



Sarvikankaan Tuuli Oy

Sarvikankaan tuulivoimapuiston välkeselvitys (VE1)

101023888-001

Tekijä
Mika Laitinen

pvm
13/12/2023

Osasto
Wind and Solar Finland

Projektinnumero
101023888-001

E-mail
mika.laitinen@afry.com

Raporttiversio
001

Raportin tila
VALMIS

Asiakas

Sarvikankaan Tuuli Oy

Sarvikankaan tuulivoimapuiston välkeselvitys (VE1)

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatiija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	13.12.2023/ Mika Laitinen, Senior Consultant	13.12.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen

Aineistojen käyttöoikeudet

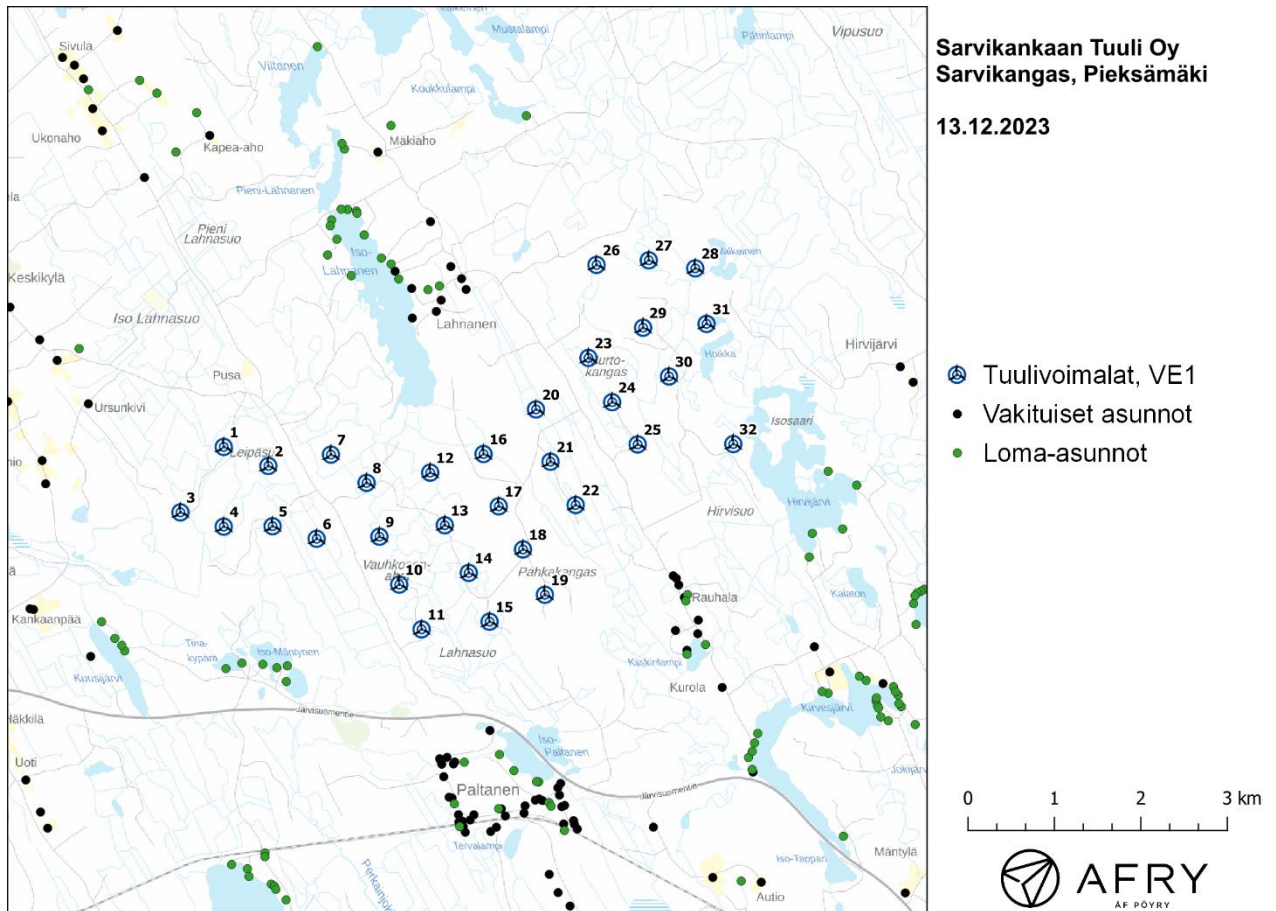
Selvityksessä on käytetty Maanmittauslaitoksen ja Ilmatieteen laitoksen avoimien aineistojen käyttö lupien alaista materiaalia, jotka on lisensoitu Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen - lisenssillä: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fi>.

Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	6
2.1	Välkevaikutus	6
2.2	Välkkeen rajoittaminen	6
2.3	Arvioinnin epävarmuudet	6
2.4	Ohjearvot	7
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus	8
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	8
3.2	Välkevaikutus	11
3.3	Välkkeen yhteisvaikutukset	15
4	Yhteenvedo	18
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	19
6	Viitteet	21

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Pieksämäen kaupungin alueelle suunnitellun Sarvikankaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi tehdään 32 voimalan suunnitelmalle VE1. Voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1). Mallinuksissa Sarvikankaan voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Selvityksessä arvioidaan myös Sarvikankaan ja lähelle rakennettavan Niinimäen tuulivoimapuiston välikkeen yhteisvaikutuksia.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Sarvikankaan suunnitelmalla VE1.

Taulukko 1: Sarvikankaan suunnitelman VE1 voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Voimala	E	N	Maaston korkeus [m]
1	491401	6914330	145
2	491917	6914110	143
3	490900	6913574	144
4	491401	6913409	138
5	491966	6913414	143
6	492476	6913269	138
7	492641	6914241	138
8	493053	6913915	139
9	493202	6913293	135
10	493431	6912740	136
11	493690	6912223	135
12	493789	6914033	143
13	493958	6913425	140
14	494235	6912875	139
15	494476	6912311	139
16	494406	6914248	152
17	494582	6913644	158
18	494863	6913146	170
19	495116	6912622	162
20	495013	6914763	160
21	495181	6914159	158
22	495472	6913659	150
23	495620	6915358	172
24	495894	6914847	165
25	496189	6914359	158
26	495713	6916433	151
27	496318	6916486	145
28	496855	6916393	145
29	496252	6915707	153
30	496552	6915144	141
31	496986	6915751	130
32	497295	6914363	130

2 Tuulivoimaloiden välke

2.1 Välkevaikutus

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

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 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 kellon-aikoina. 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 Kuopion lentoasemalta, josta etäisyys hankealueeseen on noin 85 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 [1]. Tässä selvityksessä välkeajoja verrataan Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvoihin.

Tanskassa on määritetty todennäköisen vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 tuntia. Ruotsissa vastaava todennäköisen välkkeen suositusarvo on 8 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä [2]. Saksassa todennäköisen vuotuisen välkkeen raja-arvo on 8 tuntia. Teoreettisen maksimivälkkeen raja-arvot Saksassa ovat 30 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä.

3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola mallinnusohjelmistolla. Ohjelmiston laskentamalli huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoimalueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuuliturbiinien dimensioidet. 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 2,0 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 ihmissilmän 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 Sarvikankaan voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloille on käytetty turbiinityypin Vestas V162 6,2 MW lapaprofiilia 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 väkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua väketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksista [3] 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 Kuopion lentoaseman sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä (Taulukko 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 Kuopion lentoasemalla.

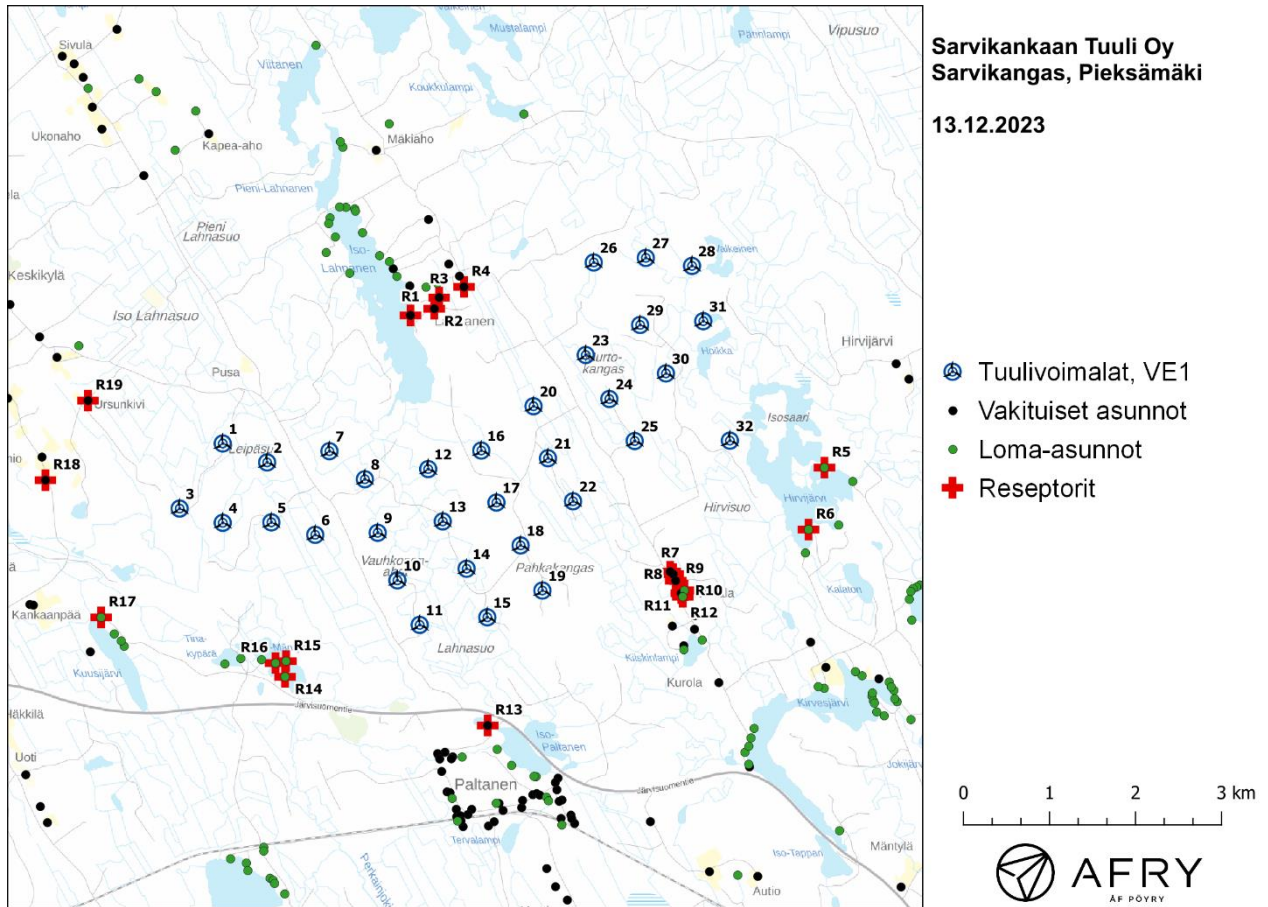
Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,154
Helmikuu	0,262
Maaliskuu	0,332
Huhtikuu	0,432
Toukokuu	0,454
Kesäkuu	0,424
Heinäkuu	0,456
Elokuu	0,406
Syyskuu	0,299
Lokakuu	0,186
Marraskuu	0,108
Joulukuu	0,082

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 19 asuntoa, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Asuntojen sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Reseptorit sijaitsevat lähimmillään 1,1–1,8 km etäisyydellä voimaloista.

Kartoissa näkyvät vakituiset ja vapaa-ajan asuinrakennukset on ladattu Maanmittauslaitoksen maastotietokannasta. Reseptorin R7 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	498395	6914047	128	loma-asunto
R6	498210	6913329	127	loma-asunto
R7	496602	6912839	147	vakituinen asuinrakennus
R8	496637	6912810	145	vakituinen asuinrakennus
R9	496666	6912734	144	vakituinen asuinrakennus
R10	496768	6912622	141	loma-asunto
R11	496731	6912589	142	vakituinen asuinrakennus
R12	496748	6912548	142	loma-asunto
R13	494481	6911052	141	vakituinen asuinrakennus
R14	492126	6911618	128	loma-asunto
R15	492138	6911799	127	loma-asunto
R16	492016	6911777	128	loma-asunto
R17	489989	6912308	135	loma-asunto
R18	489342	6913902	143	vakituinen asuinrakennus
R19	489836	6914826	160	vakituinen asuinrakennus



Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

3.2 Välkevaikutus

Mallinnettu todennäköinen vuotuinen väketuntien määrä on esitetty karttakuvassa (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.

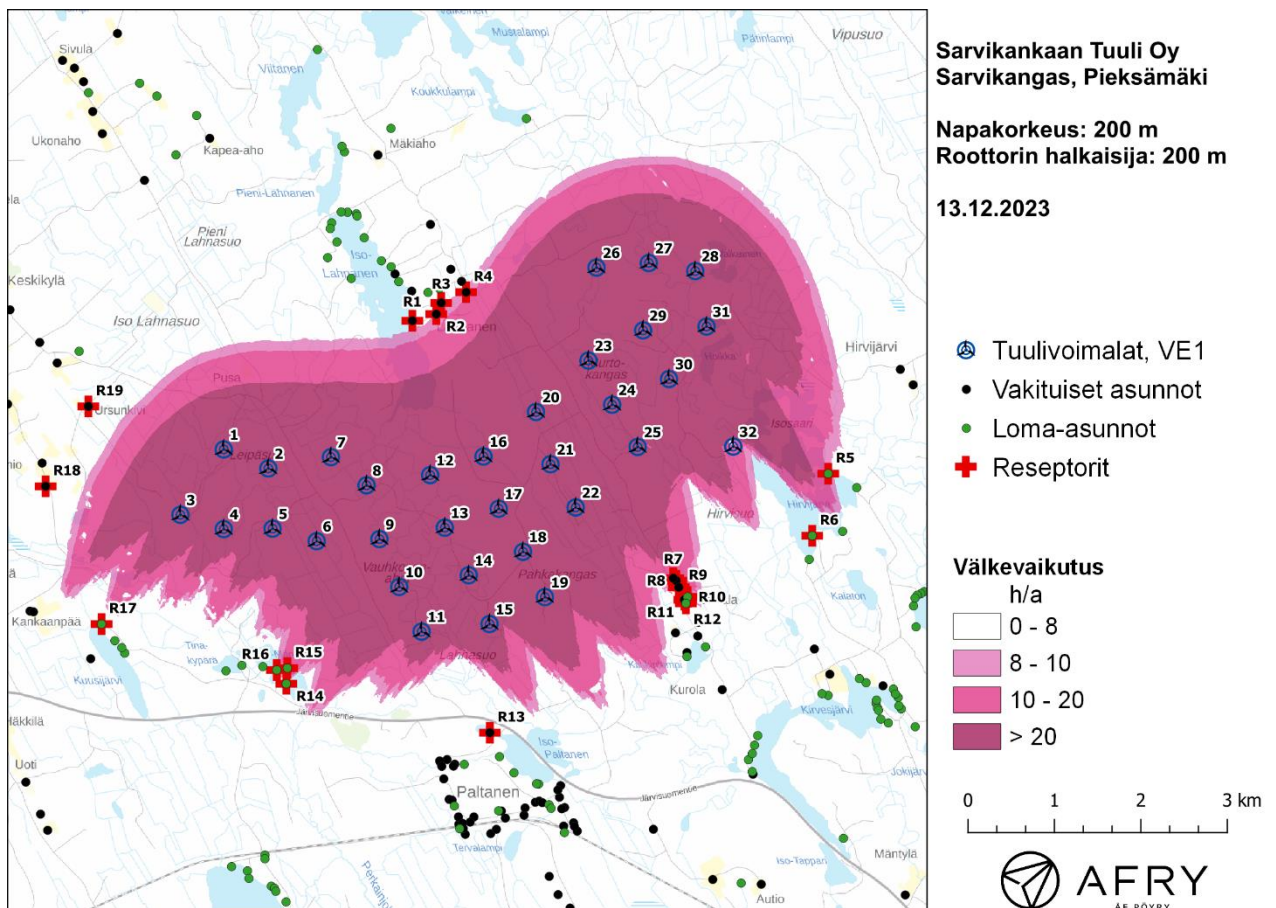
Taulukossa (Taulukko 5) on lueteltu todennäköinen välkevaikutus ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla, sekä vuotuisena tuntimääränä että suurimpana päiväkohtaisena arvona. Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittää Ruotsin 8 tunnin ohjearvon seitsemän asunnon kohdalla (reseptorit R4, R5, R7, R8, R9, R10 ja R15). Näistä asunnoista neljän kohdalla todennäköinen vuotuinen välke aika ylittää myös Tanskan 10 tunnin ohjearvon (reseptorit R7, R8, R9 ja R15). Todennäköinen päiväkohtainen välke aika jää alle Ruotsin 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdalla.

Vuotuinen teoreettinen maksimivälke ylittää Saksan 30 tunnin raja-arvon 11 asunnon kohdalla (reseptorit R1–R5, R7–R11 ja R15). Näiden asuntojen kohdalla ylittyy myös Saksan 30 minuutin raja-arvo päiväkohtaiselle teoreettiselle maksimivälkkeelle. 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–R4 kohdilla suurin osa teoreettisesta maksimivälkkeestä ajoittuu marras-helmikuulle.

Kokonaisuutena Sarvikankaan suunnitelman VE1 välkevaikutus on melko suuri. Välkevaikutusta kasvattaa erityisesti suuri roottorin halkaisija (200 m), jolla pyritään kartoittamaan maksimaaliset välkevaikutukset.

Todennäköiseen välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptoreiden R4, R5, R7 ja R15 kohdilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 6–Taulukko 9). Teoreettisen maksimivälkkeen tarkempi ajoittuminen reseptorin R4 kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 10). Taulukoissa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 3: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus.

Taulukko 5: Välkeajat [h:min] reseptoreittain. Taulukossa on esitetty vuotuinen välkeaja ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	todennäköinen vuotuinen välke	todennäköinen päiväkohtainen maksimi	Teoreettinen vuotuinen maksimivälke	teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	6:48	0:06	67:29	0:58
R2	7:56	0:05	60:09	0:46
R3	7:36	0:05	67:27	0:53
R4	8:46	0:08	70:08	0:37
R5	9:33	0:13	37:59	0:50
R6	0:49	0:03	3:22	0:13
R7	13:22	0:14	56:41	1:16
R8	12:46	0:13	53:08	0:55
R9	11:08	0:14	46:37	0:55
R10	8:41	0:11	35:59	0:46
R11	7:42	0:08	32:15	0:36
R12	6:58	0:07	29:36	0:35
R13	0:00	0:00	0:00	0:00
R14	6:28	0:07	24:40	0:25
R15	10:41	0:12	40:07	0:39
R16	7:26	0:06	28:07	0:25
R17	5:21	0:07	19:49	0:25
R18	2:52	0:06	14:24	0:30
R19	3:15	0:05	22:24	0:35

Taulukko 6: Todennäköisen vuotuisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina 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	0:53	0:21	0:02	0:00	0:00	0:00	0:00	1:16
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:17	0:32	0:00	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:56
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:17	0:39	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:57
Huhtikuu	0:00	0:00	1:44	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:44
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	1:29	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:30
Syyskuu	0:00	0:00	0:06	0:16	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:22
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:18	0:18	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:37
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:20	0:19	0:04	0:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:48
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:20	0:17	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:36
Yhteensä	0:00	0:00	3:20	0:52	1:35	2:04	0:43	0:13	0:00	0:00	0:00	0:00	8:46

Taulukko 7: Todennäköisen vuotuisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina 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	0:00	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	1:21	0:00	0:00	1:21
Toukokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:35	0:00	0:00	3:35
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	1:15	0:09	0:00	1:24
Elokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:05	0:04	0:00	3:10
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:03	0:00	0:00	0:03
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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	9:19	0:13	0:00	9:33

Taulukko 8: Todennäköisen vuotuisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R7 kohdalla.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	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	0:51	0:03	0:00	0:00	0:54
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:26	1:11	0:00	0:00	1:37
Toukokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:21	0:53	0:00	1:14
Kesäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:21	3:44	0:00	4:05
Heinäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:02	3:08	0:00	3:09
Elokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:09	0:00	0:00	1:09
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:05	0:08	0:00	0:00	1:13
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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:22	3:15	7:45	0:00	13:22

Taulukko 9: Todennäköisen vuotuisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R15 kohdalla.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Huhtikuu	0:00	0:00	1:11	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:11
Toukokuu	0:00	0:06	1:32	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:38
Kesäkuu	0:00	0:57	2:20	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:17
Heinäkuu	0:00	0:39	2:15	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:54
Elokuu	0:00	0:00	1:41	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:41
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	1:42	8:59	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	10:41

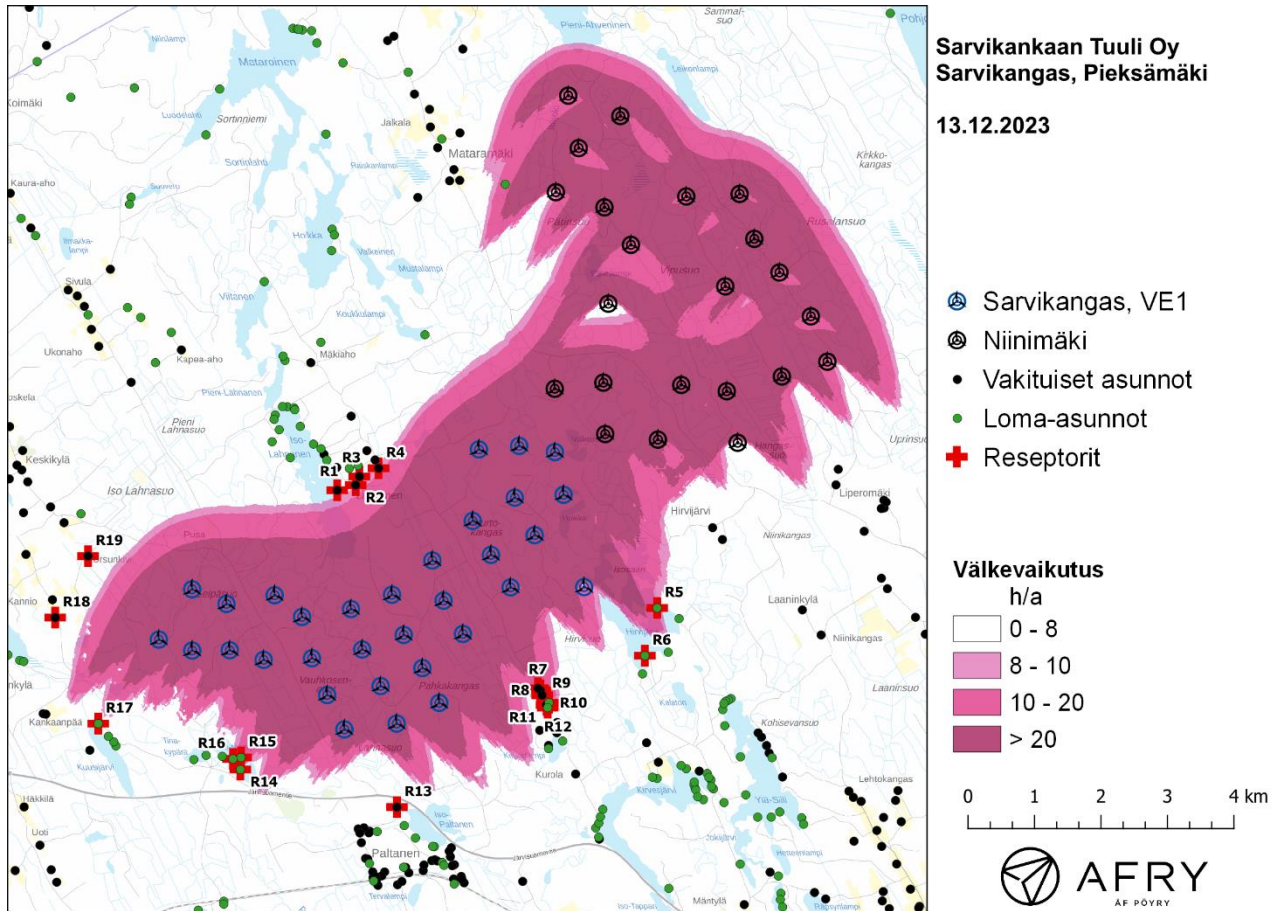
Taulukko 10: Teoreettisen vuotuisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R4 kohdalla.

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	9:23	3:56	0:20	0:00	0:00	0:00	0:00	13:39
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	1:56	3:35	0:00	0:42	0:00	0:00	0:00	0:00	6:12
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	1:30	3:30	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:00
Huhtikuu	0:00	0:00	6:46	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	6:46
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	6:08	0:03	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	6:11
Syyskuu	0:00	0:00	0:35	1:30	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:05
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	2:47	3:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:51
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	5:18	5:01	1:05	1:02	0:00	0:00	0:00	0:00	12:26
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	6:32	5:27	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	11:59
Yhteensä	0:00	0:00	13:28	5:50	13:48	24:31	10:27	2:04	0:00	0:00	0:00	0:00	70:08

3.3 Välkkeen yhteisvaikutukset

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

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



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

Taulukko 11: Välkeajat reseptoreittain, kun mallinuksissa huomioidaan Sarvikankaan ja Niinimäen tuulivoimapaistot. Taulukossa on esitetty vuotuinen välke aika ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	todennäköinen vuotuinen välke	todennäköinen päiväkohtainen maksimi	Teoreettinen vuotuinen maksimivälke	teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	6:48	0:06	67:29	0:58
R2	7:56	0:05	60:09	0:46
R3	7:36	0:05	67:27	0:53
R4	8:46	0:08	70:08	0:37
R5	9:33	0:13	37:59	0:50
R6	0:49	0:03	3:22	0:13
R7	13:22	0:14	56:41	1:16
R8	12:46	0:13	53:08	0:55
R9	11:08	0:14	46:37	0:55
R10	8:41	0:11	35:59	0:46
R11	7:42	0:08	32:15	0:36
R12	6:58	0:07	29:36	0:35
R13	0:00	0:00	0:00	0:00
R14	6:28	0:07	24:40	0:25
R15	10:41	0:12	40:07	0:39
R16	7:26	0:06	28:07	0:25
R17	5:21	0:07	19:49	0:25
R18	2:52	0:06	14:24	0:30
R19	3:15	0:05	22:24	0:35

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Pieksämäen alueelle suunnitellun Sarvikankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arvio on tehty 32 voimalan suunnitelmalle VE1. Selvityksessä on arvioitu myös Sarvikankaan ja lähelle suunniteltujen tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutuksia.

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja, ja ympäristöministeriö suosittelee käyttämään muiden maiden ohjearvoja. Mallinnusten perusteella todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittää Ruotsin 8 tunnin ohjearvon seitsemän asunnon kohdalla. Näistä neljän asunnon kohdalla ylittyy myös Tanskan 10 tunnin ohjearvo. Saksan teoreettisen maksimivälkkeen vuotuinen 30 tunnin raja-arvo ja päiväkohtainen 30 minuutin raja-arvo ylittyy 11 asunnon kohdalla. Sarvikankaan ja lähelle suunniteltujen tuulivoimapuistojen voimaloista ei aiheudu merkittävää välkkeen yhteisvaikutusta asutukselle.

Kokonaisuutena Sarvikankaan suunnitelman VE1 välkevaikutus on melko suuri.

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 roottorikehien 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 suuntaakohtaisilla tuulusuusuksilla.

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

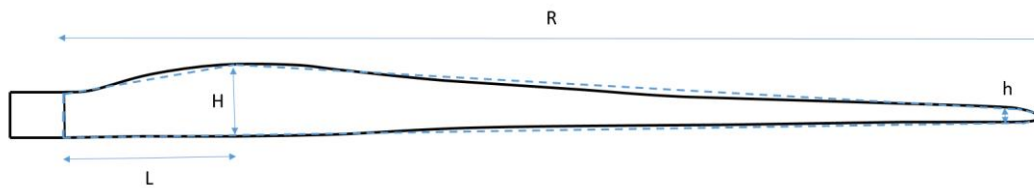
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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 yksinkertaistettu malli tyypillisestä profiilista, jossa lavan maksimileveys on H etäisyydellä L lavan tyvestä. Lavan kokonaispituus on R ja lavan leveys 90 % etäisyydellä tyvestä on h . 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 yksinkertaistettu profiili.

Tämän raportin välkelaskennassa lavan leveys on määritetty useasta kohtaa lapaa, jolloin lavan muoto saadaan kuvattua vielä tarkemmin kuin kahteen leveysarvoon H ja h perustuvassa lineaarisessa approksimaatiossa. 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] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016. Ympäristöministeriö, 2016.
- [2] Boverket: Vindkraftshandboken, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.
- [3] B. Tammelin et al.: Production of the Finnish Wind atlas. Wind Energy, 2011.
- [4] P. Pirinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.



Sarvikankaan Tuuli Oy

Sarvikankaan tuulivoimapuiston välkeselvitys (VE2)

101023888-001

Tekijä
Mika Laitinen

pvm
13/12/2023

Osasto
Wind and Solar Finland

Projektinnumero
101023888-001

E-mail
mika.laitinen@afry.com

Raporttiversio
001

Raportin tila
VALMIS

Asiakas

Sarvikankaan Tuuli Oy

Sarvikankaan tuulivoimapuiston välkeselvitys (VE2)

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatiija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	13.12.2023/ Mika Laitinen, Senior Consultant	13.12.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen

Aineistojen käyttöoikeudet

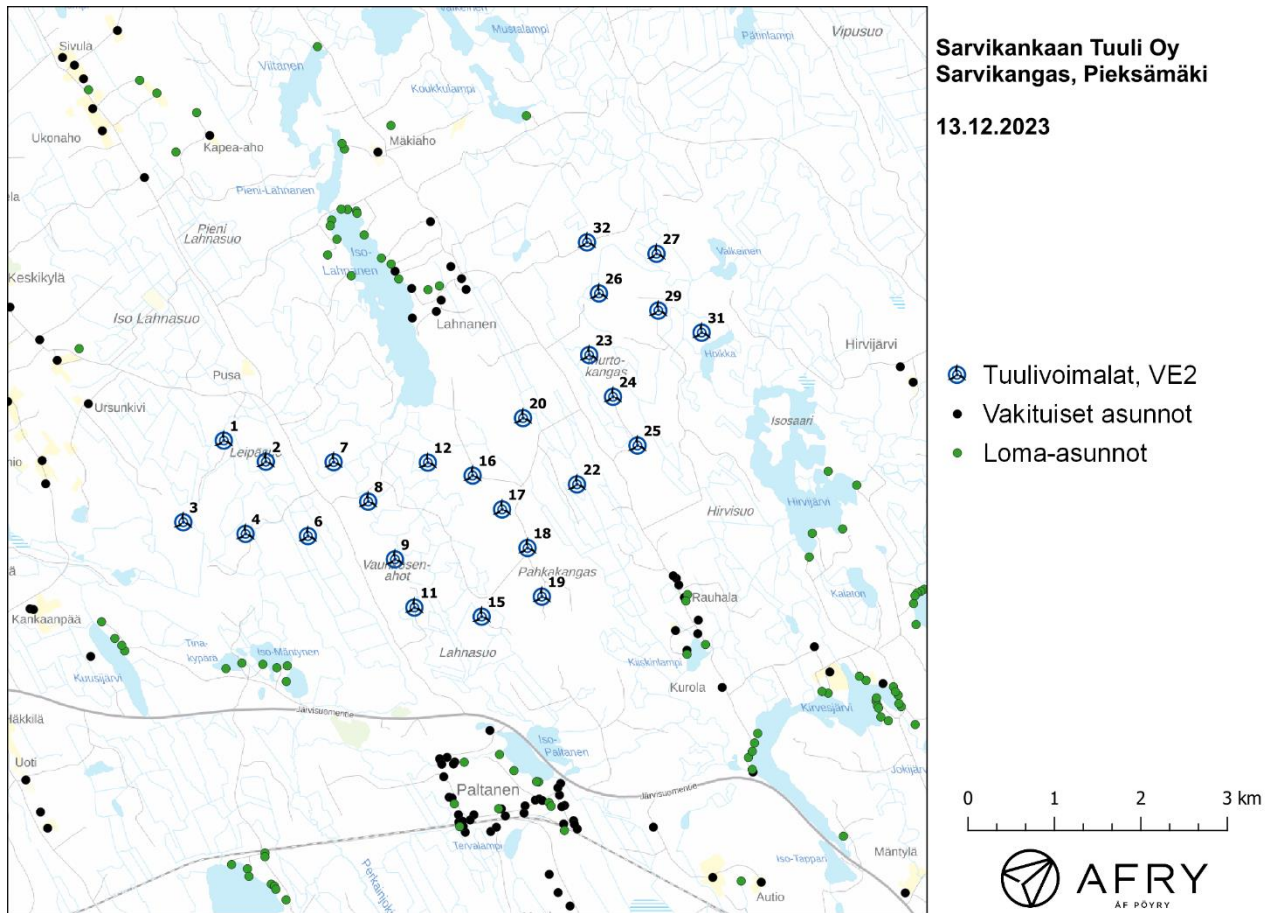
Selvityksessä on käytetty Maanmittauslaitoksen ja Ilmatieteen laitoksen avoimien aineistojen käyttö lupien alaista materiaalia, jotka on lisensoitu Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen - lisenssillä: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fi>.

Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	6
2.1	Välkevaikutus	6
2.2	Välkkeen rajoittaminen	6
2.3	Arvioinnin epävarmuudet	6
2.4	Ohjearvot	7
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus	8
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	8
3.2	Välkevaikutus	11
3.3	Välkkeen yhteisvaikutukset	15
3.4	Keinoja välkevaikutuksen vähentämiseksi	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 tehdään 25 voimalan suunnitelmalle VE2. Voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1). Mallinuksissa Sarvikankaan voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Selvityksessä arvioidaan myös Sarvikankaan ja lähelle rakennettavan Niinimäen tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Sarvikankaan suunnitelmalla VE2.

Taulukko 1: Sarvikankaan suunnitelman VE2 voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Voimala	E	N	Maaston korkeus [m]
1	491402	6914403	146
2	491888	6914159	143
3	490933	6913460	143
4	491653	6913325	141
6	492375	6913300	138
7	492672	6914154	139
8	493072	6913698	138
9	493381	6913031	135
11	493606	6912474	138
12	493762	6914149	148
15	494385	6912369	135
16	494280	6913999	162
17	494621	6913608	164
18	494915	6913162	169
19	495081	6912600	161
20	494863	6914663	162
22	495487	6913897	151
23	495628	6915391	173
24	495904	6914909	166
25	496187	6914346	158
26	495741	6916103	156
27	496407	6916561	144
29	496428	6915905	156
31	496929	6915650	139
32	495603	6916693	155

2 Tuulivoimaloiden välke

2.1 Välkevaikutus

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

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 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 kellon-aikoina. 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 Kuopion lentoasemalta, josta etäisyys hankealueeseen on noin 85 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 [1]. Tässä selvityksessä välkeajoja verrataan Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvoihin.

Tanskassa on määritetty todennäköisen vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 tuntia. Ruotsissa vastaava todennäköisen välkkeen suositusarvo on 8 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä [2]. Saksassa todennäköisen vuotuisen välkkeen raja-arvo on 8 tuntia. Teoreettisen maksimivälkkeen raja-arvot Saksassa ovat 30 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä.

3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola mallinnusohjelmistolla. Ohjelmiston laskentamalli huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoimalueen 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 2,0 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 Sarvikankaan voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloille on käytetty turbiinityypin Vestas V162 6,2 MW lapaprofiilia 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 väkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua väketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [3] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammissa 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 Kuopion lentoaseman sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä (Taulukko 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 Kuopion lentoasemalla.

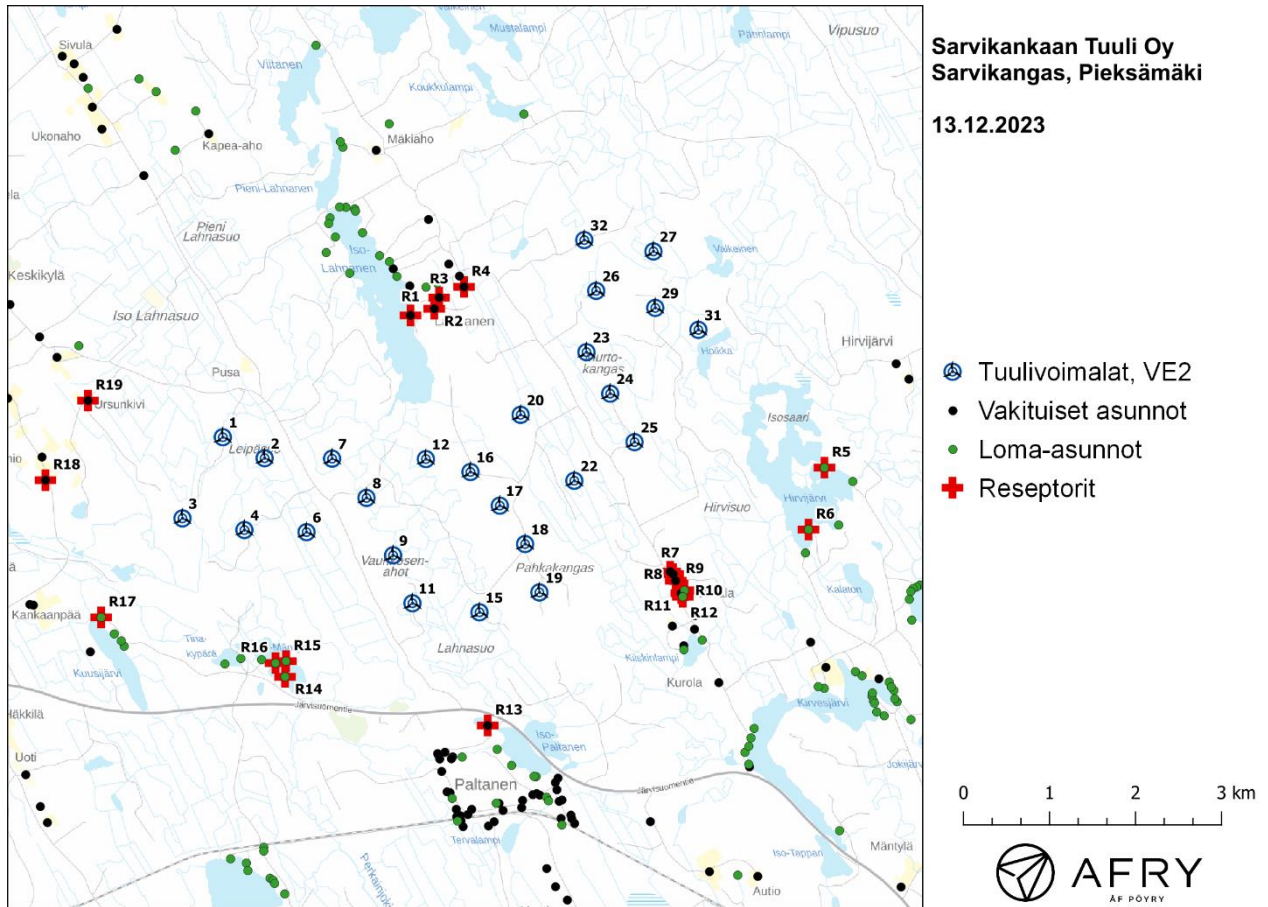
Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,154
Helmikuu	0,262
Maaliskuu	0,332
Huhtikuu	0,432
Toukokuu	0,454
Kesäkuu	0,424
Heinäkuu	0,456
Elokuu	0,406
Syyskuu	0,299
Lokakuu	0,186
Marraskuu	0,108
Joulukuu	0,082

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 19 asuntoa, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Asuntojen sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Reseptorit sijaitsevat lähimmillään 1,1–1,8 km etäisyydellä voimaloista.

Kartoissa näkyvät vakituiset ja vapaa-ajan asuinrakennukset on ladattu Maanmittauslaitoksen maastotietokannasta. Reseptorin R7 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	498395	6914047	128	loma-asunto
R6	498210	6913329	127	loma-asunto
R7	496602	6912839	147	vakituinen asuinrakennus
R8	496637	6912810	145	vakituinen asuinrakennus
R9	496666	6912734	144	vakituinen asuinrakennus
R10	496768	6912622	141	loma-asunto
R11	496731	6912589	142	vakituinen asuinrakennus
R12	496748	6912548	142	loma-asunto
R13	494481	6911052	141	vakituinen asuinrakennus
R14	492126	6911618	128	loma-asunto
R15	492138	6911799	127	loma-asunto
R16	492016	6911777	128	loma-asunto
R17	489989	6912308	135	loma-asunto
R18	489342	6913902	143	vakituinen asuinrakennus
R19	489836	6914826	160	vakituinen asuinrakennus



Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

3.2 Välkevaikutus

Mallinnettu todennäköinen vuotuinen väketuntien määrä on esitetty karttakuvassa (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.

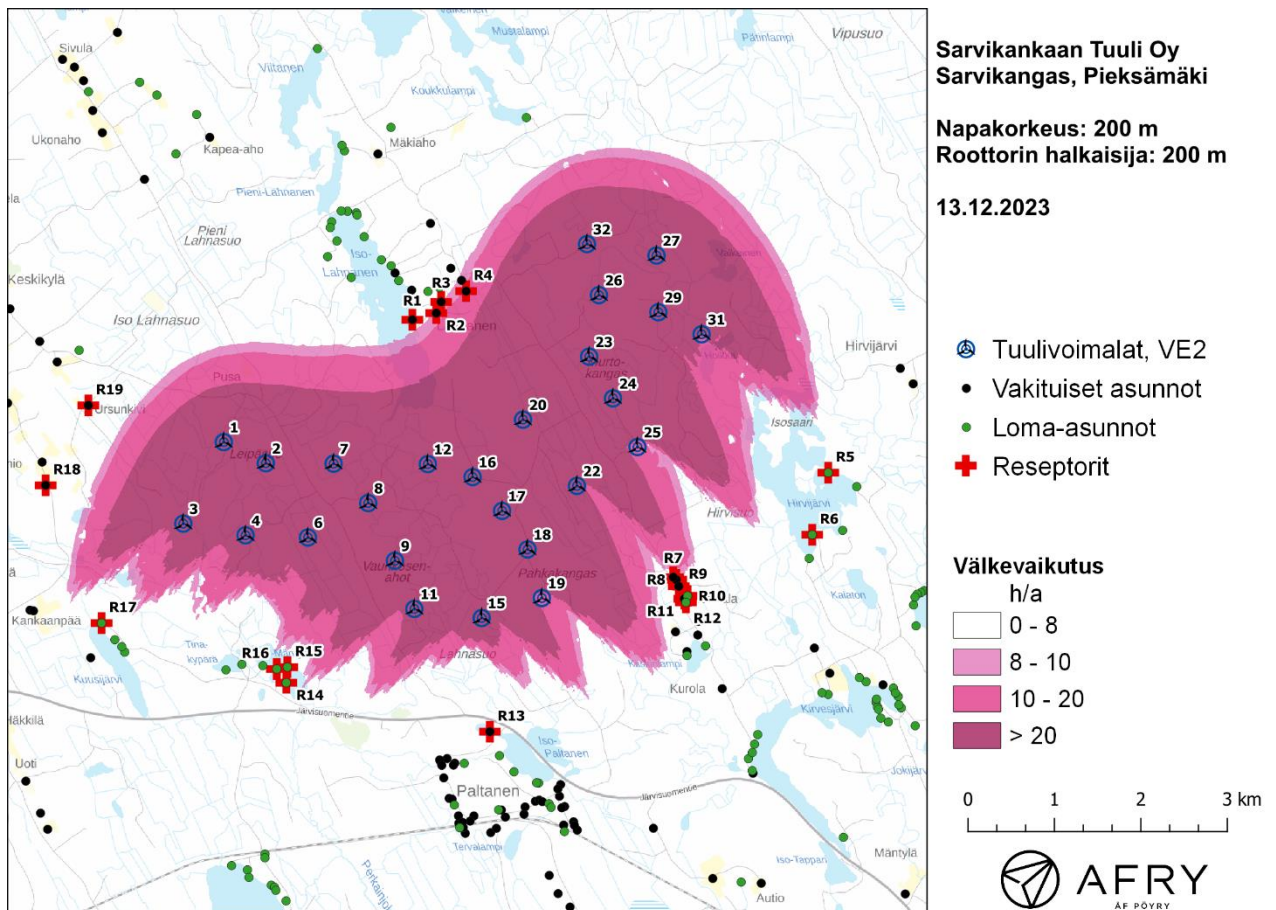
Taulukossa (Taulukko 5) on lueteltu todennäköinen välkevaikutus ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla, sekä vuotuisena tuntimääränä että suurimpana päiväkohtaisena arvona. Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittää Ruotsin 8 tunnin ohjearvon kahden asunnon kohdalla (reseptorit R2 ja R4). Reseptorin R4 kohdalla todennäköinen vuotuinen välkeaika ylittyy myös Tanskan 10 tunnin ohjearvo. Todennäköinen päiväkohtainen välkeaika jää alle Ruotsin 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdalla.

Vuotuinen teoreettinen maksimivälke ylittää Saksan 30 tunnin raja-arvon neljän asunnon kohdalla (reseptorit R1–R4). Näiden asuntojen kohdalla ylittyy myös Saksan 30 minuutin raja-arvo päiväkohtaiselle teoreettiselle maksimivälkkeelle. 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–R4 kohdilla suuri osa teoreettisesta maksimivälkkeestä ajoittuu marras-helmikuulle.

Kokonaisuutena Sarvikankaan suunnitelman VE2 välkevaikutus on kohtalainen. Välkevaikutusta kasvattaa erityisesti suuri roottorin halkaisija (200 m), jolla pyritään kartoittamaan maksimaaliset välkevaikutukset.

Todennäköiseen välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptoreiden R2 ja R4 kohdilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 6 ja Taulukko 7). Teoreettisen maksimivälkkeen tarkempi ajoittuminen näiden reseptoreiden kohdalla on esitetty taulukoissa (Taulukko 8 ja Taulukko 9). Taulukoissa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 3: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus.

Taulukko 5: Välkeajat [h:min] reseptoreittain. Taulukossa on esitetty vuotuinen välkeaja ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	todennäköinen vuotuinen välke	todennäköinen päiväkohtainen maksimi	Teoreettinen vuotuinen maksimivälke	teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	6:48	0:06	61:21	1:02
R2	8:35	0:06	68:43	0:54
R3	7:43	0:06	63:51	0:46
R4	10:38	0:08	64:06	0:31
R5	0:34	0:03	2:27	0:12
R6	0:47	0:03	3:13	0:13
R7	6:04	0:06	27:31	0:26
R8	5:56	0:06	26:34	0:25
R9	4:56	0:06	22:21	0:24
R10	4:06	0:05	18:20	0:21
R11	3:50	0:06	17:02	0:24
R12	3:44	0:06	16:27	0:22
R13	0:00	0:00	0:00	0:00
R14	3:54	0:07	14:46	0:25
R15	4:14	0:07	16:29	0:27
R16	4:52	0:06	18:38	0:24
R17	2:05	0:05	7:44	0:20
R18	2:23	0:06	11:45	0:29
R19	2:59	0:05	20:07	0:25

Taulukko 6: Todennäköisen vuotuisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina 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	0:42	0:55	0:09	0:00	0:00	0:00	0:00	1:46
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:50	0:00	0:00	0:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:58
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	0:15	0:23	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:38
Toukokuu	0:00	0:00	0:50	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:50
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	0:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:01
Elokuu	0:00	0:00	0:51	0:12	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:03
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	0:22	0:10	0:00	0:00	0:00	0:00	0:59
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	2:04	1:41	1:33	1:10	1:41	0:27	0:00	0:00	0:00	0:00	8:35

Taulukko 7: Todennäköisen vuotuisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina 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	0:42	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:08
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:15	0:15	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:31
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:21	0:43	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:04
Huhtikuu	0:00	0:00	0:40	0:58	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:38
Toukokuu	0:00	0:00	1:34	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:34
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	0:14	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:14
Elokuu	0:00	0:00	1:46	0:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:46
Syyskuu	0:00	0:00	0:06	0:57	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	0:22	0:12	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:34
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:28	0:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:36
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	0:31
Yhteensä	0:00	0:00	4:19	2:38	1:10	1:17	1:13	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	10:38

Taulukko 8: Teoreettisen vuotuisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina 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	7:29	8:08	1:32	0:00	0:00	0:00	0:00	17:09
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	5:24	0:00	0:00	0:51	0:00	0:00	0:00	0:00	6:15
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	2:30	1:05	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:35
Huhtikuu	0:00	0:00	1:04	1:28	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:32
Toukokuu	0:00	0:00	3:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:01
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	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:07
Elokuu	0:00	0:00	3:36	0:44	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	4:20
Syyskuu	0:00	0:00	0:38	2:58	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:36
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	1:06	3:34	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	4:40
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	1:51	5:11	4:09	2:23	0:00	0:00	0:00	0:00	13:34
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:18	7:37	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	9:54
Yhteensä	0:00	0:00	8:26	8:46	11:54	14:57	19:54	4:46	0:00	0:00	0:00	0:00	68:43

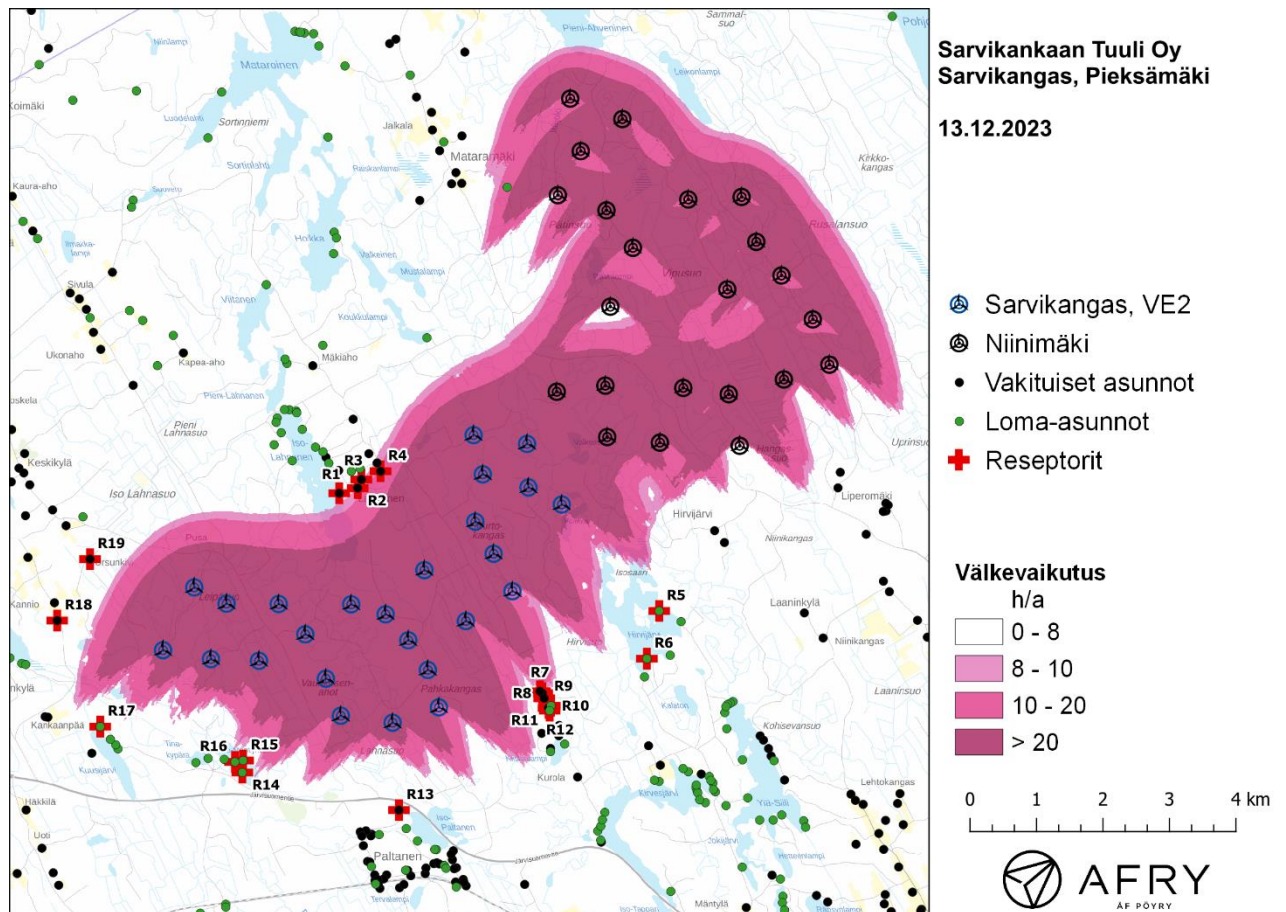
Taulukko 9: Teoreettisen vuotuisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R4 kohdalla.

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	4:42	4:42	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	9:23
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	1:44	1:38	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:21
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	1:54	3:48	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:42
Huhtikuu	0:00	0:00	2:42	3:46	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	6:29
Toukokuu	0:00	0:00	5:42	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:42
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	0:56	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:56
Elokuu	0:00	0:00	7:10	0:03	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	7:13
Syyskuu	0:00	0:00	0:41	5:24	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	6:05
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	3:22	2:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:23
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	6:31	2:03	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	8:34
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:05	5:13	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:18
Yhteensä	0:00	0:00	17:10	14:29	7:33	12:56	11:57	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	64:06

3.3 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 teoreettisen maksivälke reseptoreiden kohdilla on listattu taulukossa (Taulukko 10). Mallinnusten perusteella Sarvikankaan ja Niinimäen voimaloista aiheutuu hyvin pientä välkkeen yhteisvaikutusta asutukselle. Yhteisvaikutukset eivät lisää välkevaikutusta reseptoreiden kohdilla, eikä yhteisvaikutuksista aiheudu välkkeen ohjearvojen ylityksiä.



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinnuksissa huomioidaan Sarvikankaan ja Niinimäen tuulivoimapuistot.

Taulukko 10: Välkeajat reseptoreittain, kun mallinuksissa huomioidaan Sarvikankaan ja Niinimäen tuulivoimapaistot. Taulukossa on esitetty vuotuinen välke aika ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	todennäköinen vuotuinen välke	todennäköinen päiväkohtainen maksimi	Teoreettinen vuotuinen maksimivälke	teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	6:48	0:06	61:21	1:02
R2	8:35	0:06	68:43	0:54
R3	7:43	0:06	63:51	0:46
R4	10:38	0:08	64:06	0:31
R5	0:34	0:03	2:27	0:12
R6	0:47	0:03	3:13	0:13
R7	6:04	0:06	27:31	0:26
R8	5:56	0:06	26:34	0:25
R9	4:56	0:06	22:21	0:24
R10	4:06	0:05	18:20	0:21
R11	3:50	0:06	17:02	0:24
R12	3:44	0:06	16:27	0:22
R13	0:00	0:00	0:00	0:00
R14	3:54	0:07	14:46	0:25
R15	4:14	0:07	16:29	0:27
R16	4:52	0:06	18:38	0:24
R17	2:05	0:05	7:44	0:20
R18	2:23	0:06	11:45	0:29
R19	2:59	0:05	20:07	0:25

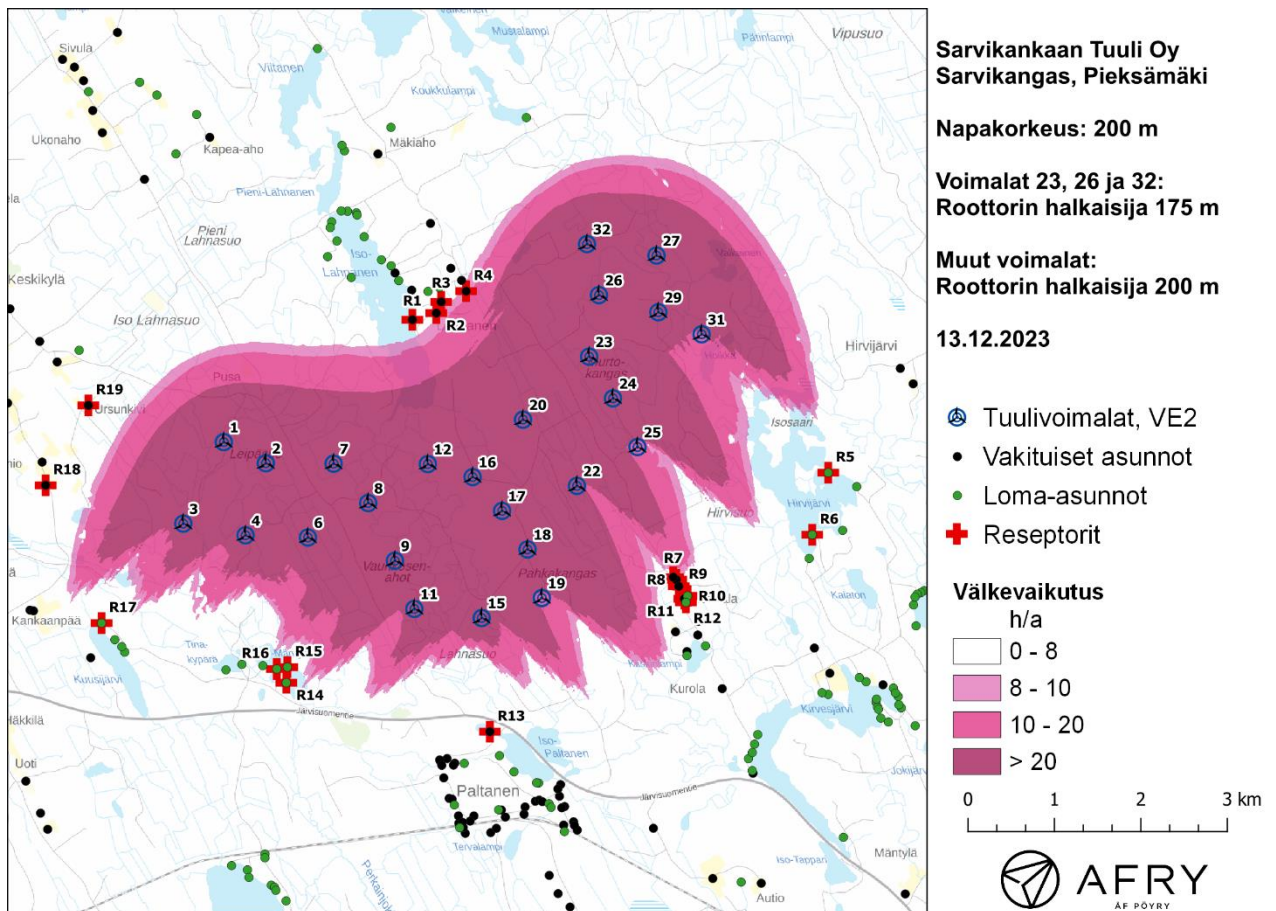
3.4 Keinoja välkevaikutuksen vähentämiseksi

Tässä luvussa tarkastellaan keinoja vähentää reseptoreihin R2 ja R4 kohdistuvaa välkevaikutusta. Näiden reseptoreiden kohdalla välke aiheutuu pääosin voimaloista 12, 20, 23, 26 ja 32. Suurin välkevaikutus on voimalalla 32.

Välkevaikutusta voidaan vähentää esimerkiksi voimalatyyppiä vaihtamalla tai voimaloita siirtämällä. Erityisesti roottorin halkaisijan pienentäminen vähentää välkevaikutusta. Seuraavassa mallinnuksessa on tarkasteltu vaihtoehtoa, jossa voimaloihin 23, 26 ja 32 on vaihdettu 175 m roottorin halkaisija. Mallinuksissa näille kolmelle voimalalle on käytetty turbiinityypin Vestas V162 6,2 MW lapaprofiilia skaalattuna roottorin halkaisijalle 175 m. Skaalatun lavan maksimileveys on 4,4 m.

Karttakuvassa (Kuva 5) on esitetty tämän vaihtoehdon todennäköinen vuotuinen väketuntien määrä. Taulukossa (Taulukko 11) on lueteltu vaihtoehdon todennäköinen välkevaikutus ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla. Mallinnusten perusteella kolmen voimalan roottorin halkaisijaa pienentämällä 200 metristä 175 metriin todennäköinen vuotuinen välke aika saadaan alennettua Tanskan 10 tunnin ohjearvon kaikkien reseptoreiden kohdalla. Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää vielä hieman yli Ruotsin 8 tunnin ohjearvon yhden asunnon kohdalla (reseptori R4). Tarvittaessa vaihtoehtoon voitaisiin yhdistää voimalan 32 pieni siirto, jolla todennäköinen vuotuinen välke aika saataisiin alle 8 tunnin ohjearvon.

Sarvikankaan suunnitelman VE2 välkevaikutus voidaan alentaa ohjearvoihin myös ilman voimalatyyppin vaihtoa tai voimaloiden siirtoa, asentamalla voimalakohtainen välkkeen hallintatyökalu. Tämä työkalu sisältää valoanturin, joka pysäyttää voimalan suurimman välkevaikutuksen aikana. Vuotuisen välkeajan alentamiseen alle 8 tuntiin reseptoreiden R2 ja R4 kohdilla riittäisi asentaa välkkeen hallintatyökalu voimalaan 32. Todennäköisen välkeanalyysin perusteella voimala 32 pitäisi pysäyttää 32 päivänä, lähinnä toukokuun ja elokuun aikaisina aamuina. Todennäköisen analyysin perusteella voimalan pysäytysaika olisi korkeintaan 20 tuntia vuodessa, mutta todellinen valoanturiin perustuva pysäytysaika olisi luultavasti vähemmän.



Kuva 5: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun kolmeen voimalaan on vaihdettu 175 m roottorin halkaisija.



Taulukko 11: Välkeajat [h:min] reseptoreittain, kun voimaloihin 23, 26 ja 32 on vaihdettu 175 m roottorin halkaisija. Taulukossa on esitetty vuotuinen välke aika ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	todennäköinen vuotuinen välke	todennäköinen päiväkohtainen maksimi	Teoreettinen vuotuinen maksimivälke	teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	6:09	0:06	58:28	1:02
R2	7:30	0:06	63:56	0:54
R3	6:35	0:05	58:38	0:46
R4	8:47	0:07	55:25	0:28
R5	0:34	0:03	2:27	0:12
R6	0:47	0:03	3:13	0:13
R7	6:04	0:06	27:31	0:26
R8	5:56	0:06	26:34	0:25
R9	4:56	0:06	22:21	0:24
R10	4:06	0:05	18:20	0:21
R11	3:50	0:06	17:02	0:24
R12	3:44	0:06	16:27	0:22
R13	0:00	0:00	0:00	0:00
R14	3:54	0:07	14:46	0:25
R15	4:14	0:07	16:29	0:27
R16	4:52	0:06	18:38	0:24
R17	2:05	0:05	7:44	0:20
R18	2:23	0:06	11:45	0:29
R19	2:59	0:05	20:07	0:25

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Pieksämäen alueelle suunnitellun Sarvikankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arvio on tehty 25 voimalan suunnitelmalle VE2. Selvityksessä on arvioitu myös Sarvikankaan ja lähelle suunniteltujen tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutuksia.

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja, ja ympäristöministeriö suosittelee käyttämään muiden maiden ohjearvoja. Mallinnusten perusteella todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittää Ruotsin 8 tunnin ohjearvon kahden asunnon kohdalla. Näistä toisen kohdalla ylittyy myös Tanskan 10 tunnin ohjearvo. Saksan teoreettisen maksimivälkkeen vuotuinen 30 tunnin raja-arvo ja päiväkohtainen 30 minuutin raja-arvo ylittyy neljän asunnon kohdalla. Sarvikankaan ja lähelle suunniteltujen tuulivoimapuistojen voimaloista ei aiheudu merkittävää välkkeen yhteisvaikutusta asutukselle.

Kokonaisuutena Sarvikankaan suunnitelman VE2 välkevaikutus on kohtalainen. Raportissa on tarkasteltu myös keinoja, joilla suunnitelman todennäköinen vuotuinen välkevaikutus saadaan alennettua alle 8 tuntiin.

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 roottorikehien 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 suuntaakohtaisilla tuulusuusuksilla.

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

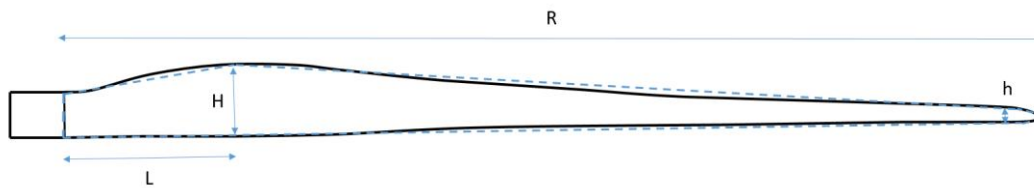
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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 yksinkertaistettu malli tyypillisestä profiilista, jossa lavan maksimileveys on H etäisyydellä L lavan tyvestä. Lavan kokonaispituus on R ja lavan leveys 90 % etäisyydellä tyvestä on h . 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 yksinkertaistettu profiili.

Tämän raportin välkelaskennassa lavan leveys on määritetty useasta kohtaa lapaa, jolloin lavan muoto saadaan kuvattua vielä tarkemmin kuin kahteen leveysarvoon H ja h perustuvassa lineaarisessa approksimaatiossa. 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] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016. Ympäristöministeriö, 2016.
- [2] Boverket: Vindkraftshandboken, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.
- [3] B. Tammelin et al.: Production of the Finnish Wind atlas. Wind Energy, 2011.
- [4] P. Pirinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.