Sitowise Oy

Valkiavaaran tuulivoimapuiston välkeselvitys (VE2)

101020250-001

Tekijä
Mika Laitinen

Osasto
Wind and Solar Finland

E-mail
mika.laitinen@afry.com

pvm
02/11/2023

Projektinumero
101020250-001

Raporttiversio
001

Raportin tila
LUONNOS

Asiakas

Sitowise Oy
Anna-Maria Kujala

Valkiavaaran tuulivoimapuiston välkeselvitys (VE2)

copyright© AFRY

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	02.11.2023/ Mika Laitinen, Senior Consultant	02.11.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen

Aineistojen käyttöoikeudet

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

copyright© AFRY

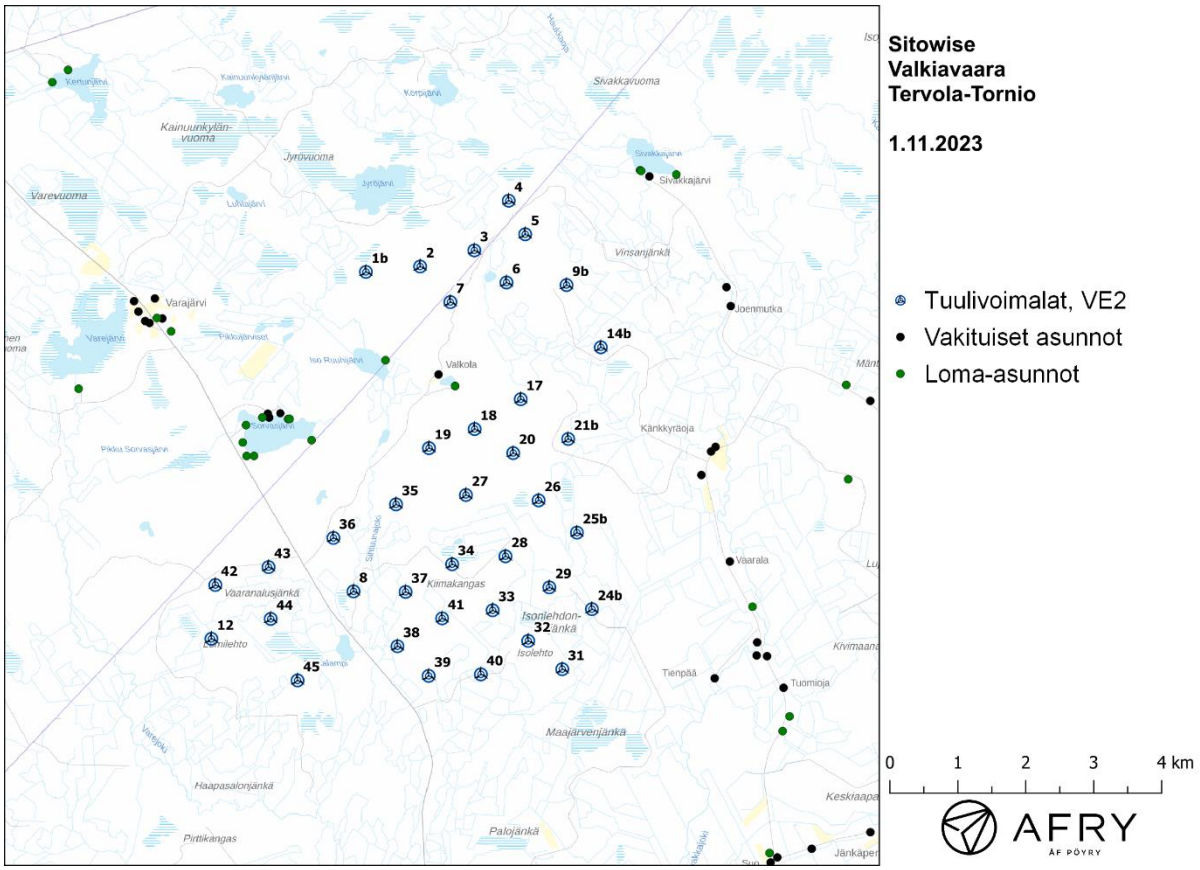
Sisällysluettelo

1 Johdanto 4
2 Tuulivoimaloiden välke 7
2.1 Välkevaikutus 7
2.2 Välkkeen rajoittaminen 7
2.3 Arvioinnin epävarmuudet 7
2.4 Ohjearvot 8
3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus 9
3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto 9
3.2 Välkevaikutus 12
3.3 Puuston välkettä vähentävä vaikutus 16
4 Yhteenveto 18
5 Välkevaikutuksen laskentamenetelmä 19
6 Viitteet 21

copyright© AFRY

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Tervolan kunnan ja Tornion kaupungin alueelle suunnitellun Valkiavaaran tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi tehdään 37 voimalan suunnitelmalle VE2. Voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1). Mallinnuksissa Valkiavaaran voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Valkiavaaran tuulivoimapuiston alueella.

copyright© AFRY

Taulukko 1: Valkiavaaran suunnitelman VE2 tuulivoimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus voimalapaikalla.

Voimala	E	N	Maaston korkeus [m]
1b	393589	7351459	147
2	394387	7351538	168
3	395185	7351775	154
4	395691	7352506	143
5	395934	7352012	153
6	395658	7351303	142
7	394832	7351016	142
8	393407	7346761	96
9b	396542	7351265	119
12	391316	7346063	107
14b	397046	7350350	100
17	395868	7349587	139
18	395189	7349148	165
19	394517	7348868	180
20	395756	7348795	121
21b	396566	7349002	94
24b	396915	7346500	79
25b	396695	7347625	95
26	396131	7348099	102
27	395061	7348178	120
28	395643	7347277	97
29	396289	7346820	88
31	396479	7345617	77
32	395978	7346033	93
33	395454	7346483	89
34	394858	7347160	104
35	394033	7348041	117
36	393111	7347547	108
37	394173	7346753	99

copyright© AFRY

38	394054	7345954	92
39	394513	7345518	83
40	395281	7345540	75
41	394711	7346364	98
42	391373	7346855	110
43	392156	7347118	109
44	392188	7346356	100
45	392584	7345451	99

copyright© AFRY

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 pilvisyys.

Suomen sijainnin vuoksi yksittäisen tuulivoimalan välkevaikutus kohdistuu valtaosin voimalan pohjoispuolelle (päiväaika) sekä lounais- ja kaakkoispuolille (aamu- ja ilta-ajat). Suomessa voimala aiheuttaa välkevaikutusta eteläpuolelleen vain pohjoisen napapiirin pohjoispuolella.

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

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

Tämän selvityksen välkelaskenta on tehty mallintamalla sekä todennäköinen välkeaika että teoreettinen maksimivälke.

2.2 Välkkeen rajoittaminen

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

2.3 Arvioinnin epävarmuudet

Mallinnettu todennäköinen välkevaikutus 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.

copyright© AFRY

2.4 Ohjearvot

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja. Ympäristöministeriön ohjeissa tuulivoimapuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia välkemäärien osalta [1]. Tässä selvityksessä välkeaikoja verrataan Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvoihin.

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

copyright© AFRY

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, 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-arvokäyrästöllä, jonka perusteella voidaan arvioida varjostusvaikutusta tarkastelualueella.

Tarkastelualueiden maanpinnan korkeuserot on saatu Maanmittauslaitoksen aineistosta *Korkeusmalli 10 m*. Korkeusdatan vaakaresoluutio on 10 m ja pystysuorainen tarkkuus 1,4 m. Laskennassa huomioitiin korkeuserot siten, että jos Auringon, turbiinin ja tarkastelupisteen kautta kulkeva jana leikkaa maanpintaa, niin varjostusta ei esiinny. Välkevaikutus laskettiin 2,0 m korkeudelle. Auringonpaistekulman rajana horisontista käytettiin kolmea astetta, jonka alle menevää säteilyä ei oteta huomioon varjostuksessa.

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

Yleensä 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. Tässä selvityksessä välkelaskennassa ei ole käytetty tavanomaista maksimietäisyyttä, vaan on huomioitu turbiinin muuttuva lapaprofiili.

Välkelaskennassa Valkiavaaran voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloille on käytetty turbiinityypin SG170 6,2 MW lapaprofiilia skaalattuna roottorin halkaisijalle 200 m. Lapaprofiilia on skaalattu sekä pidemmäksi että leveämmäksi. Skaalatun lavan maksisimileveys on 4,7 m. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat turbiinien käyttöaste, puusto ja paikallinen säätila (pilvisyys 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 välketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [3] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammissa tuulissa turbiinit ovat paikallaan, jolloin roottorin pyörimisestä aiheutuvaa valon välkkymistä ei esiinny.

copyright© AFRY

Suomen tuuliatlaksen tuulisuusestimaatti on otettu tuulivoima-alueen keskeltä korkeudelta 200 m, ja sen perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet turbiinin käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 2).

Paikallinen pilvisyys on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Rovaniemen sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [4]. Sääaseman mittausten perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 3). Suuntakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 2: Suuntasektorikohtaiset osuudet yli 3 m/s tuulennopeuksille Suomen tuuliatlaksen perusteella.

Suuntasektori	0/180	30/210	60/240	90/270	120/300	150/330
Yli 3 m/s osuus	0,193	0,237	0,137	0,104	0,117	0,134

Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Rovaniemen sääasemalla.

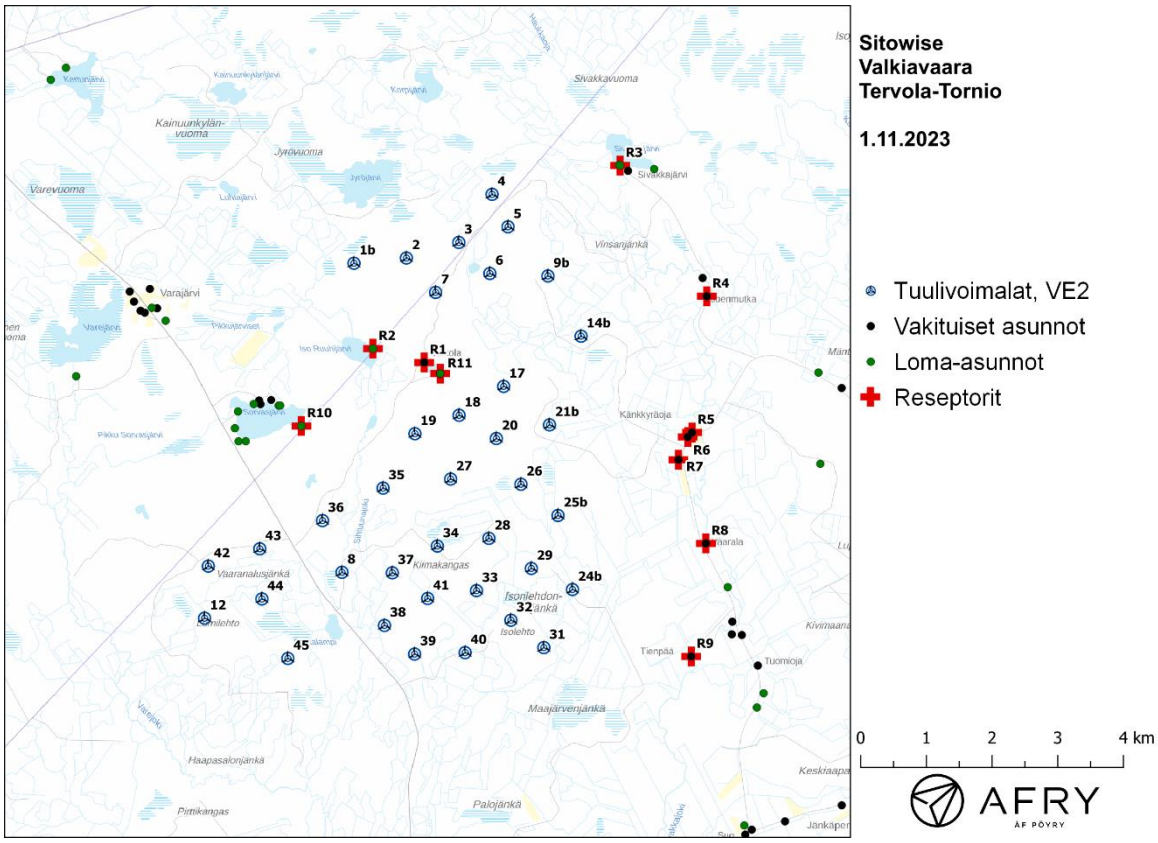
Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,111
Helmikuu	0,246
Maaliskuu	0,363
Huhtikuu	0,436
Toukokuu	0,392
Kesäkuu	0,376
Heinäkuu	0,393
Elokuu	0,347
Syyskuu	0,285
Lokakuu	0,204
Marraskuu	0,107
Joulukuu	0,040

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 11 asuntoa, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Asuntojen sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Asunnot sijaitsevat 0,7–2,2 km etäisyydellä lähimmistä voimaloista. Kartoissa näkyvät vakituiset ja vapaa-ajan asuinrakennukset on ladattu Maanmittauslaitoksen maastotietokannasta.

copyright© AFRY

Taulukko 4: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	394659	7349948	141	vakituinen asuinrakennus
R2	393879	7350159	118	loma-asunto
R3	397641	7352942	101	loma-asunto
R4	398960	7350955	79	vakituinen asuinrakennus
R5	398736	7348884	69	vakituinen asuinrakennus
R6	398670	7348816	70	vakituinen asuinrakennus
R7	398528	7348470	75	vakituinen asuinrakennus
R8	398946	7347198	72	vakituinen asuinrakennus
R9	398723	7345480	61	vakituinen asuinrakennus
R10	392791	7348983	123	loma-asunto
R11	394903	7349779	134	loma-asunto



Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

copyright© AFRY

3.2 Välkevaikutus

Vuotuiset välkeajat mallinnettuna todennäköisenä välkevaikutuksena ja teoreettisena maksimivälkkeenä on esitetty karttakuvissa (Kuva 3 ja Kuva 4). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja.

Taulukossa (Taulukko 5) on lueteltu todennäköinen välkevaikutus ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla, sekä vuotuisena tuntimääränä että suurimpana päiväkohtaisena arvona. Mallinnusten perusteella todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittää Ruotsin 8 tunnin ja Tanskan 10 tunnin ohjearvon kolmen asunnon kohdalla (reseptorit R1, R2 ja R11). Alueen muiden loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdilla todennäköinen vuotuinen välkeaika jää alle 8 ja 10 tunnin ohjearvon. Todennäköinen päiväkohtainen välkeaika jää alle Ruotsin 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdalla.

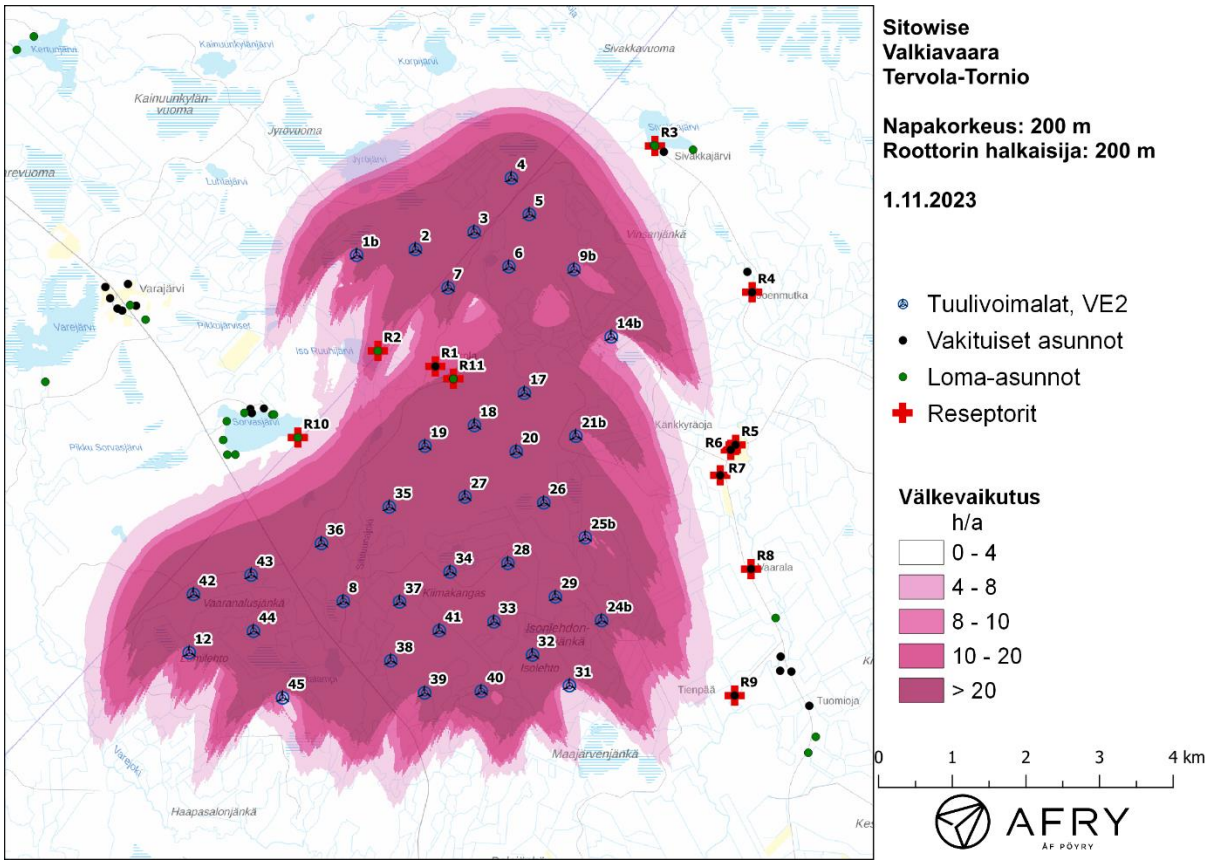
Vuotuinen teoreettinen maksimivälke ylittää Saksan 30 tunnin raja-arvon neljän asunnon kohdalla (reseptorit R1, R2, R10 ja R11). Näiden asuntojen kohdilla ylittyy myös Saksan 30 minuutin raja-arvo teoreettisen maksimivälkkeen suurimmalle päiväkohtaiselle arvolle. Reseptoreiden R1, R2 ja R11 kohdalla raja-arvojen ylitykset ovat merkittäviä, mutta reseptorin R10 kohdalla raja-arvojen ylitykset ovat vähäisiä. Lisäksi reseptorin R10 kohdalla teoreettinen maksimivälke ajoittuu suurelta osin talvikuukausiin, jolloin auringonpaisteen todennäköisyys on pieni.

Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptoreiden R1, R2 ja R11 kohdilla on esitetty taulukoissa (Taulukko 6–Taulukko 8). Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen reseptorin R10 kohdalla on esitetty taulukoissa (Taulukko 9). Taulukoissa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).

copyright© AFRY

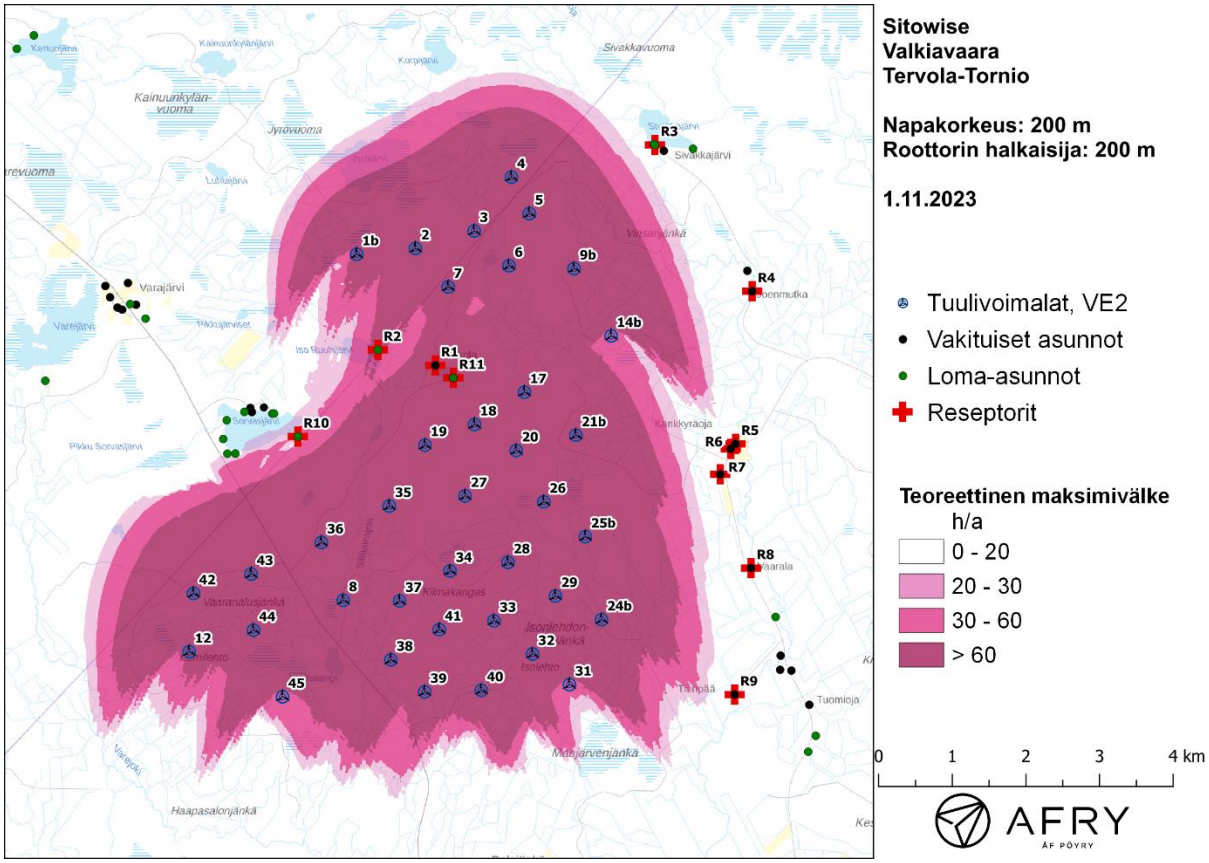
Taulukko 5: Välkeajat reseptoreittain. Taulukossa on esitetty vuotuinen välkeaika ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	todennäköinen vuotuinen välke	todennäköinen päiväkohtainen maksimi	Teoreettinen vuotuinen maksimivälke	teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	17:15	0:18	109:22	1:34
R2	12:53	0:14	65:53	1:07
R3	1:35	0:03	9:14	0:14
R4	0:48	0:03	4:11	0:13
R5	2:13	0:03	11:03	0:12
R6	2:09	0:03	10:40	0:15
R7	1:25	0:03	7:21	0:14
R8	0:48	0:03	4:05	0:12
R9	1:12	0:03	6:17	0:13
R10	4:01	0:06	31:28	0:39
R11	23:17	0:25	134:10	2:00



Kuva 3: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus.

copyright© AFRY



Kuva 4: Teoreettinen vuotuinen maksimivälke.

Taulukko 6: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R1 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	0:03	0:06	0:02	0:00	0:00	0:00	0:00	0:11
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:23	1:25	1:49	0:16	0:00	0:00	0:00	0:00	3:53
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:24	1:00	1:44	0:24	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:32
Huhtikuu	0:00	0:00	0:02	0:09	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:11
Toukokuu	0:00	0:03	0:15	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:18
Kesäkuu	0:00	2:17	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:17
Heinäkuu	0:00	1:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:06
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	1:05	0:00	0:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:12
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:01	0:38	1:42	1:34	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:55
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:03	0:13	0:10	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:26
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	3:26	0:31	1:39	2:04	5:14	4:03	0:18	0:00	0:00	0:00	0:00	17:15

copyright© AFRY

Taulukko 7: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R2 kohdalla.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:07
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:15	0:55	0:03	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:12
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:11	0:25	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:35
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	0:07	1:32	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:40
Kesäkuu	0:00	1:12	2:51	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	4:03
Heinäkuu	0:00	0:47	2:44	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:31
Elokuu	0:00	0:00	0:21	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:21
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:10	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:10
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:01	0:24	0:37	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:02
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04	0:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:12
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	2:06	7:28	0:21	1:04	1:36	0:18	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	12:53

Taulukko 8: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina 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	1:15	0:15	1:06	0:00	0:00	0:00	0:00	2:37
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	1:14	0:06	5:15	0:00	2:07	0:00	0:00	0:00	0:00	8:41
Huhtikuu	0:00	0:00	0:15	1:42	0:02	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:59
Toukokuu	0:00	0:00	0:24	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:25
Kesäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Heinäkuu	0:00	0:00	0:16	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:16
Elokuu	0:00	0:00	0:12	0:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:19
Syyskuu	0:00	0:00	0:07	2:01	0:00	2:06	0:06	0:06	0:00	0:00	0:00	0:00	4:27
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:26	2:05	1:06	0:50	0:00	0:00	0:00	0:00	4:27
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:02	0:05	0:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:07
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	1:13	5:05	0:34	10:43	1:32	4:08	0:00	0:00	0:00	0:00	23:17

Taulukko 9: Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R10 kohdalla.

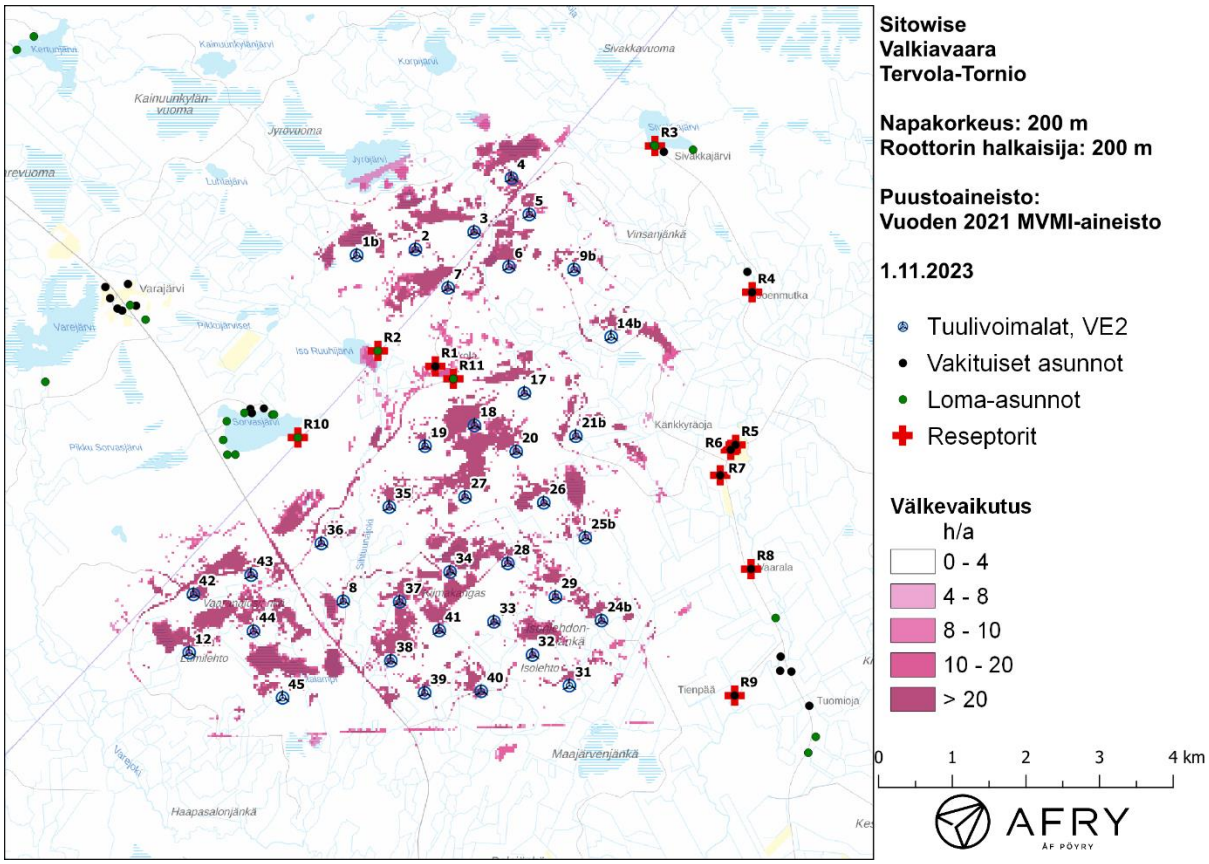
Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:55	1:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:02
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	2:29	1:07	3:17	1:49	0:00	0:00	0:00	0:00	8:41
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	1:06	1:57	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:03
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	1:58	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:58
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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	3:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:04
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:42	3:43	0:57	0:05	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:28
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:29	1:44	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	7:13
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	6:49	8:09	8:27	6:14	1:49	0:00	0:00	0:00	0:00	31:28

copyright© AFRY

3.3 Puuston välkettä vähentävä vaikutus

Karttakuvassa (Kuva 5) on esitetty todennäköisen vuotuisen välkkeen mallinnus, kun puuston välkettä vähentävä vaikutus huomioidaan. Puuston huomioivat vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat vertailukiinteistöjen kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 10). Laskennassa puustodatana on käytetty Luonnonvarakeskuksen tuottamaa monilähteisen valtakunnan metsien inventoinnin puunkorkeus-aineistoa vuodelta 2021 (© Luonnonvarakeskus, 2023).

Mallinnusten perusteella puusto rajoittaa merkittävästi voimaloiden näkyvyyttä ja siten vähentää välkevaikutusta. Reseptorin R1 kohdalla todennäköinen välke ja teoreettinen maksivälke ylittää ohjearvot myös kun puusto huomioidaan. Reseptorin R11 kohdalla teoreettisen maksimiväl kkeen päiväkohtainen arvo ylittää vielä 30 minuutin ohjearvon. Muilta osin välkeajat asuntojen kohdilla jäävät ohjearvojen alle puuston huomioivassa laskennassa.



Kuva 5: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun puusto huomioidaan.

copyright© AFRY

Taulukko 10: Välkeajat reseptoreittain, kun puusto huomioidaan. Taulukossa on esitetty vuotuinen välkeaika ja välkeajan suurin päiväkohtainen arvo, sekä todennäköisenä arvona että teoreettisen maksimivälkkeen menetelmällä laskettuna.

Reseptori	todennäköinen vuotuinen välke	todennäköinen päiväkohtainen maksimi	Teoreettinen vuotuinen maksimivälke	teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	12:58	0:18	90:46	1:34
R2	0:00	0:00	0:00	0:00
R3	0:25	0:03	2:10	0:11
R4	0:04	0:01	0:22	0:05
R5	0:00	0:00	0:00	0:00
R6	0:00	0:00	0:00	0:00
R7	0:00	0:00	0:00	0:00
R8	0:00	0:00	0:00	0:00
R9	1:12	0:03	6:17	0:13
R10	0:00	0:00	0:00	0:00
R11	2:28	0:10	12:49	0:42

copyright© AFRY

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Tervolan kunnan ja Tornion kaupungin alueille suunnitellun Valkiavaaran tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arvio on tehty 37 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE2.

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja, ja ympäristöministeriö suosittelee käyttämään muiden maiden ohjearvoja. Mallinnusten mukaan todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittää Ruotsin 8 tunnin ohjearvon ja Tanskan 10 tunnin ohjearvon kolmen asunnon kohdalla. Muiden alueen asuntojen kohdalla todennäköinen vuotuinen välkeaika jää alle näiden ohjearvojen. Todennäköinen päiväkohtainen välkeaika alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon alueen kaikkien asuntojen kohdilla.

Vuotuinen teoreettinen maksimivälke ylittää Saksan 30 tunnin raja-arvon neljän asunnon kohdalla. Näiden asuntojen kohdilla ylittyy myös Saksan 30 minuutin raja-arvo teoreettisen maksimivälkkeen suurimmalle päiväkohtaiselle arvolle. Suurimmat teoreettisen maksimivälkkeen ylitykset tulevat kolmen asunnon kohdalla, joissa myös todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittää ohjearvot. Kolmannen asunnon kohdalla teoreettisen maksimivälkkeen raja-arvojen ylitykset ovat vähäisiä.

Puuston sisältävän välkemallinnuksen perusteella puusto rajoittaa välkevaikutusta merkittävästi alueen asuntojen kohdilla, mutta yhden asunnon kohdalla välkevaikutus on melko suurta myös kun puusto huomioidaan.

copyright© AFRY

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 tiheysfunktiota turbiinin roottorikehän läpinäkyvällä taivaanpallon osuudella. Turbiinien yhteisvaikutus saadaan summaamalla turbiinikohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämissä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen turbiinien eri orientaatioille, joita skaalataan suuntakohtaisilla tuulisuusosuuksilla.

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

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.

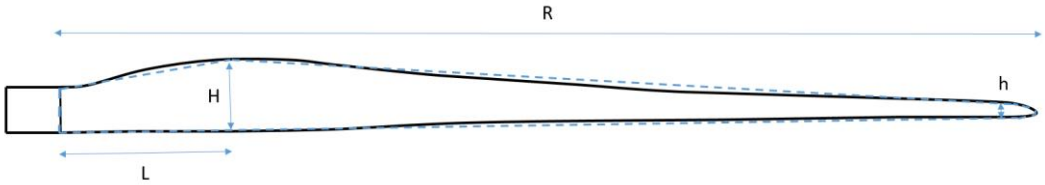
Kun lavan leveys on *w* metriä, niin 20 % Auringon peittoon perustuvan välkevarjostuksen maksimi-etäisyyden määrittämiseen voidaan johtaa laskentakaava

*maksimietäisyys = (5 * d * w)/1’097’780,*

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

Seuraavassa kaaviokuvassa (Kuva 6) on esitetty yksinkertaistettu malli tyypillisestä profiilista, jossa lavan maksimileveys on H etäisyydellä L lavan tyvestä. Lavan kokonaispituus on R ja lavan leveys 90 % etäisyydellä tyvestä on h. Lavan oletetaan kapenevan lineaarisesti arvosta H arvoon h liikuttaessa maksimikohdasta kärkeen. Tavanomaisesti välkelaskennassa turbiinin keskimääräinen leveys on määritetty parametrien H ja h keskiarvona.

copyright© AFRY



Kuva 6: Turbiinin lavan yksinkertaistettu profiili.

Tämän raportin välkelaskennassa lavan leveys on määritetty useasta kohtaa lapaa, jolloin lavan muoto saadaan kuvattua vielä tarkemmin kuin kahteen leveysarvoon H ja h perustuvassa lineaarisessa approksimaatiossa. Tällä tavoin välkelaskennassa huomioidaan turbiinin muuttuva lapaprofiili, ja saadaan realistisempia tuloksia kuin olettamalla tietty keskimääräinen lavan leveys ja sitä vastaava kiinteä maksimietäisyys.

copyright© AFRY

6 Viitteet

[1] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016. Ympäristöministeriö, 2016.

[2] Boverket: Vindkraftshandboken, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.

[3] B. Tammelin et al.: Production of the Finnish Wind atlas. Wind Energy, 2011.

[4] P. Pirinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.

copyright© AFRY