



Eurowind Energy

Metsomäen tuulivoimapuiston välkeselvitys

101023002-002, 22.07.2024

Tekijä
AFRY Finland Oy
Pinja Tikka

E-mail
pinja.tikka@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
002

Asiakas
Eurowind Energy
Neil Stewart

Päivämäärä
22/07/2024

Projektinumero
101023002-002

Raportin tila
VALMIS

Metsomäen tuulivoimapuiston välkeselvitys

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	04.04.2024/ Pinja Tikka, Technical Consultant	04.04.2024/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	
001	22.07.2024/ Pinja Tikka, Technical Consultant	22.07.2024/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	toteutusvaihtoehdon nimeämisen muuttaminen

Aineistojen käyttöoikeudet

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

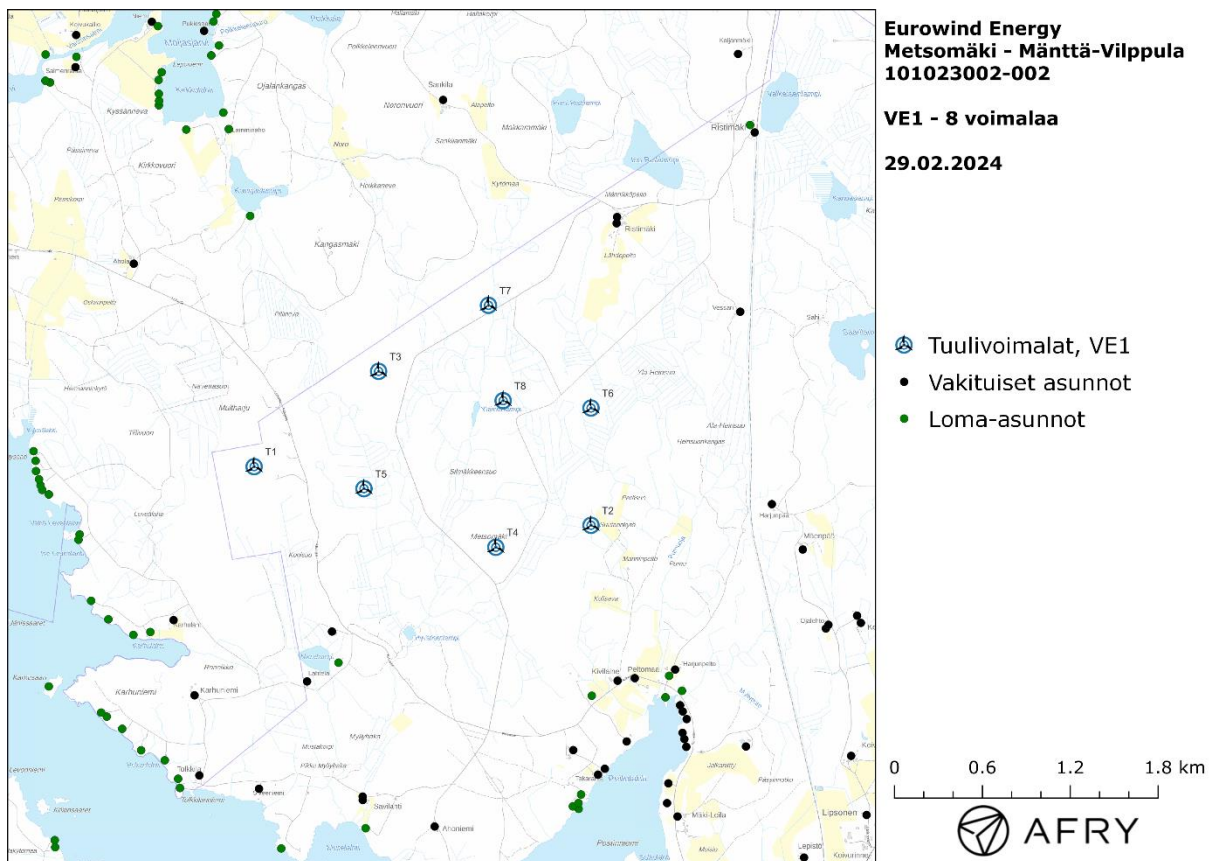
Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	7
2.1	Välkevaikutus	7
2.2	Välkkeen rajoittaminen	7
2.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	7
2.4	Ohjeavot	8
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	9
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	9
3.2	Todennäköinen välkevaikutus	12
3.3	Teoreettinen välkevaikutus	16
4	Yhteenveto	18
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	19
6	Viitteet	21

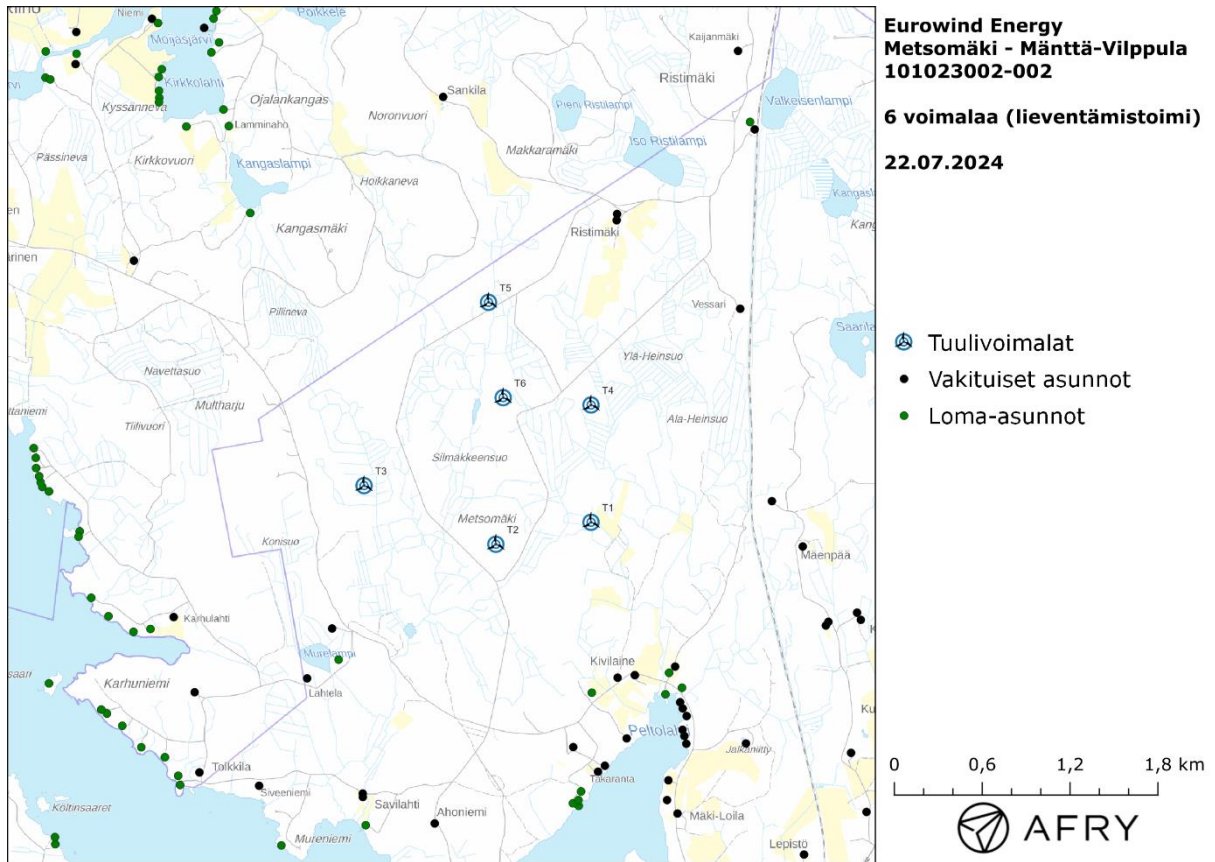
1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Mänttä-Vilppulan alueelle suunnitellun Metsomäen tuulivoimapuiston aiheuttamaa väkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty sijoitussuunnitelmille VE1 (8 voimalaa) ja 6 voimalaa (lieventämisvoimi). Voimaloiden sijainnit on esitetty kuvissa (Kuva 1 ja Kuva 2) ja koordinaatit annettu taulukoissa (Taulukko 1 ja Taulukko 2).

Mallinnuksissa voimaloille on käytetty napakorkeutta 165 m ja roottorin halkaisijaa 170 m. Voimaloiden lapaprofiili on määritetty voimalatyyppin SG170 valmistajan ilmoittaman lapaprofiilin avulla.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Metsomäen hankealueella sijoitussuunnitelmalla VE1.



Kuva 2: Tuulivoimaloiden sijainnit Metsomäen hankealueella sijoitussuunnitelmalla 6 voimalaa (lieventämistoimi).

Taulukko 1: Tuulivoimaloiden (8 kpl, VE1) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	366309	6896016	141
T2	368609	6895616	128
T3	367159	6896666	150
T4	367959	6895466	140
T5	367059	6895866	129
T6	368609	6896416	133
T7	367909	6897116	130
T8	368009	6896466	134

Taulukko 2: Tuulivoimaloiden (6 voimalaa (lieventämistoimi)) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	368609	6895616	128
T2	367959	6895466	140
T3	367059	6895866	129
T4	368609	6896416	133
T5	367909	6897116	130
T6	368009	6896466	134

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 tuulivoimalan 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 ilta-ajat). 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 Jyväskylän sääasemalta, josta etäisyys hankealueeseen on noin 70 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]. Tanskassa on määritetty vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 h. Ruotsissa vastaava suositusarvo on 8 h ja korkeintaan 30 min päivässä [2]. Näiden ohjearvojen käyttö edellyttää todennäköisen välketilanteen laskentaa. Mikäli välketuntien arvioinnissa käytetään laskennallista maksimituntimäärää, voidaan vuotuisen välkevaikutuksen ohjearvona käyttää Saksassa käytettävää 30 h raja-arvoa. Tässä raportissa mallinnettujen välketasojen arvioinnissa käytetään Ruotsin suunnitteluohjeissa annettuja ohjearvoja todennäköisen välkkeen tapauksessa. Teoreettisen maksimivälkkeen arvioinnissa käytetään Saksan 30 tunnin raja-arvoa vuodessa ja 30 minuuttia päivässä.

3 Tuulivoimakohteen väkemannus

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 tuuliturbiinien 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, turbiinin 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.

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 välkevaikutus huomioidaan mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen turbiinin aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

Yleensä väkelaskennan 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 väkelaskennassa ei ole käytetty tavanomaista maksimietäisyyttä, vaan on huomioitu turbiinin muuttuva lapaprofiili.

Väkelaskennassa voimaloille on käytetty napakorkeutta 165 m ja roottorin halkaisijaa 170 m. Voimaloiden lapaprofiili on arvioitu voimalatyypin Siemen Gamesa SG170 valmistajan ilmoittamalla lavan profiilitiedolla. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat turbiinien 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 turbiinin orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Todennäköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri turbiinien orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat väkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua väkkeituntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [1] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvensillä 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 osuille tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 3).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Jyväskylän sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [3]. Sääaseman mittausten perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 4). Suuntaakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 3: Suuntasektoriokohtaiset 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	0,149	0,170	0,150	0,136	0,128	0,146

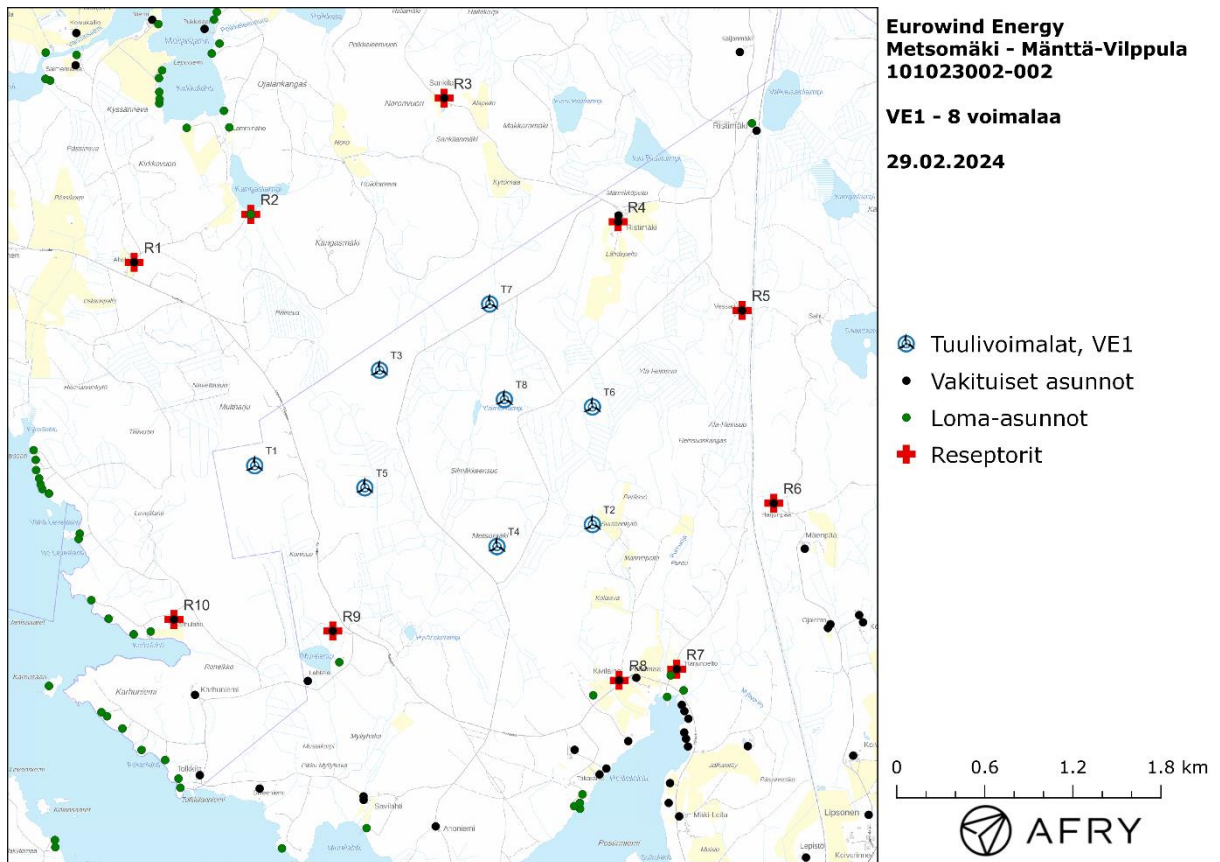
Taulukko 4: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Jyväskylän sääasemalla.

Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,131
Helmikuu	0,256
Maaliskuu	0,373
Huhtikuu	0,402
Toukokuu	0,456
Kesäkuu	0,412
Heinäkuu	0,447
Elokuu	0,419
Syyskuu	0,315
Lokakuu	0,191
Marraskuu	0,095
Joulukuu	0,062

Taulukossa (Taulukko 5) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä kymmenen vertailurakennusta, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 3). Rakennusten sijaitsevat noin 1-1,6 km etäisyydellä sijoitussuunnitelman VE1 voimaloista, ja 1-2,2 km etäisyydellä sijoitussuunnitelman 6 voimalaa (lieventämistoimi) voimaloista.

Taulukko 5: Vertailupisteiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus	Etäisyys lähimpään voimalaan [km] VE1/ 6 voimalaa (lieventämistoimi)
R1	365489	6897398	123	vakituinen asuinrakennus	1,6 / 2,2
R2	366283	6897724	119	lomarakennus	1,4 / 1,7
R3	367600	6898515	162	vakituinen asuinrakennus	1,4 / 1,4
R4	368785	6897674	150	vakituinen asuinrakennus	1,0 / 1,0
R5	369629	6897071	135	vakituinen asuinrakennus	1,2 / 1,2
R6	369845	6895759	128	vakituinen asuinrakennus	1,2 / 1,2
R7	369184	6894630	116	vakituinen asuinrakennus	1,1 / 1,1
R8	368792	6894554	118	vakituinen asuinrakennus	1,1 / 1,1
R9	366842	6894890	120	vakituinen asuinrakennus	1,0 / 1,0
R10	365760	6894968	112	vakituinen asuinrakennus	1,2 / 1,6



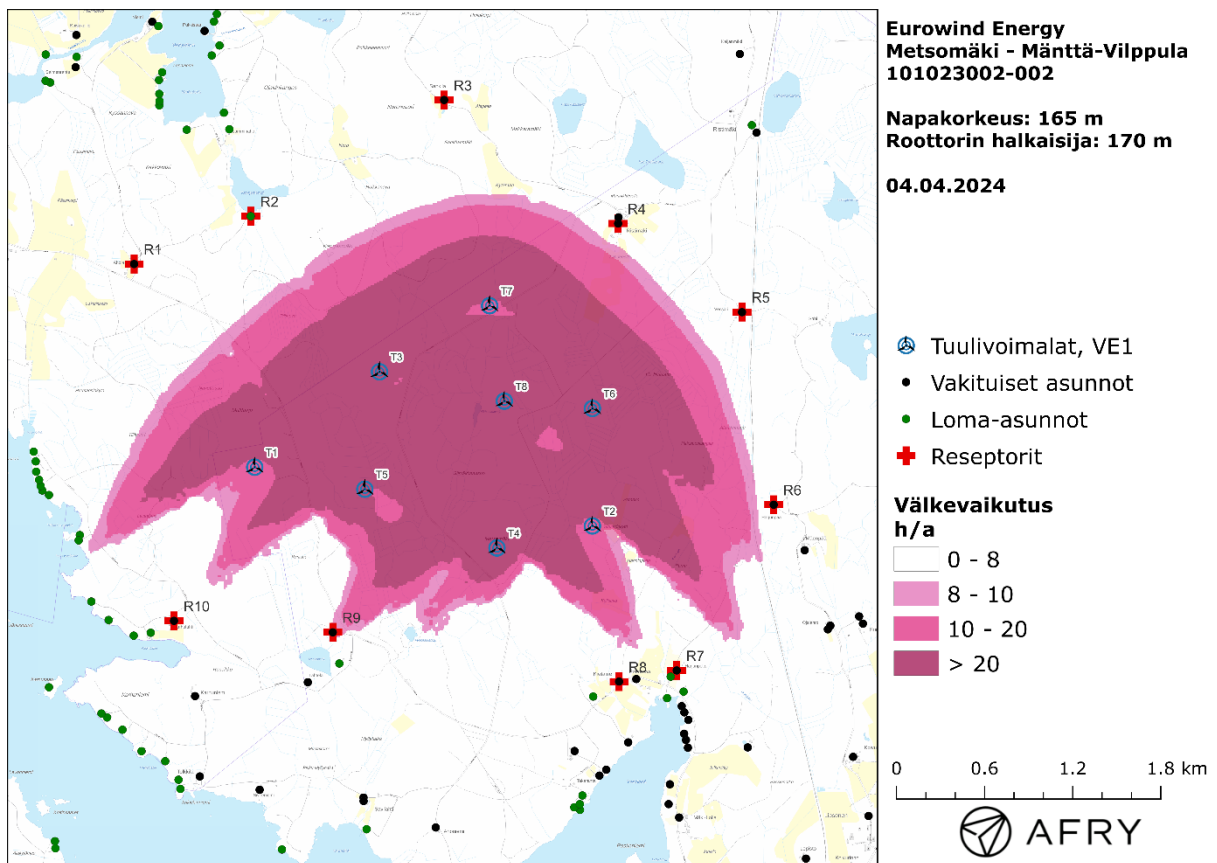
Kuva 3: Reseptoreiden paikat tuulivoimapaiston hankealueella sijoitussuunnitelmalla VE1.

3.2 Todennäköinen välkevaikutus

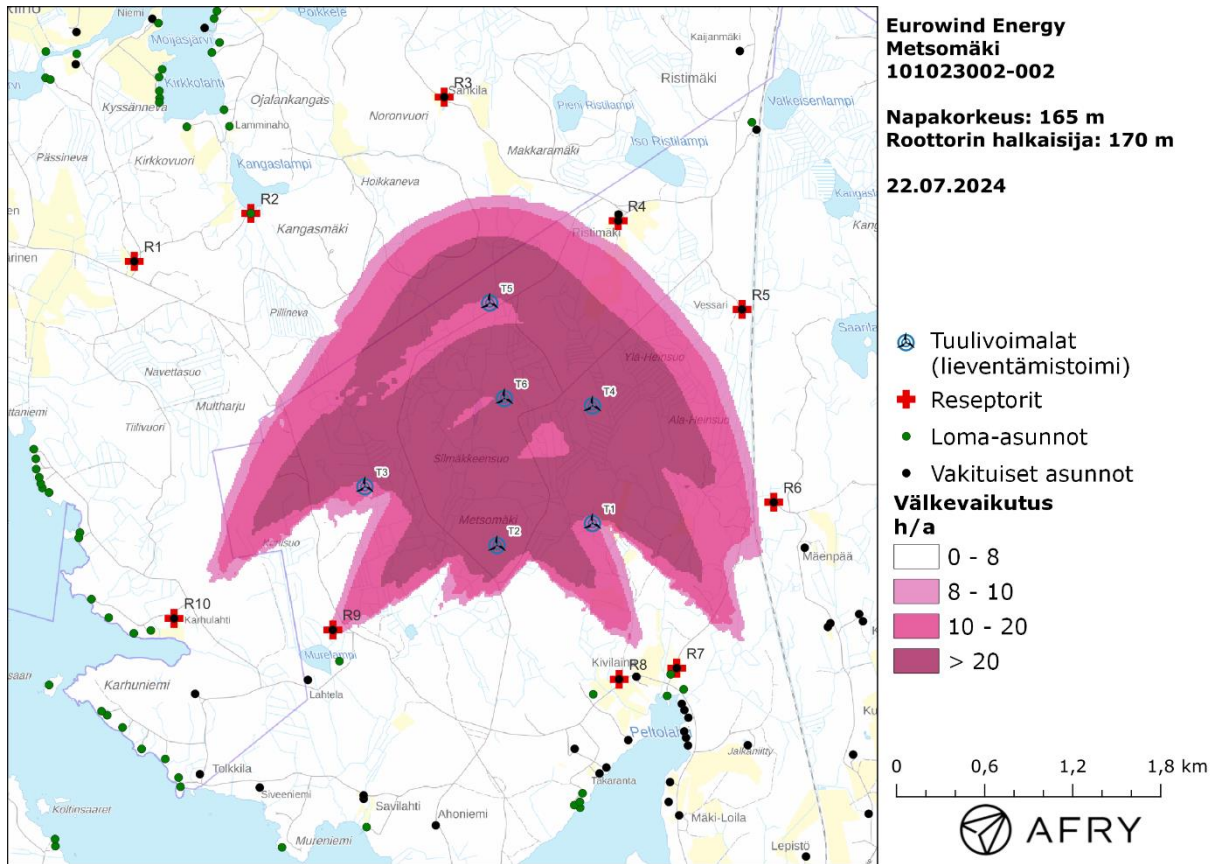
Mallinnetut arviot todennäköisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvina (Kuva 4 ja Kuva 5). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja.

Mallinnusten perusteella vuotuinen todennäköinen välkevaikutus ylittää 8 tunnin ohjearvon yhden lähialueen asuinrakennuksen kohdalla molemmilla sijoitussuunnitelmissa VE1 ja 6 voimalaa (lieventämistoimi). Päivakohtainen todennäköinen välkeaika alittaa 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen asuntojen kohdalla. Vuotuiset todennäköiset välkevaikutusajat ja suurimmat päiväkohtaiset maksimivälkkeet reseptorien kohdalla on lueteltu taulukoissa (Taulukko 6 ja Taulukko 7).

Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptorin R9 kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 8). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talvi-aika).



Kuva 4: Tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköisen välkkeen määrä ilman puuston vaikutusta sijoitussuunnitelmalla VE1.



Kuva 5: Tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköisen välkkeen määrä ilman puuston vaikutusta sijoitussuunnitelmalla 6 voimalaa (lieventämistoimi).

Taulukko 6: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptoreiden kohdilla sijoitussuunnitelmalla VE1.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välke aika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälke aika [min]
R1	1:12	3
R2	2:04	3
R3	1:50	3
R4	5:24	7
R5	3:19	7
R6	5:19	6
R7	2:54	6
R8	0:36	3
R9	8:30	9
R10	3:41	6

Taulukko 7: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptoreiden kohdilla sijoitussuunnitelmalla 6 voimalaa (lieventämistoimi).

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välke aika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälke aika [min]
R1	0:12	1
R2	0:30	2
R3	1:26	2
R4	5:04	7
R5	3:19	7
R6	5:19	6
R7	2:54	6
R8	0:36	3
R9	8:30	9
R10	3:41	6

Taulukko 8: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R9 kohdalla sijoitussuunnitelmilla VE1 ja 6 voimalaa (lieventämistoimi).

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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Huhtikuu	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
Toukokuu	0:00	0:00	2:11	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:11
Kesäkuu	0:00	0:42	1:57	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:39
Heinäkuu	0:00	0:21	2:56	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:17
Elokuu	0:00	0:00	0:23	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:23
Syyskuu	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
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	1:02	7:27	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	8:30

3.3 Teoreettinen välkevaikutus

Teoreettisen maksimivälkkeen vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukoissa (Taulukko 9 ja Taulukko 10). Mallinnusten perusteella teoreettinen vuotuinen välkeaika ylittää ohjearvon kolmen rakennuksen kohdalla sijoitussuunnitelmalla VE1 ja kahden rakennuksen kohdalla sijoitussuunnitelmalla 6 voimalaa (lieventämistoimi). Päiväkohtainen maksimivälkeaika ylittää ohjearvon neljän rakennuksen kohdalla molemmilla sijoitussuunnitelmilla, kun välkeajoja verrataan Saksan raja-arvoihin.

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. Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen reseptoreiden R4 ja R9 kohdalla on esitetty taulukoissa (Taulukko 11-Taulukko 13).

Taulukko 9: Vuotuinen teoreettinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptoreiden kohdilla sijoitussuunnitelmalla VE1.

Reseptori	Teoreettinen vuotuinen välkeaika [h:min]	Teoreettisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaika [min]
R1	10:28	20
R2	14:10	26
R3	34:48	45
R4	62:20	41
R5	25:28	33
R6	25:08	28
R7	12:08	22
R8	2:29	10
R9	34:14	37
R10	14:57	23

Taulukko 10: Vuotuinen teoreettinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptoreiden kohdilla sijoitussuunnitelmalla 6 voimalaa (lieventämistoimi).

Reseptori	Teoreettinen vuotuinen välkeaika [h:min]	Teoreettisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaika [min]
R1	1:40	10
R2	5:13	12
R3	26:38	32
R4	59:45	41
R5	25:28	33
R6	25:08	28
R7	12:08	22
R8	2:29	10
R9	34:14	37
R10	14:57	23

Taulukko 11: Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R4 kohdalla sijoitussuunnitelmalla VE1.

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	11:02	4:07	0:00	0:00	0:00	0:00	15:09
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:51	6:36	0:00	0:00	0:00	8:27
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:27	3:13	0:00	0:00	0:00	3:40
Huhtikuu	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
Toukokuu	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
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	0:00	0:00	0:00
Elokuu	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
Syyskuu	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
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	10:51	0:00	0:00	0:00	0:00	10:51
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	6:55	5:11	0:00	0:00	0:00	0:00	12:06
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	12:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	12:07
Yhteensä	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	30:04	22:28	9:49	0:00	0:00	0:00	62:20

Taulukko 12: Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R4 kohdalla sijoitussuunnitelmalla 6 voimalaa (lieventämistoimi).

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	11:02	4:07	0:00	0:00	0:00	0:00	15:09
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:51	5:18	0:00	0:00	0:00	7:10
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:27	3:13	0:00	0:00	0:00	3:40
Huhtikuu	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
Toukokuu	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
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	0:00	0:00	0:00
Elokuu	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
Syyskuu	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
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	9:33	0:00	0:00	0:00	0:00	9:33
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	6:55	5:11	0:00	0:00	0:00	0:00	12:06
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	12:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	12:07
Yhteensä	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	30:04	21:10	8:31	0:00	0:00	0:00	59:45

Taulukko 13: Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R9 kohdalla sijoitussuunnitelmilla VE1 ja 6 voimalaa (lieventämistoimi).

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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Huhtikuu	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
Toukokuu	0:00	0:00	8:29	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	8:29
Kesäkuu	0:00	2:52	8:19	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	11:11
Heinäkuu	0:00	1:20	11:36	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	12:56
Elokuu	0:00	0:00	1:38	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:38
Syyskuu	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
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	4:12	30:02	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	34:14

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Mänttä-Vilppulan alueelle suunnitellun Metsomäen tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arviointi on tehty sijoitussuunnitelmille VE1 (8 voimalaa) ja 6 voimalaa (lieventämistoimi), roottorin halkaisijalla 170 m ja napakorkeudella 165 m.

Välkevarjostusmallinnuksen mukaan vuotuinen todennäköinen välkevaikutus ylittää 8 tunnin ohjearvon yhden lähialueen asuinrakennuksen kohdalla molemmilla sijoitussuunnitelmissa. Todennäköinen päiväkohtainen välkeaika alittaa 30 minuutin ohjearvon kaikkien loma- ja asuinrakennusten kohdilla.

Välkevarjostusmallinnuksen mukaan vuotuinen teoreettinen maksimivälke ylittää Saksan 30 tunnin raja-arvon kolmen rakennuksen kohdalla sijoitussuunnitelmalla VE1 ja kahden rakennuksen kohdalla sijoitussuunnitelmalla 6 voimalaa (lieventämistoimi). Teoreettinen päiväkohtainen maksimivälkeaika ylittää 30 minuutin raja-arvon neljän rakennuksen kohdalla molemmilla sijoitussuunnitelmissa.

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 turbiinin aiheuttamien välketuntien määrä saadaan integroimalla tiheysfunktioita turbiinin roottorikehän läpinäkyvällä taivaanpallon osuudella. Turbiinien yhteisvaikutus saadaan summaamalla turbiinikohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämässä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen turbiinien eri orientaatioille, joita skaalataan suuntakohtaisilla tuulusuusosuuksilla.

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.

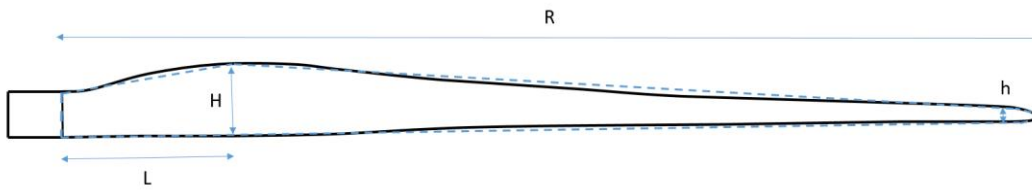
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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). Yleensä välkelaskennan 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 (Kuva 6) 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 turbiinin keskimääräinen leveys on määritetty parametrien H ja h keskiarvona.



Kuva 6: Turbiinin lavan malliprofiili.

Tämän raportin välkелaskennassa käytetään turbiinivalmistajan 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 välkелaskennassa huomioidaan turbiinin 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 kustnära vattenområden, 2009.
- [3] P. Jokinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta ja merestä 1990-2020, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2021:8.
- [4] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päiväys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016.