

Henri Niemelä

KÄÄNTYVÄN AURINKOVOIMALAN SUUNNITTELU

KÄÄNTYVÄN AURINKOVOIMALAN SUUNNITTELU

Henri Niemelä
Opinnäytetyö
Kevät 2020
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma, koneautomaatio

Tekijä: Henri Niemelä

Opinnäytetyön nimi suomeksi: Kääntyvän aurinkovoimalan suunnittelu

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Designing of a solar tracking system

Työn ohjaajat: Kimmo Rantapirkola ja Sami Lastikka

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2020

Sivumäärä: 47 + 3 liitettä

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin kääntyvän aurinkovoimalan prototyyppi ja laadittiin tarvittavat valmistuspiirustukset. Voimalassa on 18 aurinkopaneelia, jotka tuottavat maksimissaan 5 kW:n tehon. Tavoitteena oli saada mahdollisimman optimaalinen ratkaisu rakenteesta, jonka hankintakustannukset olisivat mahdollisimman alhaiset. Työn tilaajana toimi Kalajoen Sähköasennus Oy.

Työssä käytettiin systemaattista tuotekehitysprojektimallia, johon kuuluivat esisuunnitteluvaihe ja detaljisuunnitteluvaihe. Esisuunnitteluvaiheessa etsittiin vaatimuslistaan pohjautuvia potentiaalisia ratkaisuvaihtoehtoja morfologisen kaavion avulla. Potentiaalisia ratkaisuvaihtoehtoja valikoitui kaksi. Vaihtoehtoista laadittiin 3D-mittakaavaluonnokset Solidworks-ohjelmalla ja niitä vertailtiin keskenään pisteytystaulukon avulla. Vaihtoehtoilte tehtiin myös tuottovertailu PVGIS-työkalun avulla. Yksityiskohtaisen suunnittelun vaiheeseen valittiin vaihtoehto, joka oli rakenteeltaan yksinkertainen ja tavanomainen.

Detaljisuunnitteluvaiheessa karkeaa mittakaavaluonnosta alettiin mallintamaan yksityiskohtaisesti. Keskeisenä vaiheena detaljisuunnitteluvaiheessa oli rakenteeseen vaikuttavien tuuli- ja lumikuormien määrittäminen. Kuormien määrittämisen apuna käytettiin Eurokoodi-standardeja sekä Solidworks Flow Simulation-työkalua. Lujuuslaskelmat tehtiin käsin sekä Solidworks 2018 -ohjelman Simulation-työkalun avulla. Laskelmien perusteella pystyttiin valitsemaan rakenteelle sopiva jalkapalkki. Paneeleita kannattelevaan runkoon valittiin lujuuslaskelmien perusteella sopivat materiaalit ja määritettiin rungon muoto. Lisäksi rakenteelle tehtiin värähtelyanalyyssejä ominaistaajuuden määrittämiseksi. Ominaistaajuuden korottamiseksi rakenteeseen jouduttiin lisäämään jäykisteitä, jotta rakenne ei värähtelisi tuulen aiheuttaman dynaamisen vasteen takia. Lopulta rakenteesta saatiin riittävän luja ja jäykkä kestävä kovimmat myrskypuuskat. Prototyypistä laadittiin tarvittavat valmistuspiirustukset.

Työssä huomioitiin lisäksi tuotteen osien valmistustekniikat, tuotteen kokoonpantavuus ja asennus loppuasiakkaalle. Lopuksi suunniteltiin jalusta, jonka avulla rakenne voidaan kiinnittää maahan ruuvipaaluilla.

Asiasanat: aurinkoenergia, tuotekehitys, suunnittelu, FEM, värähtelyt

ALKULAUSE

Haluan kiittää Kalajoen Sähköasennus Oy:n toimitusjohtaja Mikko Kaarlelaa laajasta ja opettavaisesta aiheesta sekä työn ohjaamisesta ohjaavaa opettajaa Kimmo Rantapirkolaa Oulun ammattikorkeakoulusta ja suunnittelija ja yrittäjä Sami Lastikkaa Cadmek Ky:stä.

Oulussa 26.5.2020

Henri Niemelä

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
2 AURINKOSÄHKÖ SUOMESSA	9
2.1 Auringon säteily	9
2.2 Auringon kiertoa seuraavat kääntöjärjestelmät	11
2.2.1 Yksiakseliset järjestelmät	11
2.2.2 Kaksiakseliset järjestelmät	13
3 TUOTEKEHITYSPROSESSI	15
3.1 Esisuunnittelu	16
3.1.1 Toimintorakenne	16
3.1.2 Ratkaisuvaihtoehdot ja mittakaavaluonnokset	16
3.2 Yksityiskohtainen suunnittelu	17
4 TYÖN ESISUUNNITTELUVAIHE	18
4.1 Esisuunnitteluvaiheen tulokset	19
4.1.1 Vaihtoehto 1	19
4.1.2 Vaihtoehto 2	22
4.2 Vaihtoehtojen vertailu ja valinta	23
4.2.1 PVGIS-tulokset	24
4.2.2 Pisteytys ja valinta	25
5 DETALJISUUNNITTELU	27
5.1 Kuormien määrittäminen	27
5.1.1 Tuulikuorma	27
5.1.2 Lumikuorma	31
5.2 Rakenteen suunnittelu	33
5.2.1 Palkin valinta ja laskelmat	33
5.2.2 Rakenteen FEM-laskenta	34
5.2.3 Värähtely	35
5.2.4 Anturointi	37

5.2.5 Kiinnitys maahan	38
5.2.6 DFM- ja DFA-periaatteiden huomioiminen suunnittelussa	40
6 YHTEENVETO	44
LÄHTEET	45
LIITTEET	
Liite 1 Puuskanopeuspaineen laskelmat	
Liite 2 Jalkapalkin laskelmat	
Liite 3 Esimerkki valmistuspiirustuksesta	

SANASTO

DFA	Design for Assembly, tuotteen kokoonpantavuus
DFM	Design for Manufacturing, tuotteen valmistettavuus
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System, aurinkosähkön maantieteellinen tietojärjestelmä

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä suunnitellaan tukirakenne ja mekanismi aurinkoa seuraavalle aurinkovoimalalle. Kääntyvä aurinkovoimala seuraa auringon kiertoa ja parantaa aurinkopaneelien tuottamaa tehoa. Työ tehdään asiakastyönä mekaniikkasuunnitteluun erikoistuneessa yrityksessä Cadmek Ky:ssä. Asiakkaana ja työn tilaajana on Kalajoen Sähköasennus Oy.

Kalajoen Sähköasennus Oy on vuonna 2016 perustettu suomalainen sähköalan yritys, jonka liiketoimintaan kuuluvat muun muassa sähköurakoinnit, sähkösuunnittelu ja kunnossapitotyöt. Näiden lisäksi toimintaan kuuluvat aurinkopaneelijärjestelmien myynti ja asennus. (1.)

Työn tavoitteena on suunnitella prototyyppi tuotteesta, jolla olisi aurinkosähkömarkkinoilla kilpailukykyinen investointihinta verrattuna muihin vastaaviin tuotteisiin. Työhön sisältyy voimalan rakenteen ja mekaniikan suunnittelu. Työn keskeisenä vaiheena ovat kuormien määrittäminen ja rakenteen lujuuslaskelmat. Valmiista prototyypistä laaditaan valmistuspiirustukset ja muut tarvittavat dokumentit. Tuotteen valmistuspiirustuksia ei julkaista tässä raportissa, koska ne on tarkoitettu ainoastaan Kalajoen Sähköasennus Oy:n käyttöön. Poikkeuksena on liitteen 3 mukainen esimerkki kokoonpanopiirustuksesta.

Työstä on rajattu pois ohjausjärjestelmän suunnittelu. Tuotteen rakenteen suunnittelussa huomioidaan kuitenkin ohjausjärjestelmän komponentit ja niiden sijoittuminen rakenteessa.

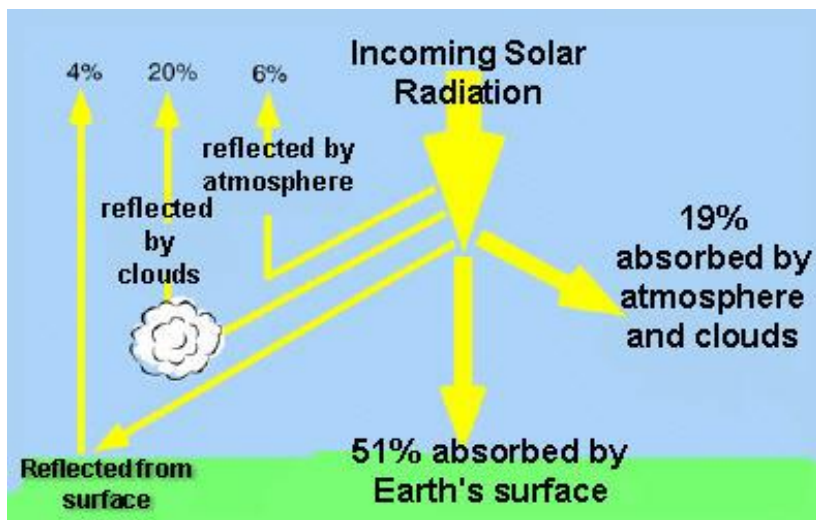
2 AURINKOSÄHKÖ SUOMESSA

Aurinkovoiman osuus Suomen sähkötuotannosta on noin alle prosentti, mutta tilanne muuttuu tulevaisuudessa. Vuodesta 2016 lähtien aurinkosähkön verkkoon kytketty kapasiteetti Suomessa on kaksinkertaistunut vuosittain. (2.)

2.1 Auringon säteily

Aurinkovakio

Maapallon ilmakehän ulkorajalle saapuvaa auringonsäteilyä määrää kutsutaan aurinkovakioksi, jonka suuruus on säteilyä vasten kohtisuoralla tasolla mitattuna keskimäärin $1\,361 - 1\,362 \text{ W/m}^2$. Säteily määrä vaihtelee hieman sen mukaan, mikä on maapallon sijainti kiertoradalla. Säteily saapuessa maapallon ilmakehään sen määrä pienenee muun muassa otsonikerroksen ja ilmassa olevien partikkeleiden takia. Suurin tekijä säteilyä heikentäjänä on kuitenkin pilvipeite (kuva 1). (3.)

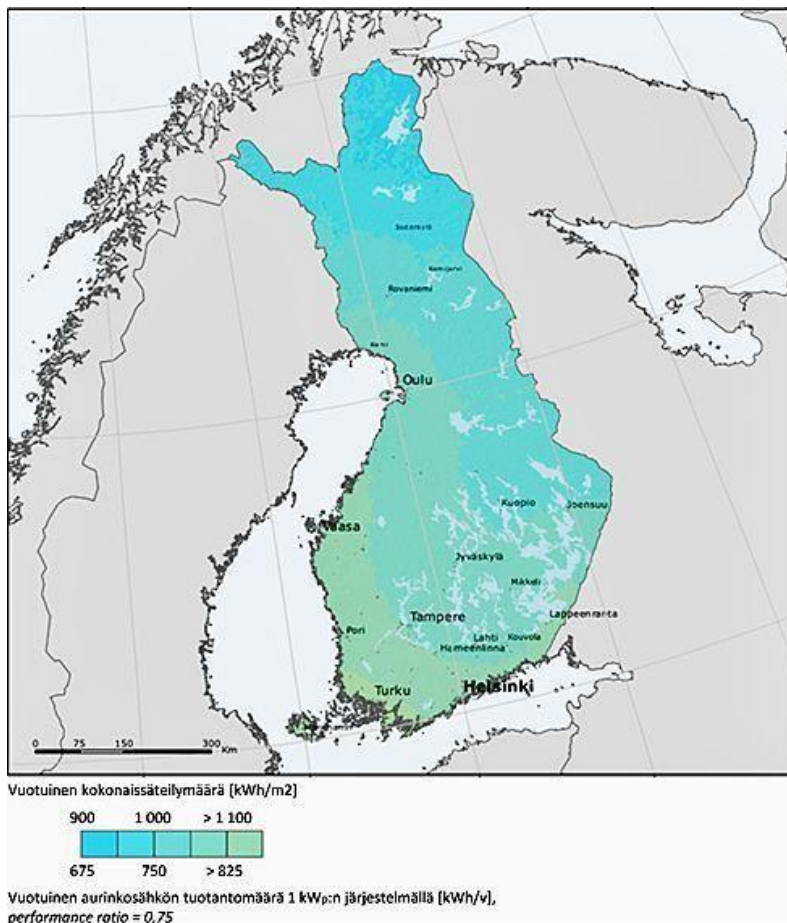


KUVA 1. Maan säteilytasapaino (4)

Säteilyn määrä Suomessa

Etelä-Suomen vuotuinen kokonaissäteilyn määrä on lähes saman suuruista kuin Pohjois-Saksassa. Suomessa säteily keskittyy kuitenkin eteläisempää Eurooppaa vahvemmin kesäkuukausille, joten tuotanto vaihtelee Suomessa enemmän vuodenaikojen mukaan. (5.)

Ilmatieteen laitos on laatinut nykyilmaston tyypillisiä sääoloja kuvaavia testivuotia energialaskelmia varten. Eteläisimmässä Suomessa kokonaissäteilyenergian määrä vaakatasolle on Ilmatieteen laitoksen testivuoden mukaan noin 980 kWh/m² vuodessa, Keski-Suomessa määrä on noin 890 kWh/m² ja Pohjois-Suomessa noin 790 kWh/m² (kuva 2). (5.)



KUVA 2. Vuotuinen auringon säteily määrä optimaalisesti suunnatulle ja kallistetuille pinnalle Suomessa (5)

Suomen etuna on matala ympäristön lämpötila, joka parantaa aurinkokennojen hyötysuhdetta. Aurinkopaneelit toimivat sitä paremmin, mitä kylmempää on (2). Aurinkopaneeleilla on niin sanottu lämpötilakerroin, joka on yleensä 0,3 - 0,4 %/°C. Tämä tarkoittaa sitä, että jokaista 25 °C:n ylittävää astetta kohden hyötysuhde putoaa 0,3 - 0,4 %. Aurinkopaneelin tumma pinta absorboi lämpöenergiaa niin, että kuumana päivänä paneelien lämpötila saattaa nousta 70 °C:seen. Tämä tarkoittaisi jo 13,5 - 18 %:n pudotusta paneelin hyötysuhteessa. (6.)

2.2 Auringon kiertoa seuraavat kääntöjärjestelmät

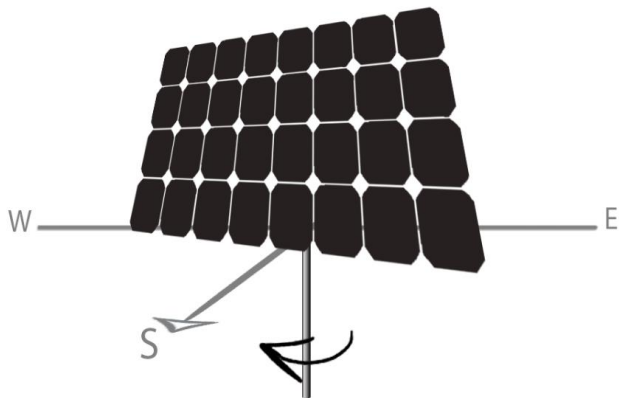
Aurinkoseurain seuraa auringon kiertoa niin, että siihen kiinnitetyt aurinkoenergiaa keräävät paneelit ovat kohdistettuna aurinkoon aina optimaalisessa kulmassa. Aurinkopaneelit hyödyntävät niihin kohdistuvaa auringon säteilyenergiaa sitä paremmin, mitä tarkemmin paneelit ovat kohtisuorassa aurinkoon (7, s. 3). Erilaisia ratkaisuja auringon seuraamiseksi on jo olemassa. Ratkaisut voidaan luokitella yksi- ja kaksiakselisiin järjestelmiin (8).

2.2.1 Yksiakseliset järjestelmät

Yksiakselinen järjestelmä seuraa aurinkoa nimensä mukaisesti kiertymällä yhden akselin ympäri. Yksiakselisen järjestelmän etuna on rakenteen yksinkertaisuus, jolloin se soveltuu hyvin pienten voimaloiden ratkaisuksi. Yksiakseliset järjestelmät voidaan luokitella vertikaaliakselisiin, horisontaaliakselisiin ja kalteva-akselisiin järjestelmiin. (8.)

Vertikaaliakselinen järjestelmä

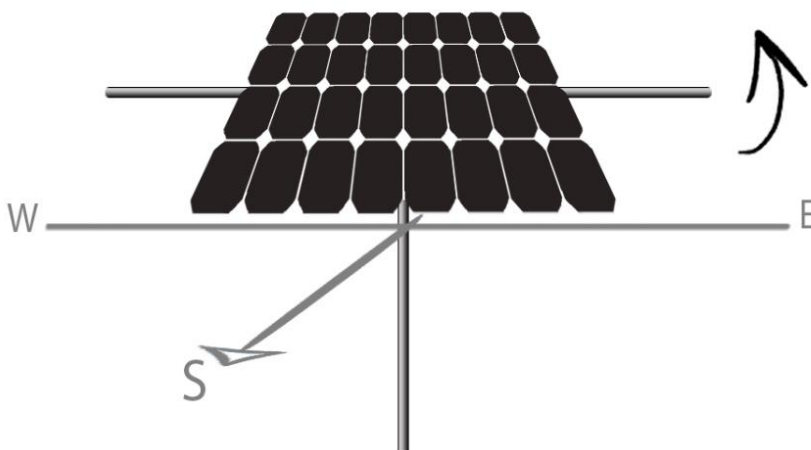
Vertikaaliakselisessä järjestelmässä (kuva 3) kiertyminen tapahtuu pystyakselin ympäri, jolloin aurinkoa seurataan atsimuuttikulman suuntaisesti. Tämän tyyppinen järjestelmä sopii paremmin alueille, joissa auringon kiertoliike on pienemässä kulmassa maahan nähden.



KUVA 3. Vertikaaliakselinen aurinkoseurain (9)

Horisontaaliakselinen järjestelmä

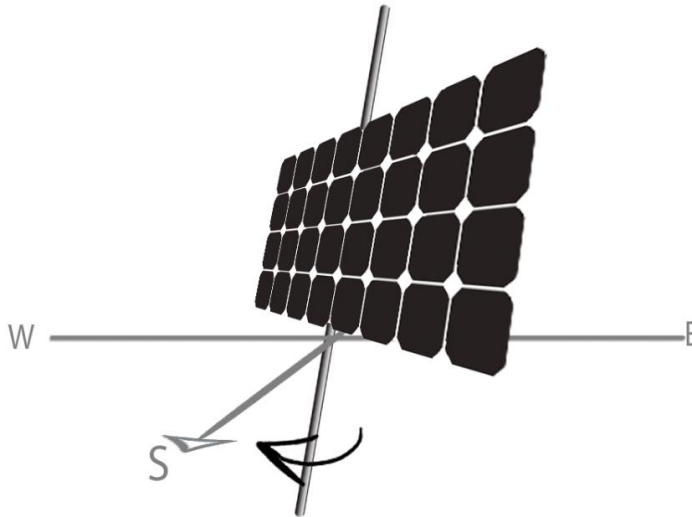
Horisontaaliakselisessa järjestelmässä (kuva 4) kiertymisakseli on vaakasuorassa, jolloin aurinkoa seurataan sen korkeuskulman suuntaisesti. Tämän tyyppinen järjestelmä toimii hyvin alueilla, joissa aurinko nousee korkeammalle.



KUVA 4. Horisontaaliakselinen aurinkoseurain (9)

Kalteva-akselinen järjestelmä

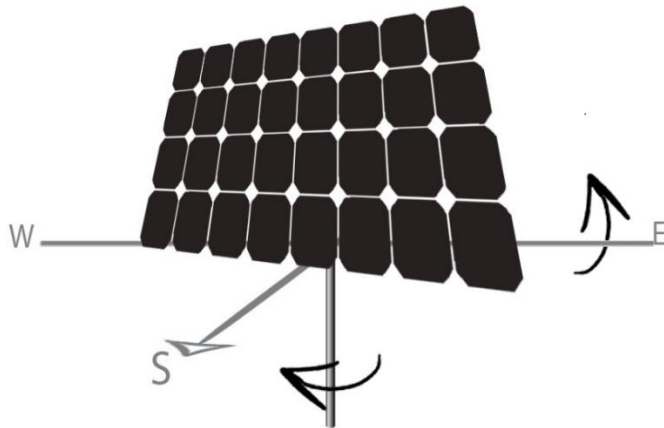
Kalteva-akselisessa järjestelmässä (kuva 5) kiertyvä akseli on kulmassa maahan nähden, ja aurinkoa seurataan sen atsimuuttikulman sekä korkeuskulman suuntaisesti. Kiertymisakselin kaltevuuskulman eri arvoilla saadaan aikaan aikaan eri leveyspiireille sopivia optimaalisia ratkaisuja.



KUVA 5. Kalteva-akselinen aurinkoseurain (9)

2.2.2 Kaksiakseliset järjestelmät

Kaksiakseliset järjestelmät (kuva 6) seuraavat aurinkoa niin, että aurinkopaneelit ovat jatkuvasti optimaalisessa kulmassa riippumatta auringon sijainnista. Kaksiakselisessa järjestelmässä on kaksi moottoria ja kaksi kierron tuottavaa mekaniismia, esimerkiksi kierukkavaihdetta. Tämän tyyppisellä järjestelmällä saadaan täysi hyöty aurinkopaneeleista, mutta haittapuolena ovat ylimääräiset kustannukset. Aurinkoseuraimissa moottorien ja mekanismien kustannukset ovat lähes poikkeuksetta suurimmat verrattuna muihin komponentteihin.

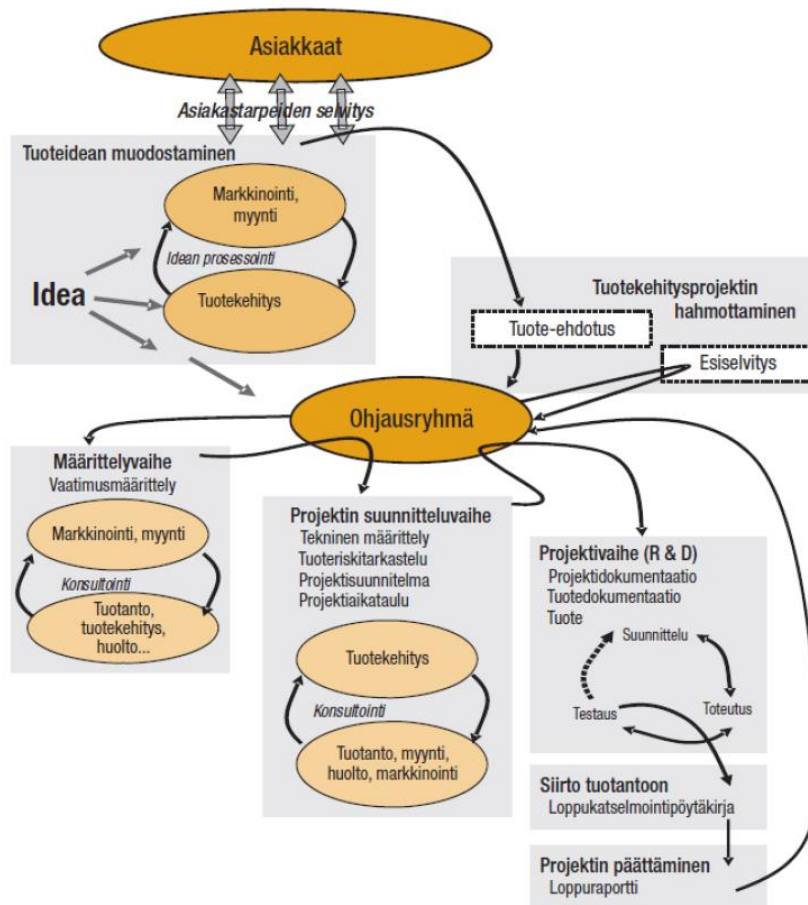


KUVA 6. Kaksiakselinen järjestelmä (9)

Kaksiakselinen järjestelmä soveltuu hyvin suuriin voimaloihin, koska moottorien ja mekanismien suhteelliset kustannukset saadaan pienemmiksi lisäämällä aurinkopaneelien lukumäärää. Kaksiakselisessa järjestelmässä voidaan myös toteuttaa myrskypuuskien varalle toiminto, jolla tuulen aiheuttamaa kuormaa pienennetään. Käytännössä toiminto asettaa aurinkopaneelit vaakatasoon, jolloin tuulikuorma pienenee merkittävästi. Tämä mahdollistaa paneelien lukumäärän suurentamisen ilman, että rakennetta tarvitsisi suunnitella erityisen lujaksi.

3 TUOTEKEHITYSPROSESSI

Yritysten menestyminen perustuu kykyyn identifioida asiakkaiden tarpeita ja odotuksia sekä valmistaa tuotteita, jotka täyttävät asiakkaiden ja käyttäjien asettamat vaatimukset. Tuotekehitysprosessissa (kuva 7) on pelkistetyksi kysymys siitä, että tunnettuja ratkaisuja yhdistellään innovatiivisella tavalla tavoitteena ominaisuuksiltaan ja hinnaltaan kilpailukykyinen tuote. (10, s. 9.)



KUVA 7. Esimerkki yrityksen innovaatioprosessikaaviosta (11)

Tuoteidea ja tuote-ehdotus perustuu joko markkinatutkimukseen, kilpailija-analyysiin tai valmistuksessa olevan oman tuotteen uudistamiseen. Kaikissa tapauksissa on oleellista tunnistaa asiakkaiden ja käyttäjien tarpeet ja prosessoida ne tuotekehitystiimissä painottaen tärkeimmät näkökohdat tuotekehityksen vaati-

muksiksi. Tuoteideoita haettaessa keskeisiä kysymyksiä ovat seuraavat: Mitä toimintoja asiakas haluaa tuotteelta? Miten tuote erottuu edukseen kilpailijoista? Mikä on tuotteen kustannusrakenne ja laatu? (10, s. 11.)

3.1 Esisuunnittelu

Esisuunnitteluvaiheessa tunnistetaan ja selkiytetään oleellinen ongelma, jota on alettu ratkomaan uuden tuotteen suunnittelulla. Ongelman selkiyttämisen lähtökohtina ovat vaatimusmäärittely ja alustava tuotespesifikaatio. Uuden tuotteen kehitystyössä kaikki ratkaisusuunnat pitää jättää avoimiksi, kunnes nähdään selvästi soveliaain ratkaisuperiaate. (10, s. 13.)

3.1.1 Toimintorakenne

Tekninen systeemi jaetaan osasysteemeihin ja yksittäisten osatoimintojen yhdistäminen tuottaa toimintorakenteen. Kokonaistoiminto on mahdollista esittää lohkokaaavion muodossa joko energia-, materiaali- tai signaalimuunnoksesta riippuvaisena, jolloin se osoittaa tulo- ja lähtö- suureiden välisen yhteyden ratkaisusta riippumattomalla tavalla. Tehtävän mutkikkuuden mukaan toimintorakenne muodostuu joko enemmän tai vähemmän kompleksiseksi. Mitä enemmän toimintoja tarvitaan, sitä enemmän osarakenteita ja osia ratkaisuun on suunniteltava. (10, s. 13.)

3.1.2 Ratkaisuvaihtoehdot ja mittakaavaluonnokset

Ratkaisuvaihtoehtojen etsiminen on periaatteessa intuitiivinen prosessi, mutta käytännössä lähtökohtana ovat ammattitiedot, kokemus ja analogiset ratkaisumallit tunnetuista teknisistä systeemeistä, luonnosta, mallikokeista ja mittauksista. (10, s. 13.)

Esisuunnitteluvaiheen tuloksena syntyy yksi tai useampi mittakaavaluonnos potentiaalisista ratkaisuvaihtoehdoista, jotka täyttävät vaatimuslistan vaatimukset. Ratkaisuvaihtoehdot pisteytetään ja arvostellaan vaatimuslistaan nojautuen. Ratkaisuvaihtoehdoista valitaan detaljisuunnitteluvaiheeseen etenevä vaihtoehto pisteytyksen mukaisesti.

Tehdyn valinnan tulisi olla lopullinen, koska myöhemmässä vaiheessa tehdyt muutokset kriittisiin kohtiin tuotteessa voivat nostaa tuotekehityksen kokonaiskustannuksia merkittävästi. Mitä aikaisemmassa vaiheessa suuret ja merkitsevät valinnat voidaan tehdä onnistuneesti, sitä suuremmat on mahdollisuudet tuotekehitysprojektin onnistumisessa ja kustannusarviossa pysymisessä. Esisuunnittelulla onkin tärkeä rooli tuotekehitysprojektin onnistumisen kannalta.

3.2 Yksityiskohtainen suunnittelu

Yksityiskohtaisen suunnittelun vaiheessa ryhdytään jatkokehittämään esisuunnitteluvaiheen tuloksena saatua ratkaisuvaihtoehtoa. Yksityiskohtaisen suunnittelun vaiheeseen sisältyvät muun muassa (11)

- valmistusmateriaalien valinta
- toiminnallisuuden huomiointi
- valmistusmenetelmien valinta/huomiointi suunnittelussa
- korroosionkestävyyden tarkastelu ja korroosioneston suunnittelu
- kokoonpanon ja asennuksen huomiointi
- tuotteen koko elinkaaren tarkastelu
- tuotedokumentaation laatiminen.

Hyvän ja tuotantotehokkaan suunnittelun edellytys on, että tunnetaan eri valmistusmenetelmien ja laitteiden mahdollisuudet ja rajoitukset. On selvitettävä mitä mahdollisuuksia tuotteen eri osien valmistuksessa on. Kustannustehokas tuote suunnitellaan niin, että sen osien valmistaminen kuluttaa mahdollisimman vähän aikaa ja resursseja raaka-aineesta valmiiksi tuotteeksi. (12, s. 4.)

4 TYÖN ESISUUNNITTELUVAIHE

Opinnäytetyö alkoi aloituspalaverilla, jossa rajattiin aihe sekä laadittiin vaatimuslista yhdessä asiakkaan kanssa. Vaatimuslistan pohjalta alettiin määrittämään osatoimintoja ja niihin ratkaisuja.

Vaatimuslista

Vaatimuslistaan tuli kohtalaisen paljon vaatimuksia, mikä toisaalta helpotti suunnittelutyötä rajaamalla aihetta entisestään. Merkittävimpiä vaatimuksia olivat muun muassa paneelien lukumäärä. 3 kW:n voimalassa on 12 paneelia ja 5,5 kW:n voimalassa 20. Yhden paneelin koko on 100 x 165 cm. Vaatimuslistaan määritettiin rakenteelle ja mekanismille myös kokonaisbudjetti, joka ei saanut ylittyä. Käyttöikäksi määritettiin 25 vuotta, joka on sama kuin aurinkopaneelien tehotakuu. Rakenteen osat tulisi ruostesuojata joko sinkkikerroksella tai maalaamalla.

Yksi merkittävä vaatimus oli myös se, että tuotteen toimitus loppuasiakkaalle tulisi olla mahdollisimman helppo ja nopea. Tuote toimitettaisiin esimerkiksi kahdessa tai kolmessa osassa asiakkaalle ja asennuksen tulisi käydä nopeasti. Asennus tulitisiin tekemään kuormausnosturilla varustetulla kuorma-autolla.

Lisäksi toiveena oli tutkia ruuvipaalujen käytön mahdollisuutta rakenteen kiinnittämiseksi maahan. Ruuvipaaluperustus olisi nopea toteuttaa eikä ylimääräisiä maaperän muokkauksia tarvitsisi tehdä.

Osatoiminnot

Laitteen päätoiminto on auringon seuraus, joka jakautuu kahteen osatoimintoon; kierto ja kallistus. Tuotteesta päätettiin kuitenkin jättää pois kallistuksen mahdollisuus jo heti alkuvaiheessa, jolloin tuotteesta tulisi yksinkertaisempi yksiaksellinen aurinkoseurain. Tähän päädyttiin, koska tavoitteena oli löytää mahdollisimman kustannustehokas ja optimaalinen ratkaisu tämän kokoluokan järjestelmälle.

Osatoimintojen ratkaisut

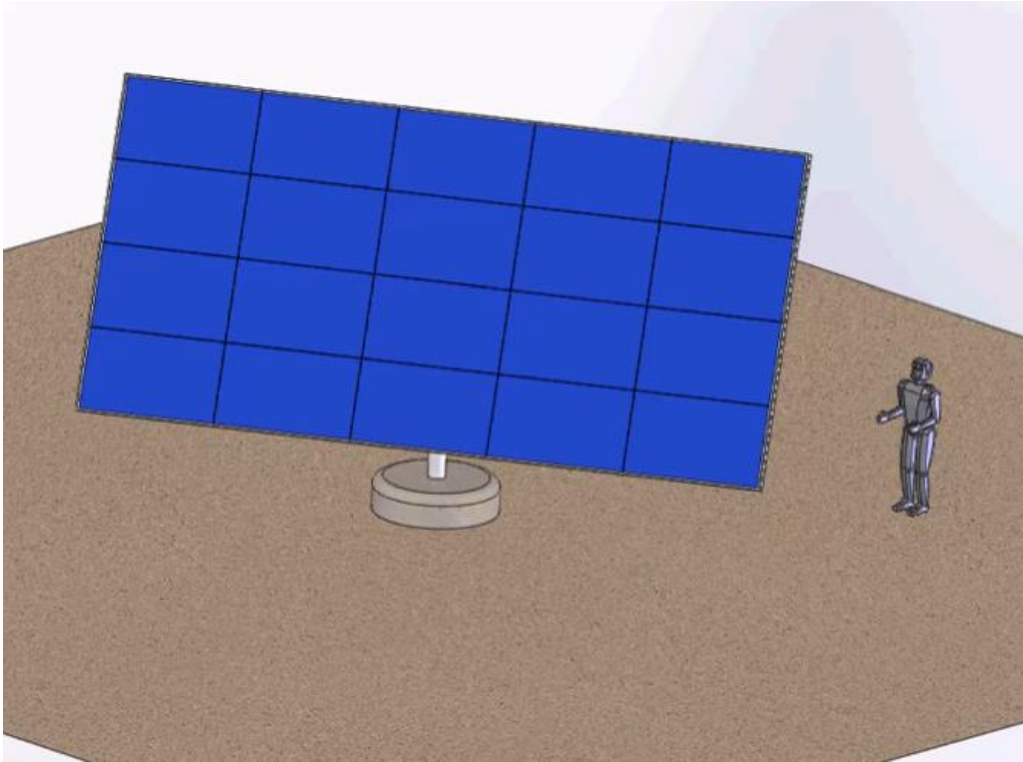
Osatoimintojen ratkaisujen etsimisen apuna käytettiin niin sanottua morfologista kaaviota, jonka tarkoituksena on helpottaa ratkaisukokonaisuuksien valintaa järjestelmällisesti. Morfologisen kaavioon lueteltiin kaikki mahdolliset ja potentiaaliset vaihtoehdot mekanismeille, voimansiirrolle ja käyttölaitteille, joilla kierto voidaan toteuttaa. Ratkaisuja yhdistelemällä saadaan aikaan kokonaisuus, jolla kierto olisi mahdollista toteuttaa. Morfologisen kaavion avulla saatuja ratkaisukokonaisuuksia tuli useampia, joista lopulta valikoitui kaksi vaihtoehtoa: kääntökätkällä ja kierukkavaihteella varustettu kokonaisuus, sekä pelkällä karamoottorilla tapahtuva kierto.

4.1 Esisuunnitteluvaiheen tulokset

Ratkaisukokonaisuuksien pohjalta laadittiin mittakaavaaluonnokset kahdesta potentiaalisesta vaihtoehdosta. Molemmille vaihtoehdoille tehtiin alustavat valinnat niiden käyttölaitteille, jotta vaihtoehtojen kustannuksia voitaisiin vertailla keskenään.

4.1.1 Vaihtoehto 1

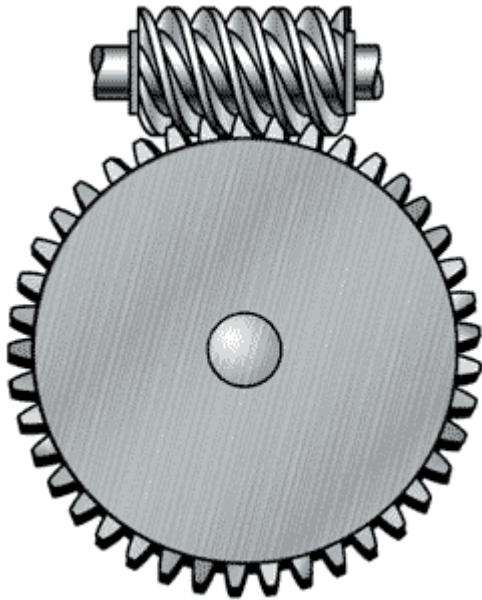
Vaihtoehto 1 (kuva 8) on vertikaaliakselinen järjestelmä, jossa kierto tapahtuu kierukkavaihteen ja sähkömoottorin avulla. Tämän vaihtoehdon etuna on rakenteen yksinkertaisuus. Haittapuolena komponenttien korkeammat kustannukset verrattuna vaihtoehtoon 2.



KUVA 8. Vaihtoehto 1:n mittakaavaaluonnos

Kierukkavaihde

Kierukkavaihde koostuu kierteitetystä akselista, jota kutsutaan joskus myös matopyöräksi, sekä hammaspyörästä (kuva 9). Ulkoinen voimanlähde pyörittää matopyörää, jolloin hammaskehä pyörii. Kierukkavaihde mahdollistaa suurien välityssuhteiden käytön, jolloin voidaan saavuttaa suuria väntömomenteja pienellä vaivalla. Toisena suurena etuna on kierukkavaihteen itsepidättyvyys. Vaihdetta ei voida pyörittää toisioakselia pyörittämällä. Huono puoli vaihteen käytössä on sen hyötysuhde. Vaihteessa liike tuotetaan käyttäen liukuvia pintoja, joka tuottaa paljon kitkaa. (13.)



KUVA 9. Kierukkavaihde (13)

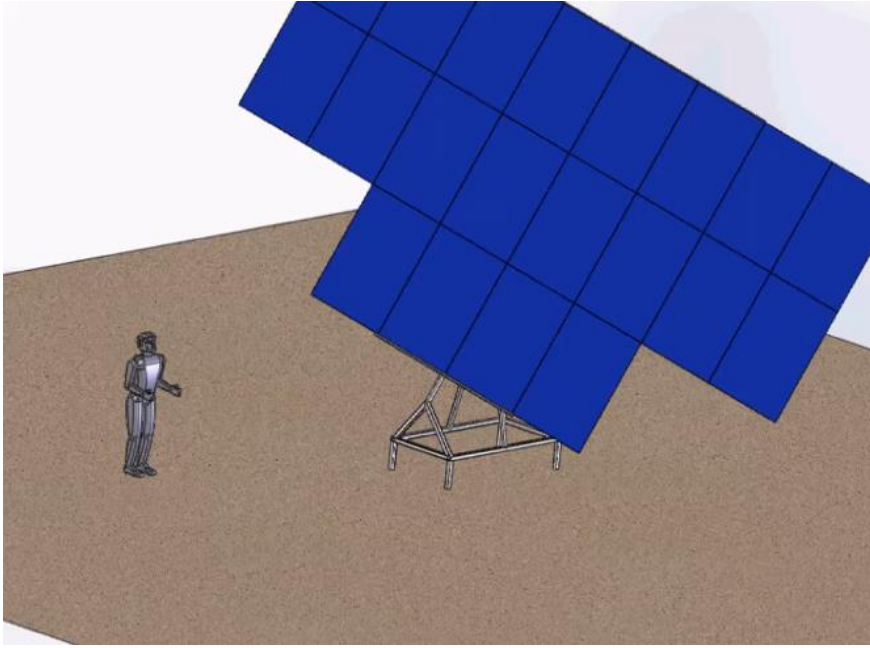
Vaihtoehdolle 1 valittiin alustavasti KMI Kinematicsin kierukkavaihde, jota on yleisesti käytetty vastaavissa ratkaisuissa (kuva 10). Se soveltuu suuren itsepidättyvyyskykynsä ansiosta hyvin kääntyvien voimaloiden ratkaisuksi, koska tuuli ei pysty pyörittämään voimalaa. Lisäksi vaihteella on suuri jäykkyys ja sen välityssuhde on suuri, jolloin kääntöliikkeestä saadaan tarvittavan hidas.



KUVA 10. Kierukkavaihde, KMI Kinematics (14)

4.1.2 Vaihtoehto 2

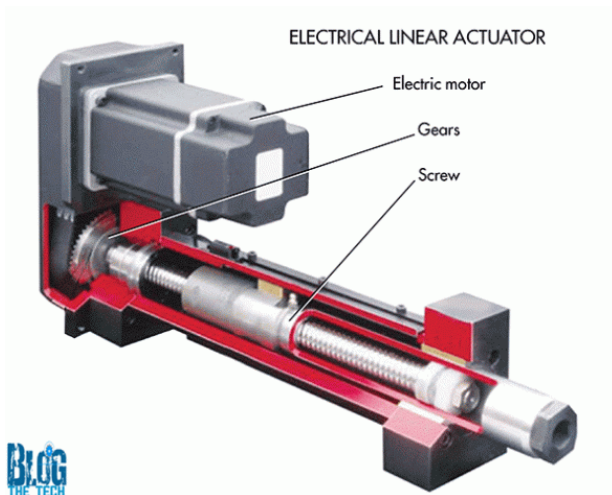
Vaihtoehto 2 (kuva 11) on kallistetun akselin järjestelmä, jossa kiertyvä akseli on asetettu johonkin kulmaan. Tässä vaihtoehdossa kierto suoritetaan karamoottorin avulla.



KUVA 11. Vaihtoehto 2:n mittakaavaaluonnos

Karamoottori

Karamoottori on lineaariliikettä tuottava toimilaite, jossa liike tuotetaan pyörittämällä liikeruuvia sähkömoottorilla (kuva 12). Liikeruuvi työntää mutteria, joka on kiinnitetty akseliin. Karamoottorin etuina ovat sen yksinkertaisuus ja edullisuus. Karamoottori voi myös olla itsepidättyvä. Itsepidättyvyys riippuu karamoottorissa käytetystä kierretyypistä.



KUVA 12. Karamoottorin rakenne (15)

Vaihtoehdolle 2 valittiin alustavasti Linakin karamoottori, jolla on suuri työntö ja vetovoima (kuva 13). Karamoottori on huoltovapaa ja sillä on korkea IP -luokitus, joten se soveltuu hyvin haastaviinkin olosuhteisiin.



KUVA 13. Karamoottori, Linak (16)

4.2 Vaihtoehtojen vertailu ja valinta

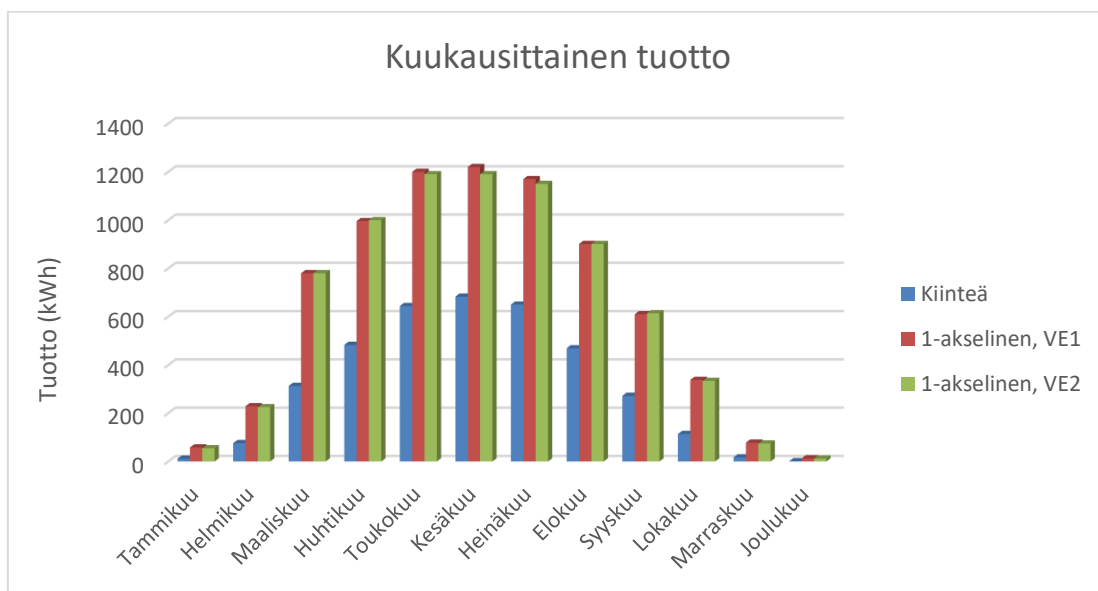
Vaihtoehtojen vertailun ja valinnan apuna käytettiin pisteytystaulukkoa sekä PVGIS-työkalun tuloksia. Valinta suoritettiin esisuunnittelun katselmoinnissa yhdessä asiakkaan kanssa.

4.2.1 PVGIS-tulokset

PVGIS (Photovoltaic geographical information system) on Euroopan Komission JRC:n (Joint Research Centre, suomeksi Yhteinen tutkimuskeskus) kehittämä ilmainen internetselaimella käytettävä työkalu (9). Työkalulla tutkittiin vaihtoehtojen 1 ja 2 potentiaalista tuottoa. Työkalun avulla saatiin myös määritettyä optimaaliset paneelien kulmat molemmille vaihtoehdoille.

Työkalulla tutkittiin 5,5 kW:n voimaloiden tuottoa Kalajoen alueella. Jokaisessa simuloinnissa käytettiin samoja paneelien tehon ja hyötysuhteen arvoja sekä samaa maantieteellistä sijaintia, jotta saadaan vertailukelpoiset tulokset. Laskelmat on tehty jokaisen vaihtoehdon kohdalla optimaalisella kulmalla, joka vaihtoehdon 1 kohdalla on 64° maahan nähden, vaihtoehdon 2 kohdalla 53° maahan nähden, ja kiinteällä asennuksella 48° maahan nähden ja suunnattuna suoraan etelään.

Kuten kuvasta 14 voidaan havaita, aurinkoa seuraavan järjestelmän tuotto on merkittävästi suurempi kuin vastaavan kiinteän järjestelmän tuotto. Vuotuinen potentiaalinen tuotto vaihtoehdon 1 kaltaisella järjestelmällä on jopa 49 % suurempi kuin vastaavan kiinteästi asennetun järjestelmän potentiaalinen tuotto.



KUVA 14. Tuottovertailu 5,5 kW:n voimaloille

Suurta eroa vaihtoehtojen 1 ja 2 välillä ei kuitenkaan ole. Vaihtoehto 1 ylittää hieman parempaan tuottoon kesä- ja heinäkuussa. Joulukuussa kaikkien tarkasteltavien järjestelmien tuotto käytännössä seisahtuu.

4.2.2 Pisteytys ja valinta

Pisteytystaulukon avulla helpotettiin vaihtoehdon valintaa. Pisteytystaulukkaan (taulukko 1) taulukoitiin vaatimuslistaan pohjautuvat arviointikriteerit. Vaihtoehtojen arviointikriteereille annettiin arvosanat. Jokaiselle kriteerille saatiin painotettu arvosana painokertoimen avulla. Painokertoimella voidaan korostaa jonkin arviointikriteerin merkitystä. Vaatimuslistan ja työn tavoitteiden mukaisesti suurin painokerroin annettiin alhaisille kustannuksille.

TAULUKKO 1. Pistearviointitaulukko

Arviointikriteeri	Painokerroin (0.0-1.0)	Ratkaisuvaihtoehdot			
		Vaihtoehto 1		Vaihtoehto 2	
		Arvosana (1...10)	Painotettu arvosana	Arvosana (1...10)	Painotettu arvosana
Alhaiset komponenttien kustannukset	0,30	6	1,8	8	2,4
Yksinkertaisuus	0,25	8	2,0	6	1,5
Helposti ja nopeasti asennettavissa	0,25	7	1,8	5	1,3
Huoltovapaus	0,10	6	0,6	8	0,8
Tuotto-odotus (PVGIS tulokset)	0,10	8	0,8	8	0,8
Yhteensä	1,0	35	6,95	35	6,75

Vaikka vaihtoehto 2 olisi komponenteiltaan edullisempi toteuttaa, sen monimutkaisempi rakenne vaikeuttaisi ja hidastaisi asennustyötä loppuasiakkaalle. Lisäksi tilaaja esitti hyvän näkökulman markkinoinnin kannalta; vaihtoehdon 1 kaltainen yksinkertainen ja tavallisempi ratkaisu vetoaa ulkonäkönsä vuoksi loppuasiakkaaseen paremmin.

Yksi vaatimuslistan vaatimuksista oli vähäinen huollon tarve. Vaihtoehdon 2 karamoottori ei käytännössä tarvitse huoltoa, sillä valmistajan mukaan tuote on huoltovapaa. Muu laakerointi todennäköisesti tarvitsisi satunnaista huoltoa. Vaihtoehdon 1 kierukkavaihte tarvitsee säännöllisen rasvauksen, joka erään ohjeistuksen mukaan tulisi tehdä noin kerran vuodessa.

Lopulta vaihtoehto 1 valittiin yhdessä tilaajan kanssa yksityiskohtaiseen suunnitteluun muutoksin. Vaihtoehdon paneelien lukumäärä muutettiin kahdeksantoista ja paneelit asetettaisiin pystytasoon. Vaihtoehto 1 valittiin, koska sen rakenne oli yksinkertainen ja tavanomainen.

5 DETALJISUUNNITTELU

Vaihtoehdolle 1 ryhdyttiin mallintamaan karkeaa mallia mittakaavaluonnokseen pohjautuen. Lisäksi aloitettiin kuormien määrittäminen standardien pohjalta.

5.1 Kuormien määrittäminen

Yksi tämän työn päätavoitteista oli saada aikaan mahdollisimman optimaalinen ja näin ollen valmistuskustannuksiltaan edullinen tuote. Jotta mahdollisimman optimaaliseen rakenteeseen voidaan päätyä, täytyy rakenteeseen vaikuttavat kuormat määrittää mahdollisimman tarkasti, jotta rakenteelle pystytään suorittamaan asianmukaiset lujuustarkastelut.

5.1.1 Tuulikuorma

Tuulen vaikutus rakenteeseen on merkitsevä rakenteen suuren pinta-alan vuoksi. Standardissa SFS-EN 1991-1-4 (Eurokoodi 1: rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat) annetaan rakennusten sekä maa- ja vesirakennuskohteiden rakennesuunnittelua varten tuulikuormien määrittämisohteita kustakin tarkasteltavasta kuormitetusta pinta-alasta. (17, s. 18).

Tuulikuormien määrittäminen standardin mukaisesti alkaa puuskanopeuspaineen määrittämisellä tietyllä korkeudella kaavan 1 mukaisesti. (17, s. 40).

$$q_p = (1 + 7 \cdot I_v) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 \quad \text{KAAVA 1}$$

q_p = puuskanopeuspaine (N/m²)

I_v = tuulenpuuskien intensiteetti tietyllä korkeudella

ρ = on ilman tiheys (kg/m³)

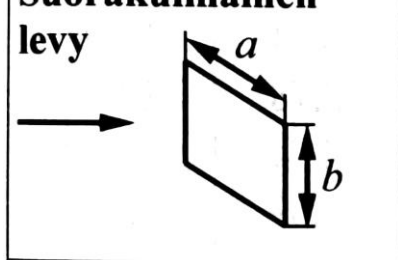
v_m = on tuulennopeuden modifioitu perusarvo tietyllä korkeudella (m/s)

Puuskanopeuspaineen suuruuteen vaikuttavat muun muassa sijainti, ympäröivät rakennukset tai kasvillisuus, korkeus maan pinnasta, maaperän rosoisuus ja maaperän korkeusvaihtelut. Puuskanopeuspaineen tarkemmat laskelmat on esitetty liitteessä 1.

Puuskanopeuspaineen avulla määritetään rakenteiden tuulikuormat erilaisten kertoimien avulla. Kertoimiin vaikuttavat rakenteen koko ja sen muodot.

Tuulikuorman määrittäminen standardin mukaisesti osoittautui tässä tapauksessa hankalaksi, koska aurinkovoimala ei ole tavanomainen kohde tuulikuormien määrittämiseksi. Standardissa määritetään pääsääntöisesti kohtisuoriin seiniin kohdistuvaa tuulikuormaa. Tuulikuorman määrittämiseen olisi periaatteessa voitu käyttää standardissa olevaa kohtaa, joka käsittää kalteviin katoksiin kohdistuvaa kuormaa (17, s. 92). Standardissa katosten kaltevuuskulma kuitenkin on minimissään 30°, kun taas voimalan kaltevuuskulma on 64°.

Standardissa on myös kohta, joka käsittää ilmoitustauluille kohdistuvan tuulikuorman laskennan (17, s. 104). Tätäkin kohtaa olisi voitu käyttää, mutta sen käyttö olisi johtanut rakenteen ylimitoitukseen. Ilmoitustaulujen tuulikuorman laskenta-kaavassa käytettiin ilmanvastuskerrointa vastaavaa kertoimen arvoa 1,8, joka on suhteellisen korkea. Esimerkiksi tekniikan taulukkokirjassa esitetään suorakulmaiselle levylle ilmanvastuskerrointa 1,1–1,4 (kuva 15), jossa kertoimen suuruus riippuu levyn leveyden ja korkeuden suhteesta (18, s. 393).

<p>Suorakulmainen levy</p> 	<p>$a : b = 1$ $a : b = 4$ $a : b = 10$ $a : b = 18$</p>	<p>1,10 1,19 1,29 1,40</p>
---	---	---

KUVA 15. Suorakulmaisen levyn ilmanvastuskerroin

Tuulen nopeus

Vaikka tuulikuorman määrittäminen standardin mukaisesti onnistunut, pystyttiin lasketun puuskanopeuspaineen avulla määrittämään mitoitusarvo tuulennopeudelle puuskissa. Dynaamisen paineen kaavasta johdettiin nopeus v ja laskettiin se kaavan 2 mukaisesti.

$$v = \sqrt{\frac{q_p}{\frac{1}{2}\rho}}$$

KAAVA 2

v = nopeus

q_p = puuskanopeuspaine

ρ = ilman tiheys

Tuulennopeudeksi puuskissa saatiin noin 31,5 m/s. Arvoa on varmasti turvallista käyttää rakenteen mitoituksessa, koska tuulenpuuskat sisämaassa ja rannikolla harvoin, jos koskaan, ovat näin korkeita.

Kuvassa 16 esitetään arvio myrskytuulien esiintymisestä Suomen merialueilla. Huomioidaan kuitenkin, että kun merellä mitataan myrskylukemia, rannikolla ja usein myös sisämaassa puhaltaa vähintään 8-12 m/s. Tuuli luokitellaan merellä myrskyksi, kun tuulen nopeuden 10 minuutin keskiarvo ylittää 21 m/s. Sisämaassa tuulee kovaa melko harvoin. Tuntureiden huipulla olevissa mastomittauksissa havaitaan talviaikana joka kuukausi myrskylukemia. (19.)

Arvio myrskytuulen esiintymisestä Suomen merialueilla (kaikki meriasemat*)		
10 minuutin keskituulen nopeus vähintään	Esiintyvyys keskimäärin	Myrskyn luokkanimitys
21 m/s	15 kertaa vuodessa	myrsky
25 m/s	3 kertaa vuodessa	kova myrsky
28 m/s	joka toinen vuosi	kova myrsky
29 m/s	kerran 4 vuodessa	ankara myrsky
30 m/s	kerran 13 vuodessa	ankara myrsky
31 m/s	kerran 20 vuodessa	ankara myrsky
32 m/s	kerran 45 vuodessa	ankara myrsky
Ei mitattu kertaakaan Suomen meriasemilla:		
33 m/s	kerran 75 vuodessa	hirmumyrsky

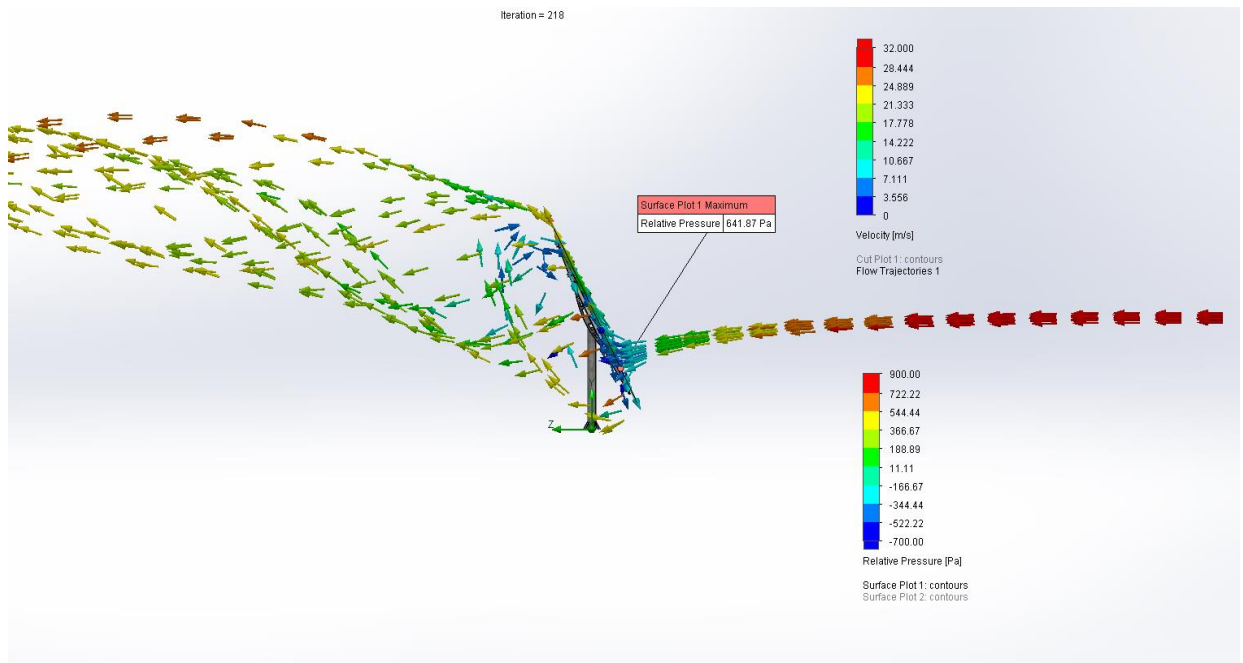
* Yhdellä mittausasemalla toistuu selvästi harvemmin.

KUVA 16. Arvio myrskytuulien esiintymisestä Suomen merialueilla (19)

Ilmanvastuskerroin

Ilmanvastuskerroin on dimensioton suure, joka kertoo jonkin kappaleen kyvystä vastustaa liikettä väliaineessa tai vastaavasti väliaineen liikettä kappaleen ohi. Esimerkiksi virtaviivaisen auton ilmanvastuskerroin on noin 0,3 - 0,4, kun taas hieman kulmikkaamman auton ilmanvastuskerroin on 0,4 - 0,55 (18, s. 393).

Ilmanvastuskertoimen avulla pystytään määrittämään kappaleeseen kohdistuva kokonaistuulikuorma, kun tiedetään kappaleen tai väliaineen nopeus ja tuulta vasten kohtisuora projektiopinta-ala. Rakenteen ilmanvastuskertoimen määrittäminen tehtiin Solidworks-ohjelman Flow Simulation-työkalulla (kuva 17). Kuvassa näkyy, kuinka tuuli käyttäytyy ohittaessa rakenteen.



KUVA 17. Ilmanvastuskertoimen määrittäminen

Kuvassa 18 nähdään simuloinnista saadut tulokset taulukoituna. Arvo C kertoo laskennallisen ilmanvastuskertoimen, joka lasketaan kaavan 3 avulla.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Force 1	[N]	26161.589	26179.620	26160.815	26228.731	100
GG Force (X) 1	[N]	0.166	0.194	0.069	0.324	100
GG Force (Y) 1	[N]	-11650.359	-11658.837	-11681.915	-11650.048	100
GG Force (Z) 1	[N]	23424.301	23440.223	23423.591	23483.594	100
C	[]	1.3399257	1.3408364	1.3398851	1.3433174	100

KUVA 18. Flow simulation -tulokset

$$C = \frac{F}{0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}$$

KAAVA 3

C = ilmanvastuskerroin

F = simuloinnista saatu voima tiettyä pinta-alaa kohden (N)

ρ = väliaineen tiheys (kg/m³)

v = väliaineen nopeus (m/s)

A = pinta-ala (m²)

Rakenteen ilmanvastuskertoimeksi saatiin noin 1,34, kun tuuli puhaltaa rakenteeseen edestäpäin. Arvoon täytyy kuitenkin suhtautua varauksella, sillä simuloimalla on vaikea saada äärimmäisen tarkkaa ilmanvastuskertoimen arvoa. Kerroin on kuitenkin turvallisella alueella suhteessa muihin vastaaviin arvoihin, joita esitettiin aiemmin kuvassa 15. Tarkempia arvoja varten joutuisi suorittamaan tarkasti kontrolloituja tuulitunnelikokeita.

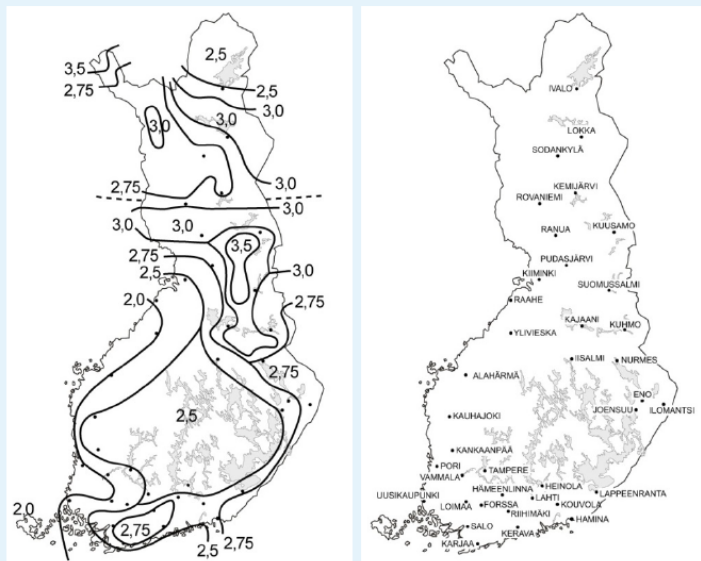
5.1.2 Lumikuorma

Standardissa SFS-EN 1991-1-3 (Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat) esitetään rakennusten sekä maa- ja vesirakennuskohteiden lumikuormat ja annetaan näitä kohteita koskevia suunnitteluohjeita. (20, s. 8.)

Lumikuorman määrittäminen tapahtuu korottamalla lumikuorman ominaisarvoa erilaisilla kertoimilla. Ominaisarvon suuruus Suomessa on esitetty standardin SFS-EN 1991-1-3 kansallisessa liitteessä (kuva 19).

Ympäristöministeriön asetus (6/16)
lumikuormia koskevista kansallisista valinnoista sovellettaessa
standardia SFS-EN 1991-1-3
2 § Maanpinnan lumikuorma

Lumikuorman standardin kohdan 4.1(1) mukaiset ominaisarvot maan pinnalla esitetään kuvassa 1. Kuvassa esitetyt arvot ovat vähimmäisarvoja.



Kuva 1. Lumen ominaisarvot maan pinnalla, yksikkö kN/m². Rakennuspaikan sijaitessa alueella, jossa arvo ei ole vakio, väliarvot interpoloidaan suoraviivaisesti suhteessa etäisyyksiin lähimmistä käyristä

KUVA 19. Lumikuormien ominaisarvot Suomessa

Aurinkovoimalan tapauksessa voidaan soveltaa standardissa esitettyä kohtaa, jossa määritetään katoille kohdistuvan lumikuorman suuruutta. Erilaisia ominaiskuormaa korottavia kertoimia ovat muun muassa katon muoto, pinnan karheus, viereisten rakennusten läheisyys, ympäröivä maasto ja paikallinen ilmasto (20, s. 26).

Kuvassa 20 on taulukoituna muotokertoimia eri katon kaltevuuskulmille. Taulukosta voidaan havaita, että mikäli katon kaltevuuskulma ylittää 60°, muotokerroin on nolla. Aurinkovoimalan tapauksessa kaltevuuskulma on 64°, joten lumikuorman vaikutukset voidaan jättää huomioimatta rakenteen suunnittelussa.

Katon kaltevuuskulma α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_1(\alpha)$	$\mu_1(0^\circ) \geq 0,8$	$\mu_1(0^\circ) \frac{(60^\circ - \alpha)}{30^\circ}$	0,0
$\mu_2(\alpha)$	0,8	$0,8 \frac{(60^\circ - \alpha)}{30^\circ}$	0,0
$\mu_3(\alpha)$	$0,8 + 0,8 \alpha/30^\circ$	1,6	–

KUVA 20. Kattojen muotokertoimet (20, s. 32)

5.2 Rakenteen suunnittelu

Kuormien määrittämisen jälkeen ryhdyttiin suunnittelemaan optimaalista rakennetta karkean mallin pohjalta. Rakenteen optimoinnin apuna käytettiin Solidworks Simulation -ohjelmaa.

5.2.1 Palkin valinta ja laskelmat

Jalan palkin valinta tehtiin liitteen 2 mukaisilla laskelmilla, kun tiedettiin kaikki vaikuttavat kokonaiskuormitukset. Staattisen lujuustarkastelun katsottiin tässä tapauksessa olevan riittävä, eikä väsymislujuustarkastelua tarvita. Kuormituskertojen lukumäärä on alhainen ja maksimikuorman aiheuttamat tuulenpuuskat ovat erittäin harvinaisia.

Jalan taivutusjännitys σ_t laskettiin kaavalla 4.

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

KAAVA 4

M = palkkia taivuttava momentti (Nm)

W_t = palkin taivutusvastus (m^3)

Jalan palkiksi valikoitui 219,1 halkaisijaltaan ja 8 mm seinämän vahvuudeltaan oleva pyöreä putkipalkki. Palkin materiaali on S355 rakenneteräs. Palkin varmuuskerroin myötölujuuteen nähden maksimikuormituksella on noin 1,8. Varmuuden katsottiin olevan riittävä, kun otetaan huomioon kuormituksessa esiintyvät varmuudet ja maksimikuormituksen aiheuttamien tuulenpuuskien esiintyvyyden harvinaisuus. Jalan juureen lisättiin lisäksi vahvikkeita jäykistämään jalkaa (kuva 21).

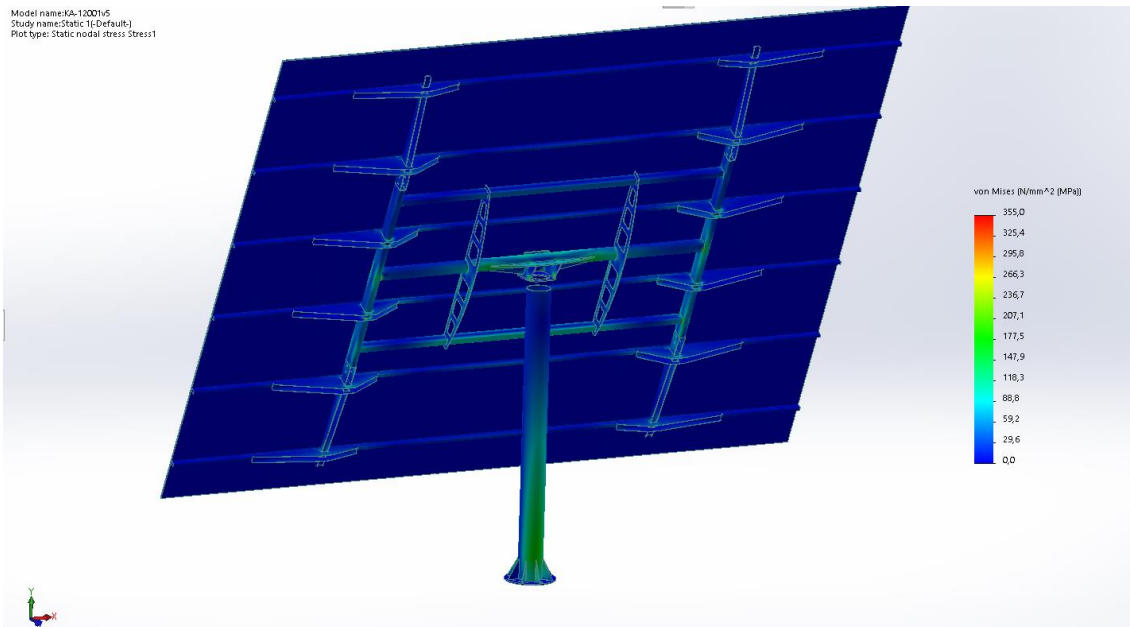


KUVA 21. Jalkapalkin vahvikkeet

Jalkapalkin hitsisaumat mitoitettiin Solidworks Simulation -työkalun avulla. Juuren hitsisauman a-mitaksi saatiin 9 mm. Muissa hitsisaumoissa a-mitta 3 - 4 mm osoittautui riittäväksi.

5.2.2 Rakenteen FEM-laskenta

Muun rakenteen optimoinnin apuna käytettiin Solidworks Simulation -työkalua. FEM-laskennan tuloksena saadaan Von Mises -vertailujännitys, jota verrataan suoraan materiaalin myötölujuuteen. Optimoidun rakenteen jännitysjaakuma nähdään kuvassa 22.



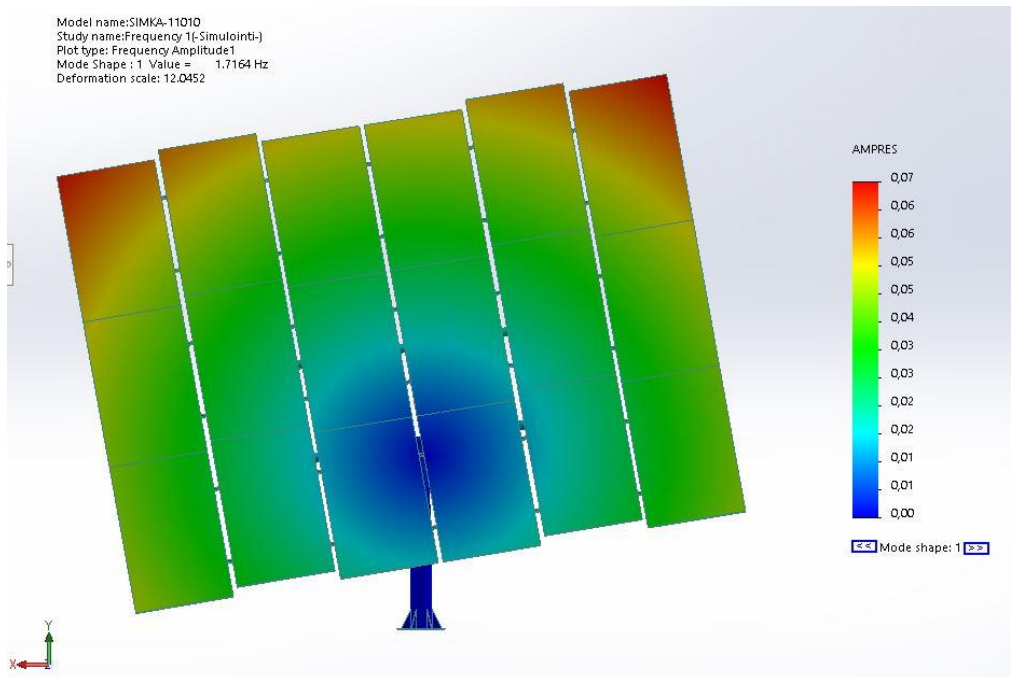
KUVA 22. Jännitys jakauma maksimikuormituksella

5.2.3 Värähtely

Tuulen turbulentsisuus eli tuulen nopeuden vaihtelut aiheuttavat rakenteille dynaamisen vasteen, joka voi aiheuttaa rakenteeseen värähtelyä. Mikäli rakenteen ominaistajuus vastaa tuulen aiheuttaman dynaamisen vasteen taajuuteen, alkaa rakenne resonoimaan, jolloin rakenteelle aiheutuu tarpeettomia kuormia ja voi ääritapauksessa johtaa rakenteen rikkoutumiseen.

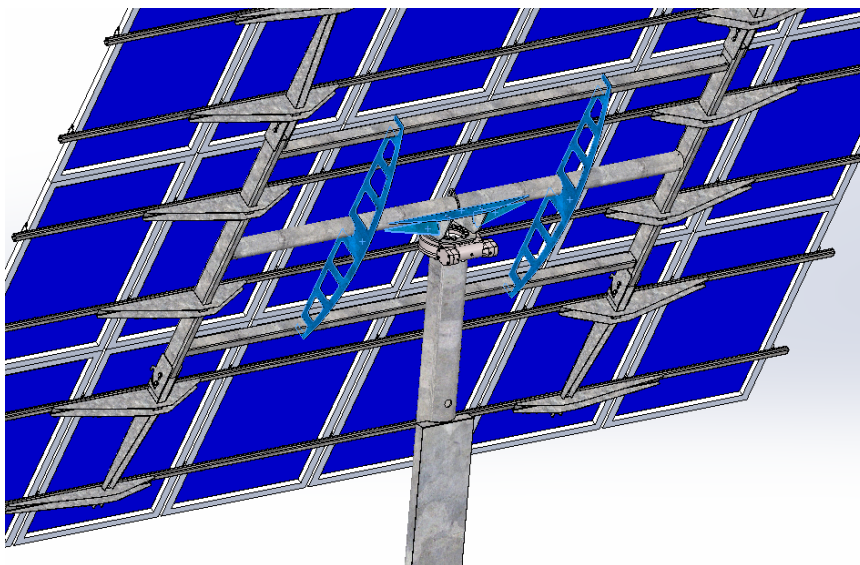
Katsottiinkin tarpeelliseksi tutkia rakenteen värähtelyalttiutta määrittämällä sen ominaistajuudet. Rakenteen ominaistajuuksien määrittämisen apuna käytettiin Solidworks Simulation -työkalua.

Alimmaksi ominaistajuudeksi saatiin noin 1,72 Hz (kuva 23). Ominaistajuuden korottaminen oli tarpeellista, jotta oltaisiin varmasti turvallisella taajuusalueella eikä olisi vaaraa rakenteen hallitsemattomalle värähtelylle. Hyväksi tavoitteeksi katsottiin noin 5 Hz.



KUVA 23. Alin ominaistaajuus

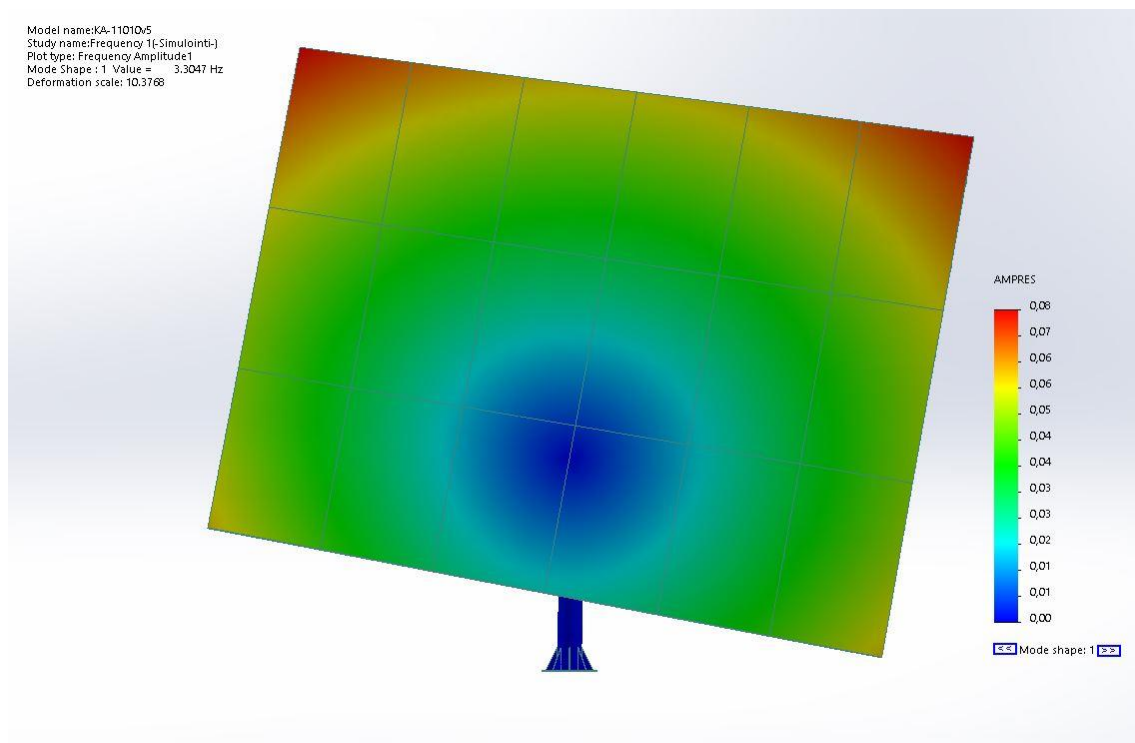
Rakennetta jäykistettiin lisäämällä muun muassa kuvan 24 mukaiset jäykisteet. Lisäksi rakenteelle tehtiin muitakin muutoksia sen jäykistämiseksi. Esimerkiksi palkkien vahvuutta lisättiin.



KUVA 24. Jäykisteet

Rakenteen jäykistämisen ansiosta alimmaksi ominaistaajuudeksi saatiin noin 3,3 Hz (kuva 25). Tämän korkeammaksi ominaistaajuutta oli todella hankala saada

ilman, että rakenteelle olisi tehty merkittäviä muutoksia. Vaikka 5 Hz:n tavoitteen ei päästy, katsottiin rakenne riittävän jäykäksi.



KUVA 25. Alin ominaistajuus jäykistetyllä rakenteella

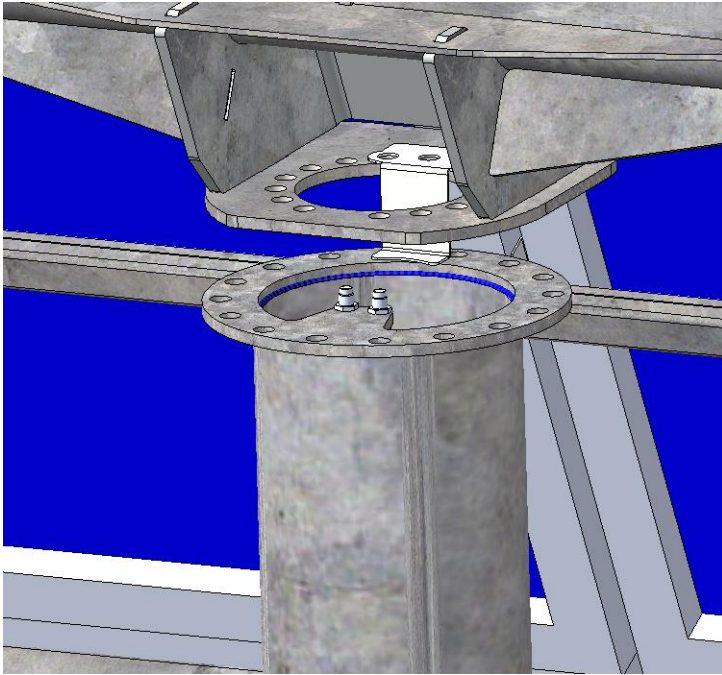
Värähtelyn osuus osoittautui merkitseväksi rakenteen suunnittelussa. Lujuuden puolesta olisi riittänyt kevyempi rakenne, mutta värähtelyn vuoksi rakennetta jouduttiin jäykistämään.

5.2.4 Anturointi

Vaikka ohjausjärjestelmän suunnittelu rajattiin pois tästä työstä, oli kuitenkin tarpeellista huomioida eri ohjausjärjestelmän osia rakenteen suunnittelussa. Anturoinnin tarkoituksena on määrittää raja-arvot voimalan käännölle, joka on hyvin tärkeää laitteen turvallisuuden vuoksi ja varmistaakseen sen, ettei osia rikkoon-tuisi laitteen saavuttaessa ääriasentonsa. Lisäksi antureita voidaan käyttää referenssipisteinä ohjausjärjestelmässä sijainnin määrittämisessä.

Anturointi toteutettiin kahden induktiivisen anturin avulla kuvan 26 mukaisesti. Antureita on kaksi, koska ääriasentoja on kaksi. Järjestelmän tulee tietää, kum-massa ääriasennossa se milloinkin on.

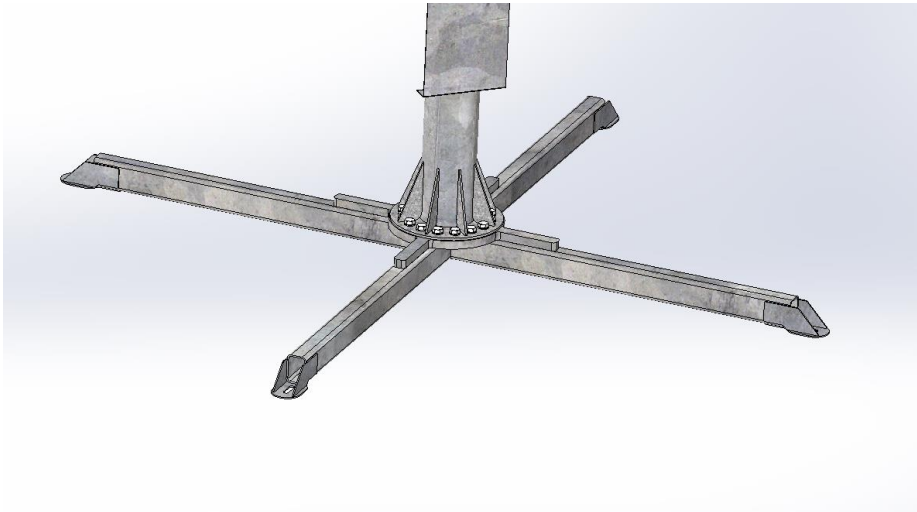
Anturit ovat kiinni jalkapalkkiin hitsatussa vaihteen kiinnityslevyssä. Kiertyvässä yläosassa on kiinni tunnistinlevy, jonka induktiiviset anturit tunnistavat levyn ja anturin kohdatessa (kuva 26).



KUVA 26. Anturoinnin toteutus

5.2.5 Kiinnitys maahan

Asiakkaan toiveena oli ruuvipaaluperustuksen käyttö. Rakenteelle suunniteltiin yksinkertainen jalusta, joka mahdollistaa ruuvipaalujen käytön (kuva 27). Jalusta tulee maahan kiinni neljällä ruuvipaalulla. Ruuvipaalujen valintaa ei suoraan voida tehdä, koska niiden valinnassa täytyy huomioida muun muassa maaperän tyyppi ja sen koostumus. Tämä vaatisi maaperän huolellisen tutkimisen kohdessa. Ruuvipaalujen valintaa varten voidaan kuitenkin määrittää niihin kohdistuvat veto- ja puristuskuormat, joiden avulla valinta voidaan tehdä kullekin maaperätyypille.



KUVA 27. Jalusta ruuvipaaluille

Veto- ja puristuskuormien laskeminen ruuvipaaluille oli yksinkertaista, kun tiedettiin jalkapalkin alaosaan kohdistuva taivutusmomentti M maksimikuormalla (kuva 28). Taivutusmomentiksi saadaan maksimikuormalla noin 60 kNm. Tukivoimat T_A ja T_B ovat samansuuruiset, mutta kohdistuvat eri suuntiin tasapainoehdon täyttymiseksi. Tukivoimat voidaan suoraan laskea kaavalla 5.

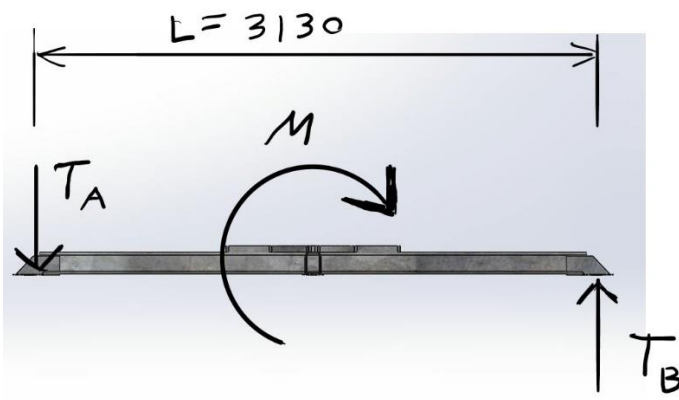
$$T_{A...B} = \frac{M}{L/2}$$

KAAVA 5

$T_{A...B}$ = tukivoima (N)

M = taivutusmomentti (Nm)

L = tukipisteiden välinen etäisyys (m)



KUVA 28. Ruuvipaalujen kuormitustapaus

Tukivoimiksi eli ruuvipaaluihin kohdistuviksi veto- ja puristuskuormiksi saatiin 38,3 kN. Arvoa on kuitenkin syytä korottaa asianmukaisilla varmuuskertoimilla, kun ruuvipaaluja valitaan kohteeseen.

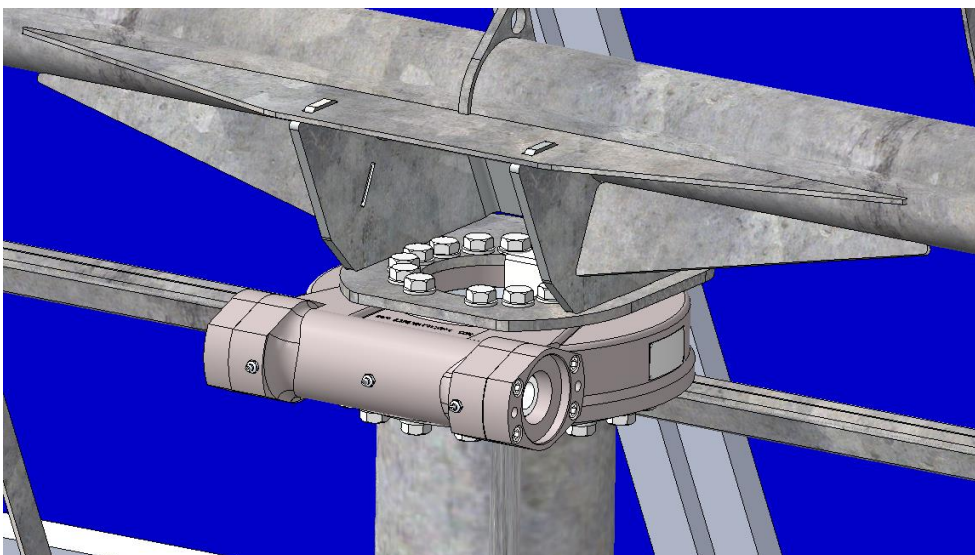
5.2.6 DFM- ja DFA-periaatteiden huomioiminen suunnittelussa

DFM, osien valmistettavuus

Rakenteen osia suunniteltaessa täytyy huomioida se, miten osat tullaan valmistamaan ja onko osia ylipäätään mahdollista valmistaa. Särmäys on kustannustehokas tapa saada aikaan monimutkaisempia rakenteita, joten särmäystä on hyödynnetty rakenteen suunnittelussa laajalti. Rakenteessa on käytetty ainoastaan laserleikkeenä ja särmäyksenä saatavia osia.

Suunniteltaessa taivutettuja teräsosia tulee suunnittelijan huomioida taivutettavan osan valmistettavuus sekä esimerkiksi aihion taivuttamaton mitta, johon vaikuttaa taivutuskohdan neutraaliakselin sijainti. Neutraaliakselin sijainti voidaan määrittää niin sanotun K-arvon avulla, joka voidaan määrittellä Solidworks-ohjelmalla suunniteltaessa.

Hitsattavia osia suunniteltaessa tulee ottaa huomioon muun muassa hitsausasennot ja materiaalien hitsattavuus. Hitsaustyötä voi helpottaa esimerkiksi lisäämällä kuvan 29 mukaisia kappaleiden asemointia helpottavia koloja.



KUVA 29. Hitsaustyötä helpottavat kolot

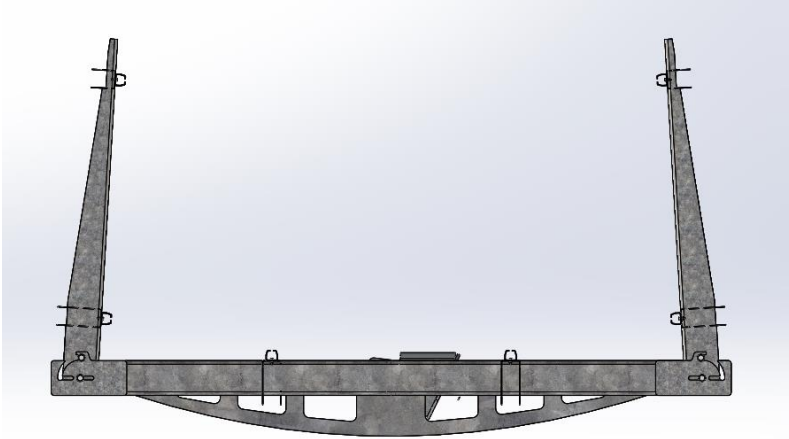
DFA, kokoonpantavuus

DFA-periaatteen huomioiminen tuli luonnostaan, sillä tilaajan vaatimuksena oli helppo kasattavuus ja helppo toimitus loppuasiakkaalle. Ajatuksena oli, että toimitus tapahtuu asiakkaalle kolmessa osassa kuvan 30 mukaisesti. Osat kokoonpannaan valmiiksi ennen toimitusta.



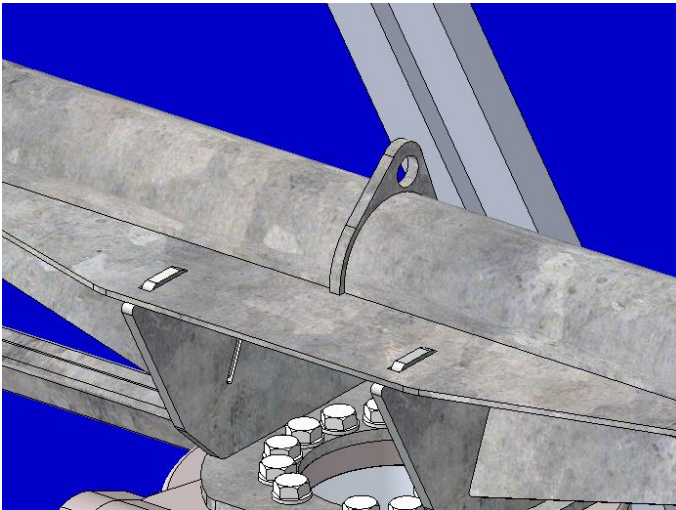
KUVA 30. Rakenteen osat

Suunnittelussa on myös huomioitu osien kuljetus. Rungon kokoonpanossa on kuljetusta varten kuljetusasento (kuva 31), jotta runko mahtuu kuorma-auton lavalle. Varret lukitaan ruuveilla kuljetuksen ajaksi. Asennuskohteessa lukitus avataan ja varret käännetään ja lukitaan oikeaan asentoon.



KUVA 31. Rungon kuljetusasento

Runkoon lisättiin myös kuvan 32 mukainen nostoa helpottava nostokorvake. Nostokorvake sijaitsee rungon kokoonpanon painopisteen yläpuolella niin, että kun runkoa nostetaan, sen kulma pysyy mahdollisimman lähellä asennuskulmaa. Tämä helpottaa rungon nostamista jalan päälle oikeassa asennossa.



KUVA 32. Rungon nostokorvake

Kuvassa 33 on esittelyä ja markkinointia varten tehty kuva. Renderöinti tehtiin Solidworks-ohjelman PhotoView 360-lisäosan avulla.



KUVA 33. Renderöity malli

6 YHTEENVETO

Tämän työn päätarkoituksena oli suunnitella optimoitu ja edullisempi kääntyvän aurinkovoimalan prototyyppi, joka päätyisi lopulta aurinkosähkömarkkinoille. Tuloksena saatiin rakenne, joka on mahdollisimman optimaalinen mutta ottaisi huomioon tarvittavat lujuudet varmuuksineen myrskytuulella ja värähtelyalttiuden

Työn laajuus yllätti suuresti. Etenkin tuulikuorman määrittämiseen kului huomattavan paljon aikaa, koska kuormat haluttiin selvittää mahdollisimman tarkasti. Todellisuudessa tuulikuorman määrittäminen ei tuo etenkään tässä tapauksessa kovin tarkkaa tulosta, koska tuulen käyttäytyminen voi olla hyvin arvaamatonta ja muuttuu ympäristötekijöiden ja sijainnin mukaan. Yksinkertaistamalla tuulikuorman laskelmat olisi voitu saada lähes yhtä pätevät ja tarkat tulokset kuin tarkemmalla ja aikaa vievällä kuormien määrittämisellä.

Rakenteelle tehtyjen lujuuslaskelmien lisäksi värähtelyn tutkiminen osoittautui hyvin tärkeäksi ja merkittäväksi vaiheeksi työssä. Värähtelyllä oli suuri merkitys valintoihin, joita tehtiin rakennetta suunniteltaessa.

Työn julkisesta raportista on rajattu työn laajuuden vuoksi joitakin kohtia pois, mutta ne on kuitenkin tehty. Näitä ovat esimerkiksi paneelien kiinnitys runkoon, jalustan lujuuslaskelmat ja sen huomioiminen rakenteen värähtelyanalyysissä, tuulen aiheuttaman väännön vaikutus koko rakenteeseen, tuulen aiheuttaman kippimomentin huomioiminen sekä jalan kiinnityselinten mitoittaminen. Työ olikin suuren laajuutensa lisäksi äärimmäisen opettavainen monella eri osa-alueella.

Työn tekeminen mahdollisti omien työskentelytapojen arvioimisen. Etenkin täydellisyyteen pyrkivästä ajattelusta ja suunnittelutavasta tulisi luopua. Aina löytyy kohtia, joita voisi vielä hioa ja parantaa. Vaikka näitä kohtia hioisi loputtomiin, siltikään ei saada täydellistä lopputulosta. Loputon hiominen vain kuluttaa loputtoman määrän aikaa. Hyvän tasapainon ajankäytön ja täydellisyyden tavoittelun välillä löytää vain kokemuksella.

LÄHTEET

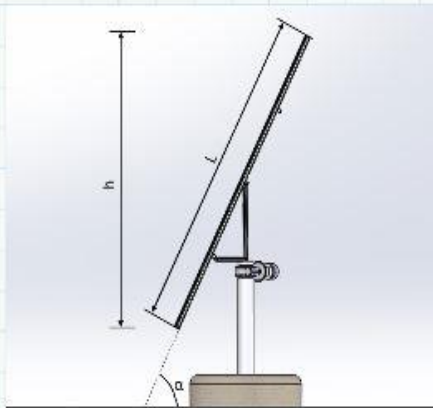
1. Kalajoen Sähköasennus Oy. Saatavissa: <http://kalajoensahkoasennus.fi/>. Hakupäivä 14.5.2020.
2. Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa. 2019. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. Saatavissa: https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa. Hakupäivä 12.4.2020.
3. Data sources and calculation methods. 2019. EU Science HUB. The European Commission's science and knowledge service. About Europa Analytics. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/docs/methods>. Hakupäivä 12.4.2020.
4. Standard 6.3. The Role of Solar Energy. 2019. SOL-pass.org. Saatavissa: <https://www.solpass.org/6-8Science/6s/standards/study6.3.htm>. Hakupäivä 28.4.2020.
5. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. 2019. Ratkaisut. Uusiutuva Energia. Motiva. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa. Hakupäivä 12.4.2020.
6. Solar Panel Temperature Coefficient: The Solar Panel Info You Need. Solar Power Beginner. Saatavissa: <http://www.solarpowerbeginner.com/solar-panel-temperature-coefficient.html>. Hakupäivä 12.4.2020.
7. Photovoltaic Efficiency: Solar Angles & Tracking Systems. 2009. Fundamentals Article. Regents of the University of Colorado. Teach Engineering. Saatavissa: https://www.teachengineering.org/content/cub_/lessons/cub_pveff/Attachments/cub_pveff_lesson01_fundamentalsarticle_v2_tedl_dwc.pdf. Hakupäivä 28.4.2020.

8. Reca-Cardena, Juan – López-Luque, Rafael 2018. Design Principles of Photovoltaic Irrigation Systems. Advances in Renewable Energies and Power Technologies. 3.1.2 Solar Tracking Systems. ScienceDirect. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solar-tracking-system>. Hakupäivä 28.4.2020.
9. Interactive tools. 2019. PVGIS. EU Science Hub. The European Commission's science and knowledge service. Joint Research Centre (JRC). Saatavissa: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP. Hakupäivä 14.5.2020.
10. Björg, T. – Hautala, P. – Huhtala, K.- Kivioja, S. – Kleimola, M. – Lavi, M. – Martikka, H, - Miettinen, J. – Ranta, A. – Rinkinen, J. – Salonen, P. 2014. Koneenosien suunnittelu. 6. painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
11. Kontio, Esa 2018. T318208-3004 Tuotekehitys 8 op. Opintojakson luennot syksyllä 2018. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
12. Piironen, Tomi 2013. Teräsrakenteiden suunnitteluohjeita parempaan valmistettavuuteen. Onnistuneen suunnittelun periaatteita – DFMA. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://portal.savonia.fi/amk/fi/tutkimus-ja-kehittaminen/julkaisutoiminta/julkaisut-aloittain/tekniikka-ja-liikenne/terasrakenteiden>. Hakupäivä 29.4.2020.
13. Black, Aaron. Worm gears explained. Machinery Lubrication. Saatavissa: <https://www.machinerylubrication.com/Read/1080/worm-gears>. Hakupäivä 29.4.2020.
14. Single Axis Slew Drives. 2019. KMI Kinematics. Saatavissa: <https://www.kinematicsmfg.com/single-axis-slew-drives/>. Hakupäivä 14.5.2020.

15. John, Daniel. How linear actuators work. Blog the Tech. Saatavissa: <https://blogthetech.com/how-linear-actuators-work/>. Hakupäivä 14.5.2020.
16. Lineaariset karamoottorit. 2020. Linak. Saatavissa: <https://www.linak.fi/tuotteet/karamoottorit/>. Hakupäivä 14.5.2020.
17. SFS-EN 1991-1-4. 2011. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
18. Valtanen, Esko 2016. Tekniikan taulukkokirja. 21. painos. Mikkeli. Genesis-kirjat Oy.
19. Tuulitilastot. 2020. Ilmasto. Merialueiden tuulipäivät. Ilmatieteen laitos. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuulitilastot>. Hakupäivä 29.4.2020.
20. SFS-EN 1991-1-3. 2015. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

Tuulikuormat

Projekti kääntyvä aurinkovoimala
Henri Niemelä



Kaikki suositusarvot on otettu standardista SFS-EN 1991-1-4 tai sen kansallisesta liitteestä

$$L := 1650 \cdot 3 \text{ mm}$$

Paneelien korkeus

$$\alpha := 64^\circ$$

Kulma maahan nähden

$$b := 1000 \cdot 6 \text{ mm}$$

Paneelien leveys

$$h := \sin(\alpha) \cdot L = 4449 \text{ mm}$$

Kohtisuoran projektion korkeus

$$A_{ref} := h \cdot b = 26.694 \cdot \text{m}^2$$

Kohtisuoran projektion pinta-ala

$$\rho := 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ilmantiheyden suositeltu arvo

$$v_{b0} := 21 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tuulennopeuden modifioimaton perusarvo

$$c_{dir} := 1.0$$

Tuulen suuntakerroin. Suositusarvo

$$c_{season} := 1.0$$

Vuodenaikakerroin. Suositusarvo

$$v_b := c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b0} = 21 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tuulennopeuden perusarvo

Tuulennopeuden modifioitu perusarvo korkeudella z

$$c_{0z} := 1.0$$

Pinnanmuotokerroin

$$z_0 := 0.01 \text{ m}$$

Rosoisuusmitta, maastoluokka I

$$z_{0II} := 0.05 \text{ m}$$

Rosoisuusmitan vertailuarvo, maastoluokka II

$$z := 4 \text{ m}$$

Korkeus

$$k_r := 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0II}} \right)^{0.07} = 0.17$$

Maastokerroin

$$c_{rz} := k_r \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) = 1.017$$

Rosoisuukerroin

$$v_m := c_{rz} \cdot c_{0z} \cdot v_b = 21.359 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tuulennopeuden modifioitu perusarvo

Taulukko 4.1 Maastoluokat ja maastoparametrit

Maastoluokka	z_0 m	z_{min} m
0 Avomeri tai merelle avoin rannikko	0,003	1
I Järvet tai tasanko, jolla on enintään vähäistä kasvillisuutta eikä tuuliesteitä	0,01	1
II Alue, jolla on matalaa heinää tai siihen verrattavaa kasvillisuutta ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus	0,05	2
III Alueet, joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä tuuliesteitä, joiden keskinäinen etäisyys on enintään 20 kertaa esteen korkeus (kuten kylät, esikaupunkialueet, pysyvä metsä)	0,3	5
IV Alueet, joiden pinta-alasta vähintään 15 % on rakennusten peitossa ja niiden keskimääräinen korkeus ylittää 15 m	1,0	10

HUOM. Liitekohdassa A.1 on kuvia maastoluokista.

(2) Tiettyä tuulen suuntaa vastaava laskelmissa käytettävä maaston rosoisuus riippuu maanpinnan rosoisuudesta ja etäisyydestä, jolla maaston rosoisuus on yhtenäinen tuulen suunnan ympärille levittyvässä sektorissa. Pienet alueet (alle 10 % tarkasteltavasta pinta-alasta), joilla rosoisuus on poikkeava, voidaan jättää huomiotta. Ks. kuvaa 4.1.

Tuulenpuuskien intensiteetti

$$k_I := 1.0$$

Pyörteisyysskerroin, suositeltu arvo 1.0

$$\sigma_v := k_r \cdot v_b \cdot k_I = 3.565 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Turbulenssin keskihajonta

$$I_v := \frac{\sigma_v}{v_m} = 0.167$$

Tuulenpuuskien intensiteetti

Puuskanopeuspaine korkeudella z

$$q_p := (1 + 7 \cdot I_v) \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v_m^2 = 618.246 \text{ Pa}$$

$$q_p = 0.618 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$F_z := 23.3 \text{ kN}$$

$$D := 219.1 \text{ mm}$$

$$t := 8 \text{ mm}$$

$$d := D - 2 \cdot t = 203.1 \text{ mm}$$

$$L := 2.5 \text{ m}$$

$$A := \pi \cdot D \cdot t = 55.066 \text{ cm}^2$$

$$R_e := 355 \text{ MPa}$$

Tuulen aiheuttama kuormitus

Putkipalkin ulkohalkaisija

Seinämän vahvuus

Sisähalkaisija

Palkin pituus

Palkin poikkipinta-ala

Materiaalin myötölujuus

Taivutusmomentti juuressa:

$$M := F_z \cdot L = 58.25 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Palkin taivutusvastus:

$$W_t := \frac{\pi \cdot D^2 \cdot t}{4} = 301.623 \text{ cm}^3$$

Neliömomentti:

$$I := \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} = (2.96 \cdot 10^{-5}) \text{ m}^4$$

+

Taivutusjännitys

$$\sigma_t := \frac{M}{W_t} = 193.122 \text{ MPa}$$

Jalan taipuma

$$f := \frac{F_z \cdot L^3}{3 \cdot 210 \text{ GPa} \cdot I} = 19.525 \text{ mm}$$

Varmuus myötölujuuteen

$$\eta := \frac{R_e}{\sigma_t} = 1.838$$

