



Pohjan Voima Oy

Moskuankankaan tuulivoimahankkeen välkeselvitys, VE1

101021203-006

Tekijä
AFRY Finland Oy
Kalle Auvinen

E-mail
kalle.auvinen@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
002

Asiakas
Pohjan Voima Oy
Sami Merelä

Päivämäärä
15/03/2024

Projektinumero
101021203-006

Raportin tila
VALMIS

Moskuankankaan tuulivoimahankkeen välkeselvitys, VE1

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	11.10.2023/ Kalle Auvinen, Technical Consultant	11.10.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen (Raportti 101021203-006.001)
002	15.03.2024/ Kalle Auvinen, Technical Consultant	15.03.2024/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Hallakallion voimalakoordinaatit lisätty raporttiin (Raportti 101021203-006.002)

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>.

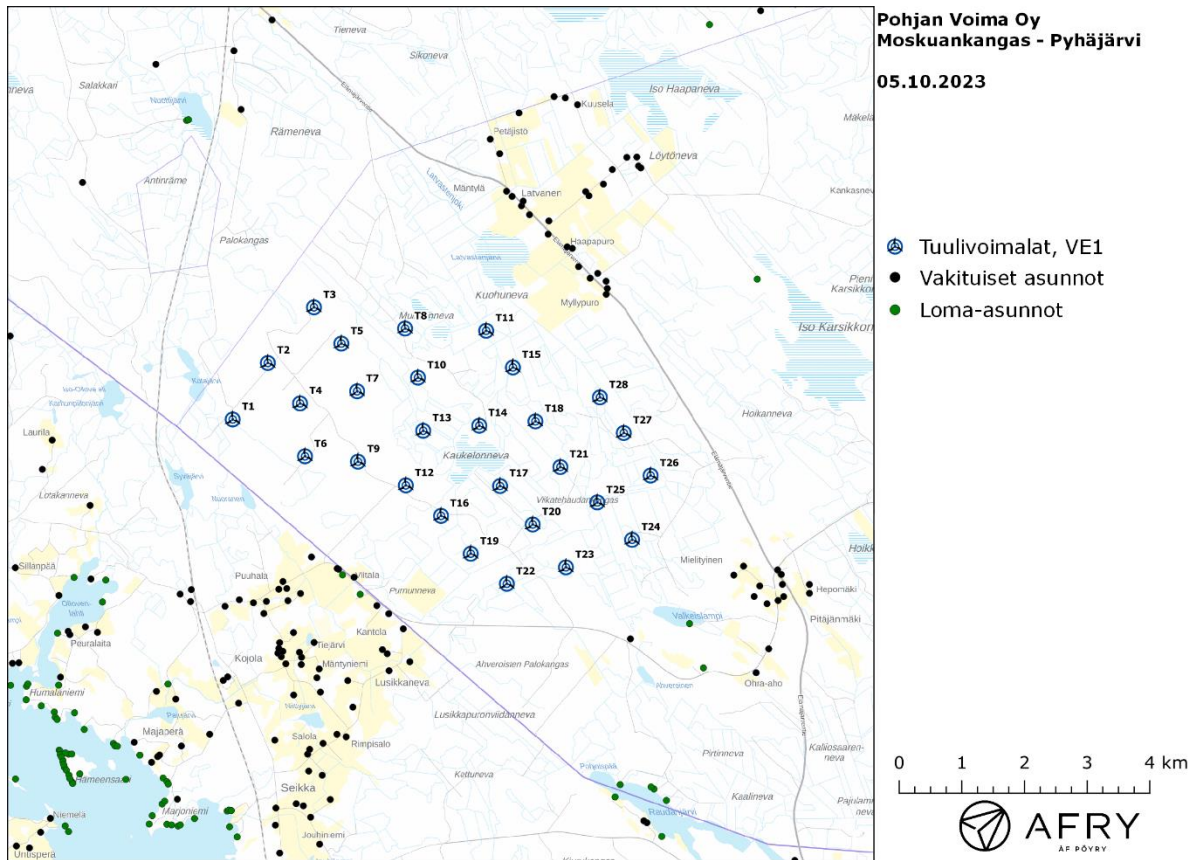
Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	6
2.1	Välkevaikutus.....	6
2.2	Välkkeen rajoittaminen.....	6
2.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	6
2.4	Ohjeavot	7
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	8
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	8
3.2	Välkevaikutus.....	12
3.3	Moskuankankaan, Hallakallion ja Pajuperänsäntankaan yhteisvaikutus	14
4	Yhteenveto	18
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	19
6	Viitteet	21

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Pyhäjärven kunnan alueelle suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Moskuankankaan tuulivoimapuistolle käytetään 28 voimalan sijoittelusuunnitelmaa VE1. Voimaloiden sijainnit on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1). Mallinuksissa voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 200.

Selvityksessä arvioidaan myös Moskuankankaan sekä läheisten Pajuperänselän (rakenteilla) ja Hallakallion (suunnitteilla) tuulivoimapuistojen välkkeiden yhteisvaikutuksia



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Moskuankankaan hankealueella.

Taulukko 1: Tuulivoimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiini-paikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	418894	7051545	128
T2	419455	7052445	155
T3	420191	7053333	156
T4	419969	7051800	159
T5	420628	7052755	158
T6	420048	7050957	144
T7	420880	7051994	156
T8	421645	7052995	145
T9	420893	7050871	144
T10	421851	7052212	150
T11	422939	7052959	140
T12	421657	7050493	143
T13	421934	7051364	147
T14	422829	7051445	145
T15	423366	7052374	140
T16	422219	7050007	138
T17	423161	7050483	145
T18	423725	7051514	143
T19	422693	7049403	138
T20	423682	7049869	148
T21	424123	7050786	146
T22	423269	7048924	142
T23	424212	7049186	156
T24	425268	7049625	155
T25	424712	7050222	153
T26	425563	7050650	150
T27	425135	7051329	145
T28	424754	7051897	141

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 iltatimet). 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 perustuu todennäköisen tilanteen mallinnukseen.

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 välkevaikutus edustaa todennäköistä tilannetta perustuen auringonpaisteen ja tuulisuuden tilastolliseen aineistoon. Yksittäisen vuoden sääolosuhteet saattavat poiketa merkittävästi keskimääräisistä olosuhteista, jolloin vuotuinen välkevaikutus voi poiketa mallinnetusta arvosta.

Puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Puuston näkyvyyttä peittävä vaikutus vaihtelee kuitenkin vuosien ja vuodenaikojen suhteen, mikä lisää arvioinnin epävarmuutta. Mallinnuksen tuloksiin vaikuttaa myös käytettävien tausta-aineistojen tarkkuus ja mallintamisessa on tehtävä yleistäyksiä liittyen puuston tiheyteen ja korkeuteen.

Rakennuksiin kohdistuvan välkkeen laskennassa käytetään ns. kasvihuone-oletusta, jolloin rakennukseen kohdistuva välkevaikutus huomioidaan riippumatta suunnasta. Todellisuudessa 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 selvityksessä välkeaikoja verrataan Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvoihin.

3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola -mallinnus-ohjelmistolla, joka huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoima-alueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuuliturbiinien dimensiot. Laskennan tuloksena saadaan tietoa 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. Auringon-paistekulman 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 Moskuankankaan voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lapaprofiilina on käytetty voimalatyyppin Vestas V162 valmistajan ilmoittamaa tarkkaa lavan profiilitietoa skaalattuna roottorin halkaisijalle 200 m. Lapaprofiilia on skaalattu sekä pidemmäksi että leveämmäksi. Skaalatun lavan maksimileveys on 4,6 m. 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 välikkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua väiketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [1] 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 200 m, ja sen perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet turbiinin käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 2).

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

Taulukko 2: Suuntasektoriokohtaiset 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	0,174	0,167	0,157	0,147	0,129	0,168

Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Siilinjärven sääasemalla.

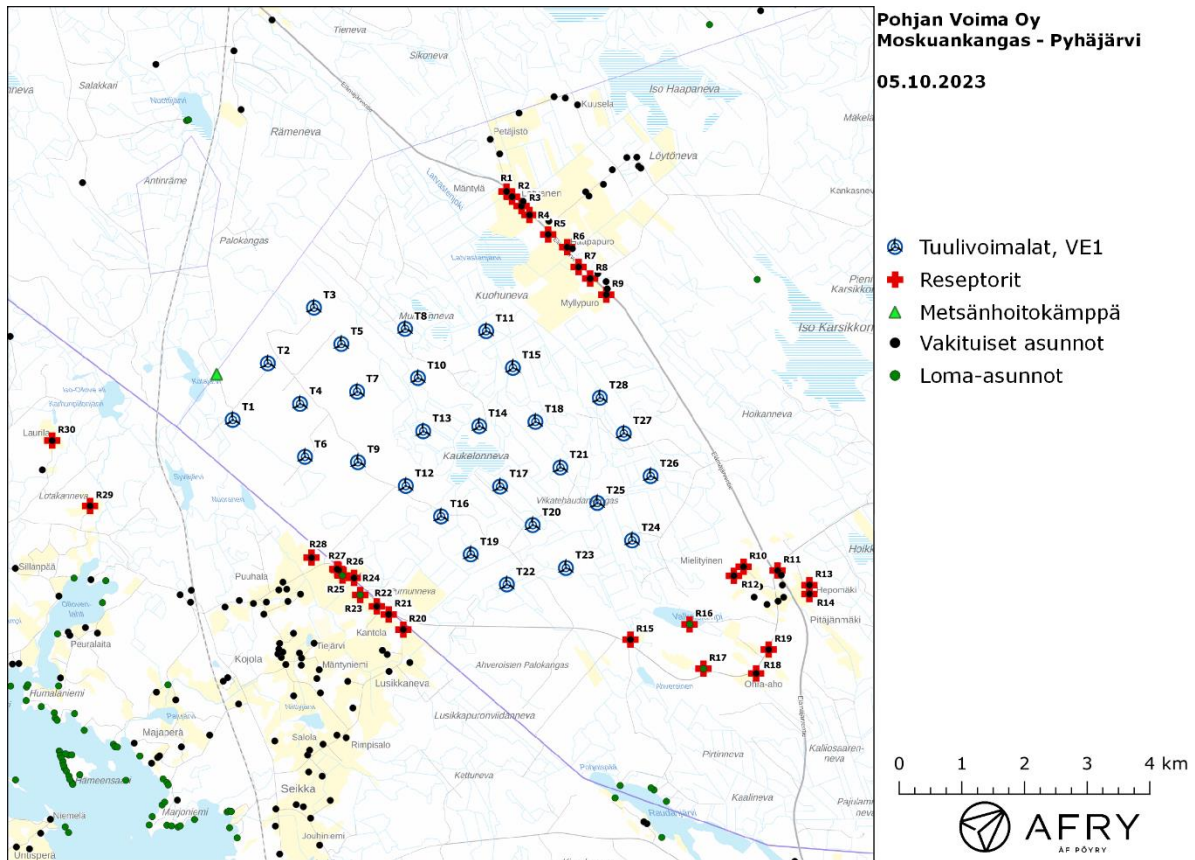
Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,154
Helmikuu	0,262
Maaliskuu	0,332
Huhtikuu	0,432
Toukokuu	0,454
Kesäkuu	0,424
Heinäkuu	0,456
Elokuu	0,406
Syyskuu	0,299
Lokakuu	0,186
Marraskuu	0,108
Joulukuu	0,082

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 30 vertailurakennusta, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Rakennukset sijaitsevat noin 1,5–3,0 km etäisyydellä voimaloista.

Moskuankankaan länsipuolella, noin 800 m voimalan T1 pohjoispuolella sijaitsee yksi loma-asunnoksi luokiteltu kiinteistö. Asiakkaalta tulleen tiedon mukaan, kyseinen kiinteistö on rakennusluvan puolesta todellisuudessa metsänhoitokämpä, eikä kiinteistöä ole otettu tästä syystä välkevaikutusten arvioinnissa huomioon.

Taulukko 4: Vertailupisteiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	423266	7055182	140	vakituinen asunto
R2	423354	7055098	139	vakituinen asunto
R3	423504	7054949	139	vakituinen asunto
R4	423632	7054807	140	vakituinen asunto
R5	423929	7054496	139	vakituinen asunto
R6	424233	7054294	139	vakituinen asunto
R7	424415	7053979	140	vakituinen asunto
R8	424599	7053795	141	vakituinen asunto
R9	424857	7053538	143	vakituinen asunto
R10	427048	7049203	216	vakituinen asunto
R11	427591	7049143	192	vakituinen asunto
R12	426892	7049059	210	vakituinen asunto
R13	428099	7048911	198	vakituinen asunto
R14	428099	7048770	194	vakituinen asunto
R15	425243	7048043	162	vakituinen asunto
R16	426186	7048286	162	loma-asunto
R17	426407	7047580	199	loma-asunto
R18	427249	7047503	189	vakituinen asunto
R19	427450	7047884	191	vakituinen asunto
R20	421618	7048203	131	vakituinen asunto
R21	421386	7048444	133	vakituinen asunto
R22	421195	7048572	131	vakituinen asunto
R23	420929	7048754	128	loma-asunto
R24	420833	7049026	126	vakituinen asunto
R25	420648	7049063	125	loma-asunto
R26	420585	7049153	127	vakituinen asunto
R27	420563	7049165	127	vakituinen asunto
R28	420153	7049349	128	vakituinen asunto
R29	416620	7050172	128	vakituinen asunto
R30	416015	7051213	128	vakituinen asunto



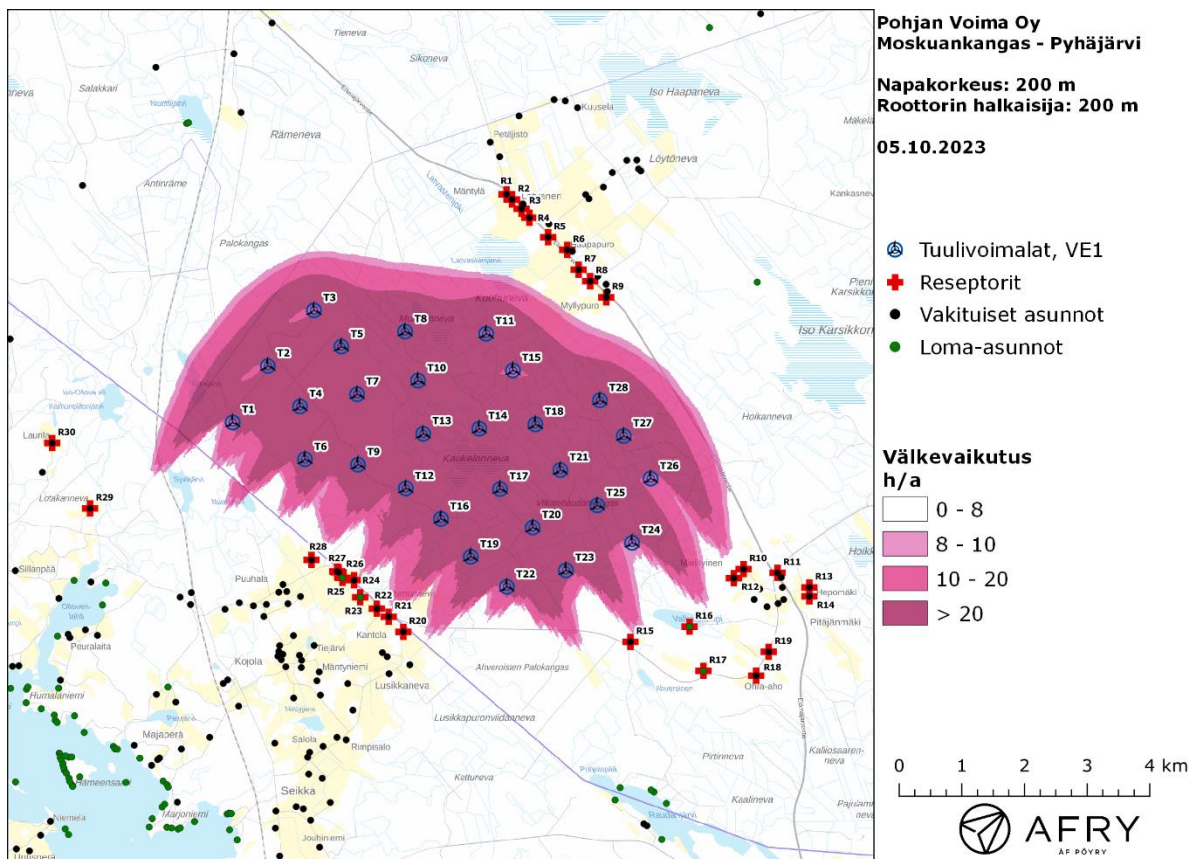
Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

3.2 Välkevaikutus

Mallinnetut arviot todennäköisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3). 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 todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon, ja todennäköinen päiväkohtainen maksimivälke aika alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon, kaikkien lähialueen loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla. Vuotuinen teoreettinen maksimivälke alittaa Saksan 30 tunnin raja-arvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla, mutta päiväkohtainen teoreettinen maksimivälke aika ylittää Saksan 30 minuutin raja-arvon 3 vakituisten asuinrakennuksen kohdalla.

Taulukossa (Taulukko 5) on lueteltu todennäköinen välkevaikutus ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla, sekä vuotuisena tuntimääränä että suurimpana päiväkohtaisena arvona. Todennäköisen välkevaikutuksen tarkempi ajoittuminen reseptorien R21 ja R24 kohdilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 6) ja (Taulukko 7). Taulukoissa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 3: Tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköinen välketuntien määrä ilman puuston vaikutusta.

Taulukko 5: Taulukossa on esitetty vuotuinen välkeaika ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo reseptoripisteissä, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaika [min]	Teoreettinen vuotuinen maksimivälkeaika [h:min]	Teoreettinen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaika [min]
R1	0:24	1	4:56	12
R2	0:26	1	5:22	14
R3	0:30	2	5:57	15
R4	0:49	2	9:59	19
R5	1:09	3	11:41	20
R6	1:22	3	13:01	17
R7	1:51	3	17:03	20
R8	2:19	3	21:24	29
R9	2:57	3	28:01	33
R10	2:28	5	9:38	18
R11	0:19	2	1:26	9
R12	3:53	6	15:20	23
R13	0:00	0	0:00	0
R14	0:00	0	0:00	0
R15	3:46	8	15:05	32
R16	0:52	3	3:32	13
R17	0:00	0	0:00	0
R18	0:00	0	0:00	0
R19	0:00	0	0:00	0
R20	1:57	6	7:37	22
R21	6:24	9	24:12	32
R22	3:49	7	14:45	24
R23	2:42	5	10:57	18
R24	6:21	7	24:17	26
R25	3:24	5	13:02	20
R26	2:44	6	10:42	22
R27	2:34	5	10:06	19
R28	4:21	6	16:29	22
R29	0:00	0	0:00	0
R30	0:00	0	0:00	0

Taulukko 6: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R21 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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Huhtikuu	0:00	0:00	0:34	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:34
Toukokuu	0:00	0:11	0:41	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:52
Kesäkuu	0:00	0:13	2:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:17
Heinäkuu	0:00	0:00	2:09	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:09
Elokuu	0:00	0:00	0:32	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:32
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	0:23	6:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	6:24

Taulukko 7: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R24 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	0:02	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:02
Huhtikuu	0:00	0:00	0:36	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:43
Toukokuu	0:00	0:01	0:54	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:55
Kesäkuu	0:00	0:00	1:57	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:57
Heinäkuu	0:00	0:00	2:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:04
Elokuu	0:00	0:00	0:34	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:34
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:06
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	0:01	6:04	0:15	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	6:21

3.3 Moskuankankaan, Hallakallion ja Pajuperänsankaan yhteisvaikutus

Tässä luvussa arvioidaan Moskuankankaan voimaloiden ja läheisyyteen suunnitellun Hallakallion ja rakenteilla olevan Pajuperänsankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutuksia. Hallakallion tuulivoimapuistoon on suunniteltu enintään 28 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 4,7 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista. Pajuperänsankaan tuulivoimapuistoon on rakenteilla 14 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 7,4 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista.

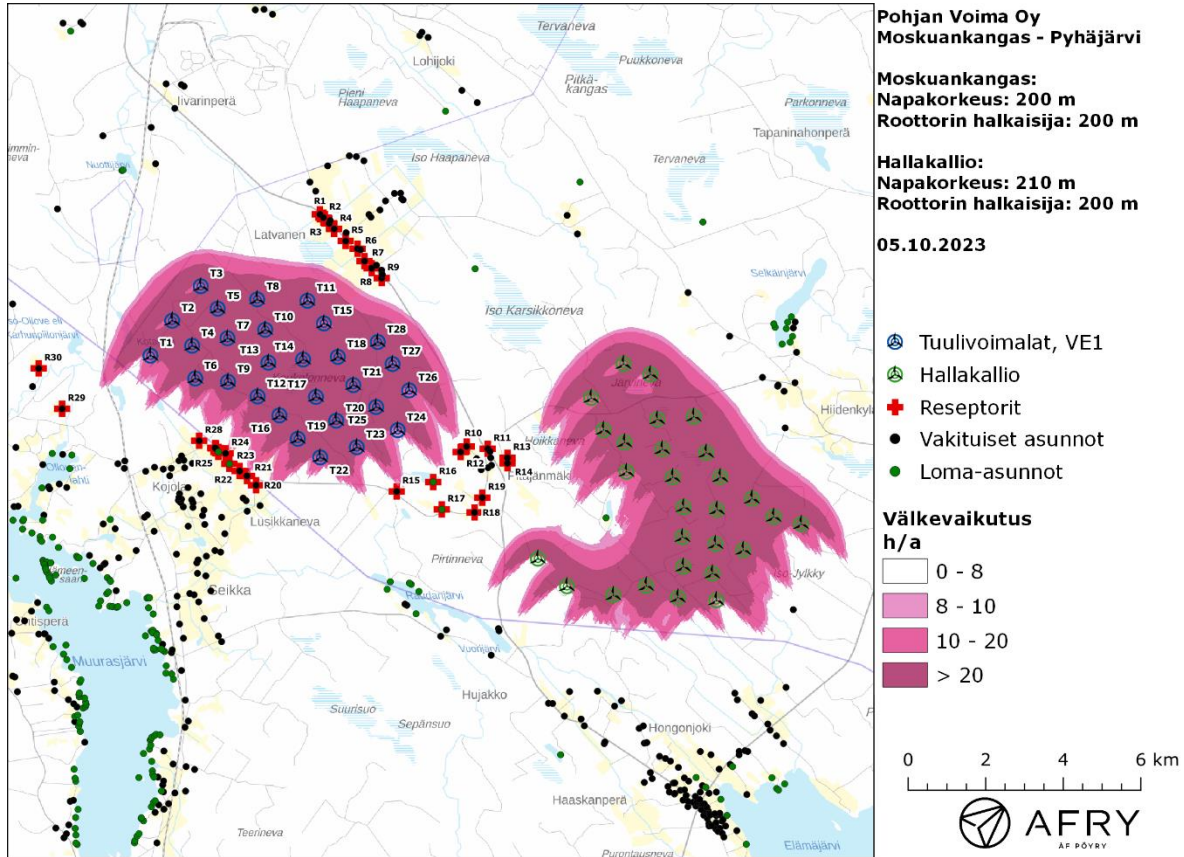
Moskuankankaan sekä Pajuperänsankaan tuulivoimapuistot ovat riittävän etäällä toisistaan, jotta ne eivät aiheuta yhteisvaikutuksia näiden tuulivoimapuistojen välissä sijaitsevalle asutukselle. Riittää siis tarkastella pelkästään Moskuankankaan sekä Hallakallion voimaloiden väliseen yhteisvaikutuksia. Hallakallion hankekehittäjän (YIT Suomi Oy) verkkosivuillaan jakamien tietojen mukaan, Hallakallioon suunnitellaan korkeintaan 310 m kokonaiskorkeuden voimaloita. Vätkemallinnuksessa Hallakallion voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 210 m. Hallakallion voimaloilla on käytetty samaa lapaprofiilia ja roottorin halkaisijaa kuin Moskuankankaan voimaloilla. Hallakallion voimaloiden koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 8).

Taulukko 8: Hallakallion voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus voimalapaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
H01	431088	7051329	168
H02	431779	7051064	168
H03	432899	7049975	165
H04	433219	7049043	158
H05	433583	7048416	163
H06	434401	7047858	178
H07	434959	7047391	166
H08	431960	7049903	172
H09	432087	7049133	173
H10	432357	7048412	162
H11	432637	7047640	154
H12	433498	7047578	152
H13	430574	7049631	186
H14	431115	7049309	180
H15	432609	7046872	166
H16	433458	7046695	151
H17	434177	7046539	156
H18	432629	7046106	162
H19	433379	7045931	149
H20	431674	7045617	155
H21	432492	7045311	146
H22	433480	7045242	150
H23	429630	7045604	153
H24	430826	7045372	160
H25	435671	7047205	165
H26	430255	7050454	185
H27	431166	7048552	188
H28	428881	7046314	155

Moskuankankaan ja Hallakallion todennäköisen välkkeen yhteisvaikutusten mallinnus on esitetty karttakuvana (Kuva 4). Todennäköiset väleajat ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla on listattu taulukossa (Taulukko 9). Mallinnusten perusteella Moskuankankaan ja Hallakallion voimaloista aiheutuu vain vähäisiä välkkeen yhteisvaikutuksia asutukselle. Ainoat muutokset todennäköisessä välevaikutuksessa sekä teoreettisessa maksimivälkevaikutuksessa kohdistuvat

reseptoreihin R18 ja R19, joissa vuotuinen todennäköinen välkevaikutus kasvaa 28 minuutilla ja 25 minuutilla. Moskuankankaan voimalat eivät aiheuta välkevaikutuksia kyseisiin reseptoripisteisiin, ja välkeajat aiheutuvat pelkästään Hallakallion voimaloista. Moskuankankaan ja Hallakallion yhteisvaikutuksista ei aiheudu välkkeen ohjearvojen ylityksiä.



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan sekä Hallakallion voimalat.

Taulukko 9: Välkeajat reseptoripisteissä, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan sekä Hallakallion voimalat. Taulukossa on esitetty vuotuinen välkeaja ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo reseptoripisteissä, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaja [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaja [min]	Teoreettinen vuotuinen maksimivälkeaja [h:min]	Teoreettinen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaja [min]
R1	0:24	1	4:56	12
R2	0:26	1	5:22	14
R3	0:30	2	5:57	15
R4	0:49	2	9:59	19
R5	1:09	3	11:41	20
R6	1:22	3	13:01	17
R7	1:51	3	17:03	20
R8	2:19	3	21:24	29
R9	2:57	3	28:01	33
R10	2:28	5	9:38	18
R11	0:19	2	1:26	9
R12	3:53	6	15:20	23
R13	0:00	0	0:00	0
R14	0:00	0	0:00	0
R15	3:46	8	15:05	32
R16	0:52	3	3:32	13
R17	0:00	0	0:00	0
R18	0:28	2	3:29	14
R19	0:25	2	3:13	14
R20	1:57	6	7:37	22
R21	6:24	9	24:12	32
R22	3:49	7	14:45	24
R23	2:42	5	10:57	18
R24	6:21	7	24:17	26
R25	3:24	5	13:02	20
R26	2:44	6	10:42	22
R27	2:34	5	10:06	19
R28	4:21	6	16:29	22
R29	0:00	0	0:00	0
R30	0:00	0	0:00	0

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Pyhäjärven kunnan alueella suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Moskuankankaan tuulivoimapuistolle on käytetty 28 voimalan sijoittelusuunnitelmaa VE1. Välkevaikutusten arviointi on tehty roottorin halkaisijalla 200 m ja napakorkeudella 200 m. Selvityksessä on arvioitu myös Moskuankankaan ja läheisen rakenteilla olevan Pajuperänkankaan sekä suunnitteilla olevan Hallakallion tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutuksia.

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja, ja ympäristöministeriö suosittelee käyttämään muiden maiden ohjearvoja. Mallinnusten mukaan todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin, ja Tanskan 10 tunnin, ohjearvon alueen kaikkien loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla. Myös todennäköinen päiväkohtainen maksimivälkeaika alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon alueen kaikkien loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla. Teoreettinen vuotuinen maksimivälke jää alle Saksan 30 tunnin raja-arvon alueen kaikkien loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla, mutta päiväkohtainen teoreettinen maksimivälkeaika ylittää Saksan 30 minuutin raja-arvon 3 vakituisten asuinrakennuksen kohdalla.

5 Välkevaikutuksen laskentamenetelmä

Välkevaikutuksen laskennassa hyödynnetään taivaanpallon käsittelyä, 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 tuulisuusosuuksilla.

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.

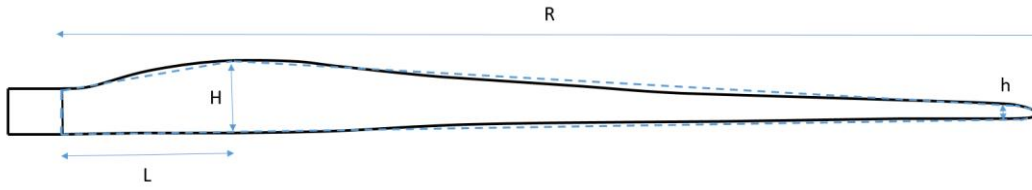
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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 5) 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 5: Turbiinin lavan malliprofiili.

Tämän raportin välkelaskennassa käytetään turbiinivalmistajan ilmoittamaa lavan profiilitietoa. 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.

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. Pirinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.
- [4] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päiväys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016.



Pohjan Voima Oy

Moskuankankaan tuulivoimahankkeen välkeselvitys, VE2

101021203-006

Tekijä
AFRY Finland Oy
Kalle Auvinen

E-mail
kalle.auvinen@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
002

Asiakas
Pohjan Voima Oy
Sami Merelä

Päivämäärä
15/03/2024

Projektinumero
101021203-006

Raportin tila
VALMIS

Moskuankankaan tuulivoimahankkeen välkeselvitys, VE2

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	11.10.2023/ Kalle Auvinen, Technical Consultant	11.10.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen (Raportti 101021203-006.001)
002	15.03.2024/ Kalle Auvinen, Technical Consultant	15.03.2024/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Hallakallion voimalakoordinaatit lisätty raporttiin (Raportti 101021203-006.002)

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>.

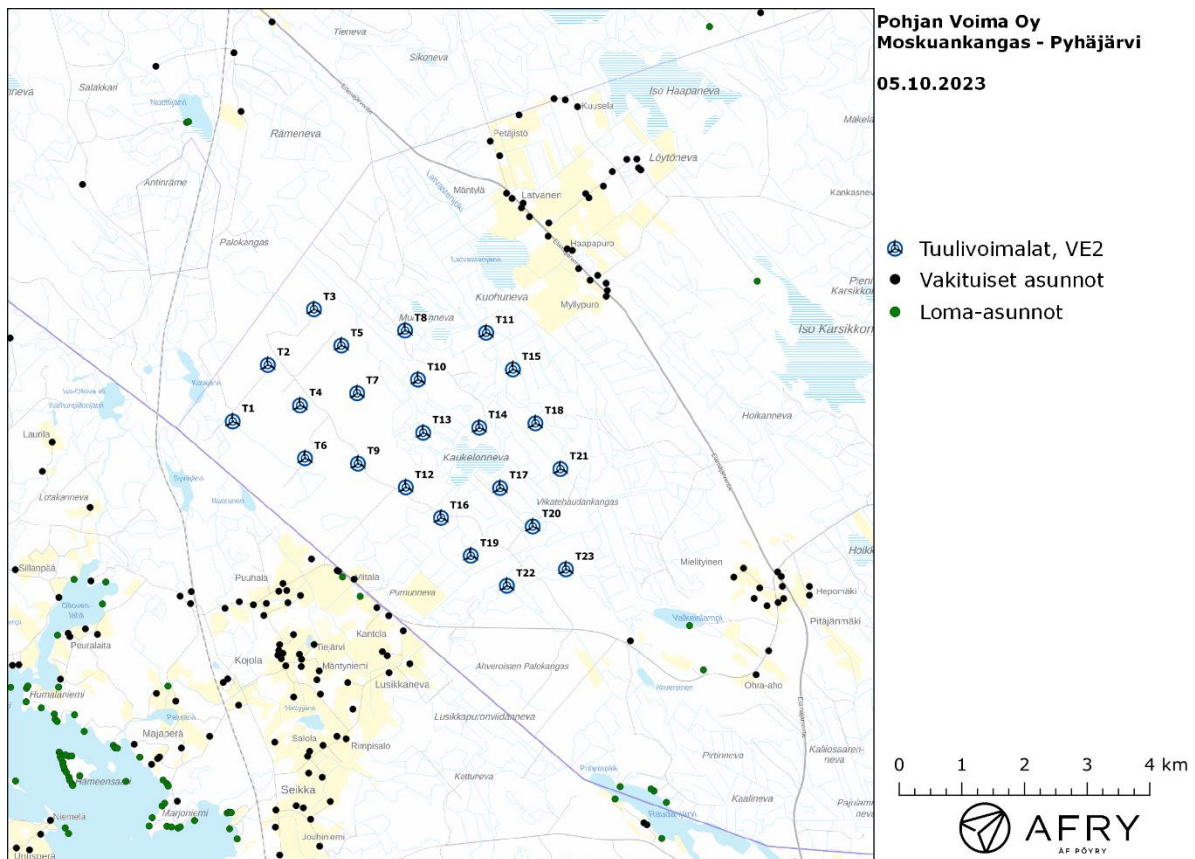
Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	6
2.1	Välkevaikutus.....	6
2.2	Välkkeen rajoittaminen.....	6
2.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	6
2.4	Ohjeavot	7
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	8
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	8
3.2	Välkevaikutus.....	12
3.3	Moskuankankaan, Hallakallion ja Pajuperänsäntankaan yhteisvaikutus	14
4	Yhteenveto	18
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	19
6	Viitteet	21

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Pyhäjärven kunnan alueelle suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Moskuankankaan tuulivoimapuistolle käytetään 23 voimalan sijoittelusuunnitelmaa VE2. Voimaloiden sijainnit on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1). Mallinuksissa voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 200.

Selvityksessä arvioidaan myös Moskuankankaan sekä läheisten Pajuperänkankaan (rakenteilla) ja Hallakallion (suunnitteilla) tuulivoimapuistojen välkkeiden yhteisvaikutuksia



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Moskuankankaan hankealueella.

Taulukko 1: Tuulivoimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiini-paikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	418894	7051545	128
T2	419455	7052445	155
T3	420191	7053333	156
T4	419969	7051800	159
T5	420628	7052755	158
T6	420048	7050957	144
T7	420880	7051994	156
T8	421645	7052995	145
T9	420893	7050871	144
T10	421851	7052212	150
T11	422939	7052959	140
T12	421657	7050493	143
T13	421934	7051364	147
T14	422829	7051445	145
T15	423366	7052374	140
T16	422219	7050007	138
T17	423161	7050483	145
T18	423725	7051514	143
T19	422693	7049403	138
T20	423682	7049869	148
T21	424123	7050786	146
T22	423269	7048924	142
T23	424212	7049186	156

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 iltatimet). 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 välkelaskenta perustuu todennäköisen tilanteen mallinnukseen.

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 välkevaikutus edustaa todennäköistä tilannetta perustuen auringonpaisteen ja tuulisuuden tilastolliseen aineistoon. Yksittäisen vuoden sääolosuhteet saattavat poiketa merkittävästi keskimääräisistä olosuhteista, jolloin vuotuinen välkevaikutus voi poiketa mallinnetusta arvosta.

Puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Puuston näkyvyyttä peittävä vaikutus vaihtelee kuitenkin vuosien ja vuodenaikojen suhteen, mikä lisää arvioinnin epävarmuutta. Mallinnuksen tuloksiin vaikuttaa myös käytettävien tausta-aineistojen tarkkuus ja mallintamisessa on tehtävä yleistäyksiä liittyen puuston tiheyteen ja korkeuteen.

Rakennuksiin kohdistuvan välkkeen laskennassa käytetään ns. kasvihuone-oletusta, jolloin rakennukseen kohdistuva välkevaikutus huomioidaan riippumatta suunnasta. Todellisuudessa 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 selvityksessä välkeajoja verrataan Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvoihin.

3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola -mallinnus-ohjelmistolla, joka huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoima-alueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuuliturbiinien dimensiot. Laskennan tuloksena saadaan tietoa 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. Auringon-paistekulman 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 Moskuankankaan voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lapaprofiilina on käytetty voimalatyyppin Vestas V162 valmistajan ilmoittamaa tarkkaa lavan profiilitietoa skaalattuna roottorin halkaisijalle 200 m. Lapaprofiilia on skaalattu sekä pidemmäksi että leveämmäksi. Skaalatun lavan maksimileveys on 4,6 m. 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 välkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua väketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [1] 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 200 m, ja sen perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet turbiinin käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 2).

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

Taulukko 2: Suuntasektoriokohtaiset 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	0,174	0,167	0,157	0,147	0,129	0,168

Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Siilinjärven sääasemalla.

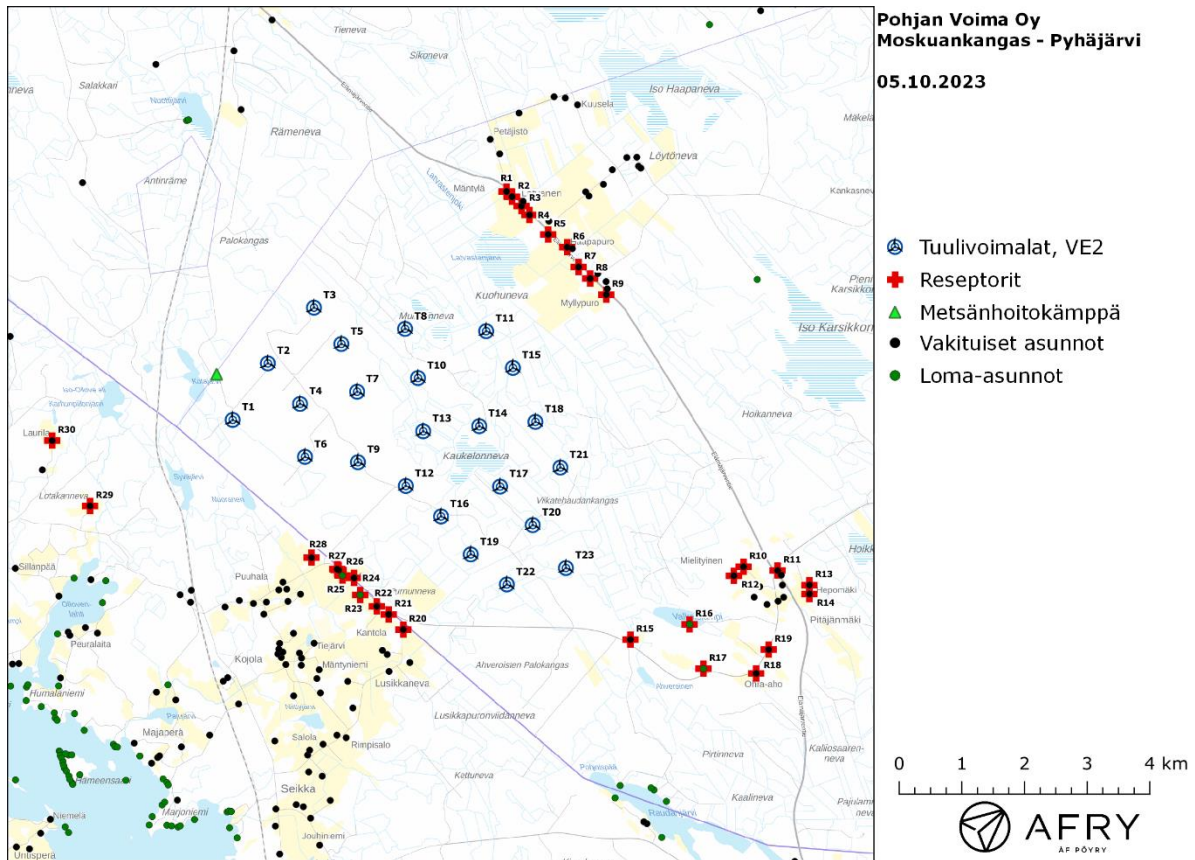
Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,154
Helmikuu	0,262
Maaliskuu	0,332
Huhtikuu	0,432
Toukokuu	0,454
Kesäkuu	0,424
Heinäkuu	0,456
Elokuu	0,406
Syyskuu	0,299
Lokakuu	0,186
Marraskuu	0,108
Joulukuu	0,082

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 30 vertailurakennusta, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Rakennukset sijaitsevat noin 1,5–3,9 km etäisyydellä voimaloista.

Moskuankankaan länsipuolella, noin 800 m voimalan T1 pohjoispuolella sijaitsee yksi loma-asunnoksi luokiteltu kiinteistö. Asiakkaalta tulleen tiedon mukaan, kyseinen kiinteistö on rakennusluvan puolesta todellisuudessa metsänhoitokämpä, eikä kiinteistöä ole otettu tästä syystä välkevaikutusten arvioinnissa huomioon.

Taulukko 4: Vertailupisteiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	423266	7055182	140	vakituinen asunto
R2	423354	7055098	139	vakituinen asunto
R3	423504	7054949	139	vakituinen asunto
R4	423632	7054807	140	vakituinen asunto
R5	423929	7054496	139	vakituinen asunto
R6	424233	7054294	139	vakituinen asunto
R7	424415	7053979	140	vakituinen asunto
R8	424599	7053795	141	vakituinen asunto
R9	424857	7053538	143	vakituinen asunto
R10	427048	7049203	216	vakituinen asunto
R11	427591	7049143	192	vakituinen asunto
R12	426892	7049059	210	vakituinen asunto
R13	428099	7048911	198	vakituinen asunto
R14	428099	7048770	194	vakituinen asunto
R15	425243	7048043	162	vakituinen asunto
R16	426186	7048286	162	loma-asunto
R17	426407	7047580	199	loma-asunto
R18	427249	7047503	189	vakituinen asunto
R19	427450	7047884	191	vakituinen asunto
R20	421618	7048203	131	vakituinen asunto
R21	421386	7048444	133	vakituinen asunto
R22	421195	7048572	131	vakituinen asunto
R23	420929	7048754	128	loma-asunto
R24	420833	7049026	126	vakituinen asunto
R25	420648	7049063	125	loma-asunto
R26	420585	7049153	127	vakituinen asunto
R27	420563	7049165	127	vakituinen asunto
R28	420153	7049349	128	vakituinen asunto
R29	416620	7050172	128	vakituinen asunto
R30	416015	7051213	128	vakituinen asunto



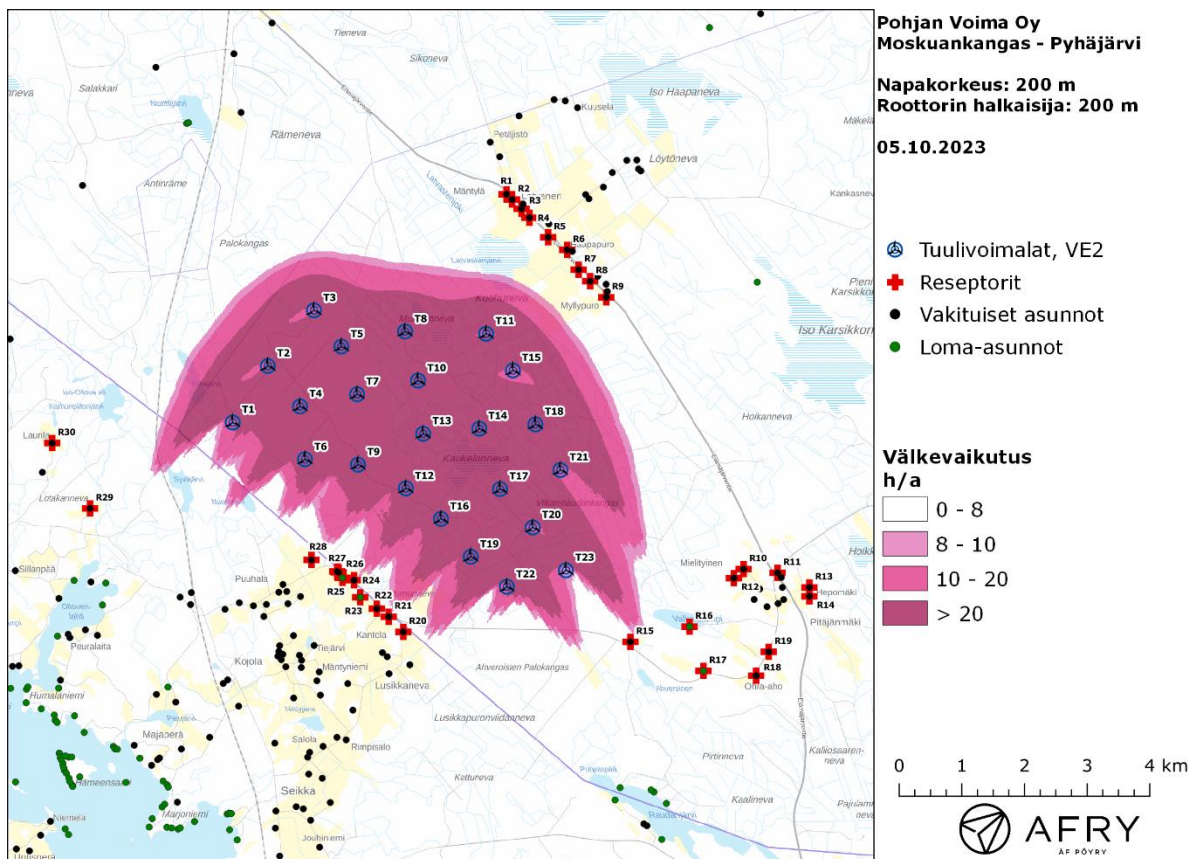
Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

3.2 Välkevaikutus

Mallinnetut arviot todennäköisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3). 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 todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon, ja todennäköinen päiväkohtainen maksimivälke aika jää alle Ruotsin 30 minuutin ohjearvon kaikkien lähialueen loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla. Vuotuinen teoreettinen maksimivälke alittaa Saksan 30 tunnin raja-arvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla, mutta päiväkohtainen teoreettinen maksimivälke aika ylittää Saksan 30 minuutin raja-arvon 2 vakituisten asuinrakennuksen kohdalla.

Taulukossa (Taulukko 5) on lueteltu todennäköinen välkevaikutus ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla, sekä vuotuisena tuntimääränä että suurimpana päiväkohtaisena arvona. Todennäköisen välkevaikutuksen tarkempi ajoittuminen reseptorien R21 ja R24 kohdilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 6) ja (Taulukko 7). Taulukoissa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 3: Tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköinen välketuntien määrä ilman puuston vaikutusta.

Taulukko 5: Taulukossa on esitetty vuotuinen välkeaika ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo reseptoripisteissä, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaika [min]	Teoreettinen vuotuinen maksimivälkeaika [h:min]	Teoreettinen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaika [min]
R1	0:24	1	4:56	12
R2	0:26	1	5:22	14
R3	0:30	2	5:57	15
R4	0:49	2	9:59	19
R5	1:09	3	11:41	20
R6	1:08	3	10:12	17
R7	1:23	3	11:19	20
R8	1:37	3	12:41	17
R9	1:26	3	10:46	16
R10	0:00	0	0:00	0
R11	0:00	0	0:00	0
R12	0:00	0	0:00	0
R13	0:00	0	0:00	0
R14	0:00	0	0:00	0
R15	3:46	8	15:05	32
R16	0:43	3	2:56	13
R17	0:00	0	0:00	0
R18	0:00	0	0:00	0
R19	0:00	0	0:00	0
R20	1:57	6	7:37	22
R21	6:24	9	24:12	32
R22	3:49	7	14:45	24
R23	2:42	5	10:57	18
R24	6:21	7	24:17	26
R25	3:24	5	13:02	20
R26	2:44	6	10:42	22
R27	2:34	5	10:06	19
R28	4:21	6	16:29	22
R29	0:00	0	0:00	0
R30	0:00	0	0:00	0

Taulukko 6: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R21 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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Huhtikuu	0:00	0:00	0:34	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:34
Toukokuu	0:00	0:11	0:41	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:52
Kesäkuu	0:00	0:13	2:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:17
Heinäkuu	0:00	0:00	2:09	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:09
Elokuu	0:00	0:00	0:32	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:32
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	0:23	6:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	6:24

Taulukko 7: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R24 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	0:02	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:02
Huhtikuu	0:00	0:00	0:36	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:43
Toukokuu	0:00	0:01	0:54	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:55
Kesäkuu	0:00	0:00	1:57	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:57
Heinäkuu	0:00	0:00	2:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:04
Elokuu	0:00	0:00	0:34	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:34
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:06
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	0:01	6:04	0:15	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	6:21

3.3 Moskuankankaan, Hallakallion ja Pajuperänkankaan yhteisvaikutus

Tässä luvussa arvioidaan Moskuankankaan voimaloiden ja läheisyyteen suunnitellun Hallakallion ja rakenteilla olevan Pajuperänkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutuksia. Hallakallion tuulivoimapuistoon on suunniteltu enintään 28 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 5,5 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista. Pajuperänkankaan tuulivoimapuistoon on rakenteilla 14 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 7,4 km etäisyydellä Moskuankankaan voimaloista.

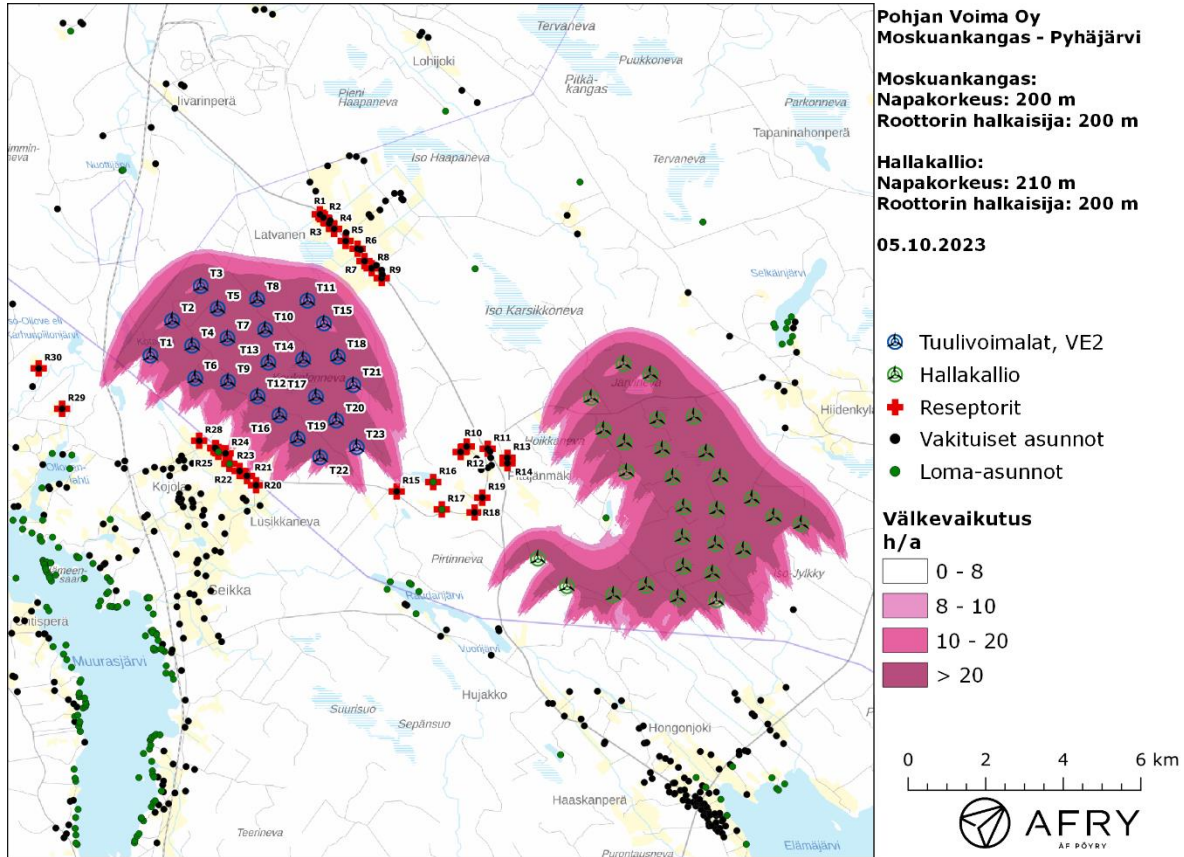
Moskuankankaan sekä Pajuperänkankaan tuulivoimapuistot ovat riittävän etäällä toisistaan, jotta ne eivät aiheuta yhteisvaikutuksia näiden tuulivoimapuistojen välissä sijaitsevalle asutukselle. Riittää siis tarkastella pelkästään Moskuankankaan sekä Hallakallion voimaloiden välkkeen yhteisvaikutuksia. Hallakallion hankekehittäjän (YIT Suomi Oy) verkkosivuillaan jakamien tietojen mukaan, Hallakallioon suunnitellaan korkeintaan 310 m kokonaiskorkeuden voimaloita. Välkemallinnuksessa Hallakallion voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 210 m. Hallakallion voimaloilla on käytetty samaa lapaprofiilia ja roottorin halkaisijaa kuin Moskuankankaan voimaloilla. Hallakallion voimaloiden koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 8).

Taulukko 8: Hallakallion voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus voimalapaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
H01	431088	7051329	168
H02	431779	7051064	168
H03	432899	7049975	165
H04	433219	7049043	158
H05	433583	7048416	163
H06	434401	7047858	178
H07	434959	7047391	166
H08	431960	7049903	172
H09	432087	7049133	173
H10	432357	7048412	162
H11	432637	7047640	154
H12	433498	7047578	152
H13	430574	7049631	186
H14	431115	7049309	180
H15	432609	7046872	166
H16	433458	7046695	151
H17	434177	7046539	156
H18	432629	7046106	162
H19	433379	7045931	149
H20	431674	7045617	155
H21	432492	7045311	146
H22	433480	7045242	150
H23	429630	7045604	153
H24	430826	7045372	160
H25	435671	7047205	165
H26	430255	7050454	185
H27	431166	7048552	188
H28	428881	7046314	155

Moskuankankaan ja Hallakallion todennäköisen välkkeen yhteisvaikutusten mallinnus on esitetty karttakuvana (Kuva 4). Todennäköiset väleajat ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla on listattu taulukossa (Taulukko 9). Mallinnusten perusteella Moskuankankaan ja Hallakallion voimaloista aiheutuu vain vähäisiä välkkeen yhteisvaikutuksia asutukselle. Ainoat muutokset todennäköisessä välevaikutuksessa sekä teoreettisessa maksivälkevaikutuksessa kohdistuvat

reseptoreihin R18 ja R19, joissa vuotuinen todennäköinen välkevaikutus kasvaa 28 minuutilla ja 25 minuutilla. Moskuankankaan voimalat eivät aiheuta välkevaikutuksia kyseisiin reseptoripisteisiin, ja välkeajat aiheutuvat pelkästään Hallakallion voimaloista. Moskuankankaan ja Hallakallion yhteisvaikutuksista ei aiheudu välkkeen ohjearvojen ylityksiä.



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan sekä Hallakallion voimalat.

Taulukko 9: Välkeajat reseptoripisteissä, kun mallinuksissa huomioidaan Moskuankankaan sekä Hallakallion voimalat. Taulukossa on esitetty vuotuinen välkeaja ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo reseptoripisteissä, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaja [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaja [min]	Teoreettinen vuotuinen maksimivälkeaja [h:min]	Teoreettinen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaja [min]
R1	0:24	1	4:56	12
R2	0:26	1	5:22	14
R3	0:30	2	5:57	15
R4	0:49	2	9:59	19
R5	1:09	3	11:41	20
R6	1:08	3	10:12	17
R7	1:23	3	11:19	20
R8	1:37	3	12:41	17
R9	1:26	3	10:46	16
R10	0:00	0	0:00	0
R11	0:00	0	0:00	0
R12	0:00	0	0:00	0
R13	0:00	0	0:00	0
R14	0:00	0	0:00	0
R15	3:46	8	15:05	32
R16	0:43	3	2:56	13
R17	0:00	0	0:00	0
R18	0:28	2	3:29	14
R19	0:25	2	3:13	14
R20	1:57	6	7:37	22
R21	6:24	9	24:12	32
R22	3:49	7	14:45	24
R23	2:42	5	10:57	18
R24	6:21	7	24:17	26
R25	3:24	5	13:02	20
R26	2:44	6	10:42	22
R27	2:34	5	10:06	19
R28	4:21	6	16:29	22
R29	0:00	0	0:00	0
R30	0:00	0	0:00	0

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Pyhäjärven kunnan alueella suunnitellun Moskuankankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Moskuankankaan tuulivoimapuistolle on käytetty 23 voimalan sijoittelusuunnitelmaa VE2. Välkevaikutusten arviointi on tehty roottorin halkaisijalla 200 m ja napakorkeudella 200 m. Selvityksessä on arvioitu myös Moskuankankaan ja läheisen rakenteilla olevan Pajuperänkankaan sekä suunnitteilla olevan Hallakallion tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutuksia.

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja, ja ympäristöministeriö suosittelee käyttämään muiden maiden ohjearvoja. Mallinnusten mukaan todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin, ja Tanskan 10 tunnin, ohjearvon alueen kaikkien loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla. Myös todennäköinen päiväkohtainen maksimivälke aika alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon alueen kaikkien loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla. Teoreettinen vuotuinen maksimivälke jää alle Saksan 30 tunnin raja-arvon alueen kaikkien loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla, mutta päiväkohtainen teoreettinen maksimivälke aika ylittää Saksan 30 minuutin raja-arvon 2 vakituisten asuinrakennuksen kohdalla.

5 Välkevaikutuksen laskentamenetelmä

Välkevaikutuksen laskennassa hyödynnetään taivaanpallon käsittelyä, 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 tuulisuusosuuksilla.

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.

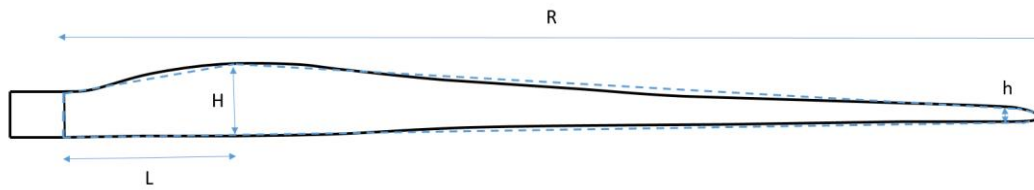
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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 5) 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 5: Turbiinin lavan malliprofiili.

Tämän raportin välkelaskennassa käytetään turbiinivalmistajan ilmoittamaa lavan profiilitietoa. 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.

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. Pirinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.
- [4] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päiväys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016.