



OX2 Finland Oy

Kettukangas-Hanhikankaan tuulipuiston väikeselvitys

101016561-002

Tekijä
Mika Laitinen

pvm
21/11/2023

Osasto
Wind and Solar Power and New Energy Systems

Projektinnumero
101016561-002

E-mail
mika.laitinen@afry.com

Raporttiversio
002

Raportin tila
VALMIS

Asiakas

OX2 Finland Oy

Kettukangas-Hanhikankaan tuulipuiston välkeselvitys

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatiija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	27.07.2023/ Mika Laitinen, Senior Consultant	27.07.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen
002	21.11.2023/ Mika Laitinen, Senior Consultant	21.11.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Voimaloiden määrät ja paikat muuttuneet suunnitelmassa VE2. Voimaloiden nimet muuttuneet suunnitelmassa VE1.

Aineistojen käyttöoikeudet

Selvityksessä on käytetty Maanmittauslaitoksen 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>.

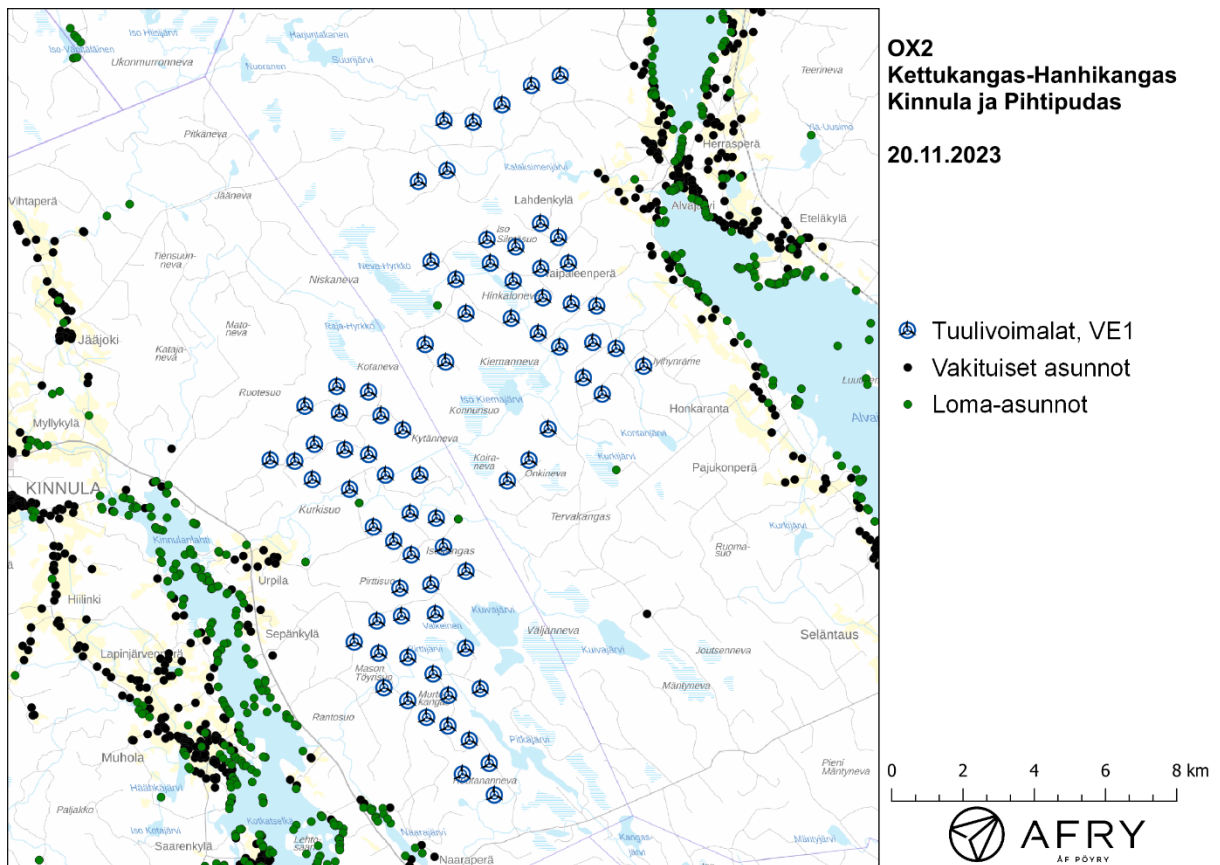
Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	9
2.1	Välkevaikutus	9
2.2	Välkkeen rajoittaminen	9
2.3	Arvioinnin epävarmuudet	9
2.4	Ohjearvot	10
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus	11
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	11
3.2	Todennäköinen välkevaikutus	14
3.3	Teoreettinen maksimivälke	18
3.4	Kettukangas-Hanhikankaan ja läheisten tuulipuistojen yhteisvaikutukset	18
4	Yhteenveto	21
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	22
6	Viitteet	24

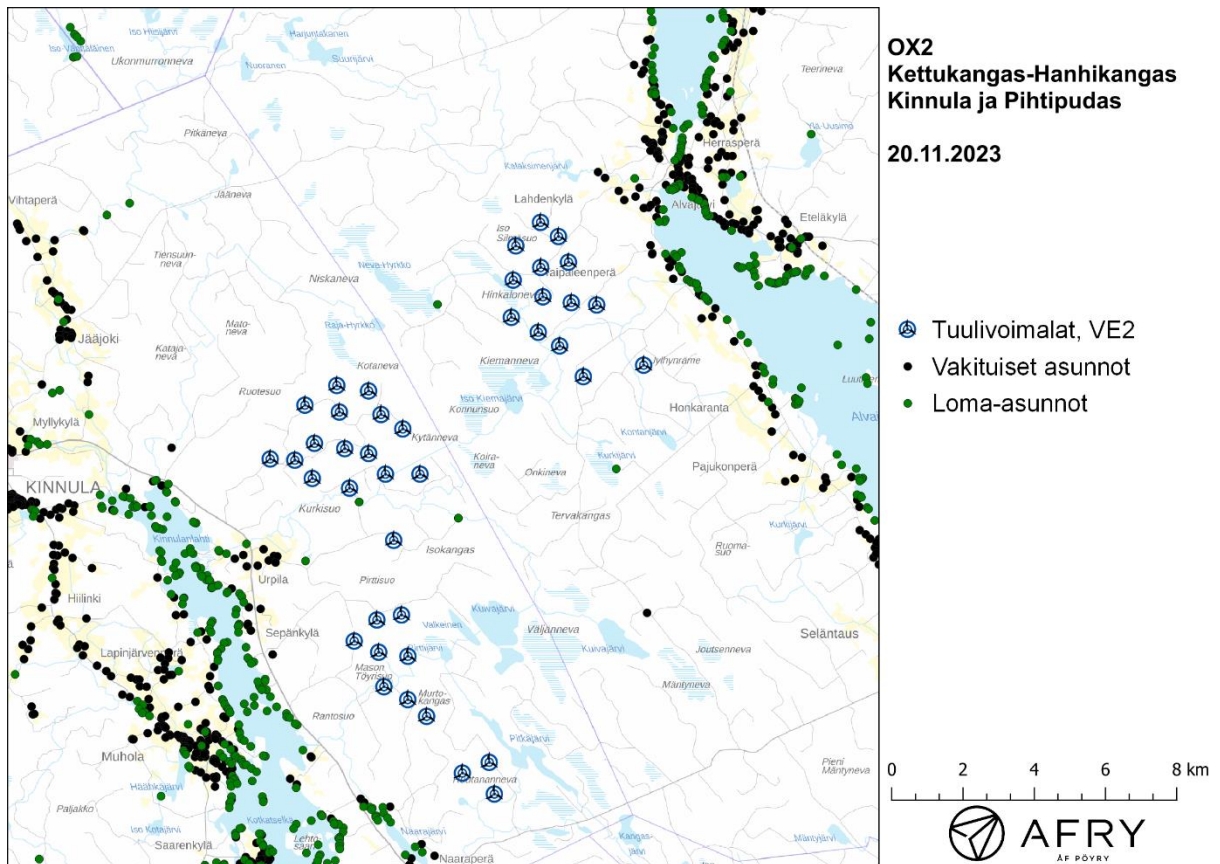
1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Kinnulan ja Pihtiputaan kuntien alueelle suunnitellun Kettukangas-Hanhikankaan tuulipuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi tehdään toteutusvaihtoehdoille VE1 (76 voimalaa) ja VE2 (41 voimalaa). Voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvissa (Kuva 1 ja Kuva 2) ja koordinaatit annettu taulukoissa (Taulukko 1 ja Taulukko 2). Mallinnuksissa voimaloille on käytetty napakorkeutta 190 m ja roottorin halkaisijaa 220 m. Nämä voimaladimensiot eivät vastaa nykyisiä voimaloita, vaan dimensiot on valittu mallintamaan maksimaalinen välkevaikutus.

Tässä selvityksessä arvioidaan myös välkkeen yhteisvaikutuksia Kettukangas-Hanhikankaan lähelle suunniteltujen tai rakennettujen tuulipuistojen kanssa.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Kettukangas-Hanhikankaan toteutusvaihtoehdolla VE1.



Kuva 2: Tuulivoimaloiden sijainnit Kettukangas-Hanhikankaan toteutusvaihtoehdolla VE2.

Taulukko 1: Kettukangas-Hanhikankaan vaihtoehtoon VE1 voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus voimalapaikalla.

Voimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
KHK.1010	416722	7030954	153
KHK.1020	415949	7031451	149
KHK.1030	415559	7030170	164
KHK.1040	415295	7031619	162
KHK.1050	415029	7030633	170
KHK.1060	415405	7032643	151
KHK.1070	414612	7033844	152
KHK.1080	414691	7032708	166
KHK.1090	414364	7031494	171
KHK.1100	414382	7039109	146
KHK.1110	414331	7034562	148
KHK.1120	413833	7033697	162
KHK.1130	413895	7032872	171
KHK.1140	413827	7034960	150
KHK.1150	414042	7029194	180
KHK.1160	413764	7031877	173
KHK.1170	413573	7038827	145
KHK.1180	411118	7037839	148
KHK.1190	413008	7032296	170
KHK.1200	413504	7028317	173
KHK.1210	413134	7034301	156
KHK.1220	412746	7038287	155
KHK.1230	413060	7033340	162
KHK.1240	412418	7033844	167
KHK.1250	412324	7034504	155
KHK.1260	412895	7027737	169
KHK.1270	411939	7037800	147
KHK.1280	411453	7033389	173
KHK.1290	411165	7031071	184
KHK.1300	411203	7036444	156
KHK.1310	410753	7033889	183
KHK.1320	410590	7031563	186
KHK.1330	411736	7032434	185
KHK.1340	410399	7036137	165
KHK.1350	412387	7019813	173
KHK.1360	411829	7020458	179
KHK.1370	412135	7021907	175
KHK.1380	412531	7018924	167
KHK.1390	411229	7020861	171
KHK.1400	411735	7025201	170
KHK.1410	411724	7023044	168



KHK.1420	410876	7024006	171
KHK.1430	411245	7021722	176
KHK.1440	411634	7019512	165
KHK.1450	410813	7022321	170
KHK.1460	410749	7024828	178
KHK.1470	410105	7022788	159
KHK.1480	409962	7029166	168
KHK.1490	409925	7023947	165
KHK.1500	409880	7024726	174
KHK.1510	409475	7027897	165
KHK.1520	409001	7030232	180
KHK.1530	409350	7029570	170
KHK.1540	409234	7023807	163
KHK.1550	408181	7029639	181
KHK.1560	408109	7030384	178
KHK.1570	408332	7028613	165
KHK.1580	407421	7027777	153
KHK.1590	407214	7029833	181
KHK.1600	407482	7028762	165
KHK.1610	406931	7028289	158
KHK.1620	406239	7028323	160
KHK.1630	409136	7026445	157
KHK.1640	411103	7025885	164
KHK.1650	410200	7025663	168
KHK.1660	409706	7026041	163
KHK.1670	410902	7026690	163
KHK.1680	410168	7026826	163
KHK.1690	410444	7027898	165
KHK.1700	409003	7028476	169
KHK.1710	408467	7027505	152
KHK.1720	408598	7023215	163
KHK.1730	409431	7021935	148
KHK.1740	410101	7021573	158
KHK.1750	410630	7021103	160
KHK.1760	409286	7022902	158

Taulukko 2: Kettukangas-Hanhikankaan vaihtoehtoon VE2 voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus voimalapaikalla.

Voimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
KHK.1010	416722	7030954	153
KHK.1050	415029	7030633	170
KHK.1060	415405	7032643	151
KHK.1070	414612	7033844	152
KHK.1080	414691	7032708	166
KHK.1090	414364	7031494	171
KHK.1110	414331	7034562	148
KHK.1120	413833	7033697	162
KHK.1130	413895	7032872	171
KHK.1140	413827	7034960	150
KHK.1160	413764	7031877	173
KHK.1190	413008	7032296	170
KHK.1210	413134	7034301	156
KHK.1230	413060	7033340	162
KHK.1350	412387	7019813	173
KHK.1380	412531	7018924	167
KHK.1440	411634	7019512	165
KHK.1470	410105	7022788	159
KHK.1480	409962	7029166	168
KHK.1490	409925	7023947	165
KHK.1510	409475	7027897	165
KHK.1520	409001	7030232	180
KHK.1530	409350	7029570	170
KHK.1540	409234	7023807	163
KHK.1550	408181	7029639	181
KHK.1560	408109	7030384	178
KHK.1570	408332	7028613	165
KHK.1580	407421	7027777	153
KHK.1590	407214	7029833	181
KHK.1600	407482	7028762	165
KHK.1610	406931	7028289	158
KHK.1620	406239	7028323	160
KHK.1660	409706	7026041	163
KHK.1690	410444	7027898	165
KHK.1700	409003	7028476	169
KHK.1710	408467	7027505	152
KHK.1720	408598	7023215	163
KHK.1730	409431	7021935	148
KHK.1740	410101	7021573	158
KHK.1750	410630	7021103	160
KHK.1760	409286	7022902	158

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 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 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 voimaloille 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 yleistyksiä 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 tuulipuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia välkemäärien osalta [1]. Tässä selvityksessä todennäköisiä välkeaikoja verrataan Ruotsin ja Tanskan suositusarvoihin, ja teoreettisen maksimivälkkeen välkeaikoja Saksan ohjearvoihin. Tästä on muodostunut vakiintunut käytäntö välkevaikutusten arvioinnissa Suomessa.

Tanskassa on määritetty todennäköisen vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 tuntia. Ruotsissa vastaava todennäköisen välkkeen suositusarvo on 8 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä [2]. Tanskassa suositellaan arvioimaan välkevaikutusta todennäköisen välkkeen menetelmällä, eikä suosituksia teoreettisen maksimivälkkeen määrälle ole annettu. Ruotsissa vuotuiselle teoreettiselle maksimivälkkeelle suositellaan käytettäväksi Saksan raja-arvoa.

Teoreettisen maksimivälkkeen raja-arvot Saksassa ovat 30 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä. Saksan ohjeistuksen mukaan todennäköinen vuotuinen välkevaikutus tulee rajoittaa korkeintaan 8 tuntiin, mikäli välkevaikutusta rajoitetaan voimaloihin asennettavien hallintatyökalujen avulla.

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 tuulivoimaloiden dimensiot. Laskennan tuloksena saadaan tieto siitä, kuinka monta tuntia vuodessa alueen eri kohteet ovat välkevaikutuksen alaisena. Tulosta havainnollistetaan tasa-arvokäyrästä, jonka perusteella voidaan arvioida varjostusvaikutusta tarkastelualueella.

Tarkastelualueiden maanpinnan korkeuserot on saatu Maanmittauslaitoksen aineistosta *Korkeusmalli 10 m*. Korkeusdatan vaakaresoluutio on 10 m ja pystysuorainen tarkkuus 1,4 m. Laskennassa huomioitiin korkeuserot siten, että jos auringon, voimalan 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.

Voimalan lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle voimalasta, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu voimalan 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 voimalan aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

Yleensä väkelaskennan maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä voimalan lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä voimalan 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 voimalan muuttuva lapaprofiili.

Väkelaskennassa Kettukangas-Hanhikankaan voimaloille on käytetty napakorkeutta 190 m ja roottorin halkaisijaa 220 m. Voimaloille on käytetty voimalatyyppin Vestas V172 7,2 MW lapaprofiilia skaalattuna roottorin halkaisijalle 220 m. Lapaprofiilia on skaalattu sekä pidemmäksi että leveämmäksi. Skaalatun lavan maksimileveys on 4,9 m. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat voimaloiden 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 voimalan orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Todennäköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri roottorin orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat välkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua välketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [3] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn voimalan käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammissa tuulissa

lavat 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 voimalan käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 3).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Jyväskylän lentoasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä (Taulukko 4). Sääaseman mittausten perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 4). Suunta-kohtaisesti skaalatut väketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioon-ottavasta väketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 3: 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	0,170	0,171	0,166	0,144	0,132	0,157

Taulukko 4: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Jyväskylän lentoasemalla.

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

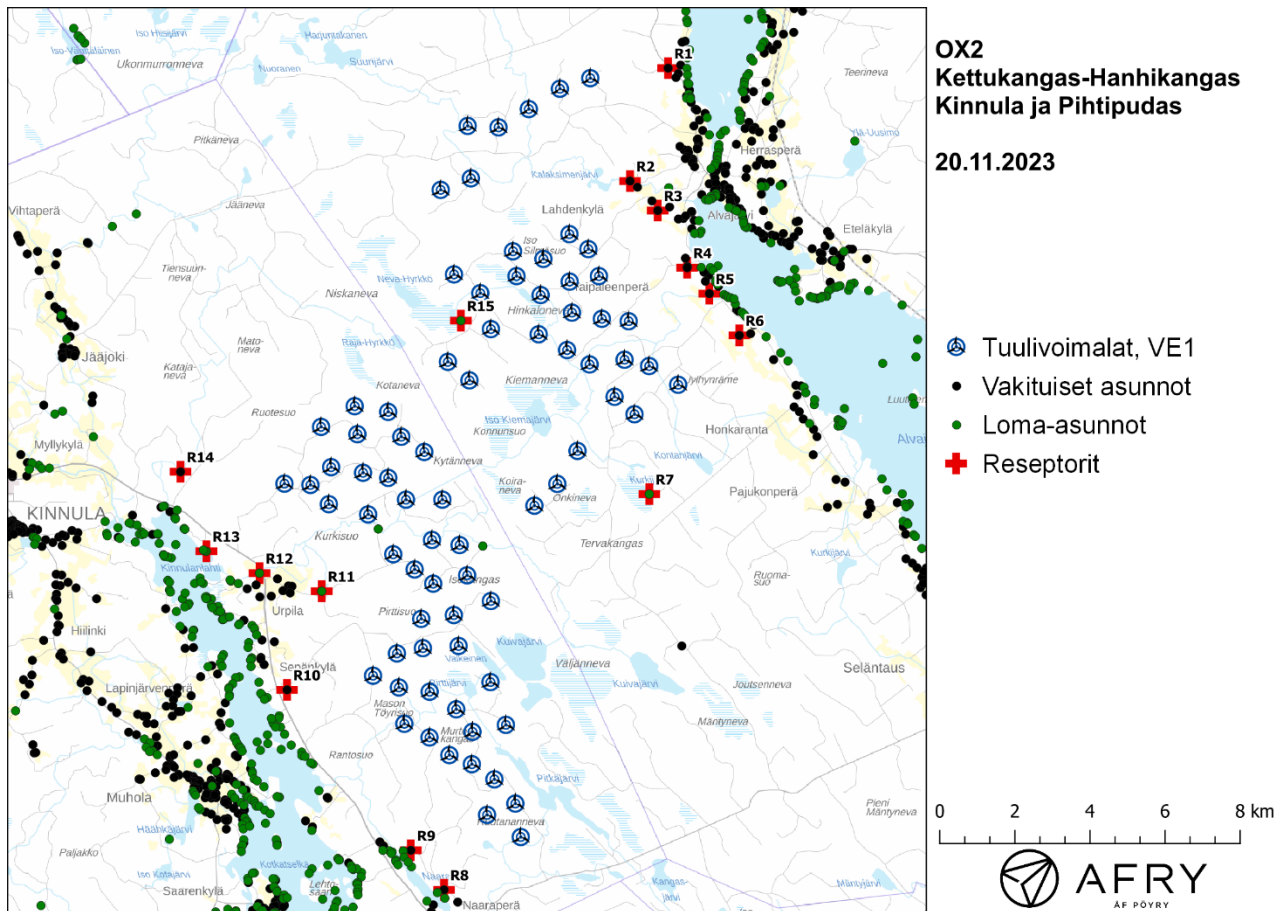
Taulukossa (Taulukko 5) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 15 vertailukiinteistöä, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Kiinteistöjen sijaintipisteitä kutsutaan reseptori-pisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 3). Kartoissa näkyvät vakituiset ja vapaa-ajan asuinrakennukset on ladattu Maanmittauslaitoksen maastotietokannasta. Reseptori R15 sijaitsee 830 m etäisyydellä lähimmästä suunnitelman VE1 voimalasta. Muut reseptorit sijaitsevat lähimmillään 2,1–2,8 km etäisyydellä suunnitelman VE1 voimaloista.

Hankealueella on kaksi loma-asuntoa, joiden omistajien kanssa hankekehittäjä on sopinut tekemänsä kiinteistökaupan, mikäli hanke toteutuu. Tällöin kiinteistöt voidaan purkaa tai niiden virallinen käyttötarkoitus muuttaa muuksi kuin loma-asunnoksi. Tämän vuoksi näitä kahta asuntoa ei ole

valittu reseptoreiksi, vaikka välkevaikutus on merkittävää näiden asuntojen kohdalla. Kartalla (Kuva 3) nämä asunnot sijoittuvat reseptoreiden R7 ja R11 väliin.

Taulukko 5: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	416457	7039371	142	vakituinen asuinrakennus
R2	415444	7036368	127	vakituinen asuinrakennus
R3	416181	7035583	127	vakituinen asuinrakennus
R4	416964	7034061	130	vakituinen asuinrakennus
R5	417556	7033373	131	vakituinen asuinrakennus
R6	418353	7032262	124	vakituinen asuinrakennus
R7	415957	7028040	180	loma-asunto
R8	410491	7017514	153	vakituinen asuinrakennus
R9	409607	7018565	154	vakituinen asuinrakennus
R10	406311	7022834	151	vakituinen asuinrakennus
R11	407233	7025457	151	loma-asunto
R12	405577	7025938	134	loma-asunto
R13	404163	7026520	136	loma-asunto
R14	403475	7028634	142	vakituinen asuinrakennus
R15	410940	7032654	186	loma-asunto



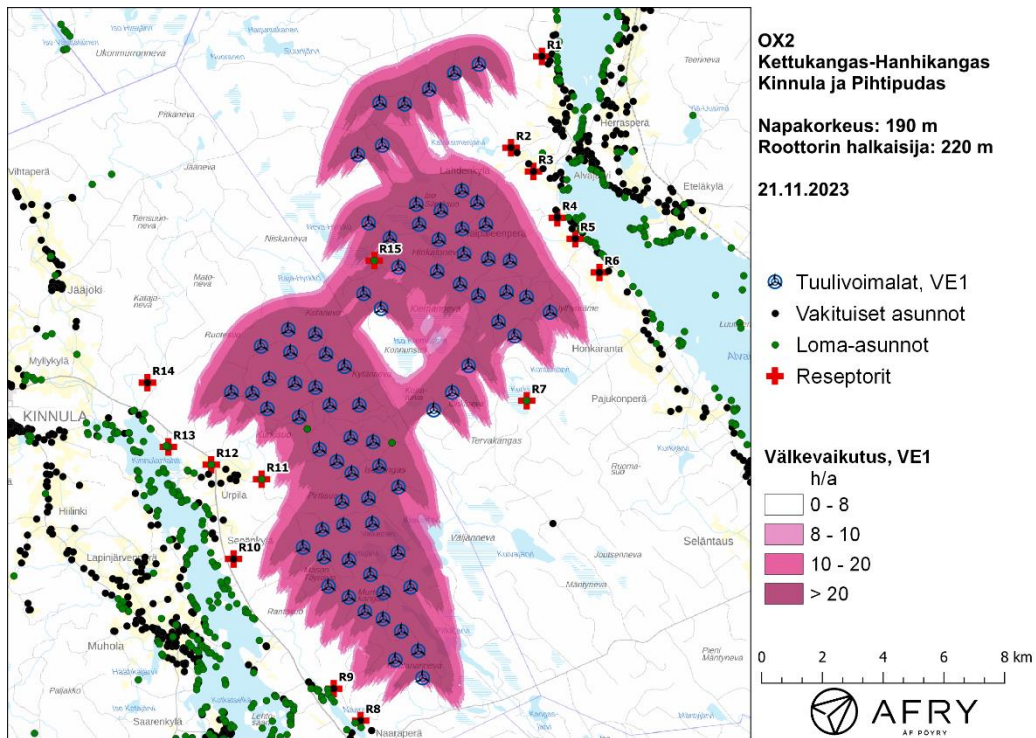
Kuva 3: Reseptoreiden paikat tuulipuiston hankealueella.

3.2 Todennäköinen välkevaikutus

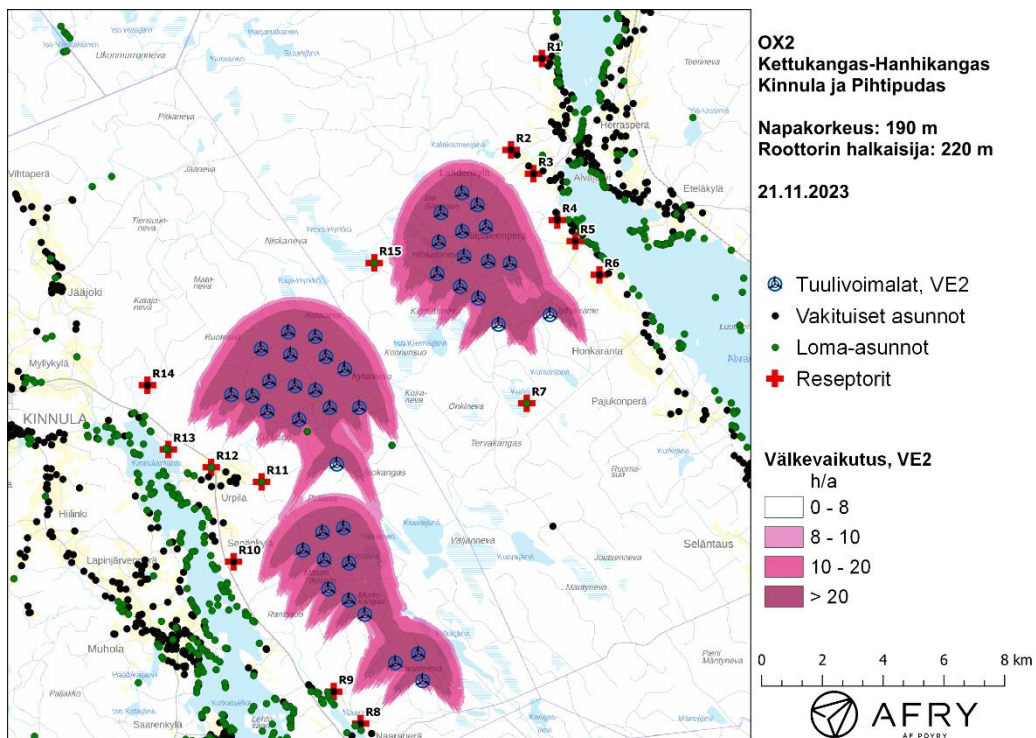
Mallinnetut arviot todennäköisen välkeajan vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvina (Kuva 4 ja Kuva 5). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta tuulivoimaloiden näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen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

Todennäköiset vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 6). Toteutusvaihtoehdolla VE1 todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittää Ruotsin 8 tunnin ohjearvon ja Tanskan 10 tunnin reseptorin R15 kohdalla. Muiden reseptorien kohdilla vaihtoehdon VE1 todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon ja Tanskan 10 tunnin ohjearvon. Toteutusvaihtoehdolla VE2 todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon ja Tanskan 10 tunnin ohjearvon kaikkien reseptoreiden kohdilla. Suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdilla jäävät alle Ruotsin 30 minuutin ohjearvon molemmilla vaihtoehdoilla.

Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptoreiden R11 ja R15 kohdalla on esitetty taulukoissa (Taulukko 7–Taulukko 10). Taulukoissa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus toteutusvaihtoehdolla VE1.



Kuva 5: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus toteutusvaihtoehdolla VE2.

Taulukko 6: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ja suurin päiväkohtainen arvo reseptoreiden kohdalla.

Reseptori	VE1 todennäköinen vuotuinen välke	VE1 todennäköinen päiväkohtainen maksimi	VE2 todennäköinen vuotuinen välke	VE2 todennäköinen päiväkohtainen maksimi
R1	0:50	0:04	0:00	0:00
R2	1:11	0:03	1:11	0:03
R3	1:29	0:04	1:29	0:04
R4	1:22	0:03	1:22	0:03
R5	1:06	0:03	0:48	0:03
R6	0:59	0:03	0:40	0:03
R7	1:34	0:04	0:00	0:00
R8	1:09	0:04	1:09	0:04
R9	1:14	0:04	1:14	0:04
R10	0:44	0:03	0:44	0:03
R11	2:33	0:05	0:56	0:03
R12	1:00	0:03	1:00	0:03
R13	0:00	0:00	0:00	0:00
R14	0:00	0:00	0:00	0:00
R15	24:21	0:18	1:40	0:04

Taulukko 7: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R11 kohdalla toteutusvaihtoehdolla VE1.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:03	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:03
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:08	0:05	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:13
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	0:15	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:15
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	0:20	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:20
Elokuu	0:00	0:00	0:42	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:42
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	0:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:06
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04
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	2:07	0:00	0:18	0:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:33

Taulukko 8: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R11 kohdalla toteutusvaihtoehdolla VE2.

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	0:03	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:03
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:08	0:05	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:13
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	0:15	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:15
Toukokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Kesäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Heinäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Elokuu	0:00	0:00	0:15	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:15
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	0:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:06
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04
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	0:30	0:00	0:18	0:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:56

Taulukko 9: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R15 kohdalla toteutusvaihtoehdolla VE1.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:45	0:45	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:30
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:10	1:52	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:03
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	2:25	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:25
Huhtikuu	0:00	0:00	0:26	4:30	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	4:56
Toukokuu	0:00	0:56	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:56
Kesäkuu	0:00	1:46	0:05	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:51
Heinäkuu	0:00	1:27	0:34	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:01
Elokuu	0:00	0:00	0:27	2:03	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:29
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	4:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	4:01
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:38	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:38
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:33	0:55	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:28
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:02	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:02
Yhteensä	0:00	4:09	1:31	12:59	0:00	1:31	4:11	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	24:21

Taulukko 10: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R15 kohdalla toteutusvaihtoehdolla VE2.

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	0:26	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:26
Huhtikuu	0:00	0:00	0:26	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:26
Toukokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Kesäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Heinäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Elokuu	0:00	0:00	0:27	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:27
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:22	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	0:00	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	0:52	0:47	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:40

3.3 Teoreettinen maksimivälke

Teoreettisen maksimivälkkeen vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdalla on lueteltu taulukossa (Taulukko 11). Toteutusvaihtoehdolla VE1 teoreettinen maksimivälke ylittää Saksan 30 tunnin raja-arvon reseptorin R15 kohdalla. Tämän reseptorin kohdalla myös teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke ylittää Saksan 30 minuutin raja-arvon. Muiden reseptoreiden kohdalla vaihtoehdolla VE1 Saksan raja-arvot eivät ylity. Tanskassa ja Ruotsissa ei ole omia suositus- tai raja-arvoja teoreettiselle maksimivälkkeelle.

Toteutusvaihtoehdolla VE2 vuotuinen teoreettinen maksimivälke jää alle Saksan 30 tunnin ohjearvon kaikkien asuntojen kohdalla. Vaihtoehdolla VE2 teoreettisen maksimivälkkeen suurin päiväkohtainen arvo jää alle Saksan 30 minuutin ohjearvon kaikkien reseptoreiden kohdalla.

Taulukko 11: Teoreettisen maksimivälkkeen vuotuinen määrä ja suurin päiväkohtainen arvo reseptoreiden kohdalla.

Reseptori	VE1 teoreettinen vuotuinen maksimivälke	VE1 teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke	VE2 teoreettinen vuotuinen maksimivälke	VE2 teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	4:09	0:18	0:00	0:00
R2	10:51	0:18	10:51	0:18
R3	10:00	0:17	10:00	0:17
R4	8:52	0:17	8:52	0:17
R5	9:45	0:14	7:00	0:14
R6	6:42	0:17	4:54	0:17
R7	6:39	0:15	0:00	0:00
R8	4:14	0:13	4:14	0:13
R9	4:43	0:16	4:43	0:16
R10	3:01	0:13	3:01	0:13
R11	12:20	0:17	6:11	0:11
R12	3:50	0:10	3:50	0:10
R13	0:00	0:00	0:00	0:00
R14	0:00	0:00	0:00	0:00
R15	143:39	1:08	7:29	0:16

3.4 Kettukangas-Hanhikankaan ja läheisten tuulipuistojen yhteisvaikutukset

Tässä luvussa arvioidaan Kettukangas-Hanhikankaan voimaloiden ja läheisten tuulipuistojen välkkeen yhteisvaikutuksia. Suomen ja Ruotsin mallinnusohjeiden [1][2] mukaan välkevaikutus ulottuu enintään 3 km etäisyydelle voimaloista. Yhteisvaikutusten arvioinnissa riittää siis mallintaa yhteisvaikutukset, kun eri puistojen voimaloiden etäisyys on alle 6 km.

Kettukangas-Hanhikankaan lähelle suunnitelluista tai rakennetuista tuulipuistoista ainoastaan lounaispuolelle rakennetulla Hautakankaan tuulipuistolla on voimaloita alle 6 km etäisyydellä. Kettukangas-Hanhikankaan vaihtoehto VE1 aiheuttaa Hautakankaan voimaloiden suunnalla

suuremman välkevaikutuksen, joten riittää mallintaa Kettukangas-Hanhikankaan VE1:n ja Hautakankaan välkkeen yhteisvaikutus. Hautakankaan tuulipuistossa on 8 voimalaa, joiden koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 12). Välkemallinnuksissa Hautakankaan voimaloille on käytetty napakorkeutta 159 m ja voimalatyyppiä Nordex N163 roottorin halkaisijalla 163 m.

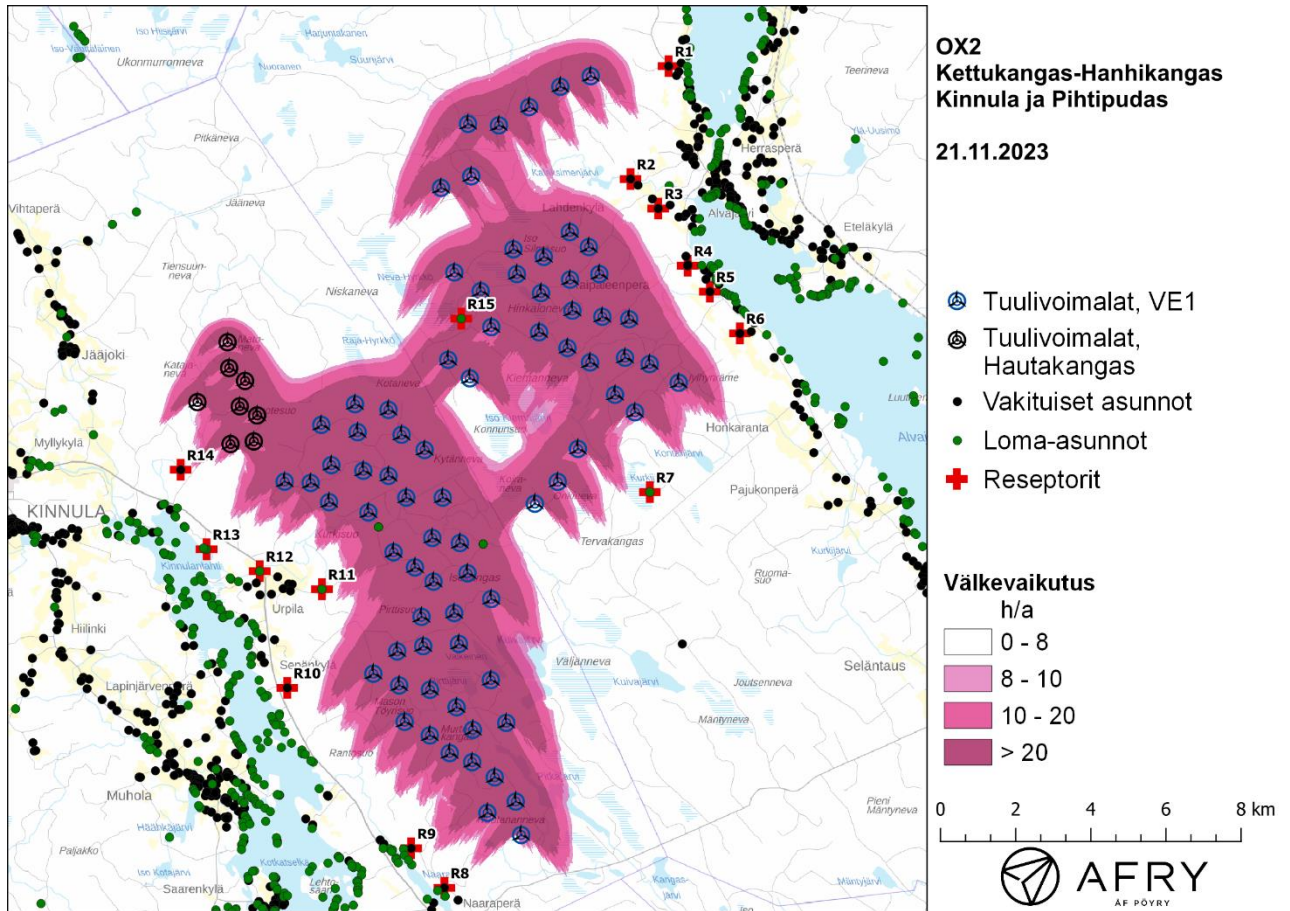
Hautakankaan ja Kettukangas-Hanhikankaan vaihtoehdon VE1 todennäköisen välkkeen yhteisvaikutusten mallinnus on esitetty karttakuvana (Kuva 6). Yhteisvaikutusten todennäköiset välkeajat sekä teoreettiset maksimivälkkeet reseptoreiden kohdilla on listattu taulukossa (Taulukko 13). Mallinnusten perusteella Hautakankaan ja Kettukangas-Hanhikankaan voimaloilla ei ole välkkeen yhteisvaikutuksia asutuksen kohdalla. Hautakankaan voimaloista aiheutuu välkettä reseptoriin R14, mutta Kettukangas-Hanhikankaan voimalat eivät aiheuta välkettä tämän reseptorin kohdalla.

Taulukko 12: Hautakankaan tuulipuiston voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus voimalapaikalla.

Voimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
WTG-1	404720	7032032	163
WTG-2	404762	7031345	163
WTG-3	405185	7031001	160
WTG-4	405044	7030327	155
WTG-5	405506	7030085	159
WTG-6	403918	7030439	156
WTG-8	405418	7029394	161
WTG-9	404798	7029323	152

Taulukko 13: Todennäköinen välkevaikutus ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla, kun mallinnuksissa huomioidaan Hautakankaan ja Kettukangas-Hanhikankaan vaihtoehdon VE1 voimalat.

Reseptori	todennäköinen vuotuinen välke	todennäköinen päiväkohtainen maksimi	teoreettinen vuotuinen maksimivälke	teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	0:50	0:04	4:09	0:18
R2	1:11	0:03	10:51	0:18
R3	1:29	0:04	10:00	0:17
R4	1:22	0:03	8:52	0:17
R5	1:06	0:03	9:45	0:14
R6	0:59	0:03	6:42	0:17
R7	1:34	0:04	6:39	0:15
R8	1:09	0:04	4:14	0:13
R9	1:14	0:04	4:43	0:16
R10	0:44	0:03	3:01	0:13
R11	2:33	0:05	12:20	0:17
R12	1:00	0:03	3:50	0:10
R13	0:00	0:00	0:00	0:00
R14	2:21	0:05	9:02	0:20
R15	24:21	0:18	143:39	1:08



Kuva 6: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinnoissa huomioidaan Hautakankaan ja Kettukangas-Hanhikankaan vaihtoehdon VE1 voimalat.

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Kinnulan ja Pihtiputaan kuntien alueelle suunnitellun Kettukangas-Hanhikankaan tuulipuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arvio on tehty 76 voimalan toteutusvaihtoehdolle VE1 ja 41 voimalan toteutusvaihtoehdolle VE2.

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja, ja ympäristöministeriö suosittelee käyttämään muiden maiden ohjearvoja. Mallinnusten perusteella välkevaikutusten ylityksiä tulee yhden loma-asunnon kohdalla vaihtoehdolla VE1: Ruotsin 8 tunnin ohjearvo ja Tanskan 10 tunnin ohjearvo todennäköiselle vuotuiselle välkkeelle ylittyy. Myös Saksan 30 tunnin raja-arvo vuotuiselle teoreettiselle maksimivälkkeelle ja Saksan 30 minuutin raja-arvo teoreettiselle päiväkohtaiselle maksimivälkkeelle ylittyy. Muiden asuntojen kohdalla vaihtoehdon VE1 välkevaikutus pysyy ohjearvoissa. Toteutusvaihtoehdolla VE2 välkevaikutus jää alle Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvojen kaikkein alueen asuntojen kohdilla.

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 voimalan aiheuttamien välketuntien määrä saadaan integroimalla tiheysfunktioita voimalan roottorikehien läpinäkyvällä taivaanpallon osuudella. Voimaloiden yhteisvaikutus saadaan summaamalla voimalakohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämässä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen roottorin 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.

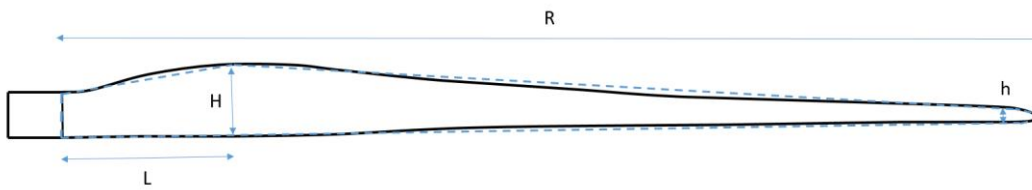
Tuulivoimalan lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle voimalasta, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu voimalan lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevarjostus huomioidaan, mikäli lapa peittää vähintään 20 % auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen voimalan 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 voimalan lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä voimalan 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 7) 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 voimalan keskimääräinen leveys on määritetty parametrien H ja h keskiarvona.



Kuva 7: Tuulivoimalan 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 voimalan 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. Jokinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta ja merestä 1990–2020, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2021:8.