



Sarvikankaan Tuuli Oy

Sarvikankaan tuulivoimapuiston välkeselvitys

101027788-001, 03.10.2024

Tekijä
AFRY Finland Oy
Veera Hatulainen

E-mail
veera.hatulainen@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
001

Asiakas
Sarvikankaan Tuuli Oy
Tommi Väilä

Päivämäärä
03/10/2024

Projektinumero
101027788-001

Raportin tila
VALMIS

Sarvikankaan tuulivoimapuiston välkeselvitys

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatiija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	03.10.2023/ Veera Hatulainen, Technical Consultant	03.10.2023/ Mika Laitinen, Senior Consultant	Alkuperäinen

Aineistojen käyttöoikeudet

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

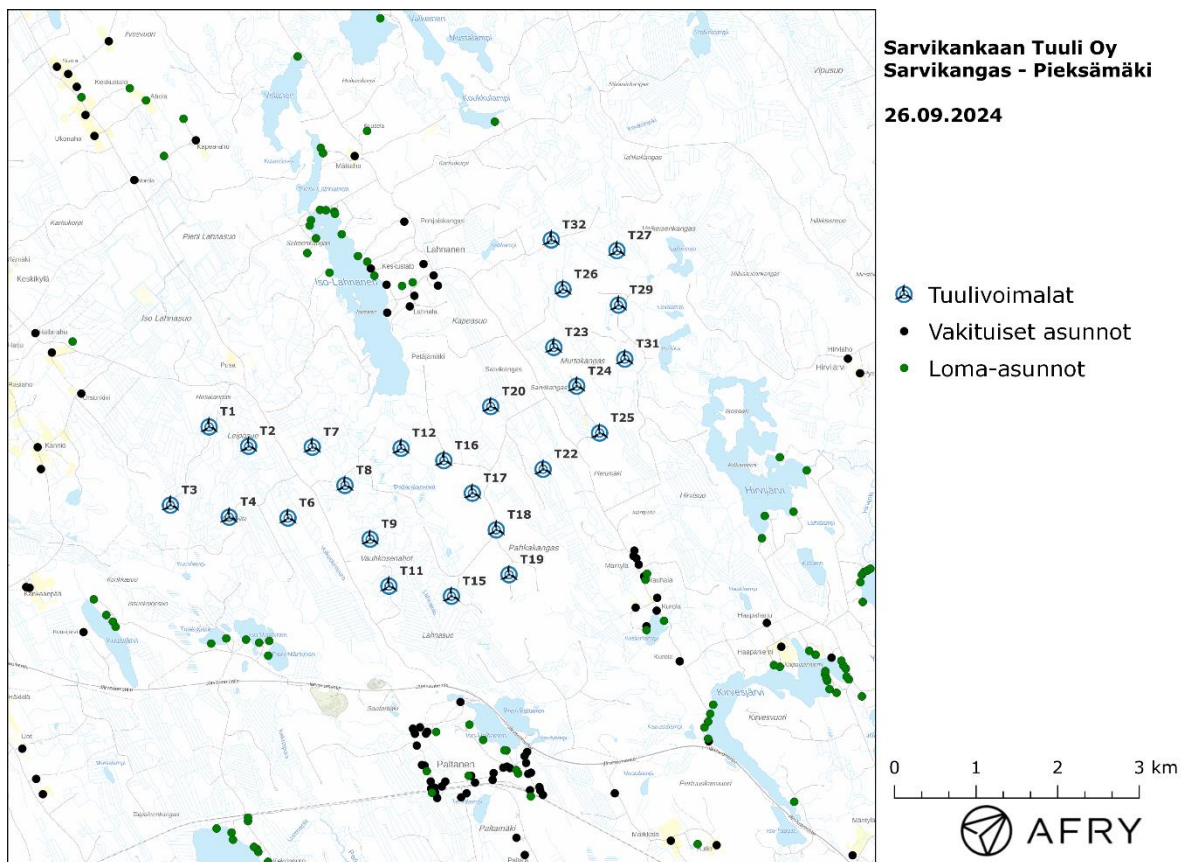
Sisällysluettelo

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	Todennäköinen välkevaikutus	12
3.3	Teoreettinen välkevaikutus	15
3.4	Sarvikankaan ja Niinimäen välkkeen yhteisvaikutukset	16
4	Yhteenveto	19
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	20
6	Viitteet	22

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Pieksämäen kaupungin alueelle suunnitellun Sarvikankaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty 25 voimalan sijoitussuunnitelmalle. Voimaloiden sijainnit on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1).

Mallinnuksissa voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lapaprofiili on määritetty voimalatyypin V162 valmistajan ilmoittaman lapaprofiilin avulla, jonka pituus on kasvatettu 100 metriin. Profiilia on samalla levennetty siten, että lavan levin kohta on 4,6 m (V162:n lapaprofiilin levin kohta on 4,3 m). Selvityksessä arvioidaan myös Sarvikankaan ja lähelle rakennettavan Niinimäen tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Sarvikankaan hankealueella.

Taulukko 1: Tuulivoimaloiden (25 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla.

Tuulivoimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	491401	6914421	147
T2	491885	6914183	142
T3	490927	6913463	146
T4	491646	6913316	141
T6	492367	6913305	139
T7	492666	6914172	139
T8	493065	6913704	136
T9	493374	6913046	135
T11	493604	6912472	138
T12	493753	6914158	147
T15	494370	6912348	135
T16	494277	6914009	158
T17	494626	6913609	163
T18	494919	6913160	170
T19	495075	6912611	161
T20	494851	6914670	161
T22	495493	6913902	151
T23	495624	6915393	172
T24	495905	6914919	164
T25	496186	6914345	158
T26	495737	6916104	156
T27	496398	6916578	144
T29	496416	6915911	152
T31	496494	6915250	143
T32	495593	6916709	155

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 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 Siilinjärven sääasemalta, josta etäisyys hankealueeseen on noin 80 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 tuulivoimaloiden 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, 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 voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lapaprofiili on arvioitu voimalatyyppin Vestas V162 valmistajan ilmoittamalla lavan profiilitiedolla, joka on skaalattu lavan pituuden ja leveyden suhteen vastaamaan 200 metrin roottorin halkaisijaa. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat tuulivoimaloiden käyttöaste, puusto ja paikallinen säätö (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 väketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [1] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn tuulivoimalan käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammassa 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 osuille 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: 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	0,161	0,177	0,167	0,139	0,133	0,161

Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Siilinjärven sääasemalla.

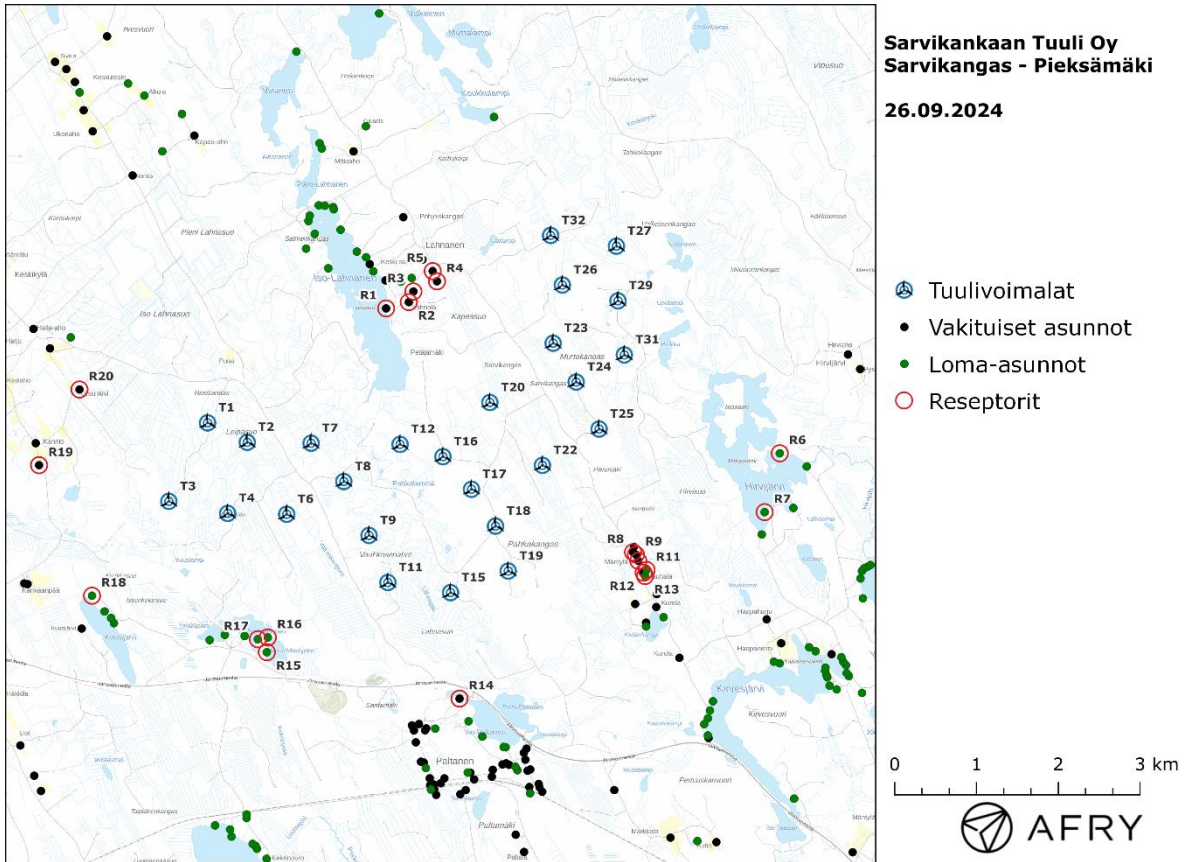
Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,154
Helmikuu	0,262
Maaliskuu	0,332
Huhtikuu	0,432
Toukokuu	0,454
Kesäkuu	0,424
Heinäkuu	0,456
Elokuu	0,406
Syyskuu	0,299
Lokakuu	0,186
Marraskuu	0,108
Joulukuu	0,082

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 20 vertailurakennusta, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Rakennukset sijaitsevan noin 1,5-2,3 km etäisyydellä voimaloista.

Kartoissa näkyvät vakituiset ja vapaa-ajan asuinrakennukset on ladattu Maanmittauslaitoksen maastotietokannasta. Reseptorin R8 pohjoispuolella on rakennus, joka on asiakkaan mukaan autiotalo. Tätä rakennusta ei ole huomioitu välketarkasteluissa.

Taulukko 4: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	493584	6915816	140	vakituinen asuinrakennus
R2	493861	6915893	159	vakituinen asuinrakennus
R3	493917	6916023	166	vakituinen asuinrakennus
R4	494206	6916147	165	vakituinen asuinrakennus
R5	494153	6916272	167	vakituinen asuinrakennus
R6	498395	6914047	128	loma-asunto
R7	498210	6913329	127	loma-asunto
R8	496602	6912839	147	vakituinen asuinrakennus
R9	496637	6912810	145	vakituinen asuinrakennus
R10	496666	6912734	144	vakituinen asuinrakennus
R11	496768	6912622	141	loma-asunto
R12	496731	6912589	142	vakituinen asuinrakennus
R13	496748	6912548	142	loma-asunto
R14	494481	6911052	141	vakituinen asuinrakennus
R15	492126	6911618	128	loma-asunto
R16	492138	6911799	127	loma-asunto
R17	492016	6911777	128	loma-asunto
R18	489989	6912308	135	loma-asunto
R19	489342	6913902	143	vakituinen asuinrakennus
R20	489836	6914826	160	vakituinen asuinrakennus



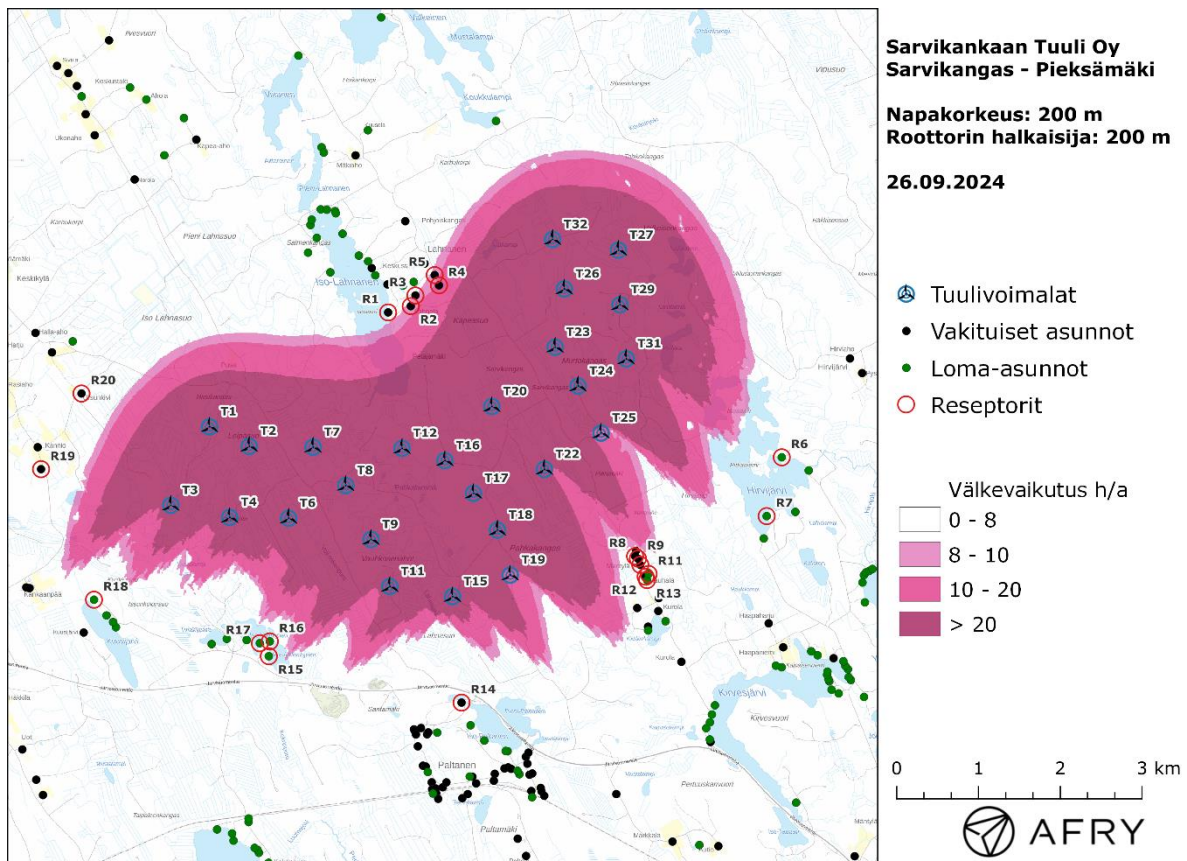
Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

3.2 Todennäköinen välkevaikutus

Mallinnetut arviot todennäköisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3). 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 ylittää 8 tunnin ohjearvon kolmen reseptoripisteen kohdalla (R2, R4 ja R5). Reseptorin R4 kohdalla todennäköinen vuotuinen välke aika ylittää myös Tanskan 10 tunnin ohjearvon. Päiväkohtainen todennäköinen välke aika alittaa 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen asuntojen kohdalla. Vuotuiset todennäköiset välkevaikutusajat ja suurimmat päiväkohtaiset maksimivälkkeet reseptorien kohdalla on lueteltu taulukossa (Taulukko 5).

Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptorien R2, R4 ja R5 kohdilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 6-Taulukko 8). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



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

Taulukko 5: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina [h:min] reseptoreiden kohdalla.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaika	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaika
R1	6:54	0:06
R2	8:46	0:06
R3	7:51	0:05
R4	11:03	0:08
R5	8:58	0:08
R6	1:36	0:04
R7	0:47	0:03
R8	5:56	0:06
R9	5:47	0:06
R10	4:41	0:06
R11	3:59	0:06
R12	3:50	0:05
R13	3:44	0:06
R14	0:00	0:00
R15	3:56	0:07
R16	3:59	0:07
R17	4:37	0:06
R18	2:07	0:06
R19	2:24	0:06
R20	3:02	0:05

Taulukko 6: Todennäköisen vuotuisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R2 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	0:43	0:58	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	1:48
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:51	0:00	0:00	0:10	0:00	0:00	0:00	0:00	1:01
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:29	0:12	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:41
Huhtikuu	0:00	0:00	0:14	0:23	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:37
Toukokuu	0:00	0:00	0:52	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:52
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	0:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04
Elokuu	0:00	0:00	0:50	0:12	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:02
Syyskuu	0:00	0:00	0:08	0:30	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:38
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:07	0:24	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:31
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:07	0:21	0:24	0:10	0:00	0:00	0:00	0:00	1:02
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:07	0:23	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:30
Yhteensä	0:00	0:00	2:08	1:41	1:34	1:11	1:45	0:27	0:00	0:00	0:00	0:00	8:46

Taulukko 7: Todennäköisen vuotuisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R4 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	0:26	0:43	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:09
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:16	0:16	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:32
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:30	0:43	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:13
Huhtikuu	0:00	0:00	0:36	0:58	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:34
Toukokuu	0:00	0:00	1:42	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:42
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	0:21	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:21
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	0:04	0:58	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:02
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:27	0:12	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:39
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:29	0:09	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:38
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:08	0:22	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:30
Yhteensä	0:00	0:00	4:26	2:53	1:11	1:19	1:14	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	11:03

Taulukko 8: Todennäköisen vuotuisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R5 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	0:27	0:32	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:59
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:20	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:27
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:43	0:26	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:09
Huhtikuu	0:00	0:00	1:18	0:21	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:39
Toukokuu	0:00	0:00	0:38	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:38
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	1:35	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:35
Syyskuu	0:00	0:00	0:09	0:54	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:03
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:09	0:20	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:29
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:23	0:05	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:28
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:13	0:18	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:31
Yhteensä	0:00	0:00	3:40	2:07	1:06	1:10	0:55	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	8:58

3.3 Teoreettinen välkevaikutus

Teoreettisen maksimivälkkeen vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdalla on lueteltu taulukossa (Taulukko 9). Mallinnusten perusteella teoreettinen vuotuinen maksimivälkeäika ylittää ohjearvot viiden rakennuksen kohdalla, kun välkeäiköjä verrataan Saksan raja-arvoihin. Teoreettinen päiväkohtainen maksimivälkeäika ylittyy neljän rakennuksen kohdalla. Teoreettisen maksimivälkkeen tarkempi ajoittuminen reseptorin R2 kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 10). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).

Suomen olosuhteissa Saksan teoreettisen maksimivälkkeen ohjearvoihin vertaaminen voi antaa epärealistisen kuvan välkevaikutuksesta, koska Suomessa aurinko paistaa eri kulmasta kuin Saksassa ja auringonpaisteen todennäköisyys on erilainen. Suomessa aurinko paistaa talvella hyvin viistosti, mikä voi aiheuttaa suuren ja kauas ulottuvan teoreettisen maksimivälkkeen. Talvisin auringonpaisteen todennäköisyys on kuitenkin Suomessa hyvin alhainen. Reseptoreiden R1–R5 kohdalla suuri osa teoreettisesta maksimivälkkeestä ajoittuu marras-helmikuulle.

Taulukko 9: Vuotuinen teoreettinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptoreiden kohdalla.

Reseptori	Teoreettinen vuotuinen välkeäika [h:min]	Teoreettisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeäika [h:min]
R1	61:58	1:02
R2	73:11	1:05
R3	64:41	0:48
R4	66:13	0:32
R5	62:48	0:28
R6	6:27	0:14
R7	3:12	0:12
R8	26:50	0:25
R9	26:00	0:26
R10	21:12	0:26
R11	17:51	0:24
R12	16:59	0:21
R13	16:25	0:23
R14	0:00	0:00
R15	14:55	0:24
R16	15:35	0:26
R17	17:51	0:24
R18	7:53	0:20
R19	11:51	0:28
R20	20:20	0:26

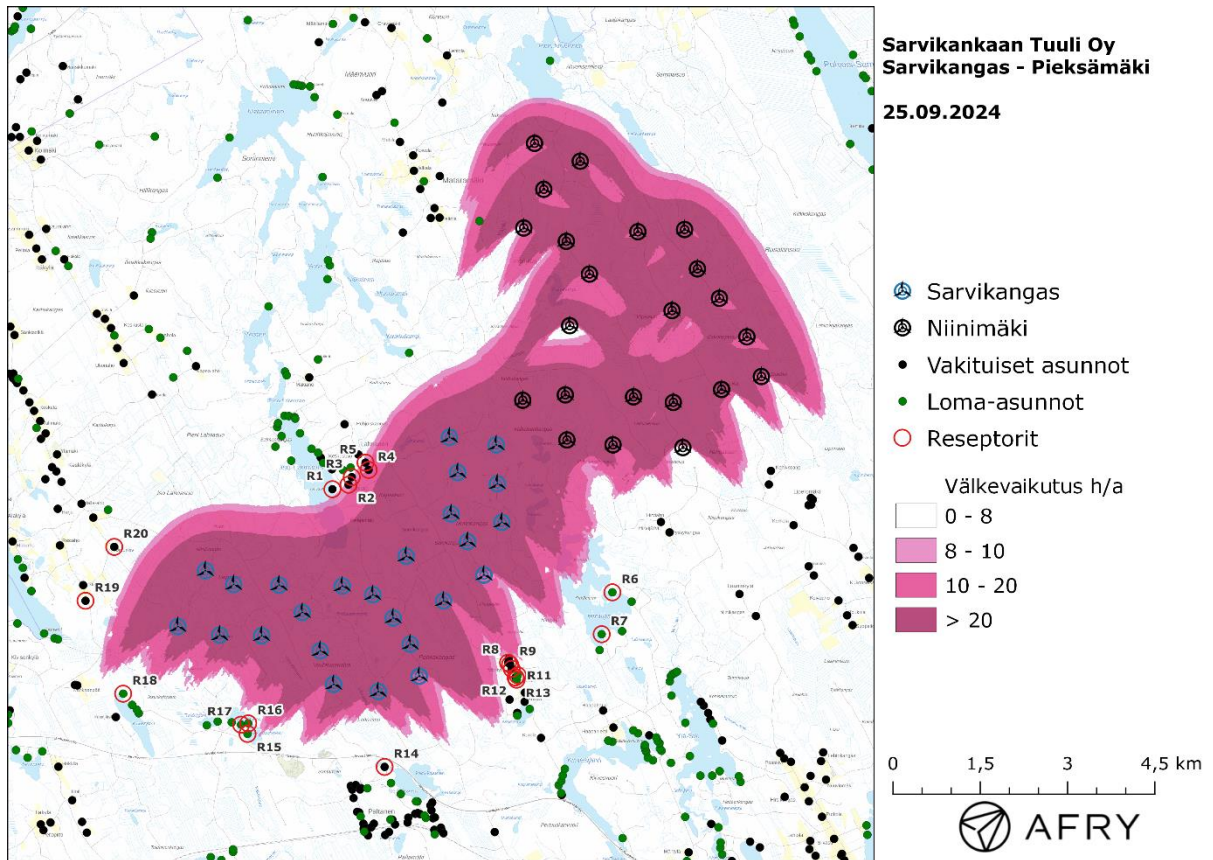
Taulukko 10: Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R2 kohdalla.

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	7:34	10:04	1:26	0:00	0:00	0:00	0:00	19:04
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	5:32	0:00	0:00	0:59	0:00	0:00	0:00	0:00	6:30
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	2:35	1:02	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:37
Huhtikuu	0:00	0:00	1:00	1:27	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:28
Toukokuu	0:00	0:00	3:11	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:11
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	0:16	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:16
Elokuu	0:00	0:00	3:31	0:43	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	4:15
Syyskuu	0:00	0:00	0:40	2:58	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:38
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	1:06	3:38	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	4:44
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	1:54	5:15	5:55	2:25	0:00	0:00	0:00	0:00	15:29
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:20	7:40	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	9:59
Yhteensä	0:00	0:00	8:38	8:50	12:05	15:09	23:39	4:49	0:00	0:00	0:00	0:00	73:11

3.4 Sarvikankaan ja Niinimäen välkkeen yhteisvaikutukset

Tässä luvussa arvioidaan Sarvikankaan ja läheisten tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutuksia. Yhteisvaikutusten arvioinnissa huomioidaan Sarvikankaan koillispuolelle rakenteilla oleva 22 voimalan Niinimäen tuulivoimapuisto. Välkemallinnuksissa Niinimäen voimaloille on käytetty napakorkeutta 165 m, roottorinhalkaisijaa 170 m ja voimalatyyppin Siemens Gamesa SG 6.6-170 lapaprofiilia.

Todennäköisen vuotuisen välkkeen yhteisvaikutusten mallinnus on esitetty karttakuvana (Kuva 4). Todennäköiset välkeajat ja teoreettinen maksimivälke reseptorien kohdilla on listattu taulukossa (Taulukko 11). Mallinnusten perusteella Sarvikankaan ja Niinimäen voimaloista aiheutuu hyvin pientä välkkeen yhteisvaikutusta asutukselle. Yhteisvaikutukset eivät lisää välkevaikutusta reseptorien kohdilla, eikä yhteisvaikutuksista aiheudu ohjearvojen ylityksiä.



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinuksissa huomioidaan Sarvikankaan ja Niinimäen tuulivoimapaistot.

Taulukko 11: Välkeajat reseptoreittain, kun mallinuksissa huomioidaan Sarvikankaan ja Niinimäen tuulivoimapaistot. Taulukossa on esitetty vuotuinen välkeaja ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna. Välkeajat ovat muodossa [h:min].

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaja	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaja	Teoreettinen vuotuinen maksimivälke	Teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	6:54	0:06	61:58	1:02
R2	8:46	0:06	73:11	1:05
R3	7:51	0:05	64:41	0:48
R4	11:03	0:08	66:13	0:32
R5	8:58	0:08	62:48	0:28
R6	1:36	0:04	6:27	0:14
R7	0:47	0:03	3:12	0:12
R8	5:56	0:06	26:50	0:25
R9	5:47	0:06	26:00	0:26
R10	4:41	0:06	21:12	0:26
R11	3:59	0:06	17:51	0:24
R12	3:50	0:05	16:59	0:21
R13	3:44	0:06	16:25	0:23
R14	0:00	0:00	0:00	0:00
R15	3:56	0:07	14:55	0:24
R16	3:59	0:07	15:35	0:26
R17	4:37	0:06	17:51	0:24
R18	2:07	0:06	7:53	0:20
R19	2:24	0:06	11:51	0:28
R20	3:02	0:05	20:20	0:26

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Pieksämäen kaupungin alueelle suunnitellun Sarvikankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arviointi on tehty 25 voimalan sijoitussuunnitelmalle, roottorin halkaisijalla 200 m ja napakorkeudella 200 m. Selvityksessä on arvioitu myös Sarvikankaan ja lähelle rakenteilla olevan Niinimäen tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia.

Välkevarjostusmallinnuksen mukaan vuotuinen todennäköinen välkevaikutus ylittää 8 tunnin ohje-arvon kolmen asuinrakennuksen kohdalla, joista yhden kohdalla ylittyy myös Tanskan 10 tunnin ohjearvo. Todennäköinen päiväkohtainen välkeaika alittaa 30 minuutin ohjearvon kaikkien loma- ja asuinrakennusten kohdilla.

Välkevarjostusmallinnuksen mukaan vuotuinen teoreettinen maksimivälke ylittää Saksan 30 tunnin raja-arvon viiden asuinrakennuksen kohdalla ja päiväkohtaisen 30 minuutin ohjearvo ylittyy neljän asunnon kohdalla. Sarvikankaan ja Niinimäen voimaloista ei aiheudu merkittävää välkkeen yhteisvaikutusta asutukselle.

5 Välkevaikutuksen laskentamenetelmä

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

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

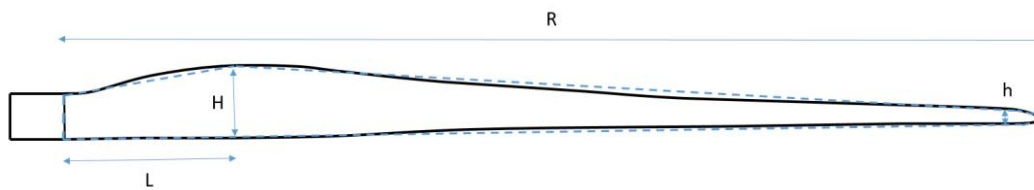
Tuulivoimalan lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle tuulivoimalasta, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu tuulivoimalan lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa 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) 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: Tuulivoimalan lavan malliprofiili.

Tämän raportin väkelaskennassa käytetään tuulivoimavalmistajan ilmoittamiin tietoihin perustuvaa lavan profiilitietoa. Laskennassa huomiotava 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 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.