



wpd Finland Oy (nykyinen wpd Suomi Oy)

Hietavaaran tuulivoimahankkeen välkeselvitys

101020540-002

Tekijä
Juulianna Lähteinen

pvm
21/12/2022

Osasto
Wind and Solar Power and New Energy Systems

Projektinnumero
101020540-002

E-mail
juulianna.lahteinen@afry.com

Raporttiversio
001

Raportin tila
VALMIS

Asiakas

wpd Finland Oy

Hietavaaran tuulivoimahankkeen välkeselvitys

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
00	07.03.2022/ Erkki Heikkola		Alkuperäinen (TV-2022-692-1, Numerola Oy)
001	21.12.2022/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	21.12.2022/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Varsavaaran voimaloiden koordinaatit muuttuneet

Aineistojen käyttöoikeudet

Selvityksessä on käytetty Maanmittauslaitoksen ja Suomen ympäristökeskuksen ja 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

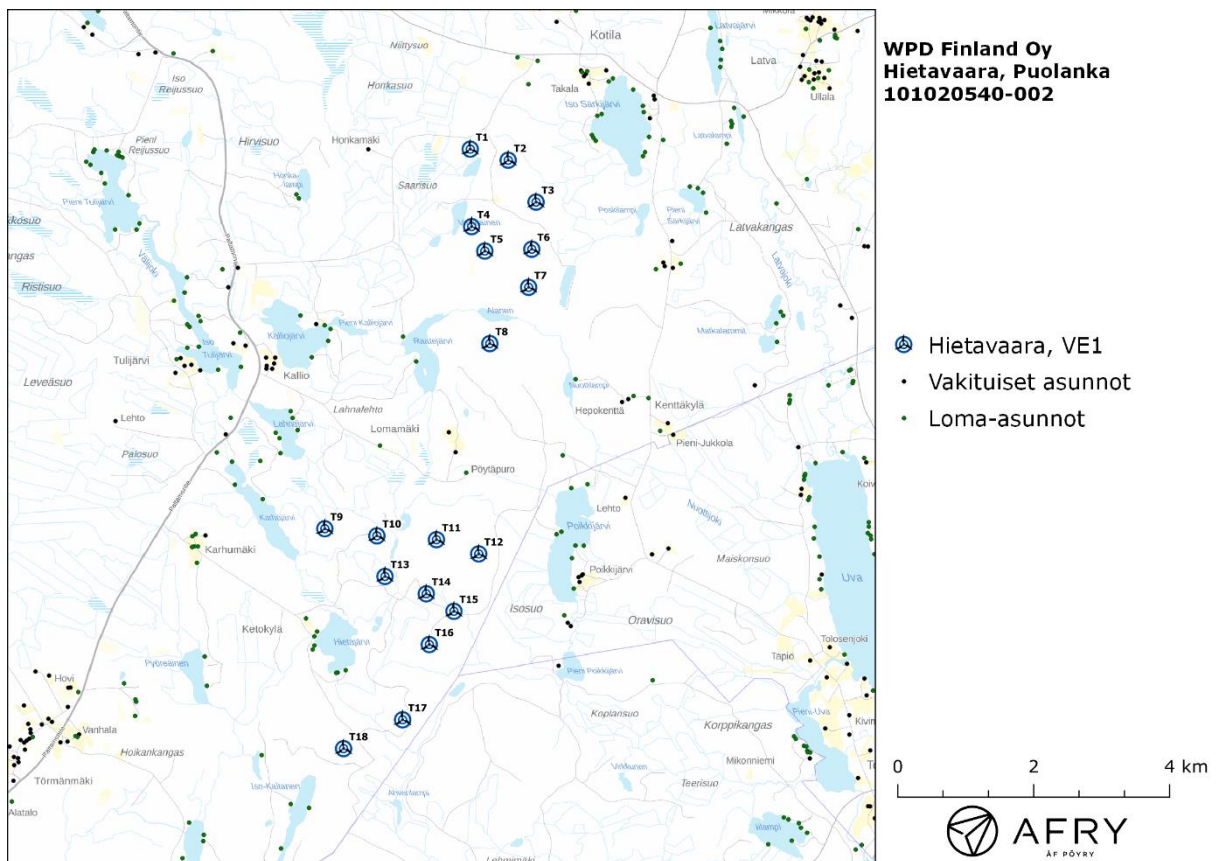
1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	9
2.1	Välkevaikutus.....	9
2.2	Arvioinnin epävarmuudet.....	9
2.3	Ohjearvot	9
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	10
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	10
3.2	Hietavaaran välkevaikutus	14
3.3	Hietavaaran ja Varsavaaran yhteisvaikutus	19
4	Yhteenveto	21
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	22
6	Viitteet.....	24

1 Johdanto

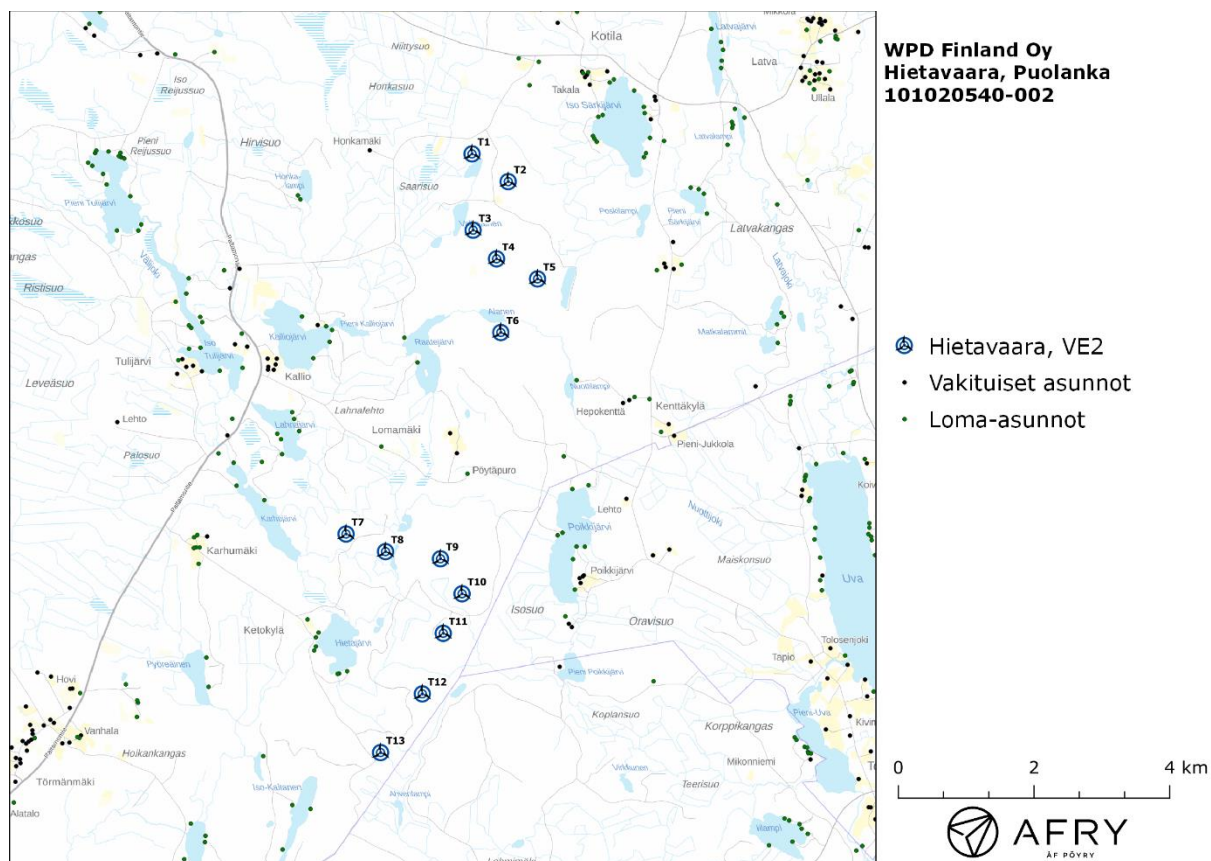
Selvityksessä arvioidaan Puolangan kunnan alueelle suunnitellun Hietavaaran tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Vaikutukset arvioidaan 18 (VE1) ja 13 (VE2) voimalan toteutusvaihtoehdoille, joiden turbiinipaikat on esitetty kuvissa (Kuva 1 ja Kuva 2) ja koordinaatit annettu taulukoissa (Taulukko 1 ja Taulukko 2).

Välkemallinnuksissa huomioidaan Hietavaaran voimaloiden yhteisvaikutukset Paltamon puolelle suunnitellun Varsavaaran tuulipuiston kanssa, jonka voimalakoordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 3) ja sijainti suhteessa Hietavaaran voimaloihin esitetty kuvassa (Kuva 3). Karttakuvissa on esitetty voimaloiden lähellä sijaitsevien asuntojen sijainnit Maanmittauslaitoksen maastotietokannan mukaisesti. Alueen rakennukset käsitellään tarkemmin luvussa 3.1.

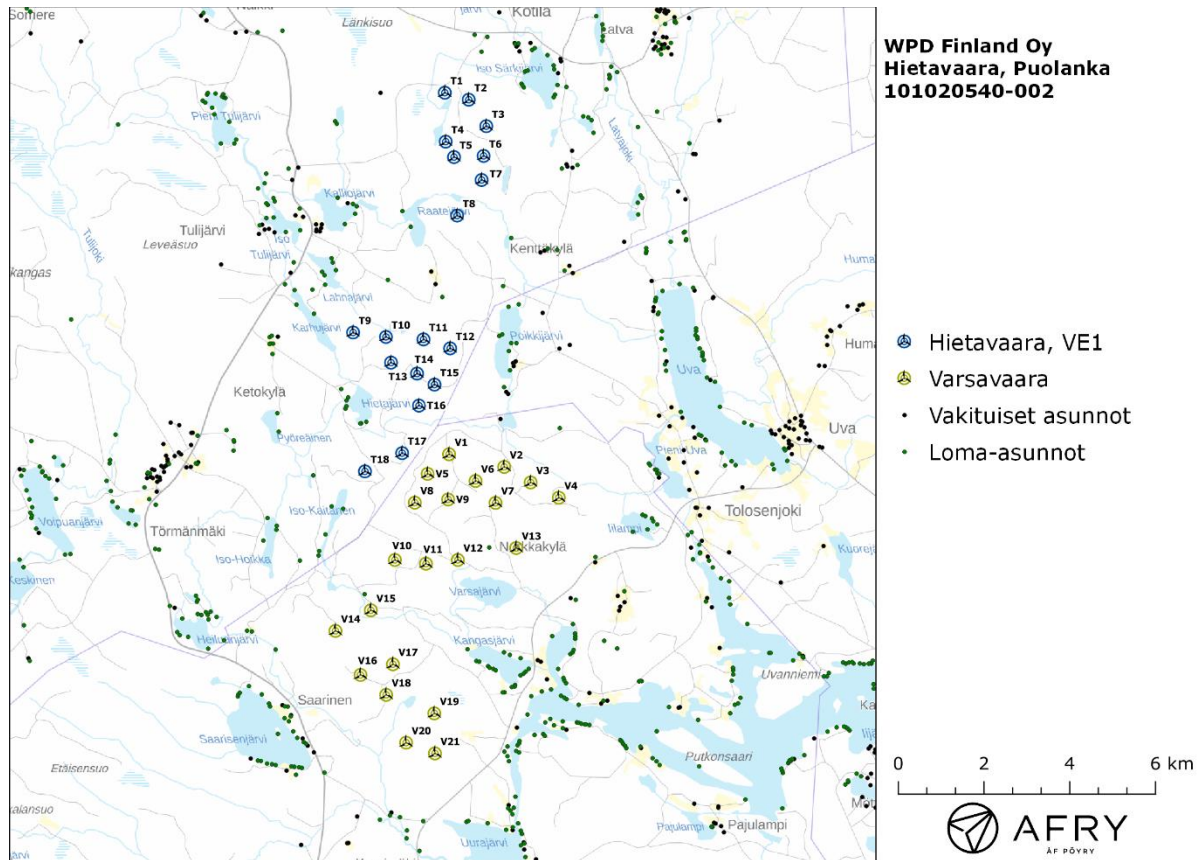
Mallinnuksissa on käytetty kaikille voimaloille roottorin halkaisijaa 200 m sekä napakorkeutta 200 m. Voimaloiden lapaprofiili on määritetty voimalatyyppin N163 valmistajan ilmoittaman lapaprofiilin avulla, jonka pituus on kasvatettu 100 metriin. Profiilia on samalla levennetty siten, että lavan levein kohta on 4,5 m (N163:n lapaprofiilin levein kohta on 4,5 m).



Kuva 1: Hietavaaran tuulivoimaloiden sijainnit vaihtoehdolla VE1.



Kuva 2: Hietavaaran tuulivoimaloiden sijainnit vaihtoehdolla VE2.



Kuva 3: Hietavaaran (VE1) ja Varsavaaran tuulivoimaloiden sijainnit Puolangan ja Paltamon alueilla.

Taulukko 1: Hietavaaran toteutusvaihtoehdon VE1 voimaloiden (18 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	541866,3	7169379,1	263,6
T2	542424,3	7169216,3	256,2
T3	542833,8	7168600,6	237,4
T4	541886,9	7168239,9	272,5
T5	542080,7	7167881,0	272,3
T6	542771,0	7167907,4	245,7
T7	542725,0	7167347,5	246,8
T8	542153,7	7166519,6	276,6
T9	539727,6	7163797,7	226,6
T10	540493,2	7163693,2	239,3
T11	541368,9	7163636,6	295,3
T12	541990,7	7163427,5	252,4
T13	540611,9	7163095,9	242,4
T14	541219,2	7162841,1	270,2
T15	541626,1	7162583,6	247,9
T16	541263,9	7162094,7	254,3
T17	540871,1	7160988,5	266,9
T18	540003,6	7160564,2	247,9

Taulukko 2: Hietavaaran toteutusvaihtoehdon VE2 voimaloiden (13 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	541874,3	7169324,1	257,8
T2	542407,1	7168916,6	256,4
T3	541890,6	7168202,5	273,6
T4	542235,5	7167780,9	270,1
T5	542839,2	7167485,8	255,8
T6	542298,1	7166697,6	245,0
T7	540018,4	7163734,7	234,8
T8	540599,9	7163476,2	240,9
T9	541409,5	7163370,9	286,3
T10	541727,4	7162856,0	259,1
T11	541450,5	7162274,5	245,7
T12	541141,9	7161384,0	255,4
T13	540527,2	7160521,2	230,9

Taulukko 3: Varsavaaran voimaloiden (21 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
V1	541966,4	7160962,0	285,0
V2	543251,3	7160667,5	196,1
V3	543868,2	7160305,7	182,5
V4	544524,5	7159950,8	185,8
V5	541465,4	7160505,1	260,8
V6	542583,3	7160340,4	262,8
V7	543049,5	7159830,2	199,1
V8	541166,3	7159834,8	225,8
V9	541943,2	7159909,1	243,9
V10	540702,4	7158501,3	193,4
V11	541426,0	7158415,5	175,8
V12	542170,5	7158501,3	165,5
V13	543531,9	7158779,6	170,0
V14	539315,5	7156850,0	192,9
V15	540141,1	7157330,1	186,6
V16	539899,9	7155824,9	199,9
V17	540656,0	7156073,0	180,8
V18	540498,3	7155361,0	174,0
V19	541620,8	7154929,6	179,7
V20	540963,3	7154247,8	194,3
V21	541635,9	7153997,3	210,6

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 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 perustuu todennäköisen tilanteen mallinnukseen.

2.2 Arvioinnin epävarmuudet

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

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

2.3 Ohjearvot

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja. Ympäristöministeriön ohjeissa tuulivoimapuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia väkemmärien osalta [4]. Tanskassa on määritetty vuotuisen väketuntimäärän suositusarvoksi 10 h. Ruotsissa vastaava suositusarvo on 8 h ja korkeintaan 30 min päivässä [2]. Näiden ohjearvojen käyttö edellyttää todennäköisen väketilanteen laskentaa. Mikäli väketuntien arvioinnissa käytetään laskennallista maksimituntimäärää, voidaan vuotuisen välkevaikutuksen ohjearvona käyttää Saksassa käytettävää 30 h raja-arvoa. Tässä raportissa mallinnettujen väketasojen arvioinnissa käytetään Ruotsin suunnitteluohjeissa annettuja ohjearvoja.

3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola -mallinnusohjelmistolla, joka huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoima-alueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuuliturbiinien 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 1,5 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 ihmisilmin 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.

Laskennassa voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lapaprofiili on arvioitu voimalatyyppin Nordex N163 valmistajan ilmoittamalla lavan profiilitiedolla, joka on skaalattu 100 pitkä lavan mitalle. Samalla lavan profiilia on levennetty siten, että profiilin levein kohta levenee 4,5 metriin. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat turbiinien käyttöaste, puusto ja paikallinen säätö (pilvisuus ja tuulisuus). Jos esimerkiksi tuulen suunta on kohtisuorassa auringon ja tarkastelupisteen välistä linjaa vasten, ei varjostusvaikutusta esiinny. Varjostuksen laskennassa turbiinin orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Todennäköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri turbiinien orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat välkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua väketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [1] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta 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 4).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Oulun sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [3]. Sääaseman mittauksen perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 5). Suuntakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 4: 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	0,156	0,169	0,160	0,171	0,143	0,135

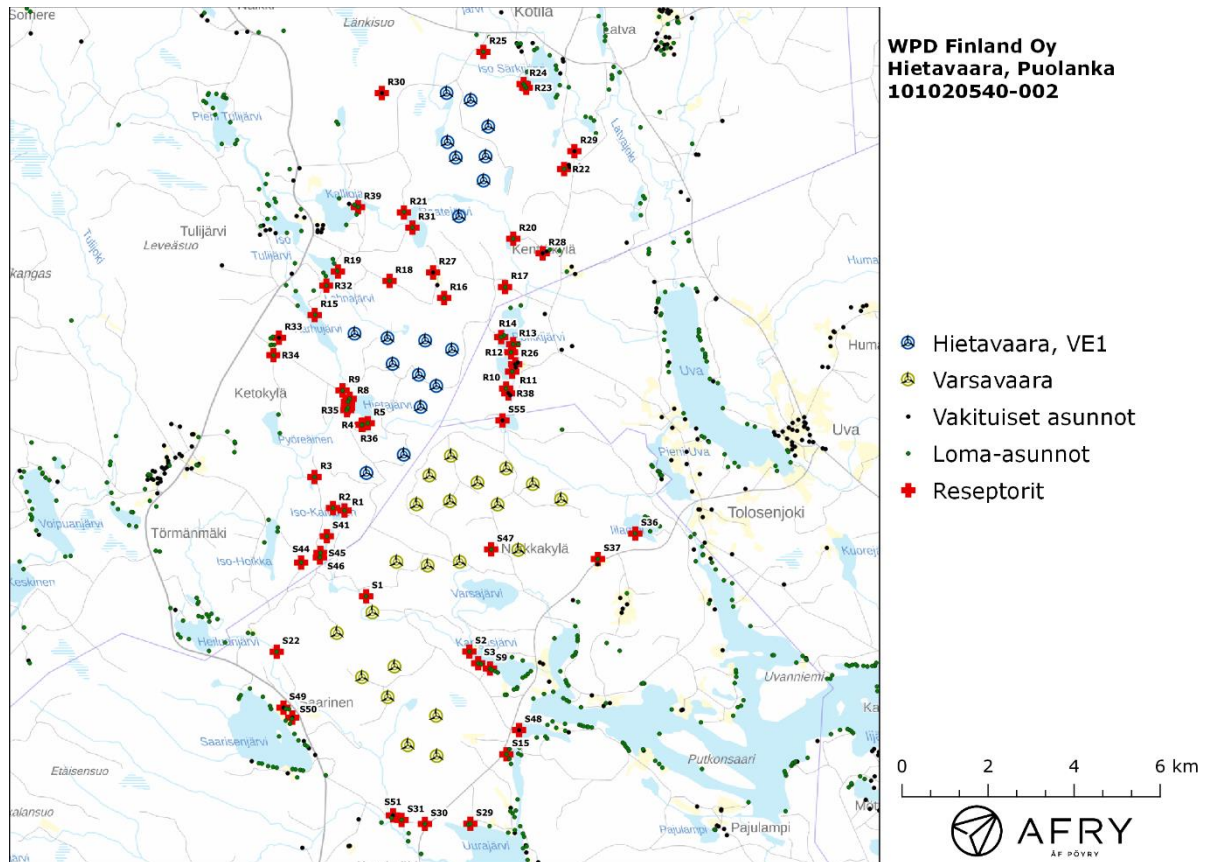
Taulukko 5: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Oulun sääasemalla.

Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,152
Helmikuu	0,289
Maaliskuu	0,377
Huhtikuu	0,455
Toukokuu	0,469
Kesäkuu	0,451
Heinäkuu	0,452
Elokuu	0,413
Syyskuu	0,340
Lokakuu	0,229
Marraskuu	0,171
Joulukuu	0,070

Taulukossa (Taulukko 6) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 59 vertailukiinteistöä, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 4).

Taulukko 6: Vertailupisteiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]
R1	539496	7159690	189,0	R31	541073	7166255	219,2
R2	539228	7159747	189,5	R32	539075	7164909	213,9
R3	538800	7160467	189,5	R33	537973	7163699	238,0
R4	539897	7161676	219,8	R34	537848	7163295	234,6
R5	540036	7161714	228,8	R35	539553	7162019	227,1
R6	539575	7162076	222,2	R36	539917	7161681	220,6
R7	539577	7162214	221,3	R38	543302	7162409	184,4
R8	539615	7162283	221,9	R39	539811	7166729	219,2
R9	539452	7162477	240,3	S1	539998	7157702	181,9
R10	543250	7162520	188,0	S2	542398	7156419	145,2
R11	543390	7162914	185,0	S3	542603	7156147	149,7
R12	543363	7163362	186,1	S9	542877	7156024	155,0
R13	543415	7163548	188,0	S15	543257	7154036	148,1
R14	543136	7163714	187,9	S22	537922	7156413	157,2
R15	538804	7164227	213,0	S29	542419	7152422	142,2
R16	541811	7164621	257,2	S30	541364	7152418	150,1
R17	543225	7164875	211,6	S31	540823	7152510	134,6
R18	540542	7165016	246,4	S36	546250	7159155	171,7
R19	539343	7165237	212,0	S37	545382	7158567	186,3
R20	543417	7165995	198,8	S41	539085	7159093	190,3
R21	540878	7166606	219,9	S44	538488	7158483	221,6
R22	544598	7167612	210,8	S45	538938	7158707	189,6
R23	543717	7169500	177,5	S46	538925	7158603	190,0
R24	543657	7169585	179,1	S47	542904	7158788	187,7
R25	542724	7170331	229,2	S48	543550	7154595	139,2
R26	543460	7163082	198,7	S49	538081	7155118	166,5
R27	541553	7165214	269,0	S50	538283	7154885	163,6
R28	544100	7165658	225,3	S51	540622	7152618	134,4
R29	544837	7168026	205,9	S55	543167	7161780	173,8
R30	540363	7169377	273,8				



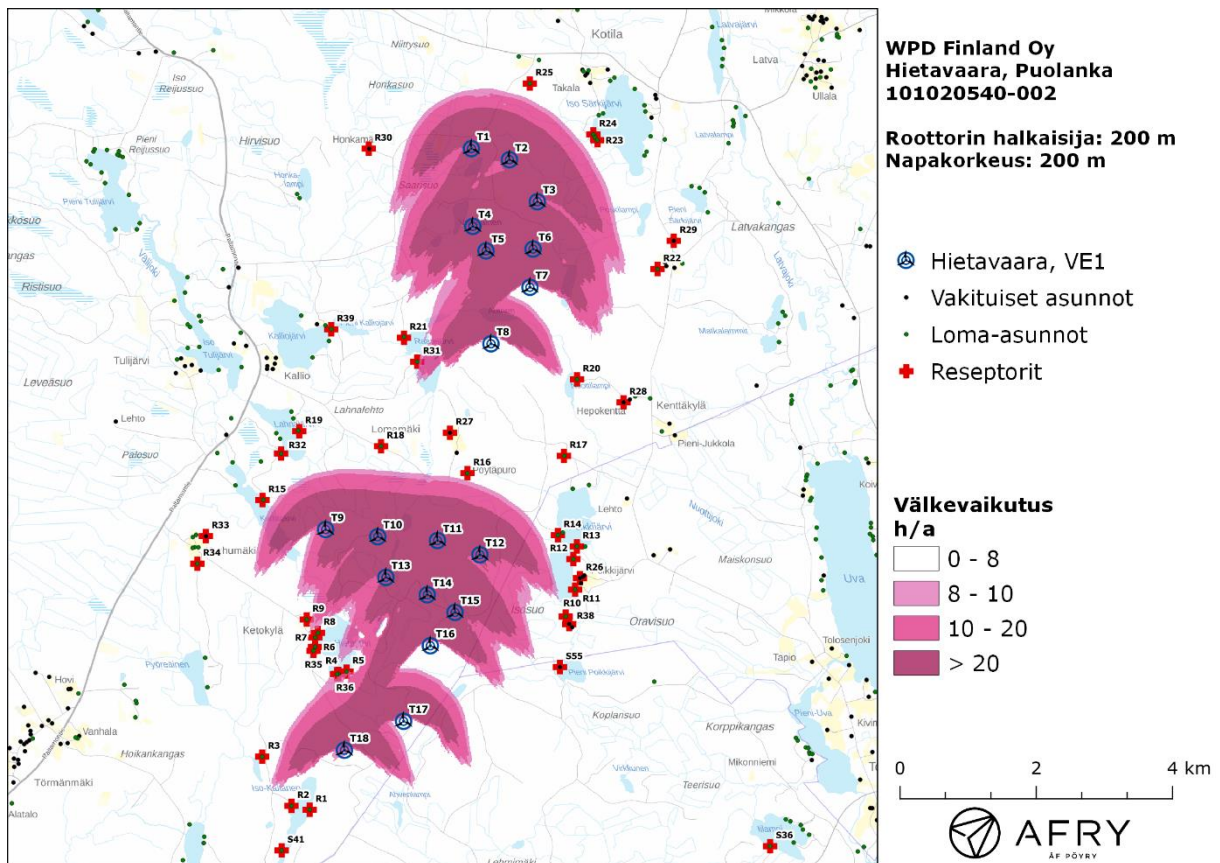
Kuva 4: Vertailukiinteistöjen paikat Hietavaaran ja Varsavaaran tuulipuistojen lähialueella.

3.2 Hietavaaran välkevaikutus

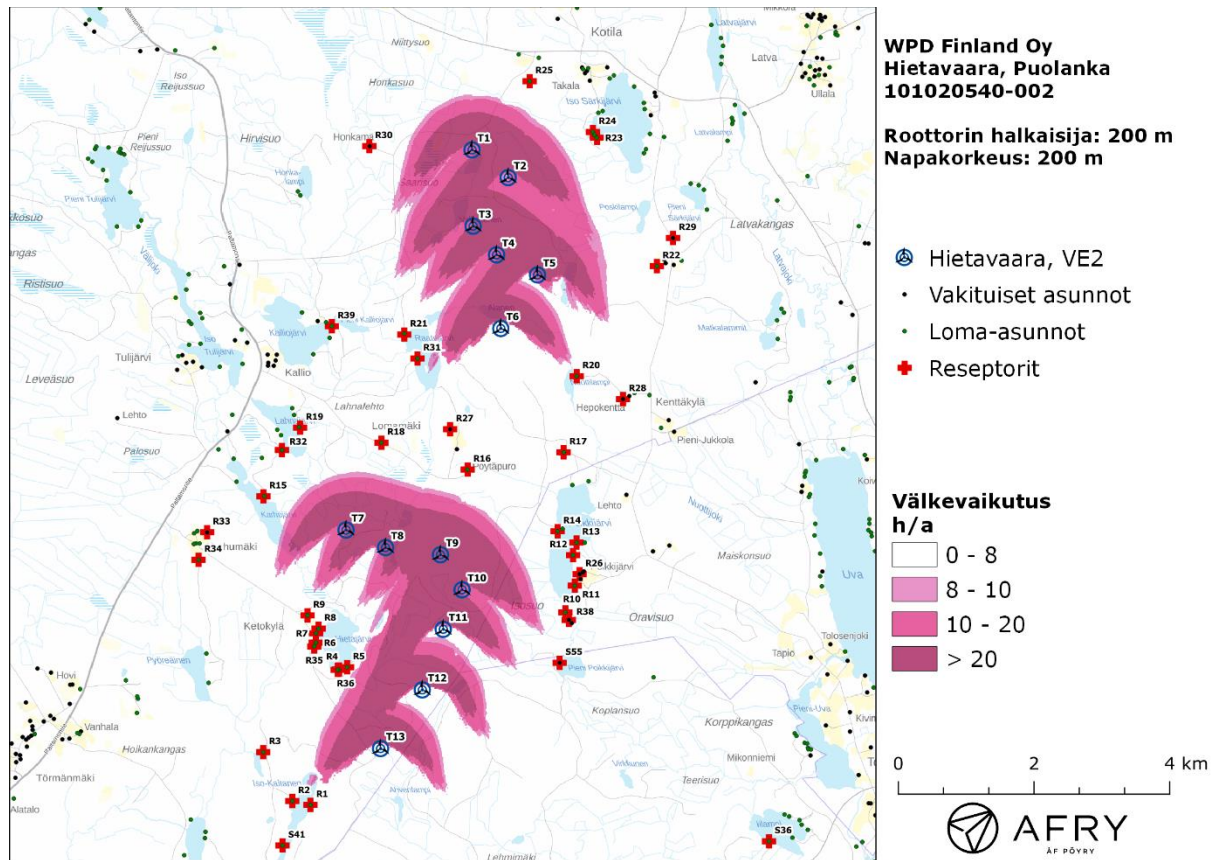
Mallinnetut arviot välketuntien todennäköisestä vuotuisesta määrästä kahdella toteutusvaihtoehdolla ilman Varsavaaran tuulipuistoa on esitetty karttakuvina (Kuva 5 ja Kuva 6). Mallinnoissa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Suomen olosuhteissa puusto rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta.

Vuotuiset välkevaikutusajat vertailukiinteistöjen kohdilla on listattu taulukossa (Taulukko 7). Mallinnusten perusteella välkevaikutus jää alle 8 tunnin ohjearvon molemmilla vaihtoehdoilla VE1 ja VE2.

Välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptorien R5 ja R31 kohdilla molemmilla toteutusvaihtoehdoilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 8-Taulukko 11). Taulukoissa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 5: Hietavaaran tuulivoimaloiden aiheuttama välketuntien määrä vaihtoehdolla VE1 ilman puuston vaikutusta.



Kuva 6: Hietavaaran tuulivoimaloiden aiheuttama välketuntien määrä vaihtoehdolla VE2 ilman puuston vaikutusta.

Taulukko 7: Välkevaikutusten kestot reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaika Varsavaara huomioituna [h:min]		Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimi- välkeaika Varsavaara huomioituna [min]		Todennäköinen vuotuinen välkeaika ilman Varsavaaraa [h:min]	
	VE1	VE2	VE1	VE2	VE1	VE2
R1	0:00	0:12	0	1	0:00	0:12
R2	2:10	3:58	3	6	1:19	3:04
R3	2:46	0:19	7	1	2:46	0:19
R4	4:36	3:08	7	6	4:36	2:54
R5	7:47	5:20	8	7	7:43	5:20
R6	3:56	2:14	4	3	3:56	2:14
R7	5:07	2:00	5	3	5:05	2:00
R8	5:52	2:06	6	3	5:46	2:06
R9	6:00	4:18	9	7	6:00	4:08
R10	5:27	3:08	6	5	4:50	2:23
R11	3:19	1:42	5	4	3:06	1:26
R12	2:38	1:09	8	3	2:38	1:08
R13	2:01	0:55	7	3	2:01	0:55
R14	3:28	1:17	9	3	3:28	1:17
R15	4:20	1:42	11	5	4:20	1:42
R16	5:48	2:34	7	4	5:48	2:34
R17	0:30	0:07	2	1	0:30	0:07
R18	4:18	2:27	7	5	4:18	2:27
R19	1:08	0:46	3	3	1:08	0:46
R20	3:06	4:33	6	7	3:06	4:33
R21	2:50	3:12	6	5	2:50	3:12
R22	1:34	0:44	4	4	1:34	0:44
R23	4:13	2:00	9	4	4:13	2:00
R24	4:09	2:02	9	4	4:09	2:02
R25	3:57	2:13	5	4	3:57	2:13
R26	2:30	1:15	6	4	2:24	1:08
R27	1:43	0:56	4	3	1:43	0:56
R28	0:24	0:29	2	2	0:24	0:29
R29	0:52	0:16	3	2	0:52	0:16
R30	1:47	1:33	5	5	1:47	1:33
R31	7:01	3:29	10	7	7:01	3:29
R32	1:42	0:57	4	4	1:42	0:57
R33	0:37	0:19	4	3	0:37	0:19
R34	0:31	0:16	3	2	0:31	0:16
R35	3:13	2:12	4	3	3:13	2:12
R36	4:05	2:39	7	5	4:05	2:39
R38	4:39	3:08	5	4	3:51	2:09
R39	0:09	0:00	1	0	0:09	0:00
S1	37:59	37:59	33	33	0:00	0:00
S2	1:26	1:26	3	3	0:00	0:00
S3	1:23	1:23	3	3	0:00	0:00
S9	0:52	0:52	3	3	0:00	0:00
S15	1:50	1:50	6	6	0:00	0:00
S22	2:14	2:14	6	6	0:00	0:00
S29	0:00	0:00	0	0	0:00	0:00

S30	0:00	0:00	0	0	0:00	0:00
S31	0:00	0:00	0	0	0:00	0:00
S36	0:39	0:39	3	3	0:00	0:00
S37	1:14	1:14	3	3	0:00	0:00
S41	1:08	1:40	3	3	0:00	0:32
S44	0:48	0:48	2	2	0:00	0:00
S45	0:43	0:43	2	2	0:00	0:00
S46	1:21	1:21	3	3	0:00	0:00
S47	37:05	37:05	25	25	0:00	0:00
S48	0:46	0:46	3	3	0:00	0:00
S49	0:43	0:43	3	3	0:00	0:00
S50	1:13	1:13	4	4	0:00	0:00
S51	0:00	0:00	0	0	0:00	0:00
S55	7:22	8:36	11	11	2:12	3:28

Taulukko 8: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto reseptorin R5 kohdalla vaihtoehdolla VE1.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:01
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:01
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	1:23	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:23
Huhtikuu	0:00	0:00	0:09	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:09
Toukokuu	0:00	0:00	1:46	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:46
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	0:26	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:26
Elokuu	0:00	0:00	1:18	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:18
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:21	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:21
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:36	0:19	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:02
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:12	0:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:16
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	3:39	0:00	2:20	0:31	1:12	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	7:43

Taulukko 9: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto reseptorin R5 kohdalla vaihtoehdolla 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	0:29	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:29
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:47	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:47
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:29	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:29
Toukokuu	0:00	0:00	1:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:07
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	0:24	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:24
Elokuu	0:00	0:00	0:37	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:37
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	1:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:04
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:20	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:20
Marraskuu	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
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	2:08	2:20	0:00	0:51	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:20

Taulukko 10: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto reseptorin R31 kohdalla vaihtoehdolla VE1.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	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	0:03	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:03
Toukokuu	0:00	0:01	3:11	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:12
Kesäkuu	0:00	0:27	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:27
Heinäkuu	0:00	0:21	1:36	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:57
Elokuu	0:00	0:00	1:23	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:23
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	0:49	6:13	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	7:01

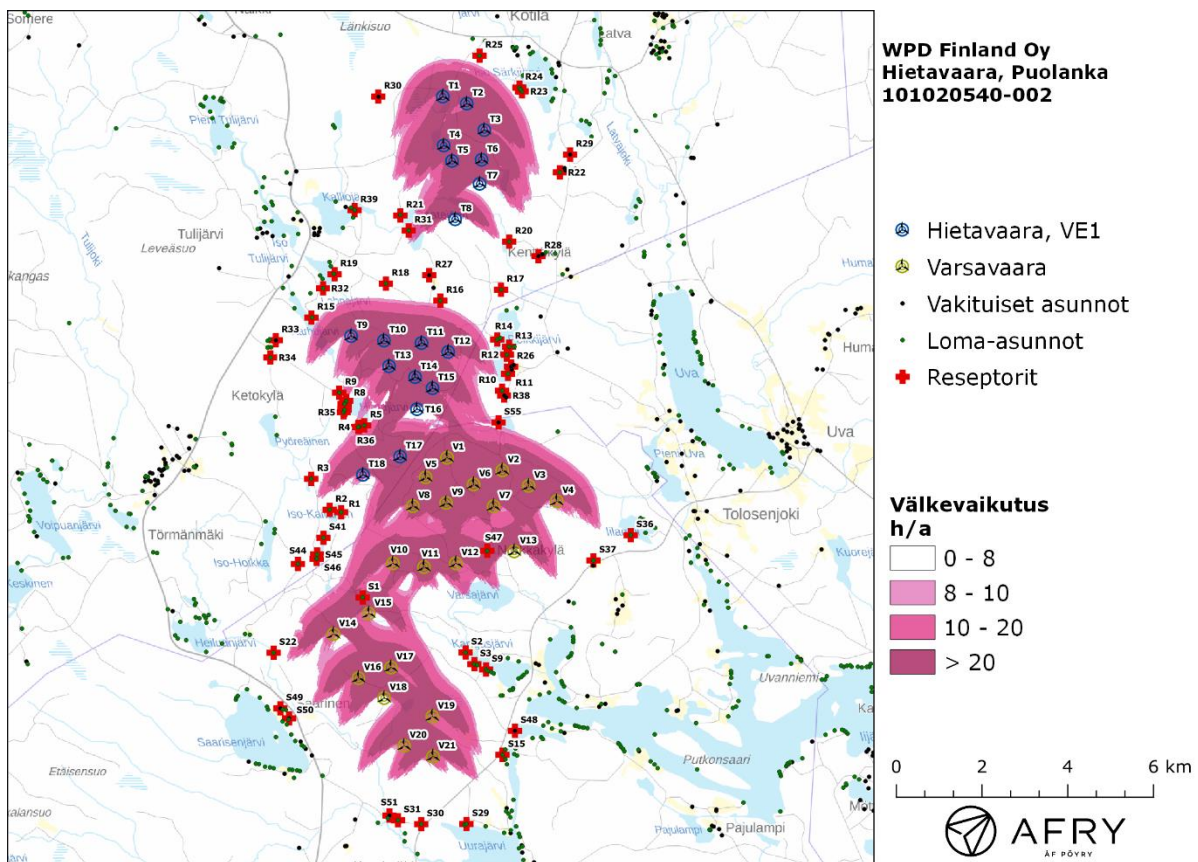
Taulukko 11: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto reseptorin R31 kohdalla vaihtoehdolla VE2.

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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Toukokuu	0:00	0:00	1:49	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:49
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	0:46	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:46
Elokuu	0:00	0:00	0:54	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:54
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	0:00	3:29	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:29

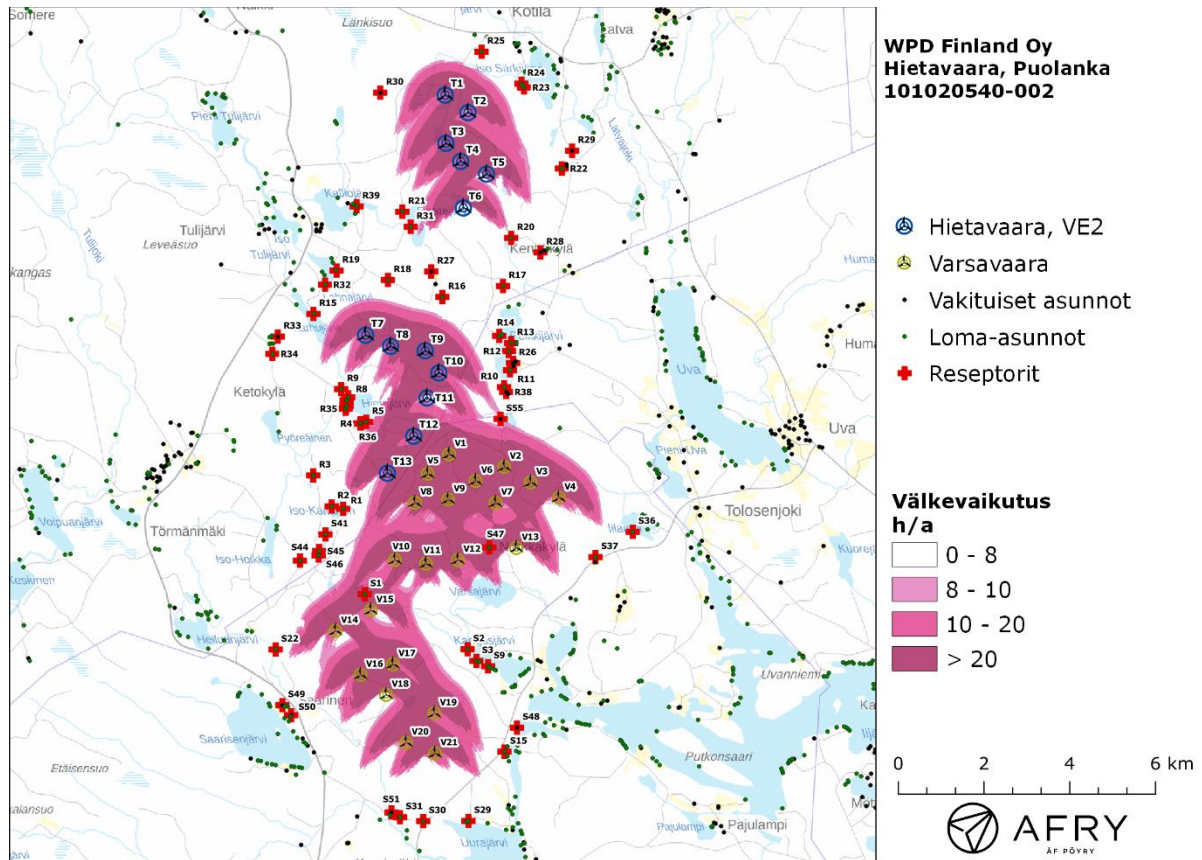
3.3 Hietavaaran ja Varsavaaran yhteisvaikutus

Mallinnetut arviot välketuntien todennäköisestä vuotuisesta määrästä kahdella toteutusvaihtoehdolla yhdessä Varsavaaran tuulipuiston kanssa on esitetty karttakuvina (Kuva 7 ja Kuva 8). Vuotuiset välkevaikutusajat vertailukiinteistöjen kohdalla on listattu kappaleessa 3.2 taulukossa (Taulukko 7).

Mallinnusten perusteella välkkeen yhteisvaikutukset ylittävät 8 tunnin ohjearvon kahden kiinteistön (S1 ja S47) kohdalla vaihtoehdolla VE1 ja kolmen kiinteistön (S1, S47 ja S55) kohdalla vaihtoehdolla VE2. Lisäksi molemmissa vaihtoehdoissa päiväkohtainen maksimivälke aika ylittyy reseptorin S1 kohdalla kolmella minuutilla. Ohjearvon ylitykset aiheutuvat pääosin Varsavaaran voimaloista. Piste S55 kohdalla Hietavaaran voimaloiden vaikutus on vaihtoehdolla VE1 2 h 12 min ja vaihtoehdolla VE2 3 h 28 min.



Kuva 7: Hietavaaran ja Varsavaaran tuulivoimaloiden aiheuttama välketuntien määrä vaihtoehdolla VE1.



Kuva 8: Hietavaaran ja Varsavaaran tuulivoimaloiden aiheuttama väiketuntien määrä vaihtoehdolla VE2.

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Puolangan kunnan alueelle suunnitellun Hietavaaran tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennalliset arviot. Vaikutukset arvioitiin 18 ja 13 voimalan toteutusvaihtoehdoille, ja mallinuksissa otettiin lisäksi huomioon yhteisvaikutukset Paltamon puolelle suunnitellun Varsavaaran tuulipuiston kanssa.

Välkemallinnusten mukaan vuotuinen välkeaika ylittää 8 tunnin ohjearvon kahden lähikiinteistön kohdalla toteutusvaihtoehdolla VE1 ja kolmen kiinteistön kohdalla vaihtoehdossa VE2. Ohjearvon ylitykset aiheutuvat kuitenkin pääosin Varsavaaran voimaloista.

5 Välkevaikutuksen laskentamenetelmä

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

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

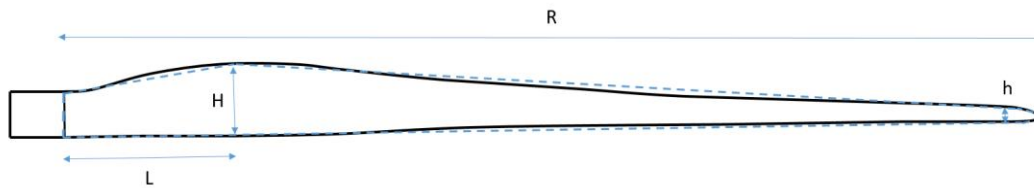
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevarjostus huomioidaan, mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen turbiinin aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

Kun lavan leveys on w metriä, niin 20 % Auringon peittoon perustuvan välkevarjostuksen maksimietäisyyden määrittämiseen voidaan johtaa laskentakaava

$$\text{maksimietäisyys} = (5 * d * w) / 1'097'780,$$

missä d on etäisyys Aurinkoon (150'000'000 km). Yleensä välkelaskennan maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä turbiinin lapa ei ole vakiolevyinen: Levein kohta sijaitsee lähellä turbiinin napaa ja lapa kapenee huomattavasti kärkeä kohti liikuttaessa. Tällä perusteella lavan tyven välkevaikutus ulottuu huomattavasti pidemmälle kuin lavan kärjen, mikäli arviointiperusteena käytetään Auringon peittoastetta.

Seuraavassa kaaviokuvassa (Kuva 9) on esitetty malli tyypillisestä profiilista, jossa lavan maksimileveys on H etäisyydellä L lavan tyvestä. Lavan kokonaispituus on R ja lavan leveys 90 % etäisyydellä tyvestä on h . Lavan oletetaan kapenevan lineaarisesti arvosta H arvoon h liikuttaessa maksimikohdasta kärkeen. Tavanomaisesti välkelaskennassa turbiinin keskimääräinen leveys on määritetty parametrien H ja h keskiarvona.



Kuva 9: Turbiinin lavan malliprofiili.

Tämän raportin välkелaskennassa käytetään turbiinivalmistajan ilmoittamiin tietoihin perustuvaa lavan profiilitietoa. Laskennassa huomioitava roottorin säde vaihtelee välillä $[0, R]$ riippuen tarkastepisteen etäisyydestä turbiineihin sekä lavan leveydestä ja sitä vastaavasta Auringon peittoasteesta. Tällä tavoin välkелaskennassa huomioidaan turbiinin muuttuva lapaprofiili, ja saadaan realistisempia tuloksia kuin olettamalla tietty keskimääräinen lavan leveys ja sitä vastaava kiinteä maksimietäisyys.

6 Viitteet

- [1] B. Tammelin et al.: Production of the Finnish Wind atlas. Wind Energy, 2011.
- [2] Boverket: *Vindkraftshandboken*, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.
- [3] P. Pirinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.
- [4] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016.