



Ilmatar Paltamo Oy

Hukkalansalo

Tuulivoimapuiston välkeselvitys

09.10.2025

Copyright © AFRY Finland Oy

Kaikki oikeudet pidätetään. Tätä asiakirjaa tai osaa siitä ei saa kopioida tai jäljentää missään muodossa ilman AFRY Finland Oy:n antamaa kirjallista lupaa.

AFRY Finland Oy:n projektinumero on 101021368-028.

Kannen kuva: © AFRY

Selvityksessä on käytetty Maanmittauslaitoksen ja Ilmatieteen laitoksen avoimien aineistojen käyttö lupien alaista materiaalia, jotka on lisensoitu Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen -lisenssillä: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fi>.

YHTEYSTIEDOT

Hankkeesta vastaava:

Ilmatar Paltamo Oy

Jussi Mäkinen

jussi.makinen@ilmatar.com

Tekijä:

AFRY Finland Oy

Veera Hatulainen

veera.hatulainen@afry.com

Wind & Solar Development and Engineering

www.afry.com

Raportin tiedot:

Projektinumero: 101021368-028

Raporttiversio: 003

Raportin tila: VALMIS

Raporttihistoria:

Versio	Pvm/Laatija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	08.12.2022/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	08.12.2022/ Mika Laitinen, Senior Consultant	Alkuperäinen (200_304.014.001)
002	06.08.2024/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	06.08.2024/ Mika Laitinen, Senior Consultant	Layout muuttunut. Huomioitu yhteisvaikutukset Varsavaaran kanssa. (101021368-028.002)
003	09.10.2025/ Veera Hatulainen, Technical Consultant	09.10.2025/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Layout muuttunut.

SISÄLLYS

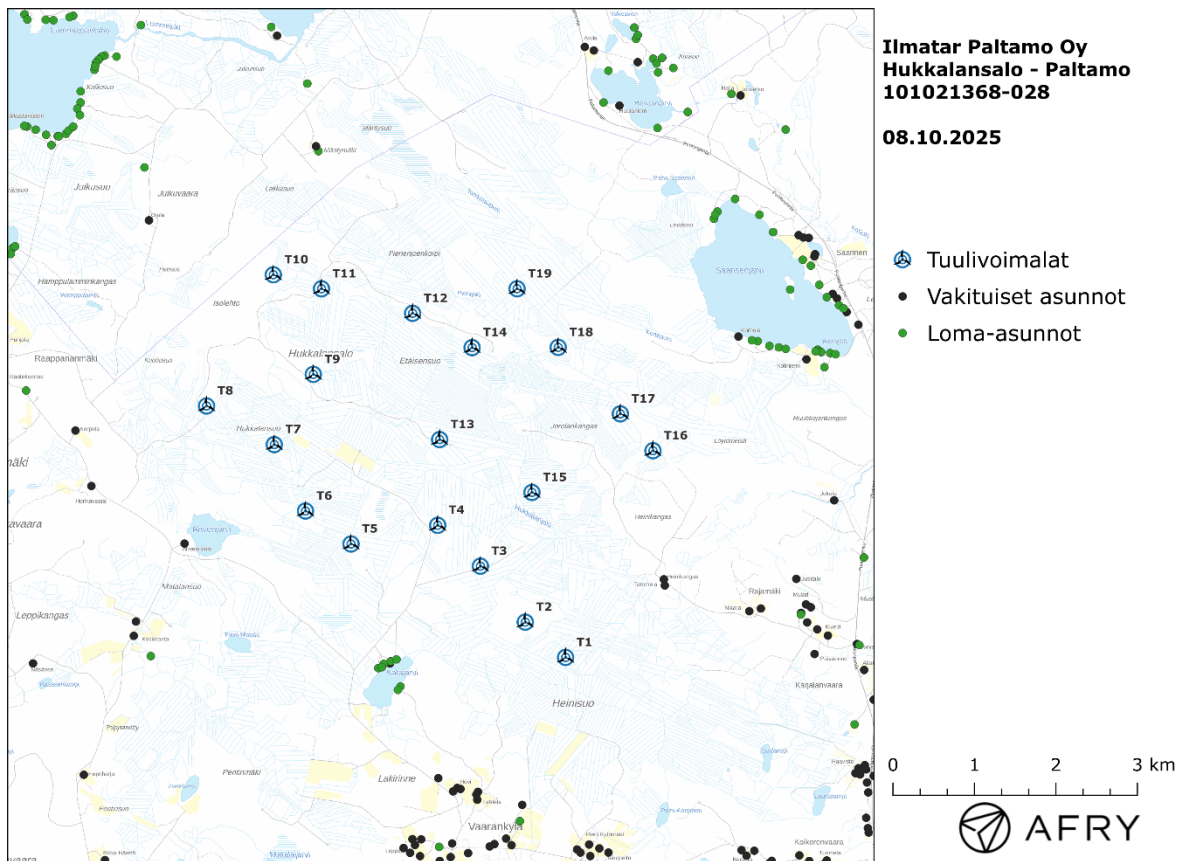
1	JOHDANTO	5
2	TUULIVOIMALOIDEN VÄLKE	7
2.1	Välkevaikutus.....	7
2.2	Välkkeen rajoittaminen.....	7
2.3	Arvioinnin epävarmuudet	7
2.4	Ohjeavot	8
3	TUULIVOIMAKOHTEN VÄLKEMALLINNUS	9
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	9
3.2	Todennäköinen välkevaikutus.....	12
3.3	Teoreettinen välkevaikutus	14
3.4	Välkkeen yhteisvaikutukset.....	16
4	YHTEENVETO.....	19
5	VÄLKEVAIKUTUKSEN LASKENTAMENETELMÄ	20
6	VIITTEET	22

1 JOHDANTO

Selvityksessä arvioidaan Paltamon kunnan alueelle suunnitellun Hukkalansalon tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty 19 voimalan suunnitelmalle. Voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvassa (Kuva 1-1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1-1).

Mallinnuksissa voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 220 m. Näin suuren roottorin voimaloita ei ole vielä tarjolla maatuulivoimapuistoihin ja mallinnuksissa arvioidaan nykyistä suurempien tulevaisuuden voimaloiden välkevaikutuksia. Roottorin halkaisijan koko on merkittävämpi välkeaikaan vaikuttava tekijä kuin lavan muoto, mutta myös voimalatyyppin lavan leveys vaikuttaa välkkeen suuruuteen. Koska tulevaisuuden voimaloiden lapojen leveydestä ei ole vielä tarkkaa tietoa, välkemallinnuksissa voimaloiden lavan muoto on skaalattu nykyisestä voimalatyyppistä V162 (roottorin halkaisija 162 m). Lapaa on skaalattu sekä pidemmäksi (110 m) että leveämmäksi (4,8 m, V162 lapaprofiilin levein kohta on 4,3 m). Voimalatyyppin V162 lapa on muodoltaan leveä ja tällä pyritään turvalliseen arvioon, joka ei aliarvioi tulevaisuuden voimaloiden välkevaikutusta.

Selvityksessä arvioidaan myös puiston nimi sekä läheisten tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutuksia. Yhteisvaikutuksia käsitellään kappaleessa 3.4.



Kuva 1-1: Tuulivoimaloiden sijainnit Hukkalansalon hankealueella.

Taulukko 1-1: Tuulivoimaloiden (19 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla.

Tuulivoimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	535220	7149940	176
T2	534725	7150373	182
T3	534174	7151059	174
T4	533651	7151561	169
T5	532587	7151331	179
T6	532028	7151736	178
T7	531645	7152551	177
T8	530814	7153024	186
T9	532124	7153412	183
T10	531633	7154634	197
T11	532224	7154462	189
T12	533343	7154161	175
T13	533674	7152612	169
T14	534073	7153740	169
T15	534807	7151964	162
T16	536292	7152476	166
T17	535892	7152928	162
T18	535129	7153743	166
T19	534624	7154462	170

2 TUULIVOIMALOIDEN VÄLKE

2.1 Välkevaikutus

Välkevaikutuksella tarkoitetaan tilannetta, jossa Auringon paisteen ja tarkastelupisteen väliin jäävän voimalan lavat aiheuttavat välkkyvän varjon. Välke voi ulottua pisimmillään 1–3 km etäisyydelle voimalasta. Välkevaikutuksen etäisyyteen ja keston vaikuttavat tuuli-voimalan korkeus ja roottorin halkaisija, vuoden- ja vuorokaudenaika, maaston muodot sekä näkyvyyttä rajoittavat tekijät kuten kasvillisuus ja pilvisuus.

Suomen sijainnin vuoksi yksittäisen tuulivoimalan välkevaikutus kohdistuu valtaosin voimalan pohjoispuolelle (päiväaika) sekä lounais- ja kaakkoispuolille (aamu- ja iltajat). Suomessa voimala aiheuttaa välkevaikutusta eteläpuolelleen vain pohjoisen napapiirin pohjoispuolella.

Välkevaikutuksen laskenta voi perustua joko teoreettisen maksimivälkkeen tai todennäköisen tilanteen mallinnukseen:

- Teoreettisen 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 on tehty mallintamalla sekä todennäköinen välkeaika että teoreettinen maksimivälke.

2.2 Välkkeen rajoittaminen

Välkevaikutusta voidaan vähentää voimalakohtaisella välkkeen hallintatyökalulla (shadow flicker protection system), joka sisältää valoanturin ja välkkeenhallintasovelluksen. Työkalun avulla voimala voidaan pysäyttää joko havaitun auringonpaisteen perusteella ja/tai haluttuina vuoden- ja kellonaikoina. Pysäytetty voimala ei aiheuta välkettä.

2.3 Arvioinnin epävarmuudet

Mallinnettu todennäköinen välkevaikutus perustuu auringonpaisteen ja tuulisuuden tilastolliseen aineistoon. Yksittäisen vuoden sääolosuhteet saattavat poiketa merkittävästi keskimääräisistä olosuhteista, jolloin vuotuinen välkevaikutus voi poiketa mallinnetusta arvosta. Auringonpaisteen aineisto on saatu Oulun sääasemalta, josta etäisyys hankealueeseen on noin 120 km.

Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta voimaloiden näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Puuston näkyvyyttä peittävä vaikutus vaihtelee kuitenkin vuosien ja vuodenaikojen suhteen, minkä vuoksi puuston välkettä vähentävää vaikutusta ei pystytä arvioimaan tarkasti.

Rakennuksiin kohdistuvan välkkeen laskennassa käytetään ns. kasvihuone-oletusta, jolloin rakennukseen kohdistuva välkevaikutus huomioidaan riippumatta suunnasta. Välkevaikutuksen laskennallinen arvio kuvaa siis välkevaikutusta ulkona. Rakennusten sisätiloissa välkevaikutus on yleensä vähäisempi, koska välkevaikutus kohdistuu rakennuksen sisätiloihin vain ikkunoiden suunnasta.

2.4 Ohjearvot

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja. Ympäristöministeriön ohjeissa tuulivoimapuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia välkemäärien osalta [4]. Tässä selvityksessä mallinnettuja välkeajoja verrataan vakiintuneen käytännön mukaan Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvoihin. Välkkeen ohjearvoja sovelletaan asutuksen kohdalla, eikä esimerkiksi eläimiin tai luontoon kohdistuvasta välkevaikutuksesta ole ohjearvoja tai arviointikriteerejä.

Tanskassa on määritetty todennäköisen vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 tuntia. Ruotsissa vastaava todennäköisen välkkeen suositusarvo on 8 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä [2]. Saksassa teoreettisen maksimivälkkeen raja-arvot ovat korkeintaan 30 tuntia vuodessa ja 30 minuuttia päivässä. Saksassa todellinen vuotuisen välkevaikutus ohjeistetaan rajoittamaan 8 tuntiin, jos voimalaan asennetaan välkkeen hallintatyökalu.

3 TUULIVOIMAKOHTTEEN VÄLKEMALLINNUS

3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola -mallinnusohjelmistolla, joka huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoima-alueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuulivoimaloiden dimensiot. Laskennan tuloksena saadaan tieto siitä, kuinka monta tuntia vuodessa alueen eri kohteet ovat välkevaikutuksen alaisena. Tulosta havainnollistetaan tasa-arvokäyrästä, jonka perusteella voidaan arvioida varjostusvaikutusta tarkastelualueella.

Tarkastelualueiden maanpinnan korkeuserot on saatu Maanmittauslaitoksen aineistosta *Korkeusmalli 10 m*. Korkeusdatan vaakaresoluutio on 10 m ja pystysuorainen tarkkuus 1,4 m. Laskennassa huomioitiin korkeuserot siten, että jos Auringon, tuulivoimalan ja tarkastelupisteen kautta kulkeva jana leikkaa maanpintaa, niin varjostusta ei esiinny. Välkevaikutus laskettiin 2 m korkeudelle. Auringonpaistekulman rajana horisontista käytettiin kolmea astetta, jonka alle menevää säteilyä ei oteta huomioon varjostuksessa.

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

Yleensä väkelaskennan maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä tuulivoimalan lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä tuulivoimalan 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 väkelaskennassa ei ole käytetty tavanomaista maksimietäisyyttä, vaan on huomioitu tuulivoimalan muuttuva lapaprofiili.

Väkelaskennassa Hukkalansalon voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 220 m. Näin suuren roottorin voimaloita ei ole vielä tarjolla maatuulivoimapuitoihin ja mallinuksissa arvioidaan nykyistä suurempien tulevaisuuden voimaloiden välkevaikutuksia. Koska tulevaisuuden voimaloiden lapojen leveydestä ei ole vielä tarkkaa tietoa, välkemallinuksissa voimaloiden lavan muoto on skaalattu nykyisestä voimalatyypistä V162 (roottorin halkaisija 162 m). Samalla kun lavan pituus on skaalattu 110 metriin, lapaa on skaalattu 11 % leveämmäksi kuin voimalatyypissä V162. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat tuulivoimaloiden käyttöaste, puusto ja paikallinen säätila (pilvisuus ja tuulisuus). Jos esimerkiksi tuulen suunta on kohtisuorassa auringon ja tarkastelupisteen välistä linjaa vasten, ei varjostusvaikutusta esiinny. Varjostuksen laskennassa tuulivoimalan orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Todennäköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri tuulivoimalan 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 [1] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja

suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn tuulivoimalan käyntinopeuksien ajallisen osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammissa tuulissa tuulivoimalat ovat paikallaan, jolloin roottorin pyörimisestä aiheutuvaa valon välkkymistä ei esiinny. Suomen tuuliatlaksen tuulisuusestimaatti on otettu tuulivoima-alueen keskeltä korkeudelta 200 m, ja sen perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet tuulivoimalan käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 3-1).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjotusaikoja Oulun sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [3]. Sääaseman mittausten perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 3-2). Suuntakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 3-1: Suuntasektorikohtaiset osuudet yli 3 m/s tuulennopeuksille Suomen tuuliatlaksen perusteella.

Suuntasektori	0/180	30/210	60/240	90/270	120/300	150/330
Yli 3 m/s osuus	0,167	0,166	0,152	0,165	0,134	0,146

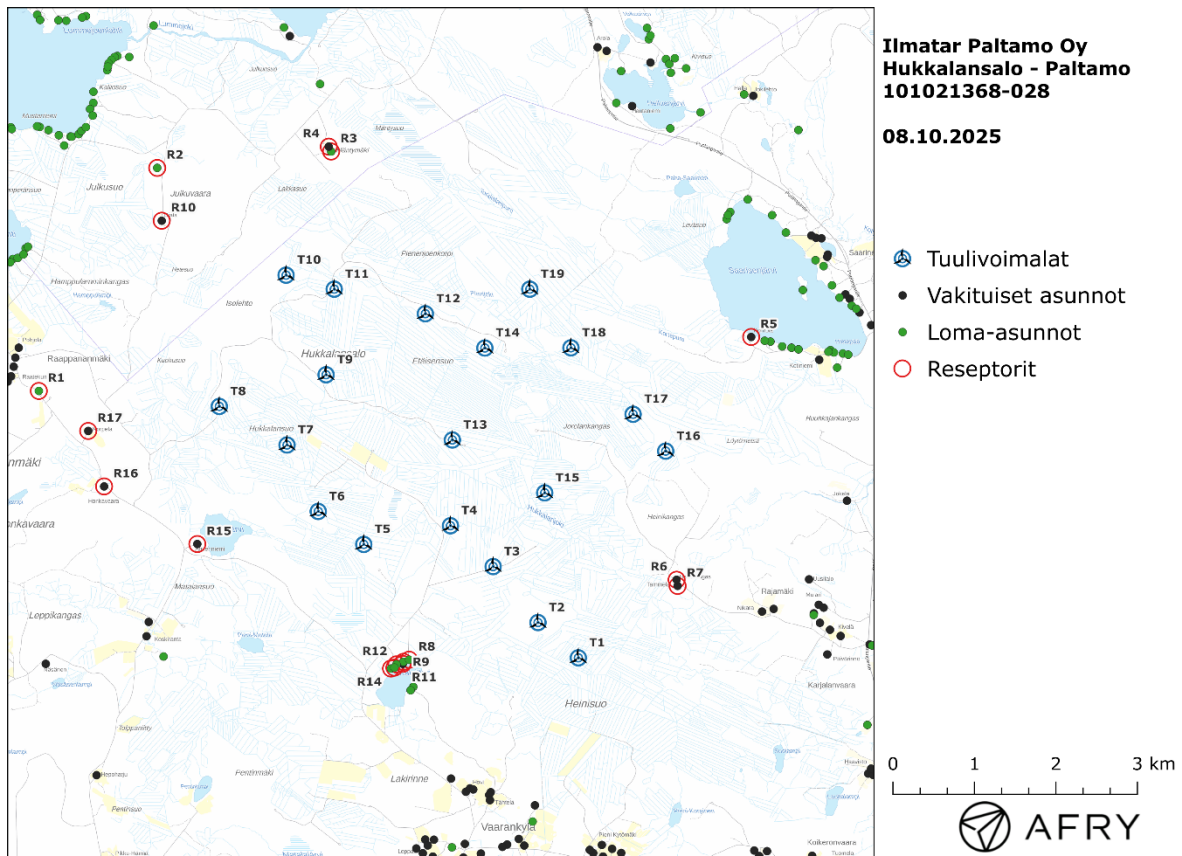
Taulukko 3-2: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Oulun sääasemalla.

Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,152
Helmikuu	0,289
Maaliskuu	0,377
Huhtikuu	0,455
Toukokuu	0,469
Kesäkuu	0,451
Heinäkuu	0,452
Elokuu	0,413
Syyskuu	0,340
Lokakuu	0,229
Marraskuu	0,151
Joulukuu	0,070

Taulukossa (Taulukko 3-3) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 17 pistettä, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Pisteet on valittu asuntojen kohdilta, joihin kohdistuu suurin välkevaikutus. Näitä pisteitä kutsutaan reseptoreiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 3-1). Reseptorit sijaitsevat noin 1,5-2,2 km etäisyydellä voimaloista.

Taulukko 3-3: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	528600	7153212	256	lomarakenus
R2	530053	7155948	209	lomarakenus
R3	532187	7156149	209	lomarakenus
R4	532158	7156209	211	vakituinen asuinrakennus
R5	537342	7153874	166	vakituinen asuinrakennus
R6	536427	7150896	167	vakituinen asuinrakennus
R7	536439	7150820	165	vakituinen asuinrakennus
R8	533145	7149915	191	lomarakenus
R9	533074	7149889	193	lomarakenus
R10	530108	7155300	203	vakituinen asuinrakennus
R11	533066	7149864	191	vakituinen asuinrakennus
R12	532989	7149858	191	lomarakenus
R13	532964	7149818	189	lomarakenus
R14	532922	7149807	190	lomarakenus
R15	530545	7151334	195	vakituinen asuinrakennus
R16	529401	7152041	227	vakituinen asuinrakennus
R17	529206	7152721	233	vakituinen asuinrakennus

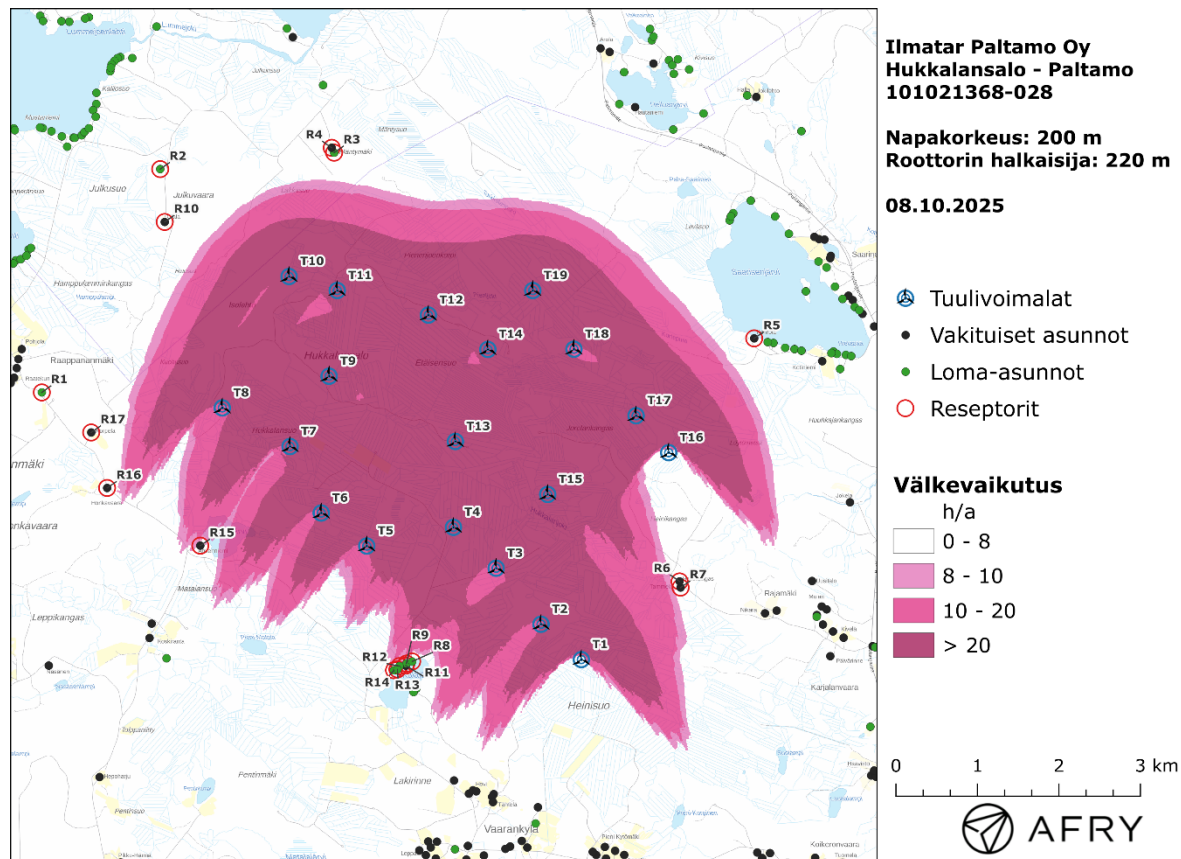

Kuva 3-1: Reseptoreiden paikat Hukkalansalon tuulivoimapaiston hankealueella.

3.2 Todennäköinen välkevaikutus

Mallinnetut arviot todennäköisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3-2). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta tuulivoimaloiden näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja.

Mallinnusten perusteella vuotuinen todennäköinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon kaikkien lähialueen asuin- ja lomarakennusten kohdalla. Myös päiväkohtainen todennäköinen välkevaikutus alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen asuntojen kohdalla. Vuotuiset todennäköiset välkevaikutusajat ja suurimmat päiväkohtaiset maksimivälkkeet reseptorien kohdalla on lueteltu taulukossa (Taulukko 3-4).

Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptorin R15 kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 3-5). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 3-2: Tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköisen välkkeen määrä ilman puuston vaikutusta.

Taulukko 3-4: Todennäköinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina [h:min] reseptoreiden kohdalla.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaika	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimi
R1	0:00	0:00
R2	0:19	0:02
R3	3:24	0:09
R4	3:03	0:08
R5	3:24	0:05
R6	6:29	0:07
R7	6:35	0:07
R8	7:15	0:08
R9	7:24	0:07
R10	1:39	0:06
R11	7:01	0:07
R12	7:25	0:10
R13	6:51	0:08
R14	6:55	0:08
R15	7:59	0:09
R16	4:23	0:08
R17	2:40	0:08

Taulukko 3-5: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R15 kohdalla.

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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:07
Huhtikuu	0:00	0:00	1:41	0:23	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:05
Toukokuu	0:00	0:05	0:13	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:17
Kesäkuu	0:00	2:14	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:14
Heinäkuu	0:00	1:09	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:09
Elokuu	0:00	0:00	1:43	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:43
Syyskuu	0:00	0:00	0:07	0:17	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:24
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	3:28	3:44	0:47	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	7:59

3.3 Teoreettinen välkevaikutus

Teoreettisen maksimivälkkeen vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdalla on lueteltu taulukossa (Taulukko 3-6). Mallinnusten perusteella vuotuinen teoreettinen välke ylittää Saksan 30 tunnin raja-arvon kolmen reseptoripisteen kohdalla. Tämän lisäksi Saksan päiväkohtainen 30 minuutin raja-arvo ylittyy useamman reseptorin kohdalla.

Suomen olosuhteissa Saksan teoreettisen maksimivälkkeen ohjearvoihin vertaaminen voi antaa harhaanjohtavan kuvan välkevaikutuksesta. Suomessa aurinko paistaa eri kulmasta kuin Saksassa ja auringonpaisteen todennäköisyys on erilainen. Suomessa aurinko paistaa talvella hyvin viistosti, mikä voi aiheuttaa suuren teoreettisen maksimivälkkeen. Talvisin auringonpaisteen todennäköisyys on kuitenkin Suomessa hyvin alhainen. Välkkeen ajoittumistaulukosta (Taulukko 3-5) nähdään, että välkettä esiintyy pisteessä R15 pääosin aikaisina kesäaamuina, jolloin auringonpaiste jää käytännössä puiden varjoon. Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen reseptorin R7 kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 3-7). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talvi-aika).

Taulukko 3-6: Teoreettinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina [h:min] reseptoreiden kohdalla.

Reseptori	Teoreettinen vuotuinen välkeaika	Teoreettisen välkkeen päiväkohtainen maksimi
R1	0:00	0:00
R2	2:04	0:13
R3	19:20	0:42
R4	18:23	0:41
R5	20:12	0:24
R6	30:29	0:29
R7	30:49	0:33
R8	27:57	0:31
R9	28:03	0:30
R10	10:36	0:27
R11	26:21	0:38
R12	27:38	0:37
R13	25:42	0:34
R14	25:51	0:34
R15	30:24	0:34
R16	16:03	0:28
R17	10:38	0:30

Taulukko 3-7: Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R7 kohdalla.

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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:10	0:49	0:00	0:00	0:00	1:58
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:52	5:00	0:00	0:00	0:00	7:52
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:18	0:00	0:00	1:18
Toukokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:33	3:44	0:00	4:17
Kesäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Heinäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:45	0:00	3:45
Elokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:09	0:32	0:00	0:41
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:26	1:08	0:00	0:00	4:35
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	6:24	0:00	0:00	0:00	0:00	6:24
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	10:25	9:15	3:08	8:01	0:00	30:49

3.4 Välkkeen yhteisvaikutukset

Tässä luvussa arvioidaan Hukkalansalon ja läheisen suunnitteilla olevan Varsavaaran tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia. Yhteisvaikutuksissa huomioidaan Varsavaaran YVA:n mukainen 21 voimalan suunnitelma VE1, sillä se aiheuttaa suuremman vaikutuksen kuin sen suunnitelma VE2. Hukkalansalon ja Varsavaaran voimalat sijaitsevat lähimmillään 4,8 km etäisyydellä toisistaan.

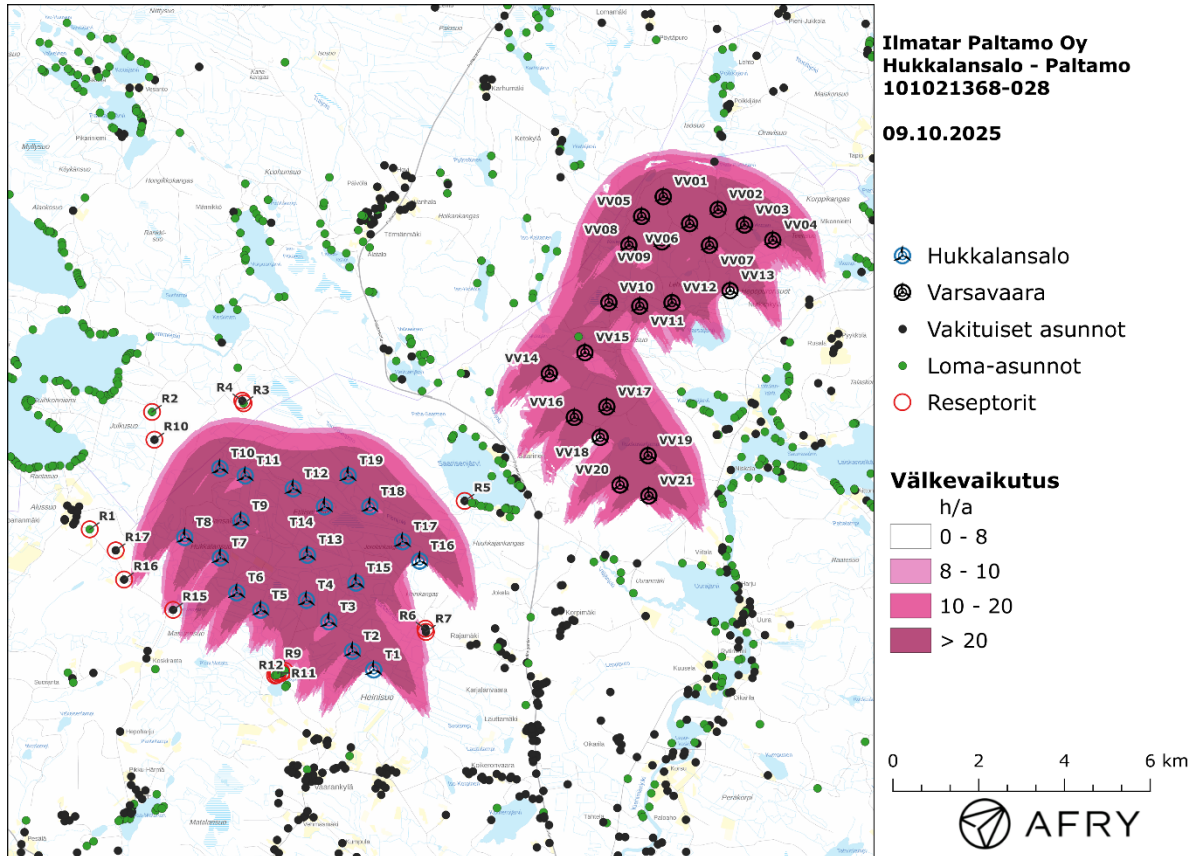
Välkemallinnuksissa Varsavaaran voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lapaprofiilina on käytetty Vestaksen V162 lavan profiilitietoa skaalattuna roottorin halkaisijalle 200 m. Skaalatun profiilin levein kohta on 4,6 m ja leveys 90 % etäisyydellä lavan tyvestä 1,8 m.

Varsavaaran voimaloiden koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 3-8).

Taulukko 3-8: Varsavaaran (21 kpl) tuulivoimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla.

Tuulivoimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
VV01	541971	7160969	285
VV02	543249	7160670	197
VV03	543865	7160308	182
VV04	544525	7159955	186
VV05	541467	7160508	261
VV06	542585	7160341	261
VV07	543049	7159835	200
VV08	541169	7159837	226
VV09	541941	7159916	246
VV10	540703	7158502	193
VV11	541423	7158417	175
VV12	542175	7158498	166
VV13	543529	7158779	170
VV14	539316	7156847	194
VV15	540144	7157334	187
VV16	539898	7155824	200
VV17	540656	7156069	181
VV18	540500	7155359	174
VV19	541617	7154933	180
VV20	540963	7154249	194
VV21	541635	7153995	211

Hukkalansalon ja Varsavaaran todennäköisen välkkeen yhteisvaikutusten mallinnus on esitetty karttakuvana (Kuva 3-3). Todennäköiset välkeajat ja teoreettinen maksimivälke reseptoripisteiden kohdilla on listattu taulukossa (Taulukko 3-9). Mallinnusten perusteella Hukkalansalon ja Varsavaaran voimat eivät aiheuta välkkeen yhteisvaikutuksia tarkasteltuihin reseptoreihin.



Kuva 3-3: Hukkalansalon ja Varsavaaran tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköisen välkkeen määrä ilman puuston vaikutusta.

Taulukko 3-9: Välkeajat tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorien kohdilla, kun mallinuksissa huomioidaan Hukkalansalon ja Varsavaaran voimat. Taulukossa on esitetty vuotuinen välke aika ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, sekä todennäköisenä että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Resep-tori	Todennäköinen vuotuinen välke aika	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimi	Teoreettinen vuotuinen välke aika	Teoreettisen välkkeen päiväkohtainen maksimi
R1	0:00	0:00	0:00	0:00
R2	0:19	0:02	2:04	0:13
R3	3:24	0:09	19:20	0:42
R4	3:03	0:08	18:23	0:41
R5	3:24	0:05	20:12	0:24
R6	6:29	0:07	30:29	0:29
R7	6:35	0:07	30:49	0:33
R8	7:15	0:08	27:57	0:31
R9	7:24	0:07	28:03	0:30

R10	1:39	0:06	10:36	0:27
R11	7:01	0:07	26:21	0:38
R12	7:25	0:10	27:38	0:37
R13	6:51	0:08	25:42	0:34
R14	6:55	0:08	25:51	0:34
R15	7:59	0:09	30:24	0:34
R16	4:23	0:08	16:03	0:28
R17	2:40	0:08	10:38	0:30

4 YHTEENVETO

Raportissa on esitetty Paltamon kunnan alueelle suunnitellun Hukkalansalon tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arviointi on tehty 19 voimalan suunnitelmalle, roottorin halkaisijalla 220 m ja napakorkeudella 200 m. Selvityksessä on lisäksi arvioitu Hukkalansalon ja Varsavaaran tuulivoimaloiden välkkeen yhteisvaikutuksia.

Välkevarjostusmallinnuksen mukaan vuotuinen todennäköinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon kaikkien asuin- ja lomarakennusten kohdalla. Myös todennäköinen päiväkohtainen välkeaika alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon kaikkien loma- ja asuinrakennusten kohdalla. Välkevarjostusmallinnuksen mukaan teoreettinen vuotuinen maksimi välke ylittää Saksan 30 tunnin raja-arvon kolmen reseptorin kohdalla. Tämän lisäksi Saksan päiväkohtainen 30 minuutin raja-arvon ylittyy useamman reseptorin kohdalla.

Välkkeen yhteisvaikutusten mallinnuksen mukaan Hukkalansalon ja Varsavaaran voimaloista ei aiheudu merkittävää välkkeen yhteisvaikutusta asutukseen.

5 VÄLKEVAIKUTUKSEN LASKENTAMENETELMÄ

Välkevaikutuksen laskennassa hyödynnetään taivaanpallon käsitettä, joka on maapallon maantieteellistä koordinaatistoa vastaava kuvitteellinen kuori katsottaessa maapallolta 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 tuulivoimalan aiheuttamien välketuntien määrä saadaan integroimalla tiheysfunktioita tuulivoimalan roottorikehien läpinäkyvällä taivaanpallon osuudella. Tuulivoimaloiden yhteisvaikutus saadaan summaamalla tuulivoimalakohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämässä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen tuulivoimaloiden eri orientaatioille, joita skaalataan suuntakohtaisilla tuulusuusuksilla.

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.

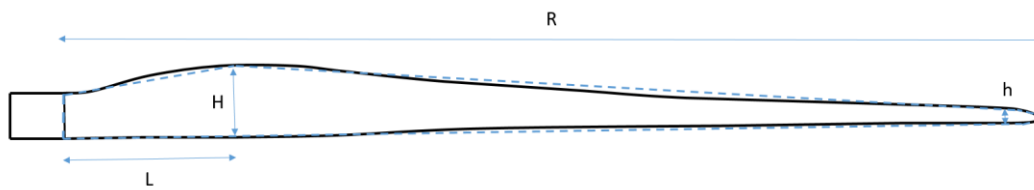
Tuulivoimalan lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle tuulivoimalasta, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu tuulivoimalan lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevarjostus huomioidaan, mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen tuulivoimalan 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). Yleensä välkelaskennan maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä tuulivoimalan lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä tuulivoimalan 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 (Kuva 5-1) on esitetty malli tyypillisestä profiilista, jossa lavan maksimileveys on H etäisyydellä L lavan tyvestä. Lavan kokonaispituus on R ja lavan leveys 90 % etäisyydellä tyvestä on h . Lavan oletetaan kapenevan lineaarisesti arvosta H arvoon h liikuttaessa maksimikohdasta kärkeen. Tavanomaisesti välkelaskennassa tuulivoimalan keskimääräinen leveys on määritetty parametrien H ja h keskiarvona.



Kuva 5-1: Tuulivoimalan lavan malliprofiili.

Tämän raportin väkelaskennassa käytetään tuulivoimavalmistajan ilmoittamiin tietoihin perustuvaa lavan profiilitietoa. Laskennassa huomioitava roottorin säde vaihtelee välillä $[0, R]$ riippuen tarkastelupisteen etäisyydestä turbiineihin sekä lavan leveydestä ja sitä vastaavasta Auringon peittoasteesta. Tällä tavoin väkelaskennassa huomioidaan tuulivoimalan muuttuva lapaprofiili, ja saadaan realistisempia tuloksia kuin olettamalla tietty keskimääräinen lavan leveys ja sitä vastaava kiinteä maksimietäisyys.

6 VIITTEET

- [1] B. Tammelin et al.: Production of the Finnish Wind atlas. Wind Energy, 2011.
- [2] Boverket: *Vindkraftshandboken*, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kust-nära vattenområden, 2009.
- [3] P. Pirinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1
- [4] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päiväys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016.