



Tuulivoimakohteen välkevarjostusmallinnus: Punkalaidun - Arkkuisuo

Erkki Heikkola
Numerola Oy

Projektiraportin nimi ja kirjoittajat

Tuulivoimakohteen välkevarjostusmallinnus: Punkalaidun - Arkkuinsuo

Erkki Heikkola, Numerola Oy

Vastaanottaja

Punkalaitumen Tuulivoima Oy
Erkka Saario

Aineiston käyttöoikeus

Sisältää Maanmittauslaitoksen avoimen tietoaineiston lisenssin (09/2016)
(<http://www.maanmittauslaitos.fi/avoimen-tietoaineiston-cc-40-lisenssi>) alaista materiaalia.

Tiivistelmä

Raportti sisältää arvion Punkalaitumen kunnassa Arkkuinsuon alueelle suunniteltujen kolmen tuulivoimalan aiheuttamista välkevarjostusvaikutuksista. Arviointi tehdään laskennallisten menetelmien avulla. Tuulivoimaloiden aiheuttaman välkevaikutuksen laskennassa käytetään turbiinien napakorkeutta 160 m ja roottorin halkaisijaa 141 m. Tulosten arvioinnissa käytetään ympäristöhallinnon esittämiä ohjearvoja tuulivoimarakentamisen suunnitteluun.

Paikka ja aika

Jyväskylä 27.9.2016

Projektin vastuuhenkilöt

Erkki Heikkola

Asiatarkastus

Pasi Tarvainen

Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Välkevarjostusmallinnus.....	5
2.1	Välkevarjostus	5
2.2	Ohjeavot.....	5
2.3	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto.....	5
2.4	Alueiden reseptoripisteet.....	7
2.5	Välkevarjostusvaikutus	8
3	Johtopäätökset	11
4	Välkevarjostuksen laskentamenetelmä.....	12

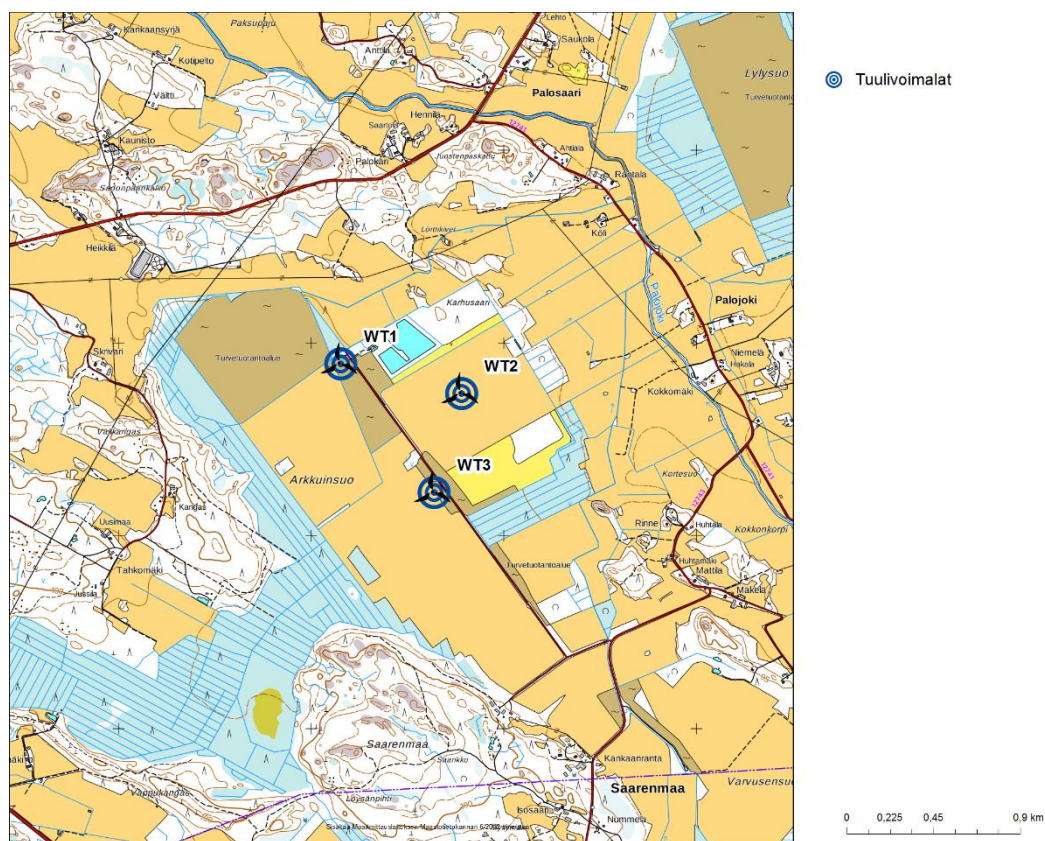
1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Punkalaitumen kunnan alueelle suunnitellun Arkkuisuon tuulivoimapuiston välkevarjostusvaikutuksia. Tuulipuiston kehityksestä vastaa Punkalaitumen Tuulivoima Oy.

Arkkuisuon kohteeseen on suunniteltu sijoitettavaksi 3 turbiinia. Sijoitettavien turbiinien paikat on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 1). Analyysit on suoritettu turbiinityypillä, jonka napakorkeus on 160 m ja roottorin halkaisija 141 m (Enercon E-141).

Taulukko 1: Arkkuisuon turbiinien sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiini	E	N	korkeus [m]
T1	287157	6774893	89.9
T2	287782	6774739	86.9
T3	287639	6774226	88.1



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Arkkuisuon tuulivoimakohdeessa.

2 Välkevarjostusmallinnus

2.1 Välkevarjostus

Välkevarjostuksella tarkoitetaan tilannetta, jossa Aurinko paistaa tarkastelupisteeseen pyörivän roottorin läpi. Tällöin katselija havaitsee välkkyvän varjon, joka voi ulottua pisimmillään 1-3 km etäisyydelle voimalasta. Välkevaikutuksen etäisyyteen ja kestoon vaikuttavat tuulivoimalan korkeus ja roottorin halkaisija, vuoden- ja vuorokaudenaika, maaston muodot sekä näkyvyyttä rajoittavat tekijät kuten kasvillisuus ja pilvisuus. Välkevaikutuksen kohdistuminen tiettyyn kohteeseen voidaan ajoittaa tarkasti, joten vaikutusta voidaan rajoittaa ohjelmoimalla tuulivoimala pysähtymään välkkeen kannalta kriittisiksi ajoiksi.

Suomen sijainnin vuoksi yksittäisen tuulivoimalan välkevaikutus kohdistuu valtaosin voimalan pohjoispuolelle (päiväaika) sekä lounais- ja kaakkoispuolille (aamu- ja iltajat). Voimala aiheuttaa välkevaikutusta eteläpuolelleen vain, jos voimala sijaitsee joko Kravun kääntöpiirin eteläpuolella tai pohjoisen napapiirin pohjoispuolella.

Välkevarjostuksen laskenta voi perustua joko ns. astronomisen maksimivälkkeen (worst case) tai todennäköisen tilanteen (real case) mallinnukseen. Astronomisen maksimivälkkeen laskennassa oletetaan, että päiväaikaan Aurinko paistaa jatkuvasti, tuulivoimalan roottori pyörii jatkuvasti, ja roottori on aina kohtisuorassa Aurinkoa kohden. Todennäköisen tilanteen mallinnuksessa otetaan huomioon paikallinen tilastollinen aineisto auringonpaisteen määrästä ja ajoittumisesta sekä tuulen suuntien ja nopeuksien jakautumisesta. Tämän selvityksen väkelaskenta perustuu todennäköisen tilanteen mallinnukseen.

2.2 Ohjearvot

Tuulivoimaloiden varjostusvaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja. Ympäristöministeriön ohjeissa tuulivoimapuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia välkemäärien osalta¹. Tanskassa on määritetty vuotuisen väketuntimäärän suositusarvoksi 10 h. Ruotsissa vastaava suositusarvo on 8 h ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä². Näiden ohjearvojen käyttö edellyttää todennäköisen väketilanteen laskentaa. Mikäli väketuntien arvioinnissa käytetään laskennallista maksimivälkemäärää, voidaan välkevaikutusten ohjearvona käyttää Saksassa käytettävää 30 h raja-arvoa. Tässä raportissa analysoitu välkevaikutus vastaa todellista odotettavissa olevaa väketuntimäärää, ja näin ollen suunnitteluohjearvona voidaan käyttää esimerkiksi yllä mainittuja Tanskan ja Ruotsin ohjearvoja 8 tai 10 tuntia.

2.3 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama vilkkuva varjostus (shadow flicker) arvioitiin geometrisella laskentamallilla, joka huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoima-alueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuuliturbiinien dimensiot (Numerola Oy:n implementoitu malli). Laskennan tuloksena saadaan tietoa siitä, kuinka monta tuntia vuodessa alueen eri kohteet ovat vilkkuvan varjostuksen alaisena. Tulosta

¹ *Tuulivoimarakentamisen suunnittelu*, Ympäristöhallinnon ohjeita 4 | 2012, Ympäristöministeriö, 2012.

² *Boverket: Vindkraftshandboken*, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.

havainnollistetaan tasa-arvokäyrästöllä, jonka perusteella voidaan arvioida varjostusvaikutusta tarkastelualueella. Laskennassa on käytetty turbiinien napakorkeutta 160 m ja roottorin halkaisijaa 141 m.

Tarkastelualueiden maanpinnan korkeuserot on saatu Maanmittauslaitoksen aineistosta *Korkeusmalli 10 m*. Korkeusdatan resoluutio on 10 m ja tarkkuus 1,4 m. Laskennassa huomioitiin korkeuserot siten, että jos auringon, turbiinin ja tarkastelupisteen kautta kulkeva jana leikkaa maanpintaa, niin varjostusta ei esiinny. Varjostusvaikutus laskettiin 1,5 m korkeudelle maanpinnasta. Auringonpaistekulman rajana horisontista käytettiin kolmea astetta, jonka alle menevää säteilyä ei oteta huomioon varjostuksessa. Alueen loma- ja asuinrakennusten sijainnit on saatu Maanmittauslaitoksen maastotietokannasta.

Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevarjostus huomioidaan mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen turbiinin aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

Yksinkertaistetussa välkelaskennassa maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä turbiinin lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä turbiinin napaa, ja lapa kapenee huomattavasti kärkeä kohti liikuttaessa. Tällä perusteella lavan tyven välkevaikutus ulottuu huomattavasti pidemmälle kuin lavan kärjen, mikäli arviointiperusteena käytetään Auringon peittoastetta. Tässä selvityksessä välkelaskennassa ei ole käytetty tavanomaista maksimietäisyyttä, vaan on huomioitu turbiinin muuttuva lapaprofiili ja sen vaikutus Auringon peittoasteeseen. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 4.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat turbiinien käyttöaste, puusto ja paikallinen säätötila (pilvisuus ja tuulisuus). Jos esimerkiksi tuulen suunta on kohtisuorassa auringon ja tarkastelupisteen välistä linjaa vasten, ei varjostusvaikutusta esiinny. Varjostuksen laskennassa turbiinin orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Laskenta on suoritettu kuudella eri turbiinien orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat välkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua välketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammassa tuulissa turbiinit ovat paikallaan, jolloin roottorin pyörimisestä aiheutuvaa valon välkkymistä ei esiinny. Suomen tuuliatlaksen tuulisuusestimaatti on otettu tuulivoima-alueen keskeltä korkeudelta 150 m, ja sen perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet turbiinin käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 2).

Taulukko 2: Suuntasektorikohtaiset osuudet yli 3 m/s tuulenopeuksille Suomen tuuliatlaksen perusteella.

Suuntasektori	0/180	30/210	60/240	90/270	120/300	150/330
Yli 3 m/s osuus	0.173	0.213	0.162	0.141	0.137	0.146

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Jokioisten sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien

määrästä³. Jokioisten sääaseman kuukausittaiset auringonpaistetunnit on koottu taulukkoon (Taulukko 3). Suuntakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Jokioisten sääasemalla.

Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0.177
Helmikuu	0.284
Maaliskuu	0.356
Huhtikuu	0.437
Toukokuu	0.484
Kesäkuu	0.444
Heinäkuu	0.469
Elokuu	0.426
Syyskuu	0.355
Lokakuu	0.250
Marraskuu	0.150
Joulukuu	0.143

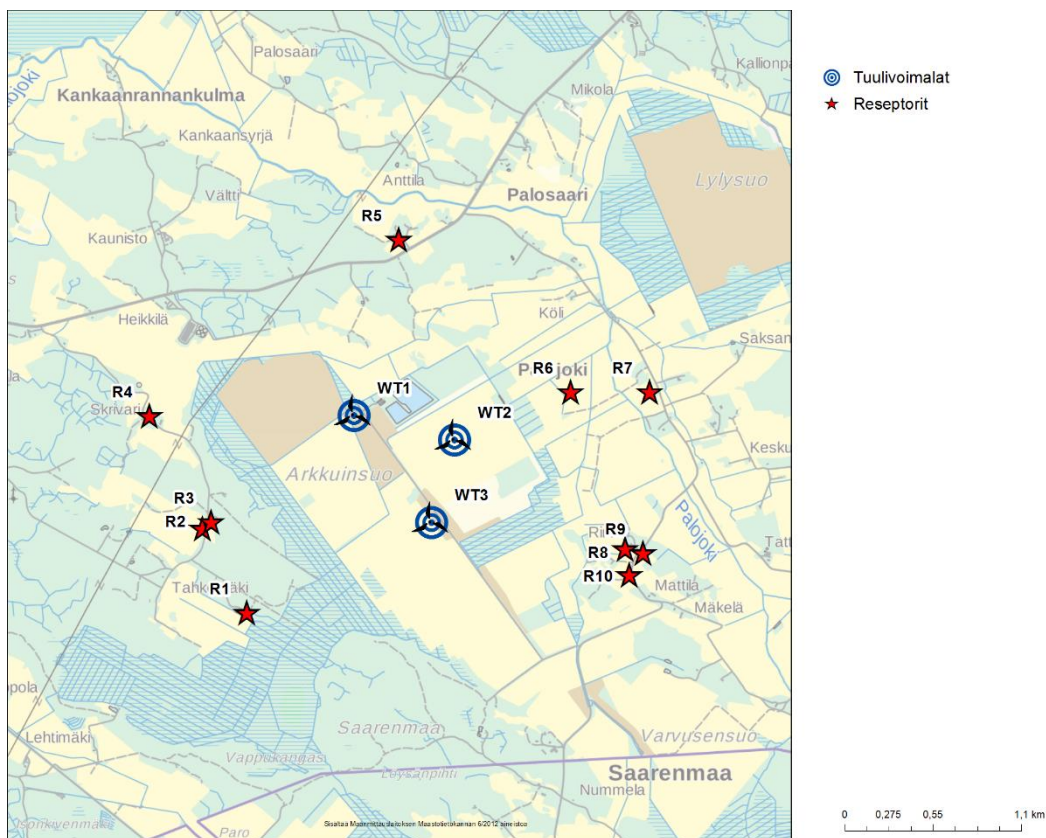
2.4 Alueiden reseptoripisteet

Tuulivoimapuistojen ympäristöstä on määritelty 10 vertailukiinteistöä, joiden kohdilla välkevaikutuksen kesto ja ajoittumista tarkastellaan tarkemmin. Näitä kohteita kutsutaan reseptoripisteiksi. Pisteiden koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 4), ja niiden sijainti suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty kuvassa (Kuva 2).

Taulukko 4: Vertailukiinteistöjen koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptoripiste	E	N
R01	286485	6773668
R02	286209	6774190
R03	286263	6774232
R04	285879	6774893
R05	287433	6775991
R06	288501	6775631
R07	288994	6775043
R08	288843	6774064
R09	288952	6774040
R10	288867	6773902

³ P. Pirinen et al.: *Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010*, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.

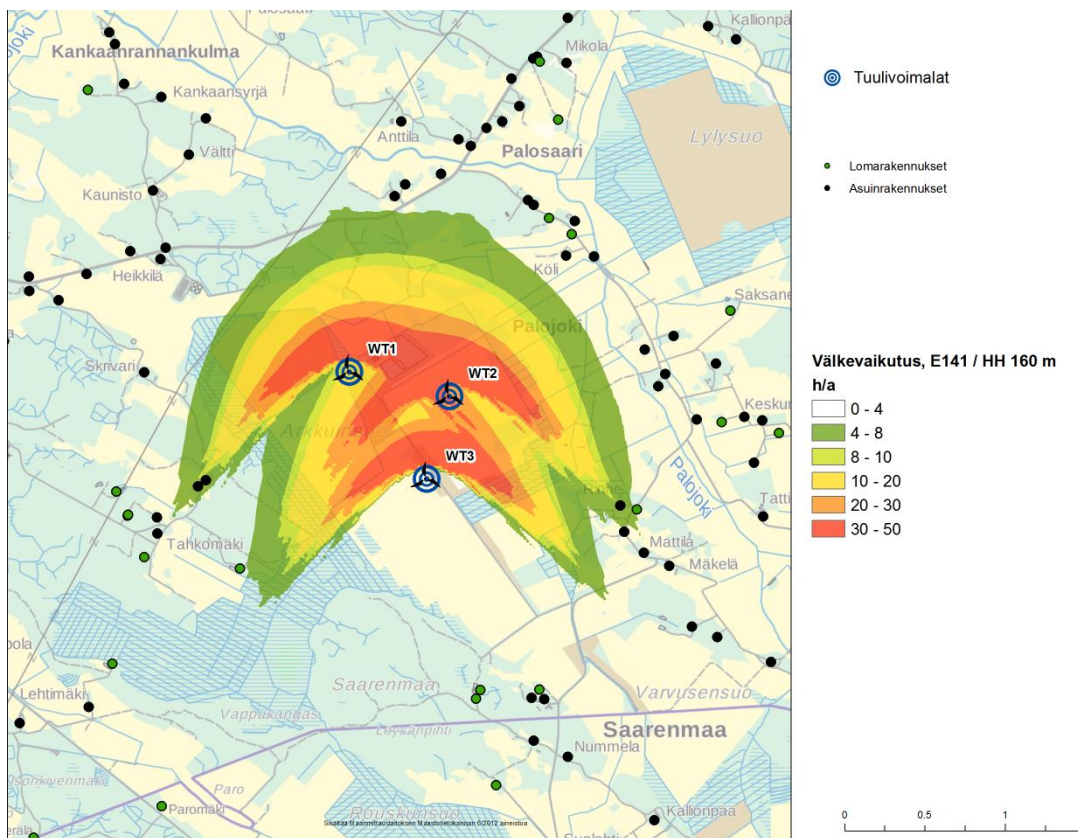


Kuva 2: Reseptoripisteiden sijainnit Arkuinsuon alueella.

2.5 Välkevarjostusvaikutus

Mallinnettu arvio Arkuinsuon voimaloiden aiheuttamista todellisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3). Kaikilla alueen asunnoilla välkevaikutus jää alle 8 tunnin raja-arvon.

Välkevaikutusten kestoja ja ajoittumista tarkastellaan tarkemmin reseptoripisteiden R01-R10 kohdilla. Taulukkoon (Taulukko 5) on listattu pisteisiin kohdistuva vuotuinen välkevarjostusaika sekä suurimmat päiväkohtaiset välkeajat. Tulosten perusteella päiväkohtainen välkeaika pysyy tutkittujen rakennusten kohdilla alle 30 minuutin ja vuosittainen välkeaika alle 8 tunnin.



Kuva 3: Arkkuinsuon tuulivoimaloiden aiheuttama välketuntien määrä.

Taulukko 5: Turbiinien aiheuttaman välkevaikutuksen kesto reseptoripisteiden kohdilla.

Reseptoripiste	Vuotuinen välkevaikutus [h:min]	Suurin päiväkohtainen välke aika [min]
R01	3:21	6
R02	6:13	10
R03	6:55	12
R04	1:15	4
R05	2:54	6
R06	2:10	4
R07	1:42	5
R08	6:19	8
R09	3:20	5
R10	3:29	5

Korkeimmat välkevaikutusajat kohdistuvat pisteisiin R03 ja R08. Välkevaikutuksen ajoittuminen näissä pisteissä vuoden- ja vuorokaudenaikojen suhteen on esitetty taulukoissa (Taulukko 6 ja Taulukko 7):

- R03: Vaikutus painottuu pääosin touko-elokuulle aamuihin klo 6-8.
- R08: Vaikutus painottuu pääosin touko-elokuulle iltapäiviin klo 14-17.

Taulukko 6: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptoripisteessä R03.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Helmikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Maaliskuu	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:05
Huhtikuu	0	0	15	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0:35
Toukokuu	0	0	0	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0:46
Kesäkuu	0	0	0	156	0	0	0	0	0	0	0	0	2:36
Heinäkuu	0	0	0	137	0	0	0	0	0	0	0	0	2:17
Elokuu	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0:17
Syyskuu	0	0	18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0:19
Lokakuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Marraskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Joulukuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Yhteensä	0	0	0:39	6:17	0	0	0	0	0	0	0	0	6:55

Taulukko 7: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptoripisteessä R08.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Helmikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Maaliskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Huhtikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	51	0	0	0	0:51
Toukokuu	0	0	0	0	0	0	0	56	5	0	0	0	1:00
Kesäkuu	0	0	0	0	0	0	0	102	0	0	0	0	1:42
Heinäkuu	0	0	0	0	0	0	0	106	0	0	0	0	1:46
Elokuu	0	0	0	0	0	0	0	5	54	0	0	0	1:00
Syyskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Lokakuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Marraskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Joulukuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Yhteensä	0	0	0	0	0	0	0	4:29	1:49	0	0	0	6:19

3 Johtopäätökset

Raportissa on esitetty Punkalaitumen kunnassa sijaitsevan Arkuinsuon tuulivoimapuiston aiheuttaman välkevarjostusvaikutuksen laskennallinen arvio. Välkevarjostusmallinnuksen mukaan vuotuinen välkevarjostusaika jää alle 8 tunnin tarkasteltujen rakennusten kohdalla ja samoin päivittäinen maksimivälke aika alittaa 30 minuuttia. Mallinnuksessa käytetty turbiinityyppi on välkevaikutuksiltaan tällä hetkellä mallinnettavissa olevista turbiineista merkittävin.

Mallinnuksissa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Suomen olosuhteissa puusto rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta.

4 Välkevarjostuksen laskentamenetelmä

Välkevaikutuksen laskennassa hyödynnetään taivaanpallon käsitettä, joka on maapallon maantieteellistä koordinaatistoa vastaava kuvitteellinen kuori katsottaessa maapalloa taivaalle. Samalla tavoin kuin paikan sijainti maapallolla voidaan ilmoittaa pituus- ja leveyspiirien avulla, voidaan taivaankappaleiden paikat taivaanpallolla ilmoittaa kahden koordinaatin (rektaskensio ja deklinaatio) avulla. Aurinko kulkee vuoden aikana taivaanpallolla kääntöpiirien väliin asettuvalla nauhalla, ja Auringon esiintymistiheys kyseisellä nauhalla voidaan esittää tiheysfunktiona.

Tiettyyn pisteeseen kohdistuvaa vuotuista välkevaikutusta laskettaessa tarkastellaan sitä osaa taivaanpallosta, joka näkyy pisteeseen tuulivoimaloiden roottorikehien läpi. Näkyvyyden arvioinnissa otetaan huomioon paikallinen maaston korkeusaineisto. Mikäli kääntöpiirien väliin asettuva nauha ei näy roottorikehien läpi, tarkastelupisteeseen ei kohdistu välkevaikutusta. Muussa tapauksessa yksittäisen turbiinin aiheuttamien välketuntien määrä saadaan integroimalla tiheysfunktioita turbiinin roottorikehien läpi näkyvällä taivaanpallon osuudella. Turbiinien yhteisvaikutus saadaan summaamalla turbiinikohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämässä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen turbiinien eri orientaatioille, joita skaalataan suuntaakohtaisilla tuulusuhteilla.

Huomioitaessa kuukausittaista (tai muuta lyhytaikaista) vaihtelua auringonpaisteen todennäköisyydessä, taivaanpallon nauha jaetaan vastaaviin osiin Auringon deklinaation mukaan. Tiheysfunktio määritellään näissä osissa erikseen, ja integroinnin tuloksia skaalataan kuukausikohtaisilla todennäköisyyksillä.

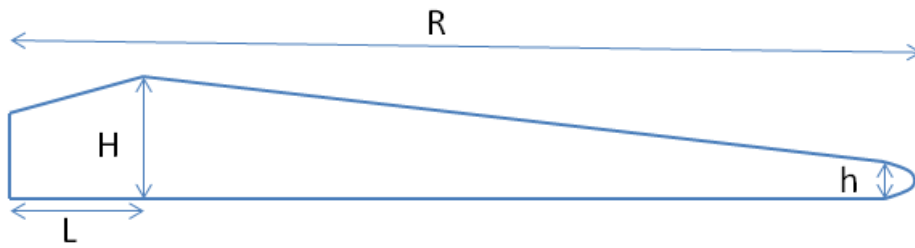
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevarjostus huomioidaan, mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen turbiinin aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

Kun lavan leveys on w metriä, niin 20 % Auringon peittoon perustuvan välkevarjostuksen maksimietäisyyden määrittämiseen voidaan johtaa laskentakaava

$$\text{maksimietäisyys} = (5 * d * w) / 1'097'780,$$

missä d on etäisyys Aurinkoon (150'000'000 km). Yksinkertaistetussa välkelaskennassa maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä turbiinin lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä turbiinin napaa ja lapa kapenee huomattavasti kärkeä kohti liikuttaessa. Tällä perusteella lavan tyven välkevaikutus ulottuu huomattavasti pidemmälle kuin lavan kärjen, mikäli arviointiperusteena käytetään Auringon peittoastetta.

Seuraavassa kaaviokuvassa on esitetty yksinkertaistettu malli tyypillisestä profiilista, jossa lavan maksimileveys on H etäisyydellä L lavan tyvestä. Lavan kokonaispituus on R ja lavan leveys 90 % etäisyydellä tyvestä on h . Yksinkertaistetussa välkelaskennassa turbiinin keskimääräinen leveys määritetään parametrien H ja h keskiarvona (esim. WindPRO Shadow).



Kuva 4: Turbiinin lavan yksinkertaistettu profiili.

Tämän raportin välkelaskennassa turbiinin lavan profiili annetaan lavan tyven ja kärjen välisenä murtoviivana, joten laskenta ei rajoitu kuvan mukaiseen yksinkertaistettuun profiiliin. Laskennassa huomioitava roottorin säde vaihtelee välillä $0 - R$ riippuen tarkastelupisteen etäisyydestä turbiineihin sekä lavan leveydestä ja sitä vastaavasta Auringon peittoasteesta. Tällä tavoin välkelaskennassa huomioidaan turbiinin muuttuva lapaprofiili, ja saadaan realistisempia tuloksia kuin olettamalla tietty keskimääräinen lavan leveys ja sitä vastaava kiinteä maksimietäisyys.