



Pohjan Voima Oy

**Tukkimäen tuulivoimahankkeen välkeselvitys (VE1)**

101021203-003, 27.09.2023

Tekijä  
AFRY Finland Oy  
Juulianna Lähteinen

E-mail  
[juulianna.lahteinen@afry.com](mailto:juulianna.lahteinen@afry.com)

Osasto  
Wind and Solar Finland

Raporttiversio  
002

Asiakas  
Pohjan Voima Oy  
Sami Merelä

Päivämäärä  
27/09/2023

Projektinumero  
101021203-003

Raportin tila  
VALMIS

## Tukkimäen tuulivoimahankkeen välkeselvitys (VE1)

## Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatiija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	29.05.2023/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	29.05.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen
002	27.09.2023/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	27.09.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Voimalakoordinaattien muutos. Rakentamattomien rakennuspaikkojen ja Sammakkokankaan jätekeskuksen lisääminen reseptoreiksi. Yhteisvaikutukset Haapalamminkankaan kanssa.

## Aineistojen käyttöoikeudet

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

## Sisällysluettelo

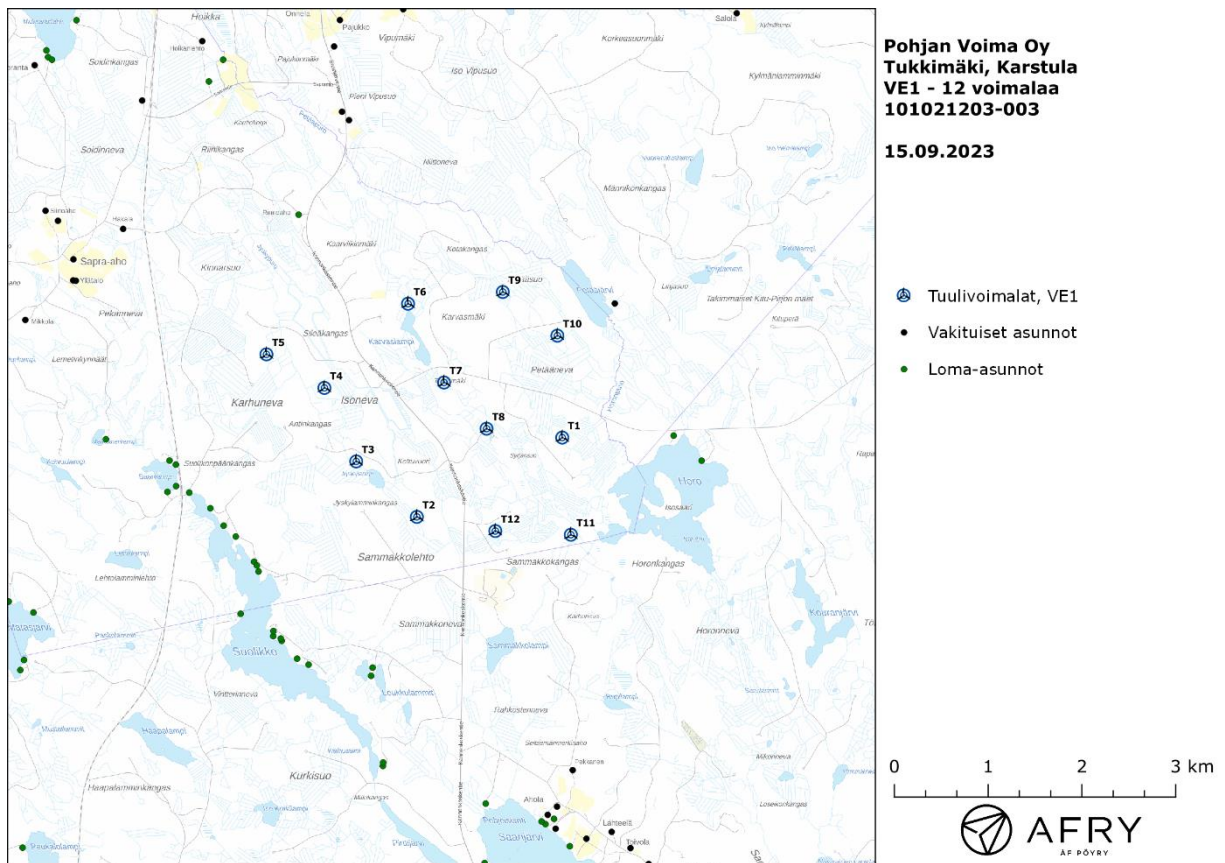
1	Johdanto .....	4
2	Tuulivoimaloiden välke .....	6
2.1	Välkevaikutus.....	6
2.2	Välkkeen rajoittaminen.....	6
2.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	6
2.4	Ohjearvot .....	6
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	8
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto .....	8
3.2	Välkevaikutus.....	12
3.3	Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutus.....	15
4	Yhteenveto .....	17
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä .....	18
6	Viitteet.....	20

# 1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Karstulan kuntaan suunnitellun Tukkimäen tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty 12 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE1. Voimaloiden sijainnit on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1).

Mallinnuksissa voimaloilla on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 200 m. Voimaloiden lapaprofiili on määritetty voimalatyyppin V162 valmistajan ilmoittaman lapaprofiilin avulla, jonka pituus on kasvatettu 100 metriin. Profiilia on samalla levennetty siten, että lavan levein kohta on 4,6 m (V162:n lapaprofiilin levein kohta on 4,3 m).

Selvityksessä arvioidaan myös Tukkimäen ja läheisen toiminnassa olevan Haapalamminkankaan tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia. Yhteisvaikutuksia käsitellään erillisessä luvussa 3.3.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit hankealueella sijoitussuunnitelmalla VE1.

*Taulukko 1: Tuulivoimaloiden (12 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.*

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	412595	6966812	177
T2	411045	6965968	182
T3	410399	6966558	176
T4	410059	6967341	172
T5	409442	6967698	170
T6	410951	6968237	166
T7	411335	6967399	174
T8	411789	6966907	176
T9	411961	6968362	163
T10	412543	6967897	173
T11	412687	6965777	183
T12	411882	6965817	185

## 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 iltat). Suomessa voimala aiheuttaa välkevaikutusta eteläpuolelleen vain pohjoisen napapiirin pohjoispuolella.

Välkevaikutuksen laskenta voi perustua joko teoreettisen maksimivälkkeen tai todennäköisen tilanteen mallinnukseen:

- Teoreettisen maksimivälkkeen laskennassa oletetaan, että päiväaikaan Aurinko paistaa jatkuvasti, tuulivoimalan roottori pyörii jatkuvasti, ja roottori on aina kohtisuorassa Aurinkoa kohden.
- Todennäköisen tilanteen mallinnuksessa otetaan huomioon paikallinen tilastollinen aineisto auringonpaisteen määrästä ja ajoittumisesta sekä tuulen suuntien ja nopeuksien jakautumisesta.

Tämän selvityksen väkelaskenta perustuu todennäköisen tilanteen mallinnukseen.

### 2.2 Välkkeen rajoittaminen

Välkevaikutusta voidaan vähentää voimalakohtaisella välkkeen hallintatyökalulla (shadow flicker protection system), joka sisältää valoanturin ja välkkeenhallintasovelluksen. Työkalun avulla voimala voidaan pysäyttää joko havaitun auringonpaisteen perusteella ja/tai haluttuina vuoden- ja kellonaikoina. Pysäytetty voimala ei aiheuta välkettä.

### 2.3 Arvioinnin epävarmuudet

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

Puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Puuston näkyvyyttä peittävä vaikutus vaihtelee kuitenkin vuosien ja vuodenaikojen suhteen, mikä lisää arvioinnin epävarmuutta. Mallinnuksen tuloksiin vaikuttaa myös käytettävien tausta-aineistojen tarkkuus ja mallintamisessa on tehtävä 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 tuulivoimapuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia välkemäärien osalta [3]. Tanskassa on määritetty vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 h.

Ruotsissa vastaava suositusarvo on 8 h ja korkeintaan 30 min päivässä [2]. Näiden ohjearvojen käyttö edellyttää todennäköisen välketilanteen laskentaa. Mikäli välketuntien arvioinnissa käytetään laskennallista maksimituntimäärää, voidaan vuotuisen välkevaikutuksen ohjearvona käyttää Saksassa käytettävää 30 h raja-arvoa. Tässä raportissa mallinnettujen välketasojen arvioinnissa käytetään Ruotsin suunnitteluohjeissa annettuja ohjearvoja.



## 3 Tuulivoimakohteen väkemannus

### 3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola -mallinnusohjelmistolla, joka huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoima-alueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä 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 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 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 voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lapaprofiili on arvioitu voimalatyyppin Vestas V162 valmistajan ilmoittamalla lavan profiilitiedolla, joka on skaalattu lavan pituuden ja leveyden suhteen vastaamaan 200 m roottorin halkaisijaa. 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. Toden näköisen 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 välketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [1] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammassa tuulissa turbiinit ovat paikallaan, jolloin roottorin pyörimisestä aiheutuvaa valon välkkymistä ei esiinny. Suomen tuuliatlaksen tuulisuusestimäätti 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 Jyväskylän sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [3]. Sääaseman mittauksen perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 3). Suuntaakohtaisesti 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	0,164	0,168	0,161	0,148	0,137	0,158

Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Jyväskylän sääasemalla.

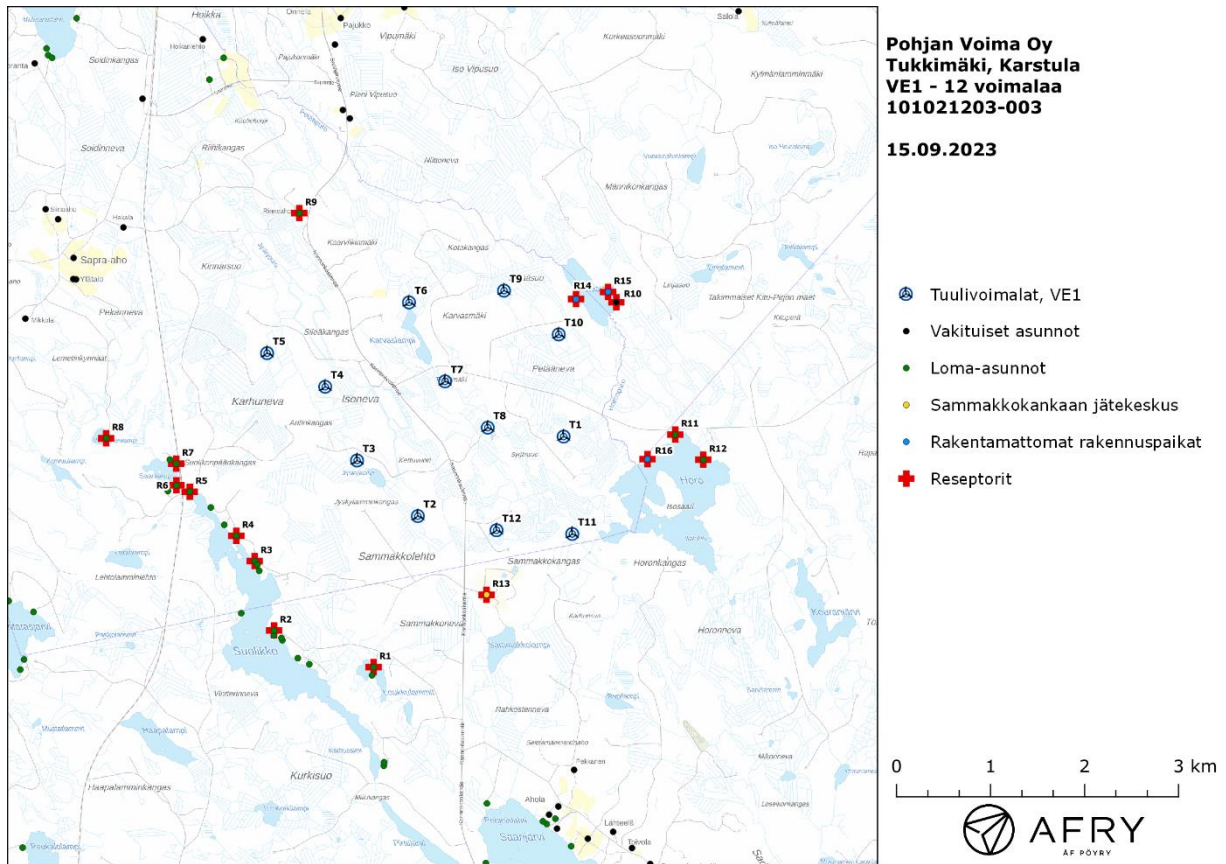
Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,131
Helmikuu	0,256
Maaliskuu	0,373
Huhtikuu	0,402
Toukokuu	0,456
Kesäkuu	0,412
Heinäkuu	0,447
Elokuu	0,419
Syyskuu	0,315
Lokakuu	0,191
Marraskuu	0,095
Joulukuu	0,062

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 12 vertailurakennusta, Sammakkokankaan jätekeskuksen toimisto sekä kolme kiinteistöä, joissa on yleiskaavamerkinnet rakentamattomista rakennuspaikoista. Näitä edellä mainittuja 16 sijaintipistettä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin.

Lähimmät reseptoripisteet sijaitsevat n. 400-900 metrin etäisyydellä lähimmistä voimaloista. Muut reseptoripisteet sijaitsevat yli 1,2 km etäisyydellä voimaloista. Reseptoripisteiden sijainnit suhteessa voimaloihin on esitetty karttakuvassa (Kuva 2).

Taulukko 4: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus	Lisätietoja
R1	410575	6964361	186	lomarakennus	-
R2	409517	6964751	188	lomarakennus	-
R3	409311	6965488	185	lomarakennus	-
R4	409115	6965757	190	lomarakennus	-
R5	408620	6966224	186	lomarakennus	-
R6	408479	6966293	186	lomarakennus	-
R7	408476	6966523	187	lomarakennus	-
R8	407731	6966793	198	lomarakennus	-
R9	409786	6969184	169	lomarakennus	-
R10	413157	6968238	171	vakituinen asuinrakennus	Käyttötarkoituksen muuttaminen erämajaksi on käynnissä.
R11	413784	6966832	179	lomarakennus	Metsähallituksen omistama. Käyttötarkoitus muutetaan tarvittaessa erämajaksi.
R12	414082	6966565	176	lomarakennus	-
R13	411777	6965130	200	teollinen rakennus	Piste Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston edestä.
R14	412728	6968271	170	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka kolmelle rakennukselle. Metsähallituksen omistama kiinteistö, huomioitu sopimuksellisesti.
R15	413069	6968347	169	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka. Sovittu omistajan kanssa, ettei kiinteistölle rakenneta mitään.
R16	413488	6966571	177	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka neljälle rakennukselle. Metsähallituksen omistama kiinteistö, huomioitu sopimuksellisesti.



Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

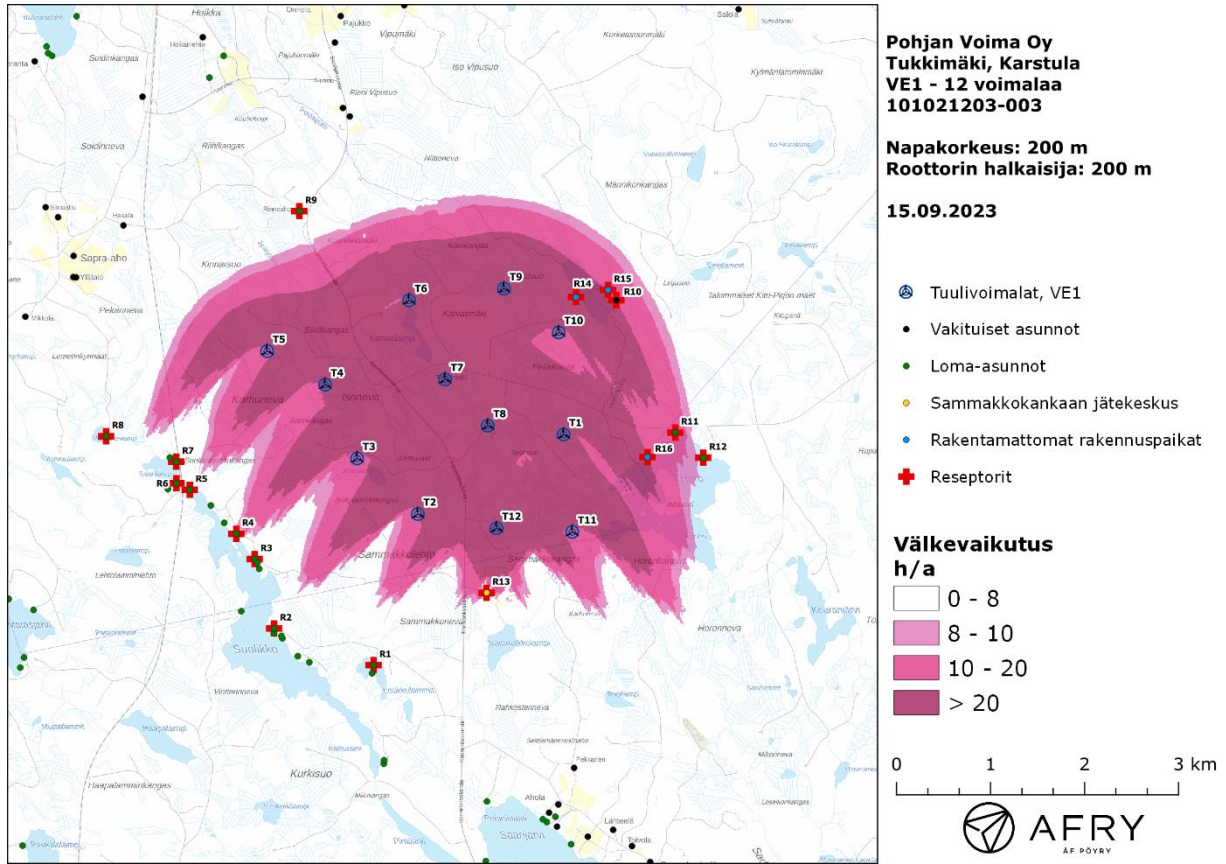
## 3.2 Välkevaikutus

Mallinnetut arviot todennäköisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja. Tämän lisäksi karttakuvaan on merkitty rakentamattomat rakennuspaikat sekä piste Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston edestä.

Taulukossa (Taulukko 5) on lueteltu vuotuiset välkevaikutusajat sekä suurimmat päiväkohtaiset maksimivälkkeet reseptoreiden kohdilla. Mallinnusten perusteella vuotuinen välkevaikutus ylittää Ruotsin 8 tunnin ohjearvon yhden vakituisen asuinrakennuksen (R10) ja yhden lomarakennuksen (R11) kohdalla. Kyseisen vakituisen asuinrakennuksen käyttötarkoituksen muutos erämajaksi on käynnissä. Lomarakennus on puolestaan Metsähallituksen omistuksessa ja sen käyttötarkoitus tullaan muuttamaan tarvittaessa erämajaksi. Välkevaikutuksille annetut ohjearvot eivät koske erämajoja. Muiden asuin- ja lomarakennusten kohdilla välkevaikutukset jäävät alle 8 tunnin. Välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptoreiden R10 ja R11 kohdilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 6-Taulukko 7). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talvi-aika).

Välkemallinnuksen mukaan todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittyy kahden rakennuksen lisäksi kolmella rakentamattomalla rakennuspaikalla, joita välkkeen ohjearvot eivät kuitenkaan koske. Hankekehittäjä on huomioinut rakentamattomat rakennuspaikat omistajien kanssa sopimuksellisesti.

Sammakkokankaan jätekeskuksen vuotuinen välkevaikutus on mallinnuksen mukaan 9 h 46 min. Koska jätekeskus on avoinna arkisin klo. 07.00-17.00, huomioidaan välkkeet vain tältä ajalta. Sammakkokankaan jätekeskuksen ajoittumistaulukosta (Taulukko 8) nähdään, että välkevaikutuksen esiintyminen ajoittuu väleille 02.00-06.00 sekä 20.00-22.00 eikä välkettä synny aikavälillä 06.00-20.00 ollenkaan. Jätekeskuksen aukioloaikojen puitteissa ei siis synny välkettä. Välkevaikutuksen ohjearvot eivät koske teollisia rakennuksia.



Kuva 3: Tuulivoimaloiden aiheuttama välketuntien määrä ilman puuston vaikutusta sijoitussuunnitelmalla VE1.

Taulukko 5: Vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välke aika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälke aika [min]
R1	0:00	0
R2	2:54	6
R3	1:36	5
R4	7:32	8
R5	5:17	8
R6	3:47	6
R7	3:18	6
R8	2:03	5
R9	4:01	5
R10	18:39	17
R11	12:46	11
R12	6:21	7
R13	9:46	18
R14	48:30	32
R15	18:50	18
R16	19:50	14

Taulukko 6: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R10 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	0:25	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:25
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:22	0:24	0:01	0:00	0:00	0:00	0:47
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:48	3:33	0:10	0:00	0:00	5:31
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:46	0:35	2:20	0:00	0:00	3:40
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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04	1:35	0:00	0:00	1:40
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:21	1:14	0:35	0:00	0:00	5:10
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:42	0:14	0:00	0:00	0:00	0:56
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:27	0:02	0:00	0:00	0:00	0:00	0:28
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	1:14	7:02	5:42	4:40	0:00	0:00	18:39

Taulukko 7: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R11 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	0:51	0:08	0:00	0:00	0:00	0:59
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:21	0:09	0:00	0:00	0:30
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:48	0:25	0:00	0:00	2:13
Toukokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:26	0:00	1:26
Kesäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:03	0:00	2:03
Heinäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:35	0:00	2:35
Elokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:32	0:00	0:00	0:00	0:32
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:31	0:10	0:00	0:00	1:41
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:40	0:06	0:00	0:00	0:00	0:46
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:01
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	1:32	4:26	0:44	6:04	0:00	12:46

Taulukko 8: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R13 (Sammakkokankaan jätekeskus) kohdalla.

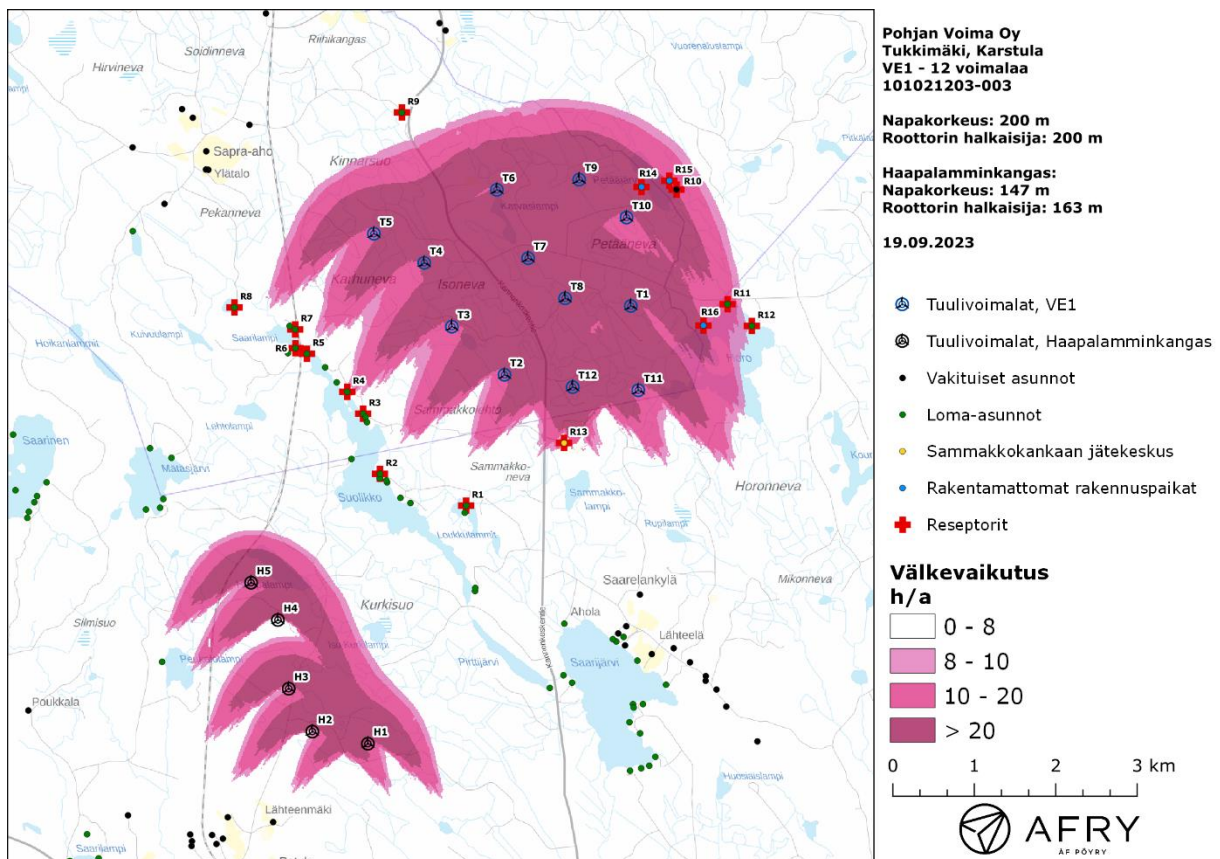
Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Toukokuu	0:00	0:00	0:25	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:20	0:00	0:45
Kesäkuu	0:00	0:22	3:05	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:12	0:00	5:39
Heinäkuu	0:00	0:02	2:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:15	0:00	3:22
Elokuu	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
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	0:24	5:35	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:47	0:00	9:46

### 3.3 Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutus

Tässä luvussa arvioidaan Tukkimäen voimaloiden ja läheisen toiminnassa olevan Haapalamminkankaan tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia. Haapalamminkankaan tuulivoimapuistossa on viisi voimalaa, joista lähimmät sijaitsevat noin neljän kilometrin etäisyydellä Tukkimäen voimaloista.

Haapalamminkankaan voimaloiden napakorkeus on 147 m ja voimalatyyppi N163 5.7 MW. Voimaloille on käytetty turbiinityypin N163 teknisten tietojen pohjalta arvioitua lapaprofiilia, jonka levein kohta on 4,15 m ja leveys 90 % etäisyydellä lavan tyvestä 1,11 m.

Tukkimäen ja Haapalamminkankaan todennäköinen välkkeen yhteisvaikutusten mallinnus on esitetty karttakuvana (Kuva 4). Taulukossa (Taulukko 9) on lueteltu vuotuiset välkevaikutusajat sekä suurimmat päiväkohtaiset maksimivälkkeet reseptoreiden kohdilla. Mallinnusten perusteella Tukkimäen ja Haapalamminkankaan voimaloista aiheutuu vain vähäisiä välkkeen yhteisvaikutuksia asutukselle. Haapalamminkankaan voimalat lisäävät todennäköistä vuotuista välkevaikutusta reseptorin R2 kohdalla 12 minuutilla ja reseptorin R3 kohdalla minuutilla. Muiden reseptoreiden kohdilla välkkeen yhteisvaikutuksia ei ole eikä yhteisvaikutuksista aiheudu ohjearvojen ylityksiä.



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinuksissa huomioidaan Tukkimäen (VE1) sekä Haapalamminkankaan voimalat.



Taulukko 9: Vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptoreiden kohdilla, kun mallinuksissa huomioidaan Haapalamminkankaan voimalat.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaika [min]
R1	0:00	0
R2	3:06	6
R3	1:37	5
R4	7:32	8
R5	5:17	8
R6	3:47	6
R7	3:18	6
R8	2:03	5
R9	4:01	5
R10	18:39	17
R11	12:46	11
R12	6:21	7
R13	9:46	18
R14	48:30	32
R15	18:50	18
R16	19:50	14

## 4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Karstulan kuntaan suunnitellun Tukkimäen tuulivoimapuiston ympäristölle aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Arviointi on tehty 12 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE1. Selvityksessä on myös arvioitu Tukkimäen ja läheisen toiminnassa olevan Haapalamminkankaan tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia.

Mallinnusten mukaan vuotuinen todennäköinen välkevaikutus ylittää 8 tunnin ohjearvon yhden asuinrakennuksen ja yhden lomarakennuksen kohdilla. Asuinrakennuksen käyttötarkoituksen muutos erämajaksi on prosessissa ja lomarakennuksen käyttötarkoitus tullaan muuttamaan tarvittaessa erämajaksi. Välkkeen ohjearvot koskevat pelkästään asuin- ja lomarakennuksia.

Välkevaikutuksia arvioitiin lisäksi kolmen rakentamattoman rakennuspaikan sekä hankealueen eteläpuolella sijaitsevan Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston kohdalla. Välkkeen 8 tunnin ohjearvo ylittyy kaikilla rakentamattomilla rakennuspaikoilla sekä jätekeskuksella. Välkkeen ohjearvot eivät koske rakentamattomia rakennuspaikkoja eikä teollisia rakennuksia.

Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistoista aiheutuu vain vähäistä välkkeen yhteisvaikutusta asutuksen kohdalla. Yhteisvaikutuksista ei aiheudu välkkeen ohjearvojen ylityksiä.

## 5 Välkevaikutuksen laskentamenetelmä

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

Tiettyyn pisteeseen kohdistuvaa vuotuista välkevaikutusta laskettaessa tarkastellaan sitä osaa taivaanpallosta, joka näkyy pisteeseen tuulivoimaloiden roottorikehien läpi. Näkyvyyden arvioinnissa otetaan huomioon paikallinen maaston korkeusaineisto. Mikäli kääntöpiirien väliin asettuva nauha ei näy roottorikehien läpi, tarkastelupisteeseen ei kohdistu välkevaikutusta. Muussa tapauksessa yksittäisen turbiinin aiheuttamien välketuntien määrä saadaan integroimalla tiheysfunktiota 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 suuntakohtaisilla 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.

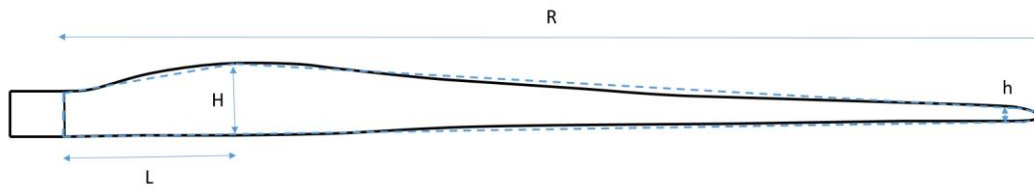
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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 malli tyypillisestä profiilista, jossa lavan maksimileveys on  $H$  etäisyydellä  $L$  lavan tyvestä. Lavan kokonaispituus on  $R$  ja lavan leveys 90 % etäisyydellä tyvestä on  $h$ . Lavan oletetaan kapenevan lineaarisesti arvosta  $H$  arvoon  $h$  liikuttaessa maksimikohdasta kärkeen. Tavanomaisesti välkelaskennassa turbiinin keskimääräinen leveys on määritetty parametrien  $H$  ja  $h$  keskiarvona.



*Kuva 5: Turbiinin lavan malliprofiili.*

Tämän raportin väkelaskennassa käytetään turbiinivalmistajan ilmoittamiin tietoihin perustuvaa lavan profiilitietoa. Laskennassa huomiotava roottorin säde vaihtelee välillä  $[0, R]$  riippuen tarkastelupisteen etäisyydestä turbiineihin sekä lavan leveydestä ja sitä vastaavasta Auringon peittoasteesta. Tällä tavoin väkelaskennassa huomioidaan 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. Jokinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta ja merestä 1990–2020, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2021:8.
- [4] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016.



Pohjan Voima Oy

**Tukkimäen tuulivoimahankkeen välkeselvitys (VE2)**

101021203-003, 27.09.2023

Tekijä  
AFRY Finland Oy  
Juulianna Lähteinen

E-mail  
[juulianna.lahteinen@afry.com](mailto:juulianna.lahteinen@afry.com)

Osasto  
Wind and Solar Finland

Raporttiversio  
002

Asiakas  
Pohjan Voima Oy  
Sami Merelä

Päivämäärä  
27/09/2023

Projektinumero  
101021203-003

Raportin tila  
VALMIS

## Tukkimäen tuulivoimahankkeen välkeselvitys (VE2)

## Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatiija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	29.05.2023/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	29.05.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen
002	27.09.2023/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	27.09.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Voimalakoordinaattien muutokset. Rakentamattomien rakennuspaikkojen ja Sammakkokankaan jätekeskuksen lisääminen reseptoreiksi. Yhteisvaikutukset Haapalaminkankaan kanssa.

## Aineistojen käyttöoikeudet

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



## Sisällysluettelo

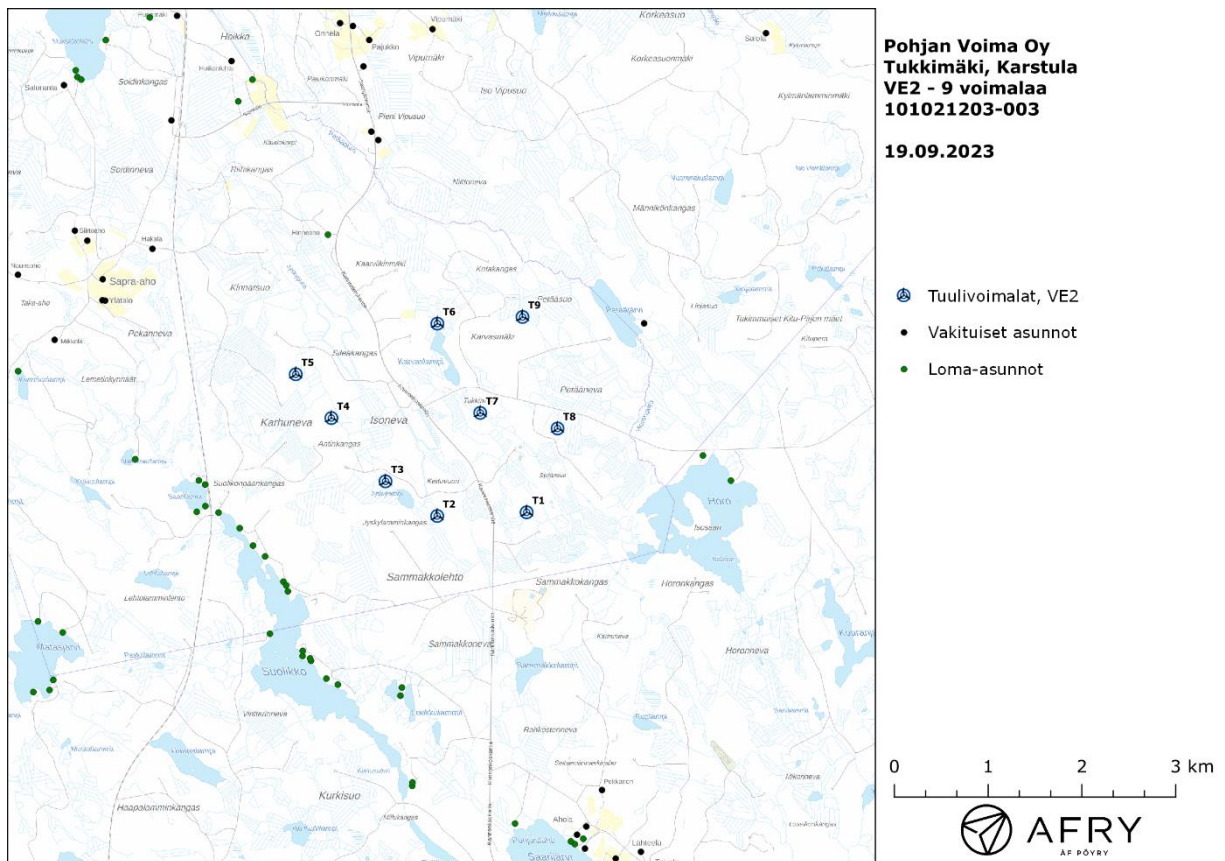
1	Johdanto .....	4
2	Tuulivoimaloiden välke .....	6
2.1	Välkevaikutus.....	6
2.2	Välkkeen rajoittaminen.....	6
2.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	6
2.4	Ohjearvot .....	6
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	8
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto .....	8
3.2	Välkevaikutus.....	12
3.3	Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutus.....	14
4	Yhteenveto .....	16
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä .....	17
6	Viitteet.....	19

# 1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Karstulan kuntaan suunnitellun Tukkimäen tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty 9 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE2. Voimaloiden sijainnit on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1).

Mallinnuksissa voimaloilla on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 200 m. Voimaloiden lapaprofiili on määritetty voimalatyyppin V162 valmistajan ilmoittaman lapaprofiilin avulla, jonka pituus on kasvatettu 100 metriin. Profiilia on samalla levennetty siten, että lavan levein kohta on 4,6 m (V162:n lapaprofiilin levein kohta on 4,3 m).

Selvityksessä arvioidaan myös Tukkimäen ja läheisen toiminnassa olevan Haapalamminkankaan tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia. Yhteisvaikutuksia käsitellään erillisessä luvussa 3.3.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit hankealueella sijoitussuunnitelmalla VE2.

*Taulukko 1: Tuulivoimaloiden (9 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.*

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	411903	6966228	182
T2	410949	6966189	180
T3	410399	6966558	176
T4	409821	6967232	171
T5	409442	6967698	170
T6	410951	6968237	166
T7	411408	6967287	178
T8	412233	6967121	176
T9	411859	6968308	166

## 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 iltajat). Suomessa voimala aiheuttaa välkevaikutusta eteläpuolelleen vain pohjoisen napapiirin pohjoispuolella.

Välkevaikutuksen laskenta voi perustua joko teoreettisen maksimivälkkeen tai todennäköisen tilanteen mallinnukseen:

- Teoreettisen maksimivälkkeen laskennassa oletetaan, että päiväaikaan Aurinko paistaa jatkuvasti, tuulivoimalan roottori pyörii jatkuvasti, ja roottori on aina kohtisuorassa Aurinkoa kohden.
- Todennäköisen tilanteen mallinnuksessa otetaan huomioon paikallinen tilastollinen aineisto auringonpaisteen määrästä ja ajoittumisesta sekä tuulen suuntien ja nopeuksien jakautumisesta.

Tämän selvityksen väkelaskenta perustuu todennäköisen tilanteen mallinnukseen.

### 2.2 Välkkeen rajoittaminen

Välkevaikutusta voidaan vähentää voimalakohtaisella välkkeen hallintatyökalulla (shadow flicker protection system), joka sisältää valoanturin ja välkkeenhallintasovelluksen. Työkalun avulla voimala voidaan pysäyttää joko havaitun auringonpaisteen perusteella ja/tai haluttuina vuoden- ja kellonaikoina. Pysäytetty voimala ei aiheuta välkettä.

### 2.3 Arvioinnin epävarmuudet

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

Puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Puuston näkyvyyttä peittävä vaikutus vaihtelee kuitenkin vuosien ja vuodenaikojen suhteen, mikä lisää arvioinnin epävarmuutta. Mallinnuksen tuloksiin vaikuttaa myös käytettävien tausta-aineistojen tarkkuus ja mallintamisessa on tehtävä 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 tuulivoimapuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia välkemäärien osalta [3]. Tanskassa on määritetty vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 h.

Ruotsissa vastaava suositusarvo on 8 h ja korkeintaan 30 min päivässä [2]. Näiden ohjearvojen käyttö edellyttää todennäköisen välketilanteen laskentaa. Mikäli välketuntien arvioinnissa käytetään laskennallista maksimituntimäärää, voidaan vuotuisen välkevaikutuksen ohjearvona käyttää Saksassa käytettävää 30 h raja-arvoa. Tässä raportissa mallinnettujen välketasojen arvioinnissa käytetään Ruotsin suunnitteluohjeissa annettuja ohjearvoja.

## 3 Tuulivoimakohteen väkemannus

### 3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola -mallinnusohjelmistolla, joka huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoima-alueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä 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 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 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 voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lapaprofiili on arvioitu voimalatyyppin Vestas V162 valmistajan ilmoittamalla lavan profiilitiedolla, joka on skaalattu lavan pituuden ja leveyden suhteen vastaamaan 200 m roottorin halkaisijaa. 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. Toden näköisen 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 välketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [1] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammassa tuulissa turbiinit ovat paikallaan, jolloin roottorin pyörimisestä aiheutuvaa valon välkkymistä ei esiinny. Suomen tuuliatlaksen tuulisuusestimähti 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 Jyväskylän sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [3]. Sääaseman mittausten perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 3). Suuntaakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 2: 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	0,164	0,168	0,161	0,148	0,137	0,158

Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Jyväskylän sääasemalla.

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

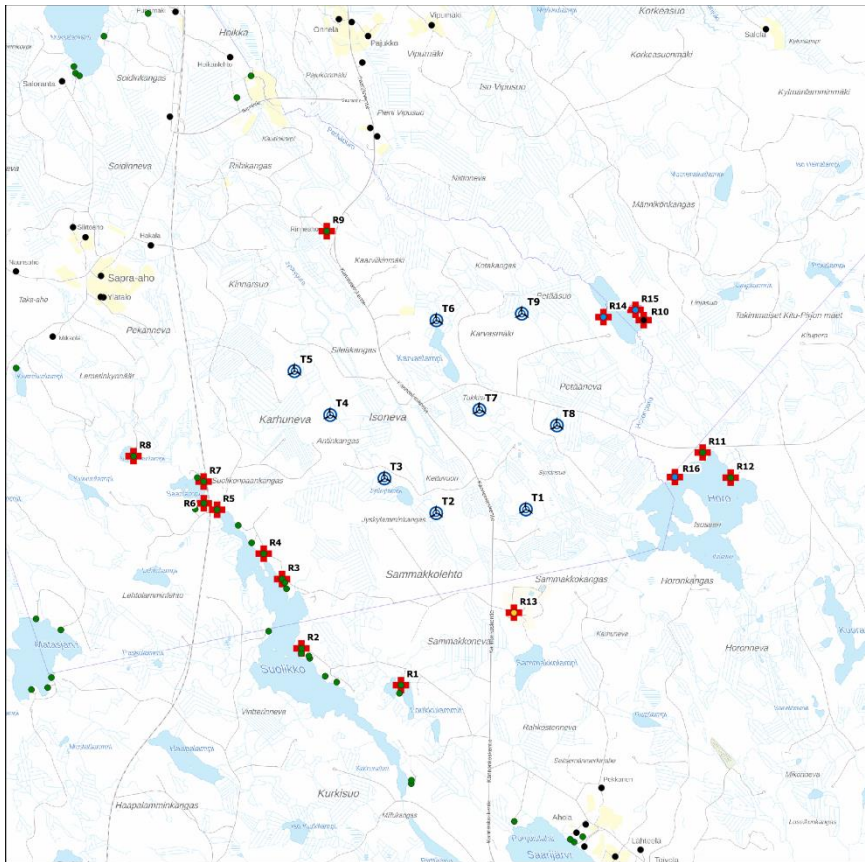
Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 12 vertailurakennusta, Sammakkokankaan jätekeskuksen toimisto sekä kolme kiinteistöä, joissa on yleiskaavamerkinnät rakentamattomista rakennuspaikoista. Näitä edellä mainittuja 16 sijaintipistettä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin.

Lähimmät reseptoripisteet sijaitsevat n. 800 metrin etäisyydellä lähimmistä voimaloista. Muut reseptoripisteet sijaitsevat 1,1 km etäisyydellä voimaloista. Reseptoripisteiden sijainnit suhteessa voimaloihin on esitetty karttakuvassa (Kuva 2).

Taulukko 4: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.







Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus	
R1	410575	6964361	186	lomarakennus	-
R2	409517	6964751	188	lomarakennus	-
R3	409311	6965488	185	lomarakennus	-
R4	409115	6965757	190	lomarakennus	-
R5	408620	6966224	186	lomarakennus	-
R6	408479	6966293	186	lomarakennus	-
R7	408476	6966523	187	lomarakennus	-
R8	407731	6966793	198	lomarakennus	-
R9	409786	6969184	169	lomarakennus	-
R10	413157	6968238	171	vakituinen asuinrakennus	Käyttötarkoituksen muuttaminen erämajaksi on käynnissä.
R11	413784	6966832	179	lomarakennus	Metsähallituksen omistama. Käyttötarkoitus muutetaan tarvittaessa erämajaksi.
R12	414082	6966565	176	lomarakennus	-
R13	411777	6965130	200	teollinen rakennus	Piste Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston edestä.
R14	412728	6968271	170	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka kolmelle rakennukselle. Metsähallituksen omistama kiinteistö, huomioitu sopimuksellisesti.
R15	413069	6968347	169	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka. Sovittu omistajan kanssa, ettei kiinteistölle rakenneta mitään.
R16	413488	6966571	177	rakentamaton rakennuspaikka	Yleiskaavassa osoitettu rakennuspaikka neljälle rakennukselle. Metsähallituksen omistama kiinteistö, huomioitu sopimuksellisesti.





**Pohjan Voima Oy  
Tukkimäki, Karstula  
VE2 - 9 voimalaa  
101021203-003**

**19.09.2023**

-  Tuulivoimat, VE2
-  Vakituiset asunnot
-  Loma-asunnot
-  Sammakkokankaan jätekeskus
-  Rakentamattomat rakennuspaikat
-  Reseptorit



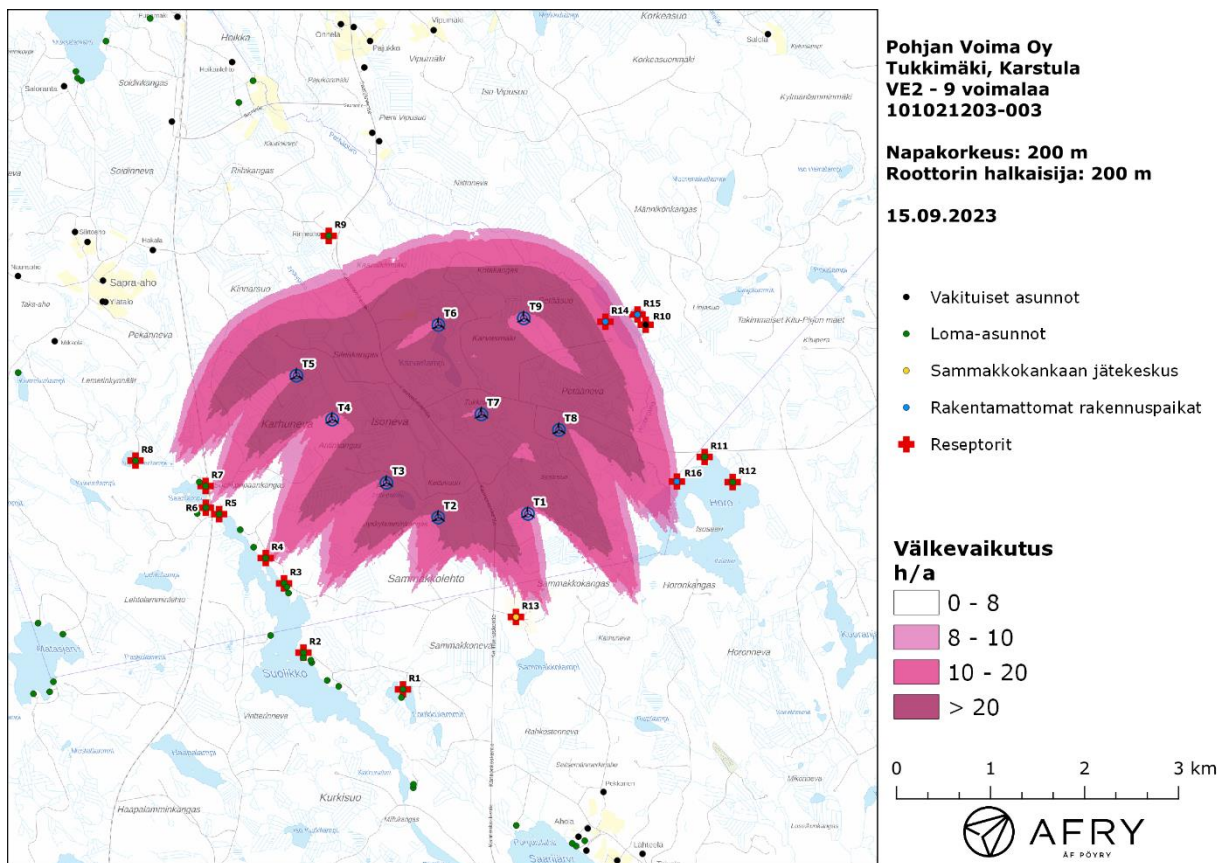
*Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.*

### 3.2 Välkevaikutus

Mallinnetut arviot todennäköisten väketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja. Tämän lisäksi karttakuvaan on merkitty rakentamattomat rakennuspaikat sekä piste Sammakkokankaan jätekeskuksen toimiston edestä.

Taulukossa (Taulukko 5) on lueteltu vuotuiset välkevaikutusajat sekä suurimmat päiväkohtaiset maksimivälkkeet reseptoreiden kohdilla. Mallinnusten perusteella vuotuinen välkevaikutus alittaa Ruotsin 8 tunnin ohjearvon kaikkien asuin- ja lomarakennusten sekä Sammakkokankaan jätekeskuksen kohdilla. Välkemallinnuksen mukaan todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittyy kahdella rakentamattomalla rakennuspaikalla (R14 ja R16). Välkkeen ohjearvot eivät koske rakentamattomia rakennuspaikkoja. Hankekehittäjä on huomioinut rakentamattomat rakennuspaikat omistajien kanssa sopimuksellisesti.

Välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptorin R4 kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 6). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 3: Tuulivoimaloiden aiheuttama väketuntien määrä ilman puuston vaikutusta sijoitussuunnitelmalla VE2.

Taulukko 5: Vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaika [min]
R1	0:00	0
R2	0:02	0
R3	2:08	6
R4	7:52	8
R5	4:52	6
R6	6:36	8
R7	6:12	8
R8	2:21	5
R9	3:52	5
R10	6:17	8
R11	3:35	7
R12	1:28	4
R13	2:55	5
R14	14:45	15
R15	6:40	9
R16	8:21	9

Taulukko 6: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R4 kohdalla.

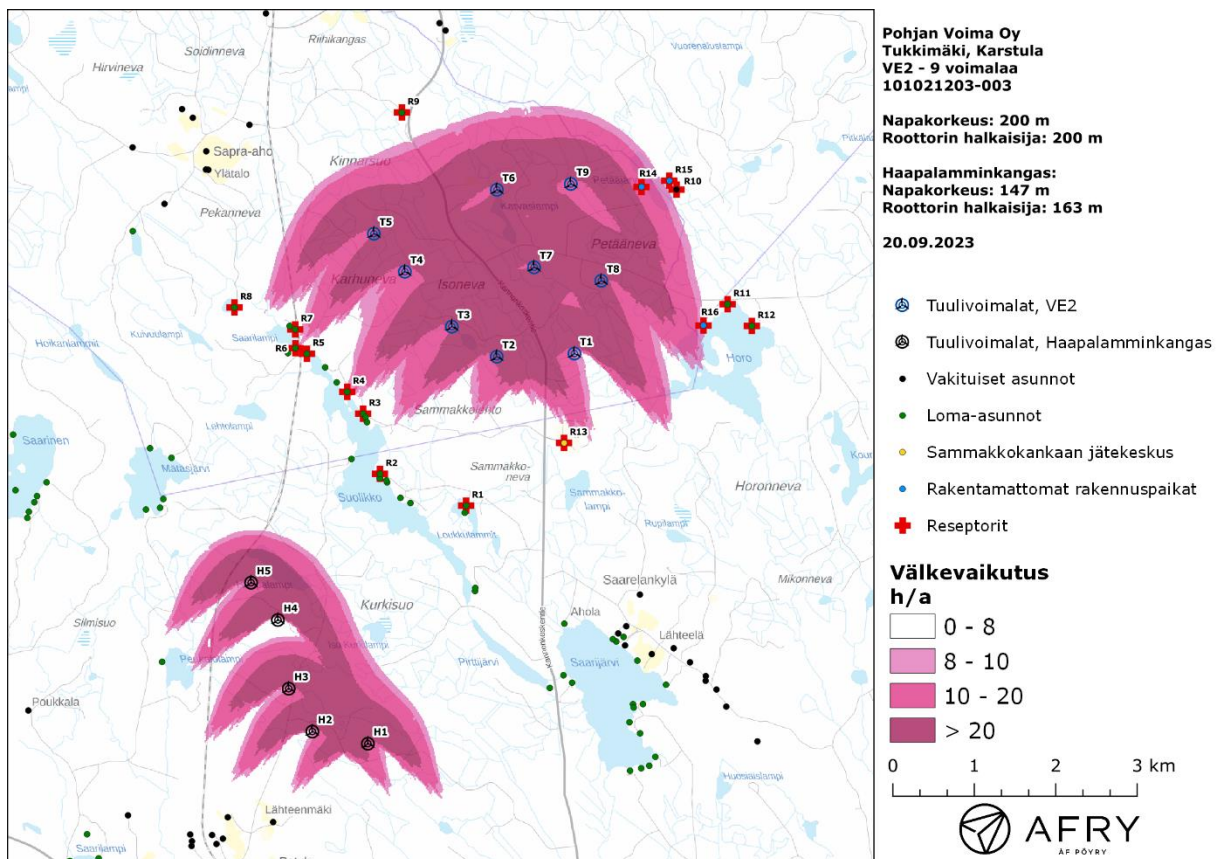
Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Huhtikuu	0:00	0:00	0:32	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:32
Toukokuu	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
Kesäkuu	0:00	0:00	2:10	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:10
Heinäkuu	0:00	0:00	2:55	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:55
Elokuu	0:00	0:00	0:34	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:34
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	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	7:52	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	7:52

### 3.3 Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistojen yhteisvaikutus

Tässä luvussa arvioidaan Tukkimäen voimaloiden ja läheisen toiminnassa olevan Haapalamminkankaan tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia. Haapalamminkankaan tuulivoimapuistossa on viisi voimalaa, joista lähimmät sijaitsevat noin neljän kilometrin etäisyydellä Tukkimäen voimaloista.

Haapalamminkankaan voimaloiden napakorkeus on 147 m ja voimalatyyppi N163 5.7 MW. Voimaloille on käytetty turbiinityypin N163 teknisten tietojen pohjalta arvioitua lapaprofiilia, jonka levein kohta on 4,15 m ja leveys 90 % etäisyydellä lavan tyvestä 1,11 m.

Tukkimäen ja Haapalamminkankaan todennäköinen välkkeen yhteisvaikutuksen mallinnus on esitetty karttakuvana (Kuva 4). Taulukossa (Taulukko 7) on lueteltu vuotuiset välkevaikutusajat sekä suurimmat päiväkohtaiset maksimivälkkeet reseptoreiden kohdilla. Mallinnusten perusteella Tukkimäen ja Haapalamminkankaan voimaloista aiheutuu vain vähäisiä välkkeen yhteisvaikutuksia asutukselle. Haapalamminkankaan voimalat lisäävät todennäköistä vuotuista välkevaikutusta reseptorin R2 kohdalla 12 minuutilla ja reseptorin R3 kohdalla kahdella minuutilla. Muiden reseptoreiden kohdalla välkkeen yhteisvaikutuksia ei ole eikä yhteisvaikutuksista aiheudu ohjearvojen ylityksiä.



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinnoissa huomioidaan Tukkimäen (VE2) sekä Haapalamminkankaan voimalat.

Taulukko 7: Vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptoreiden kohdilla, kun mallinuksissa huomioidaan Haapalamminkankaan voimalat.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaika [min]
R1	0:00	0
R2	0:14	1
R3	2:10	6
R4	7:52	8
R5	4:52	6
R6	6:36	8
R7	6:12	8
R8	2:21	5
R9	3:52	5
R10	6:17	8
R11	3:35	7
R12	1:28	4
R13	2:55	5
R14	14:45	15
R15	6:40	9
R16	8:21	9

## 4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Karstulan kuntaan suunnitellun Tukkimäen tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Arviointi on tehty 9 voimalan sijoitus-suunnitelmalle VE2. Selvityksessä on myös arvioitu Tukkimäen ja läheisen toiminnassa olevan Haapalamminkankaan tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia.

Mallinnusten mukaan vuotuinen todennäköinen välkevaikutus jää alle 8 tunnin ohjearvon kaikkien asuin- ja lomarakennusten sekä hankealueen eteläpuolella sijaitsevan Sammakkokankaan jätekeskuksen kohdalla. Välkevaikutukset ylittyvät kahdella rakentamattomalla rakennuspaikalla. Välkkeen ohjearvot eivät koske rakentamattomia rakennuspaikkoja eikä teollisia rakennuksia.

Tukkimäen ja Haapalamminkankaan tuulivoimapuistoista aiheutuu vain vähäistä välkkeen yhteisvaikutusta asutuksen kohdalla. Yhteisvaikutuksista ei aiheudu välkkeen ohjearvojen ylityksiä.

## 5 Välkevaikutuksen laskentamenetelmä

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

Tiettyyn pisteeseen kohdistuvaa vuotuista välkevaikutusta laskettaessa tarkastellaan sitä osaa taivaanpallosta, joka näkyy pisteeseen tuulivoimaloiden roottorikehien läpi. Näkyvyyden arvioinnissa otetaan huomioon paikallinen maaston korkeusaineisto. Mikäli kääntöpiirien väliin asettuva nauha ei näy roottorikehien läpi, tarkastelupisteeseen ei kohdistu välkevaikutusta. Muussa tapauksessa yksittäisen turbiinin aiheuttamien välketuntien määrä saadaan integroimalla tiheysfunktiota 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 suuntakohtaisilla 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.

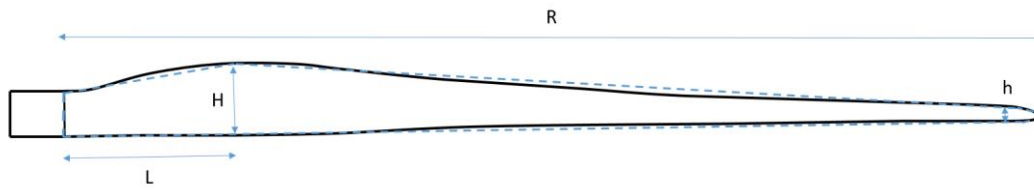
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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 malli tyypillisestä profiilista, jossa lavan maksimileveys on  $H$  etäisyydellä  $L$  lavan tyvestä. Lavan kokonaispituus on  $R$  ja lavan leveys 90 % etäisyydellä tyvestä on  $h$ . Lavan oletetaan kapenevan lineaarisesti arvosta  $H$  arvoon  $h$  liikuttaessa maksimikohdasta kärkeen. Tavanomaisesti välkelaskennassa turbiinin keskimääräinen leveys on määritetty parametrien  $H$  ja  $h$  keskiarvona.



Kuva 5: Turbiinin lavan malliprofiili.

Tämän raportin välkkelaskennassa käytetään turbiinivalmistajan ilmoittamiin tietoihin perustuvaa lavan profiilitietoa. Laskennassa huomioitava roottorin säde vaihtelee välillä  $[0, R]$  riippuen tarkastelupisteen etäisyydestä turbiineihin sekä lavan leveydestä ja sitä vastaavasta Auringon peittoasteesta. Tällä tavoin välkkelaskennassa 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. Jokinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta ja merestä 1990–2020, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2021:8.
- [4] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016.