

Tuulivoimahankkeen välkeselvitys

KIVIKANKAAN TUULIVOIMAPUISTO – KAJAANI

MIKA LAITINEN

07.04.2022

Raportin nimi ja tunnus

Tuulivoimahankkeen välkeselvitys: Kivikangas – Kajaani
TV-2022-696-1, 07.04.2022

Asiakas

ABO Wind Oy
Metsähallitus Kiinteistökehitys

Raportin tekijät

Mika Laitinen, Numerola Oy
mika.laitinen@numerola.fi

Asiatarkastus

Erkki Heikkola ja Pasi Tarvainen

Aineistojen käyttöoikeudet

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

Tiivistelmä

Raportti sisältää arvion Kajaanin kaupungin alueelle suunnitellun Kivikankaan tuulivoimapuiston aiheuttamista välkevaikutuksista. Arviointi tehdään laskennallisten menetelmien avulla sijoitussuunnitelmille VE1 (67 voimalaa) ja VE2 (45 voimalaa). Arvioinnissa huomioidaan myös Kivikankaan yhteisvaikutukset lähelle suunniteltujen Katajamäen ja Sivakkalehdon tuulivoimapuistojen kanssa. Tuulivoimaloiden aiheuttamat välkevaikutukset lasketaan käyttäen roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 200 m. Tulosten arvioinnissa käytetään ympäristöhallinnon esittämiä ohjearvoja tuulivoimarakentamisen suunnitteluun.

Versiohistoria

Revisio	Päiväys	Muutokset	Muutoksen tekijä
00	07.04.2022		Mika Laitinen

Tulosten käyttö- ja jakeluoikeudet

Tämä raportti on laadittu raportissa mainitun vastaanottajan (Asiakas) käyttöön.

Asiakas voi käyttää tämän selvityksen tuloksia lähtötietoina raportissa mainitun kohteen tuulivoimaan liittyvissä jatkoselvityksissä ja suunnittelutyössä. Tulosten jakelu viranomaisille ja hankkeessa työskenteleville muille sidosryhmille (mm. ympäristövaikutusten arviointia laativat konsultit ja maanomistajat) on myös sallittu.

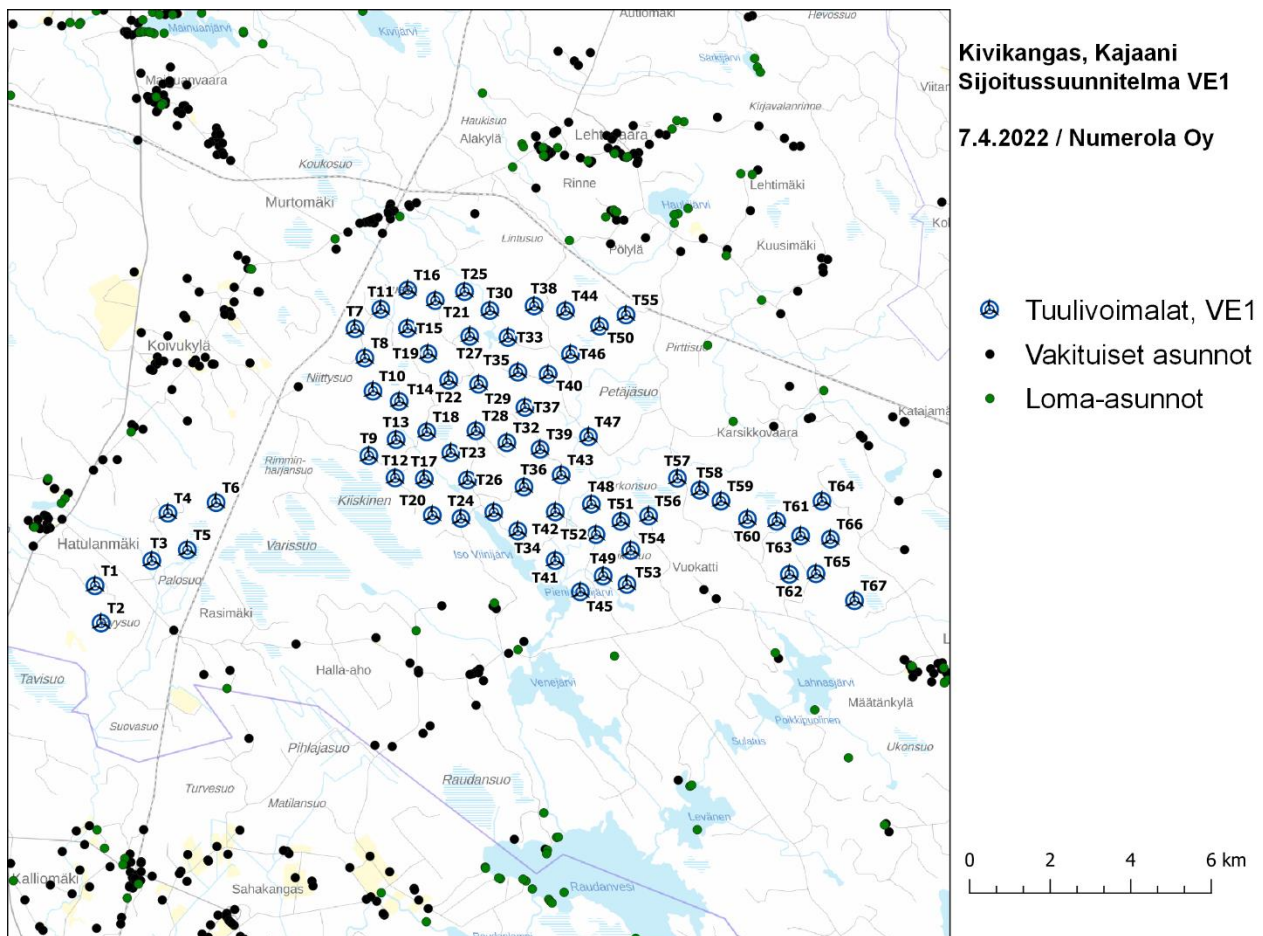
Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke.....	9
2.1	Välkevaikutus.....	9
2.2	Ohjeavot.....	9
2.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	9
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	10
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto.....	10
3.2	Välkevaikutus.....	13
3.3	Kivikankaan ja läheisten tuulivoimapuistojen yhteisvaikutukset.....	18
4	Yhteenveto	23
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä.....	24
6	Viitteet	26

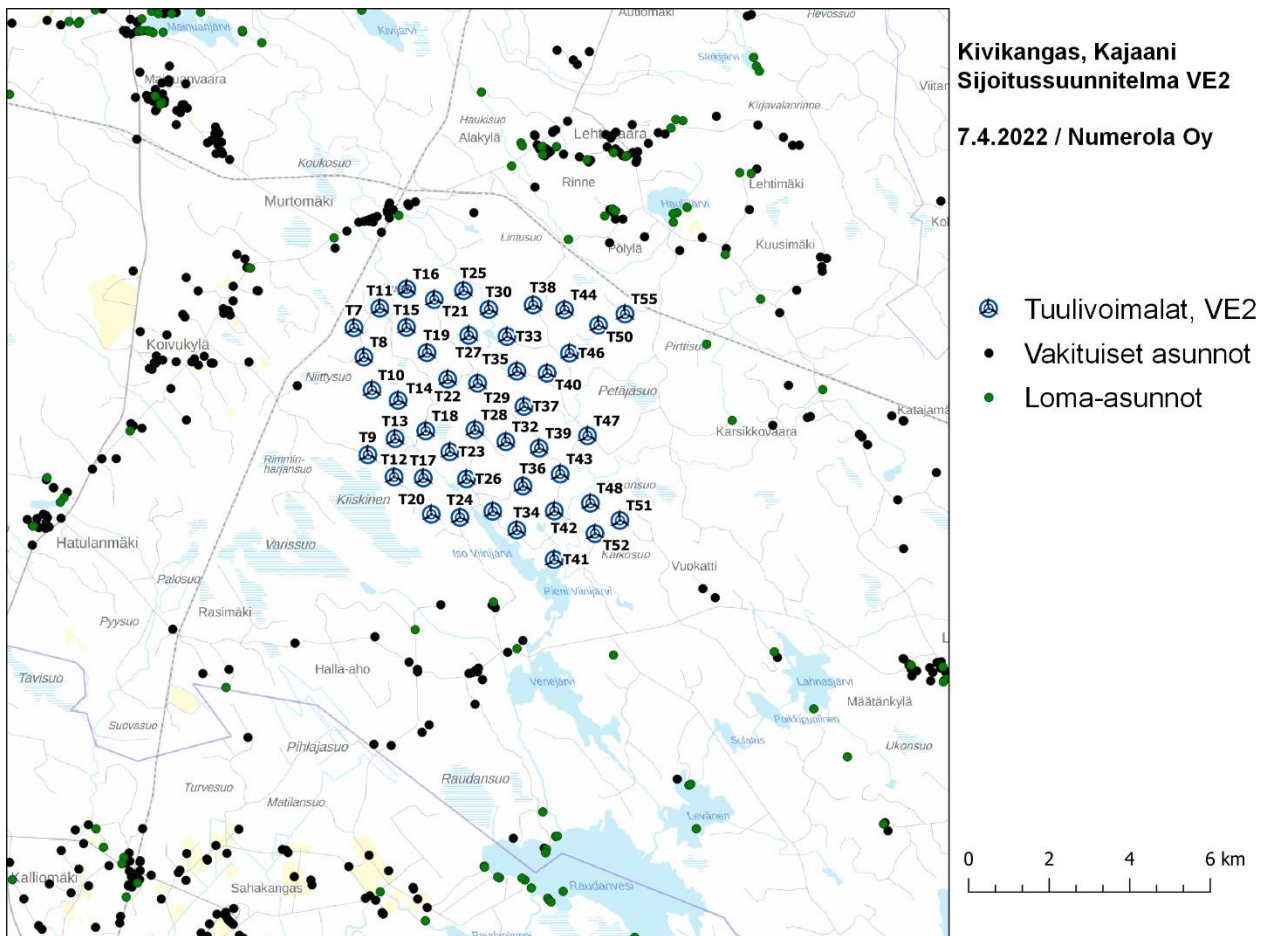
1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Kajaanin kaupungin alueelle suunnitellun Kivikankaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa väelvaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi tehdään sijoitussuunnitelmille VE1 (67 voimalaa) ja VE2 (45 voimalaa). Nämä sijoitussuunnitelmat on esitetty karttapohjalla kuvissa (Kuva 1 ja Kuva 2) ja koordinaatit annettu taulukoissa (Taulukko 1 ja Taulukko 2). Mallinnuksissa voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 200 m.

Tässä selvityksessä on arvioitu myös väelkkeen yhteisvaikutuksia Kivikankaan läheisyyteen suunniteltujen Katajamäen ja Sivakkalehdon tuulivoimapuistojen kanssa. Näiden läheisten puistojen sijainnit on kuvattu luvussa 3.3.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Kivikankaan sijoitussuunnitelmalla VE1.



Kuva 2: Tuulivoimaloiden sijainnit Kivikankaan sijoitussuunnitelmalla VE2.

Taulukko 1: Kivikankaan sijoitussuunnitelma VE1: voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	520945	7095256	176
T2	521095	7094331	164
T3	522355	7095878	172
T4	522755	7097057	177
T5	523237	7096145	170
T6	523951	7097319	165
T7	527400	7101633	174
T8	527645	7100906	176
T9	527745	7098481	188
T10	527847	7100086	175
T11	528041	7102119	163
T12	528395	7097931	188
T13	528420	7098881	177

T14	528496	7099831	178
T15	528704	7101642	171
T16	528710	7102595	163
T17	529120	7097906	175
T18	529181	7099074	175
T19	529211	7101016	184
T20	529320	7097006	193
T21	529393	7102332	176
T22	529727	7100356	205
T23	529779	7098556	172
T24	530031	7096928	172
T25	530120	7102556	175
T26	530192	7097881	184
T27	530249	7101446	191
T28	530402	7099101	208
T29	530470	7100256	185
T30	530749	7102088	177
T31	530845	7097081	167
T32	531170	7098806	195
T33	531199	7101417	178
T34	531442	7096615	167
T35	531445	7100556	184
T36	531595	7097706	179
T37	531620	7099681	193
T38	531848	7102200	182
T39	531995	7098644	193
T40	532195	7100506	178
T41	532370	7095881	166
T42	532373	7097087	172
T43	532520	7098005	171
T44	532627	7102078	186
T45	532995	7095106	166
T46	532752	7101003	187
T47	533198	7098953	173
T48	533270	7097281	170
T49	533563	7095498	170
T50	533473	7101697	198
T51	534002	7096854	197
T52	533383	7096525	176
T53	534153	7095289	172
T54	534246	7096135	175

T55	534129	7101976	207
T56	534691	7096987	186
T57	535406	7097920	184
T58	535963	7097629	190
T59	536487	7097358	209
T60	537145	7096906	219
T61	537870	7096856	208
T62	538185	7095540	188
T63	538465	7096494	193
T64	538995	7097356	198
T65	538846	7095554	190
T66	539204	7096413	190
T67	539802	7094886	188

Taulukko 2: Kivikankaan sijoitus suunnitelma VE2: voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T7	527400	7101633	174
T8	527645	7100906	176
T9	527745	7098481	188
T10	527847	7100086	175
T11	528041	7102119	163
T12	528395	7097931	188
T13	528420	7098881	177
T14	528496	7099831	178
T15	528704	7101642	171
T16	528710	7102595	163
T17	529120	7097906	175
T18	529181	7099074	175
T19	529211	7101016	184
T20	529320	7097006	193
T21	529393	7102332	176
T22	529727	7100356	205
T23	529779	7098556	172
T24	530031	7096928	172
T25	530120	7102556	175
T26	530192	7097881	184
T27	530249	7101446	191
T28	530402	7099101	208
T29	530470	7100256	185

T30	530749	7102088	177
T31	530845	7097081	167
T32	531170	7098806	195
T33	531199	7101417	178
T34	531442	7096615	167
T35	531445	7100556	184
T36	531595	7097706	179
T37	531620	7099681	193
T38	531848	7102200	182
T39	531995	7098644	193
T40	532195	7100506	178
T41	532370	7095881	166
T42	532373	7097087	172
T43	532520	7098005	171
T44	532627	7102078	186
T46	532752	7101003	187
T47	533198	7098953	173
T48	533270	7097281	170
T50	533473	7101697	198
T51	534002	7096854	197
T52	533383	7096525	176
T55	534129	7101976	207

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 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 on tehty mallintamalla sekä todennäköinen välkeaika että teoreettinen maksimivälke.

2.2 Ohjearvot

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja. Ympäristöministeriön ohjeissa tuulivoimapuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia välkemäärien osalta [4]. Tanskassa on määritetty vuotuisen todennäköisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 tuntia. Ruotsissa vastaava suositusarvo on 8 tuntia ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä [2]. Näiden ohjearvojen käyttö edellyttää todennäköisen välketilanteen laskentaa. Saksassa teoreettisen maksimivälkkeen raja-arvot ovat 30 tuntia vuodessa ja 30 minuuttia päivässä.

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.

Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Avoimilla alueilla mallinnettu välkevaikutus vastaa todellista tilannetta, mutta puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Puuston näkyvyyttä peittävä vaikutus vaihtelee vuosien ja vuodenaikojen suhteen, mikä myös lisää arvioinnin epävarmuutta.

Rakennuksiin kohdistuvan välkkeen laskennassa käytetään ns. kasvihuone-oletusta, jolloin rakennukseen kohdistuva välkevaikutus huomioidaan riippumatta suunnasta. Todellisuudessa välkevaikutus kohdistuu rakennuksen sisätiloihin vain ikkunoiden suunnasta.

3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin geometrisella laskentamallilla, joka huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoima-alueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuuliturbiinien dimensiot (Numerola Oy:n implementoitu malli). Laskennan tuloksena saadaan tietoa 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 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 kaikille voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m, roottorin halkaisijaa 200 m ja lapaprofiilia, jonka maksimileveys on 5,0 m 10 % etäisyydellä lavan tyvestä ja joka kapenee lineaarisesti arvoon 1,7 m 90 % etäisyydellä lavan tyvestä. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat turbiinien käyttöaste, puusto ja paikallinen säätila (pilvisuus ja tuulisuus). Jos esimerkiksi tuulen suunta on kohtisuorassa auringon ja tarkastelupisteen välistä linjaa vasten, ei varjostusvaikutusta esiinny. Varjostuksen laskennassa turbiinin orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Todennäköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri turbiinien orientaatiolla. Tämä vastaa 12 tuulen suuntasektorin varjostustuloksia, sillä vastakkaiset tuulensuunnat aiheuttavat välkkeen 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 korkeammissa tuulissa turbiinit ovat paikallaan, jolloin roottorin pyörimisestä aiheutuvaa valon välkymistä ei esiinny. Suomen tuuliatlaksen tuulusuusestimaatti on otettu tuulivoima-alueen keskeltä korkeudelta 200 m, ja sen

perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet turbiinin käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 3).

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

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

Suuntasektori	0/180	30/210	60/240	90/270	120/300	150/330
Yli 3 m/s osuus	0,192	0,166	0,136	0,132	0,130	0,179

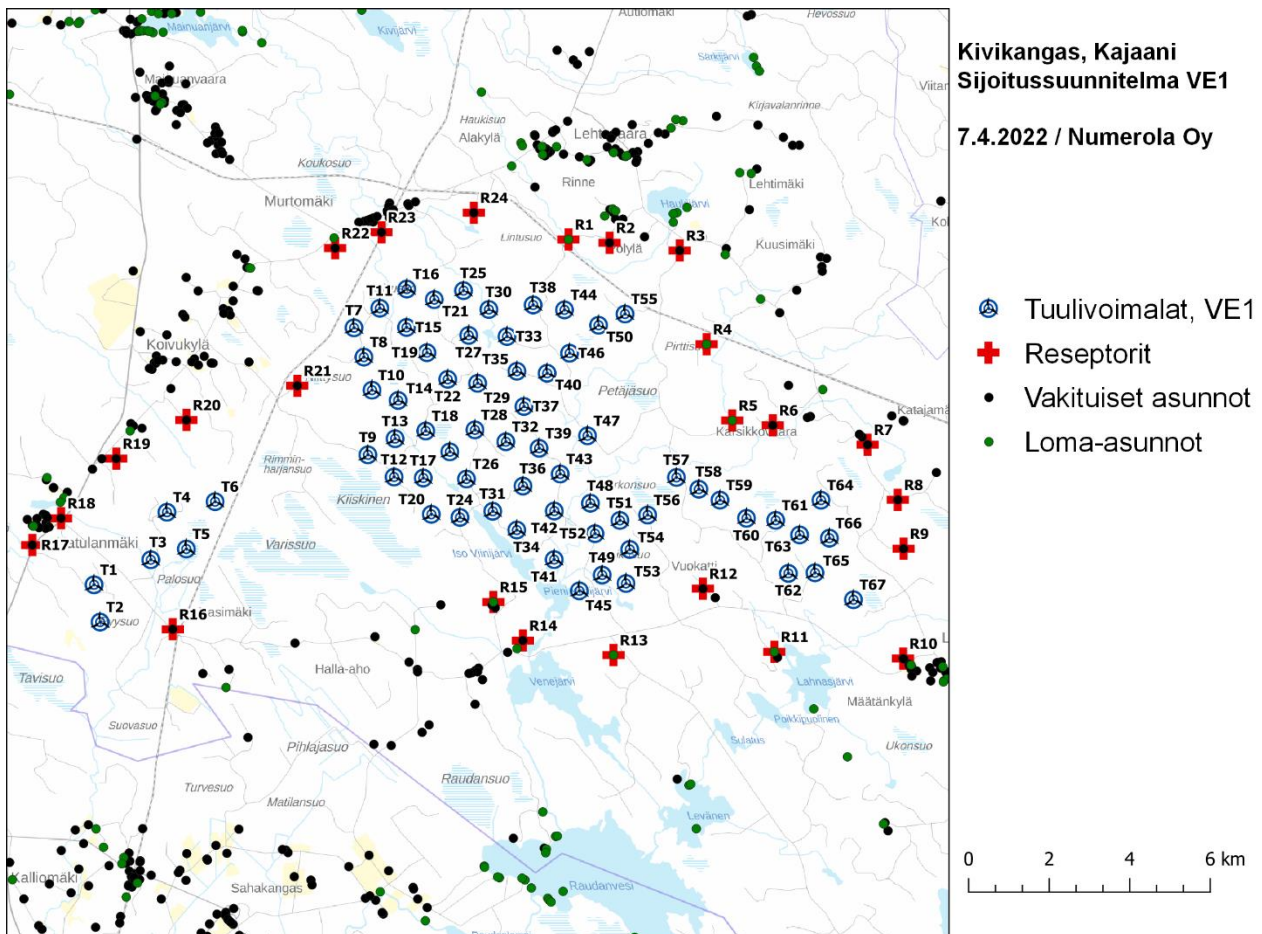
Taulukko 4: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Siilinjärven sääasemalla.

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

Taulukossa (Taulukko 5) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 24 vertailukiinteistöä, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 3). Pisteet sijaitsevat lähimmillään noin 1,5 km etäisyydellä voimaloista. Alueen rakennustieto perustuu Maanmittauslaitoksen maastotietokannan aineistoon, jossa on eritelty alueen asuinrakennukset ja loma-asunnot.

Taulukko 5: Reseptoreiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	532728	7103821	175	lomarakennus
R2	533749	7103738	205	vakituinen asuinrakennus
R3	535490	7103547	228	vakituinen asuinrakennus
R4	536158	7101221	218	lomarakennus
R5	536793	7099330	197	lomarakennus
R6	537801	7099210	206	vakituinen asuinrakennus
R7	540154	7098728	236	vakituinen asuinrakennus
R8	540904	7097360	226	vakituinen asuinrakennus
R9	541048	7096148	213	vakituinen asuinrakennus
R10	541036	7093422	216	vakituinen asuinrakennus
R11	537839	7093588	185	lomarakennus
R12	536065	7095156	201	vakituinen asuinrakennus
R13	533845	7093508	193	lomarakennus
R14	531596	7093869	174	vakituinen asuinrakennus
R15	530862	7094825	176	lomarakennus
R16	522903	7094149	171	vakituinen asuinrakennus
R17	519414	7096238	191	vakituinen asuinrakennus
R18	520128	7096904	196	vakituinen asuinrakennus
R19	521499	7098383	192	vakituinen asuinrakennus
R20	523242	7099341	171	vakituinen asuinrakennus
R21	525995	7100191	201	vakituinen asuinrakennus
R22	526933	7103606	168	vakituinen asuinrakennus
R23	528085	7103999	157	vakituinen asuinrakennus
R24	530378	7104484	171	vakituinen asuinrakennus



Kuva 3: Reseptoreiden paikat Kivikankaan tuulivoimapaiston alueella.

3.2 Välkevaikutus

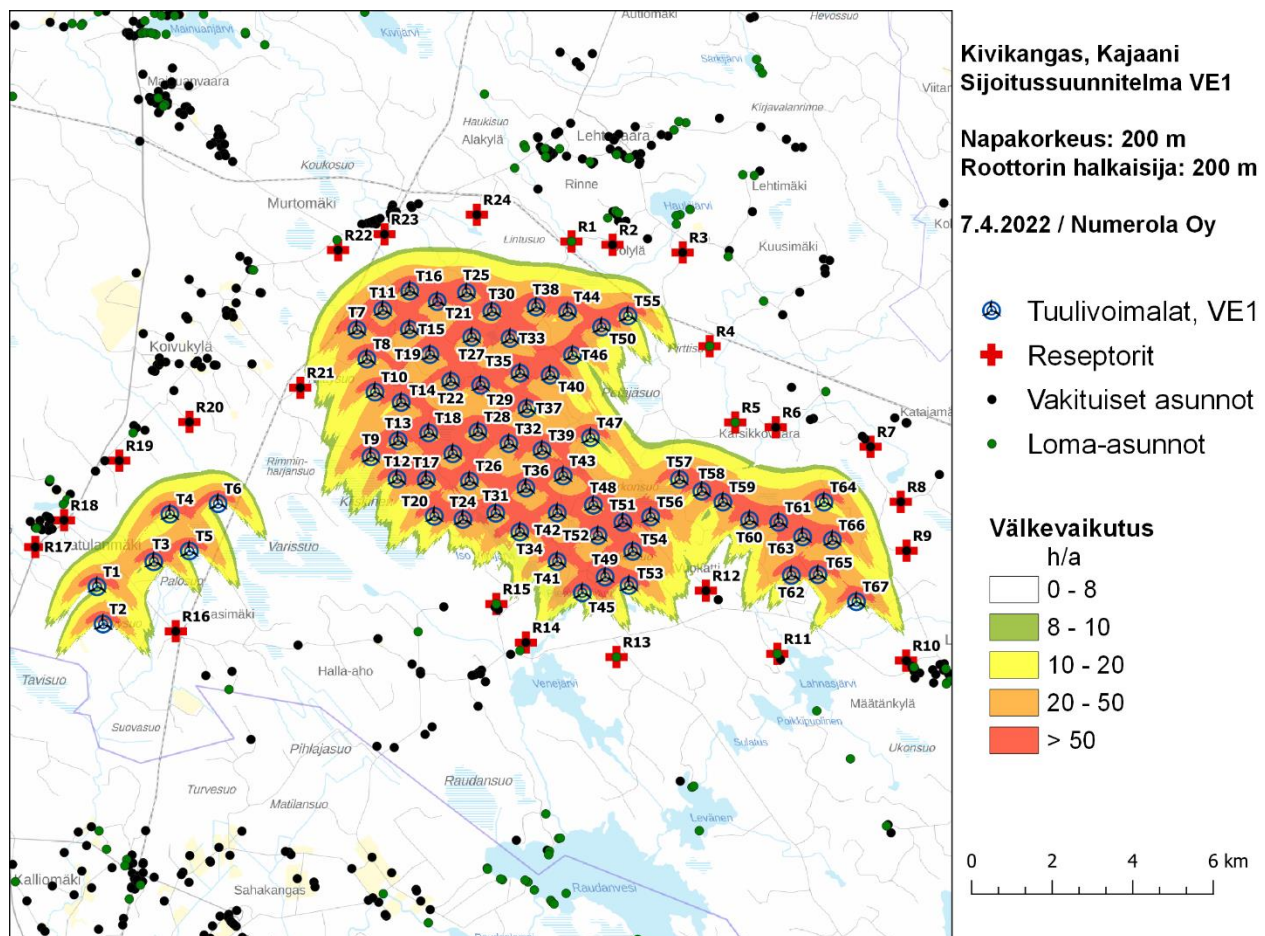
Mallinnettu todennäköinen vuotuinen välketuntien määrä on esitetty karttakuvina (Kuva 4 ja Kuva 5). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Suomen olosuhteissa puusto rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja.

Todennäköiset vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdalla on lueteltu taulukossa (Taulukko 6). Mallinnusten perusteella todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdalla. Myös todennäköinen päiväkohtainen välkeaika jää alle 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdalla.

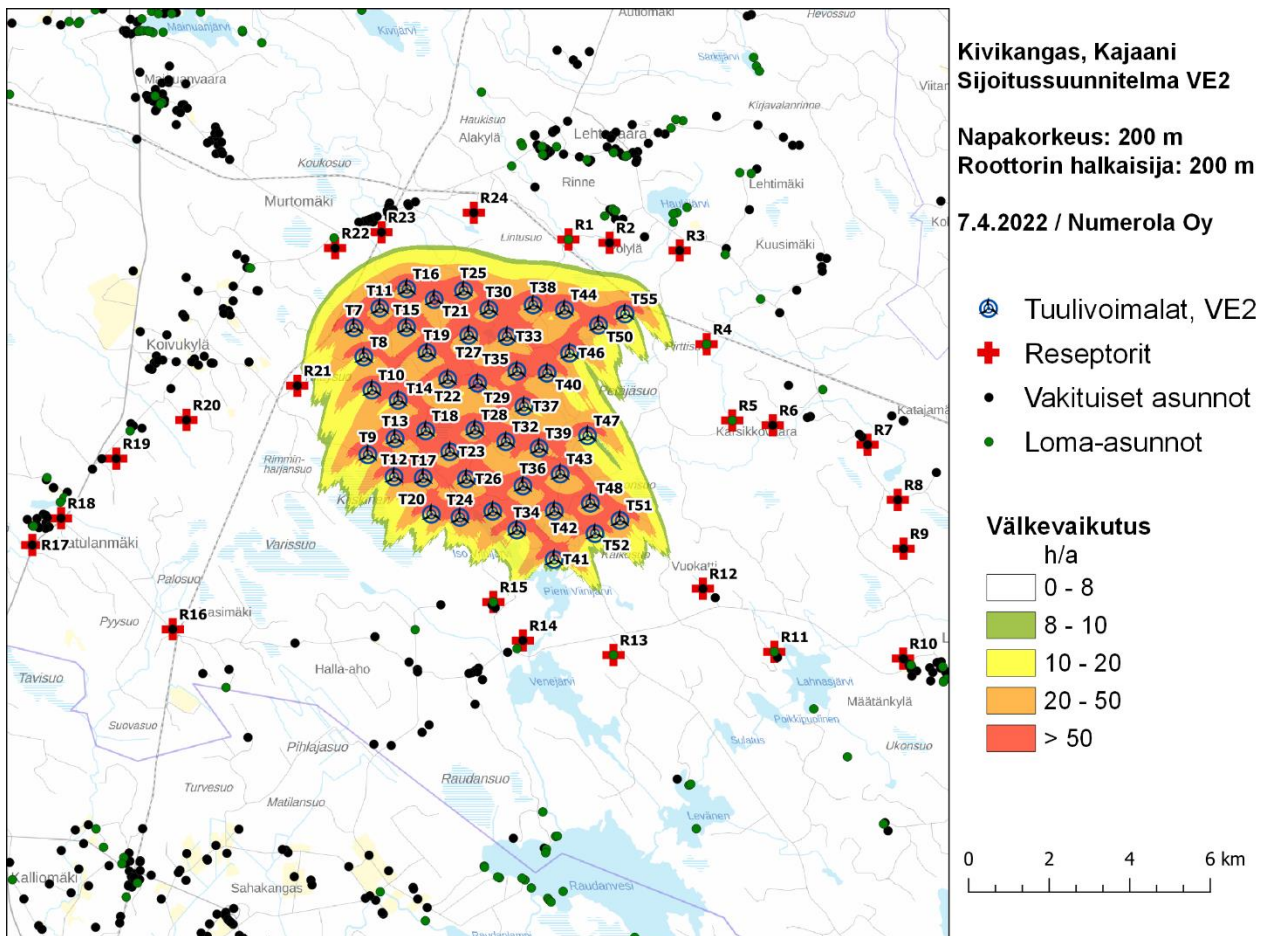
Suurin todennäköinen välkevaikutus kohdistuu reseptoriin R21, jonka kohdalla vuotuinen todennäköinen välkeaika on 5 tuntia 8 minuuttia molemmilla sijoitussuunnitelmissa. Välkkeen tarkempi ajoittuminen tämän reseptorin kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 8). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).

Teoreettisen maksimivälkkeen vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 7). Mallinnusten perusteella teoreettinen vuotuinen maksimivälke jää alle Saksan 30 tunnin raja-arvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdalla.

Reseptorin R23 kohdalla teoreettisen maksimivälkkeen suurin päiväkohtainen arvo on 33 minuuttia, eli Saksan 30 minuutin raja-arvo ylittyy 3 minuuttia. Ylitykset ajoittuvat marraskuun ja helmikuun alkuun, jolloin auringonpaisteen todennäköisyys on Suomen olosuhteissa hyvin alhainen. Todennäköisen välkevaikutuksen suurin päiväkohtainen arvo tämän reseptorin kohdalla on 6 minuuttia. Tämän reseptorin kohdalla teoreettinen maksimivälke on sama sijoitus suunnitelmilla VE1 ja VE2. Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen reseptorin R23 kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 9). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 4: Tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköinen välketuntien määrä sijoitus suunnitelmalla VE1 ilman puuston vaikutusta.



Kuva 5: Tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköinen välketuntien määrä sijoitussuunnitelmalla VE2 ilman puuston vaikutusta.

Taulukko 6: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ja päiväkohtainen maksimivälke reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	VE1 Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus [h:min]	VE1 Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimi [min]	VE2 Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus [h:min]	VE2 Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimi [min]
R1	2:00	4	2:00	4
R2	1:54	3	1:54	3
R3	0:26	2	0:26	2
R4	0:38	3	0:38	3
R5	1:50	3	0:00	0
R6	1:13	3	0:00	0
R7	0:47	3	0:00	0
R8	1:12	4	0:00	0
R9	2:33	4	0:00	0
R10	0:57	3	0:00	0
R11	0:35	3	0:00	0
R12	3:02	5	0:00	0
R13	0:00	0	0:00	0
R14	3:34	6	0:00	0
R15	2:43	5	2:14	5
R16	1:42	4	0:00	0
R17	0:40	3	0:00	0
R18	0:50	3	0:00	0
R19	0:45	3	0:00	0
R20	0:37	2	0:00	0
R21	5:08	5	5:08	5
R22	1:35	3	1:35	3
R23	2:50	6	2:50	6
R24	1:00	2	1:00	2

Taulukko 7: Teoreettisen maksimivälkkeen vuotuinen määrä ja suurin päiväkohtainen arvo reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	VE1 Teoreettinen vuotuinen maksimivälke [h:min]	VE1 Teoreettisen maksimivälke päiväkohtainen maksimi [min]	VE2 Teoreettinen vuotuinen maksimivälke [h:min]	VE2 Teoreettisen maksimivälkkeen päiväkohtainen maksimi [min]
R1	19:00	28	19:00	28
R2	20:02	30	20:02	30
R3	3:21	14	3:21	14
R4	2:39	12	2:39	12
R5	18:19	25	0:00	0
R6	9:16	19	0:00	0
R7	6:14	19	0:00	0
R8	7:26	15	0:00	0
R9	14:03	20	0:00	0
R10	3:42	14	0:00	0
R11	2:20	11	0:00	0
R12	13:06	20	0:00	0
R13	0:00	0	0:00	0
R14	13:46	19	0:00	0
R15	11:00	19	8:42	19
R16	7:33	18	0:00	0
R17	4:51	17	0:00	0
R18	8:09	19	0:00	0
R19	5:30	18	0:00	0
R20	7:19	21	0:00	0
R21	22:11	20	22:11	20
R22	14:00	19	14:00	19
R23	20:45	33	20:45	33
R24	11:50	23	11:50	23

Taulukko 8: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R21 kohdalla. Tämän reseptorin kohdalla välkevaikutus on sama molemmilla sijoitussuunnitelmilla.

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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Helmikuu	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0:07
Maaliskuu	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0:17
Huhtikuu	0	0	21	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0:28
Toukokuu	0	16	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:41
Kesäkuu	0	84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1:24
Heinäkuu	0	63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1:03
Elokuu	0	0	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:43
Syyskuu	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0:20
Lokakuu	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0:05
Marraskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Joulukuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Yhteensä	0:00	2:43	1:29	0:44	0:11	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:08

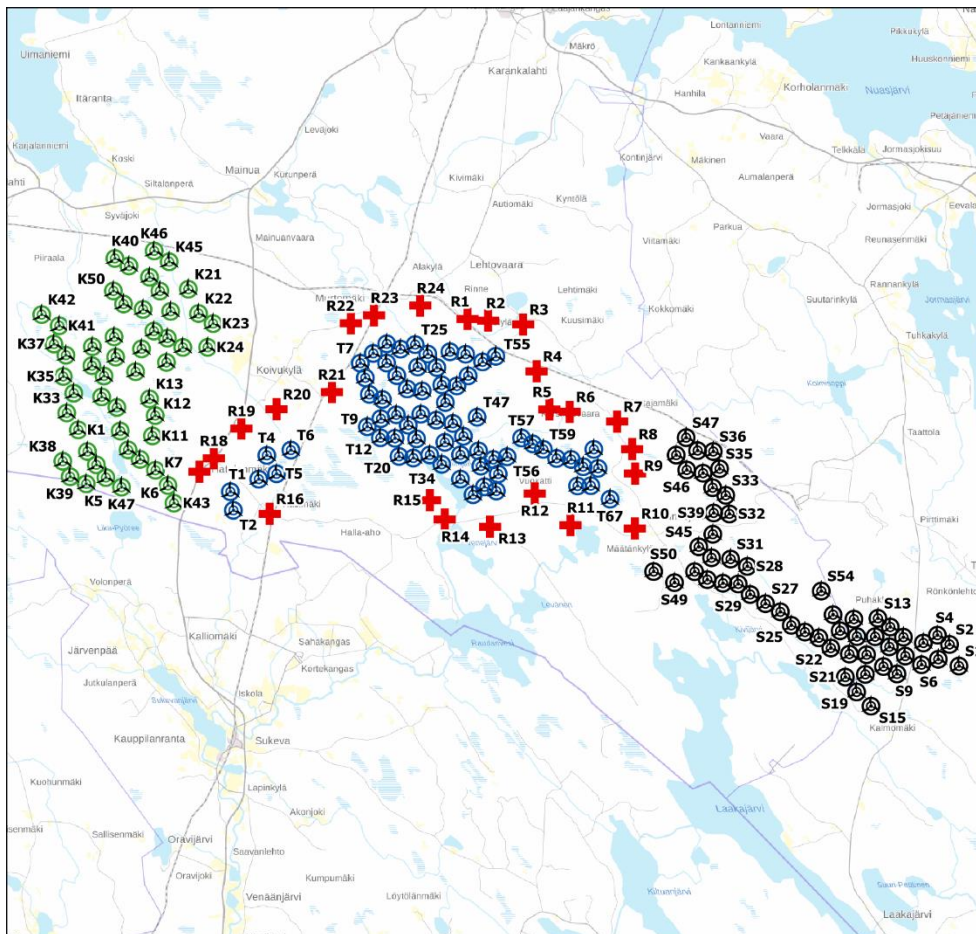
Taulukko 9: Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto minuutteina ja tunteina reseptorin R23 kohdalla. Tämän reseptorin kohdalla välkevaikutus on sama molemmilla sijoitussuunnitelmilla.

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	0	0	0	0	152	70	0	0	0	0	0	3:42
Helmikuu	0	0	0	0	125	276	0	0	0	0	0	0	6:40
Maaliskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Huhtikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Toukokuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Kesäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Heinäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Elokuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Syyskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Lokakuu	0	0	0	0	91	73	0	0	0	0	0	0	2:44
Marraskuu	0	0	0	0	34	354	70	0	0	0	0	0	7:39
Joulukuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Yhteensä	0:00	0:00	0:00	0:00	4:10	14:15	2:21	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	20:45

3.3 Kivikankaan ja läheisten tuulivoimapuistojen yhteisvaikutukset

Kivikankaan läheisyyteen on suunniteltu Katajamäen ja Sivakkalehton tuulivoimapuistoja, joiden kanssa Kivikankaan voimaloilla voi olla välkkeen suhteen yhteisvaikutuksia. Tässä luvussa arvoidaan näiden kolmen puiston yhteisiä välkevaikutuksia. Katajamäen sijoitussuunnitelmassa on 51 voimalaa. Sivakkalehdon osalta vaikutusten arvioinnissa käytetään Sivakkalehdon laajempaa sijoitussuunnitelmaa VE1, jossa on 54 voimalaa. Sivakkalehdon suppeampi suunnitelma VE2 sisältää 39 voimalaa, jotka ovat osa suunnitelmaa VE1. Kaikki yhteisvaikutusten arvioinnissa huomioitavat voimalat on esitetty karttapohjalla (Kuva 6). Katajamäen ja

Sivakkalehdon voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m, roottorin halkaisijaa 200 m ja samaa lapaprofiilia kuin Kivikankaan voimaloille.



Kivikangas VE1, Katajamäki ja Sivakkalehto VE1

22.2.2022 / Numerola Oy

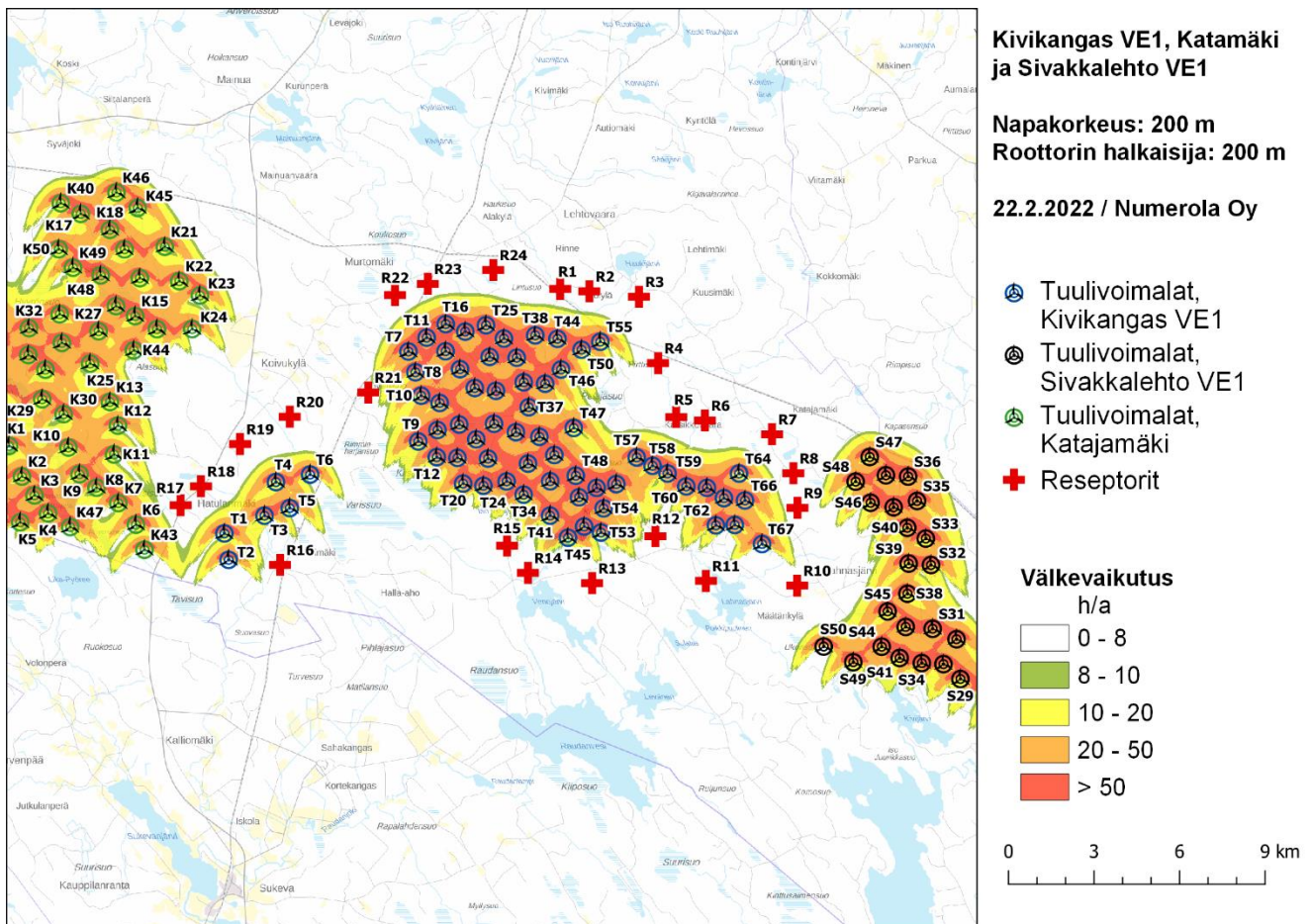
- ⊗ Tuulivoimalat, Kivikangas VE1
- ⊗ Tuulivoimalat, Sivakkalehto VE1
- ⊗ Tuulivoimalat, Katajamäki
- + Reseptorit

0 4 8 12 km

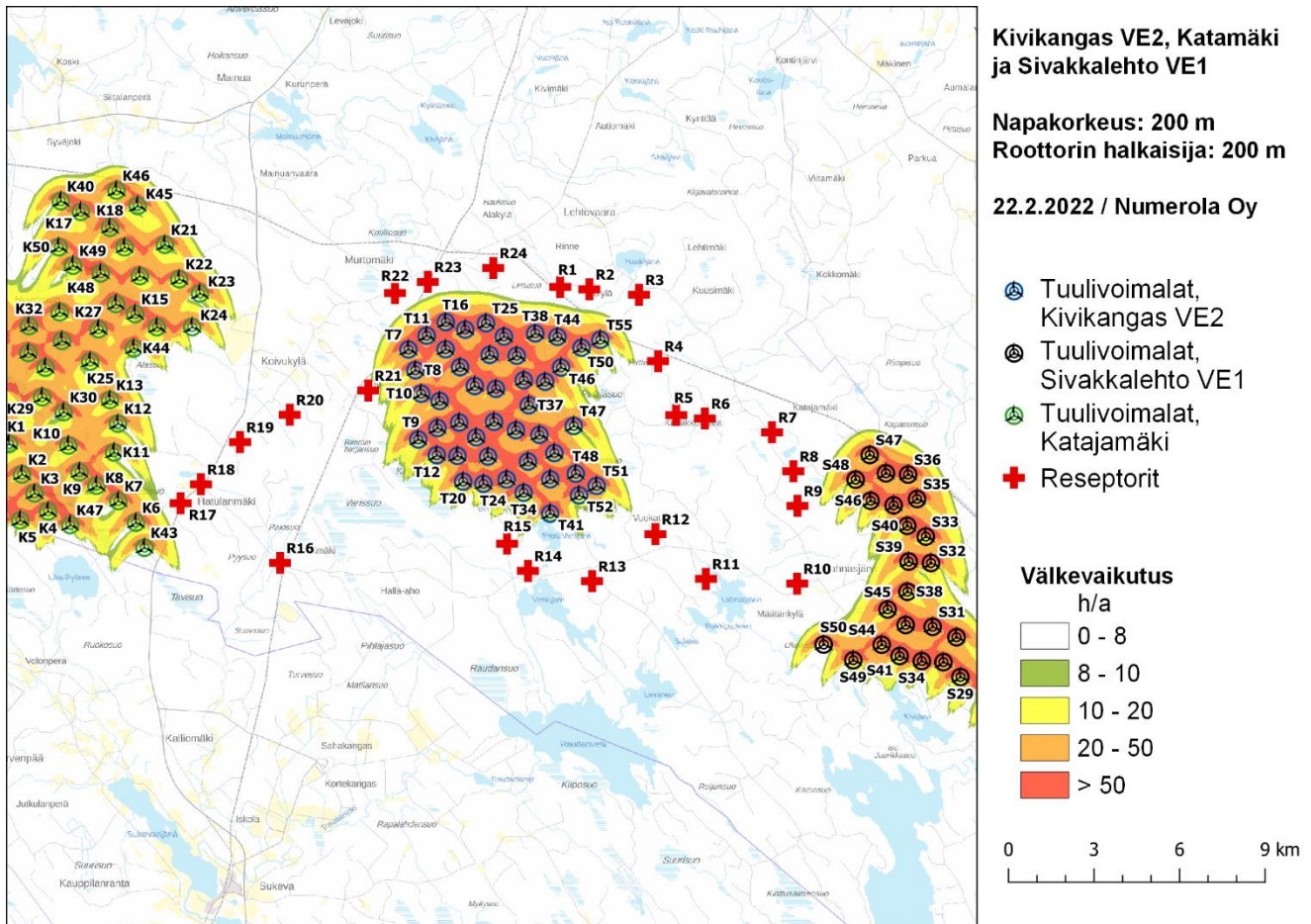
Kuva 6: Kivikankaan (VE1), Katajamäen ja Sivakkalehdon (VE1) sijoitussuunnitelmat.

Todennäköisen välkkeen yhteisvaikutukset on esitetty karttakuvina (Kuva 7 ja Kuva 8) ja reseptorikohtaisesti taulukossa (Taulukko 10). Mallinnusten perusteella Kivikankaan ja Sivakkalehdon voimaloista aiheutuu vähäisiä välkkeen yhteisvaikutuksia reseptoreihin R8, R9 ja R10, kun tarkastellaan molempien puistojen laajempaa suunnitelmaa VE1. Katajamäen ja Kivikankaan sijoitussuunnitelman VE1 voimaloista aiheutuu pieni välkkeen yhteisvaikutus reseptoriin R17. Kivikankaan sijoitussuunnitelmalla VE2 ei ole välkkeen yhteisvaikutuksia Katajamäen tai Sivakkalehdon voimaloiden kanssa.

Kivikankaan, Katajamäen ja Sivakkalehdon välkkeen yhteisvaikutukset eivät aiheuta todennäköisen välkkeen ohjearvojen ylityksiä Kivikankaan lähialueella: vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon ja todennäköinen päiväkohtainen välkeaika jää alle 30 minuutin ohjearvon, myös kun yhteisvaikutukset huomioidaan.



Kuva 7: Todennäköisen välkkeen yhteisvaikutus Kivikankaan sijoitusuunnitelmalla VE1, Katajamäen voimaloilla ja Sivakkalehdon sijoitusuunnitelmalla VE1.



Kuva 8: Todennäköisen välkkeen yhteisvaikutus Kivikankaan sijoitusuunnitelmalla VE2, Katajamäen voimaloilla ja Sivakkalehdon sijoitusuunnitelmalla VE1.

Taulukko 10: Todennäköisen välkkeen yhteisvaikutukset reseptoreiden kohdilla, kun huomioidaan Kivikankaan vaihtoehdon VE1 tai VE2 ohella Katajamäen ja Sivakkalehdon (VE1) tuulivoimapuistot.

Reseptori	Kivikangas VE1 Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus [h:min]	Kivikangas VE1 Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimi [min]	Kivikangas VE2 Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus [h:min]	Kivikangas VE2 Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimi [min]
R1	2:00	4	2:00	4
R2	1:54	3	1:54	3
R3	0:26	2	0:26	2
R4	0:38	3	0:38	3
R5	1:50	3	0:00	0
R6	1:13	3	0:00	0
R7	0:47	3	0:00	0
R8	1:33	4	0:20	2
R9	3:07	4	0:34	3
R10	1:11	3	0:15	1
R11	0:35	3	0:00	0
R12	3:02	5	0:00	0
R13	0:00	0	0:00	0
R14	3:34	6	0:00	0
R15	2:43	5	2:14	5
R16	1:42	4	0:00	0
R17	2:28	4	1:48	4
R18	0:50	3	0:00	0
R19	0:45	3	0:00	0
R20	0:37	2	0:00	0
R21	5:08	5	5:08	5
R22	1:35	3	1:35	3
R23	2:50	6	2:50	6
R24	1:00	2	1:00	2

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Kajaanin kaupungin alueelle suunnitellun Kivikankaan tuulivoimapuiston ympäristölle aiheuttaman välkevaikutuksen laskennalliset arvio. Arvio on tehty sijoitussuunnitelmille VE1 (67 voimalaa) ja VE2 (45 voimalaa). Vaikutusten arvioinnissa on huomioitu myös Kivikankaan läheisyyteen suunnitellut tuulivoimapuistot. Voimaloiden välkevaikutusten arvio tehtiin roottorin halkaisijalla 200 m ja napakorkeudella 200 m.

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja, ja ympäristöministeriö suosittelee käyttämään muiden maiden ohjearvoja. Mallinnuksen mukaan todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon ja Tanskan 10 tunnin ohjearvon alueen kaikkien vakituisten ja vapaa-ajan asuntojen kohdilla. Todennäköinen päiväkohtainen välkeaika alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon alueen kaikkien asuntojen kohdilla. Teoreettinen vuotuinen maksimivälke jää alle Saksan 30 tunnin raja-arvon. Saksan 30 minuutin raja-arvo teoreettisen maksimivälkkeen päiväkohtaiselle arvolle ylittyy vähän yhden asunnon kohdalla. Ylitys ajoittuu kuitenkin marraskuun ja helmikuun alkuun, jolloin auringonpaisteen todennäköisyys on Suomen olosuhteissa hyvin alhainen.

5 Välkevaikutuksen laskentamenetelmä

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

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

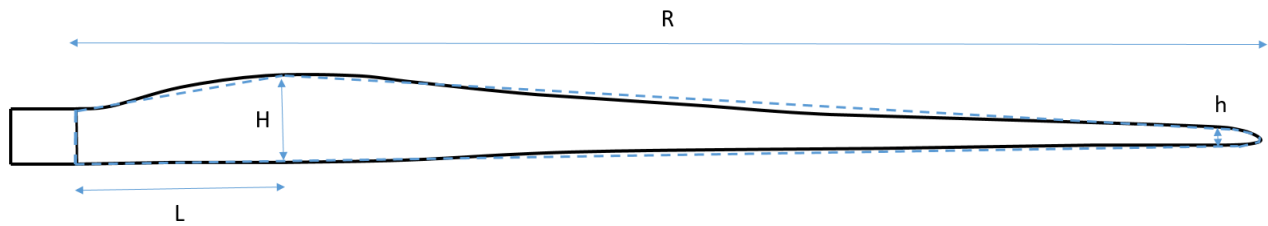
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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 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 määritetään parametrien H ja h keskiarvona (esim. WindPRO Shadow).



Kuva 9: Turbiinin lavan yksinkertaistettu profiili.

Tämän raportin väkelaskennassa käytetään kuvan (Kuva 9) mukaista yksinkertaistettua profiilia, ja isojen roottorien mallintamiseen soveltuvia mittoja H ja h . Laskennassa huomioitava 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. Pirinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.
- [4] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päiväys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5 | 2016.