



ABO Energy Suomi Oy, Metsähallitus

Kivikankaan tuulivoimapuiston välkeselvitys

101011971-004, 12.05.2025

Tekijä
AFRY Finland Oy
Mika Laitinen

E-mail
mika.laitinen@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
003

Asiakas
ABO Energy Suomi Oy
Metsähallitus

Päivämäärä
12/05/2025

Projektinumero
101011971-004

Raportin tila
VALMIS

Kivikankaan tuulivoimapuiston välkeselvitys

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	06.06.2023/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	06.06.2023/ Mika Laitinen, Senior Consultant	Alkuperäinen
002	30.04.2024/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	30.04.2024/ Mika Laitinen, Senior Consultant	Layout muutokset puistoissa: Kivikangas, Kivikangas 2 ja Sivakkalehto
003	12.02.2025/ Mika Laitinen, Senior Consultant	12.05.2025/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Layout muuttunut puistoissa Kivikangas ja Sivakkalehto

Aineistojen käyttöoikeudet

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

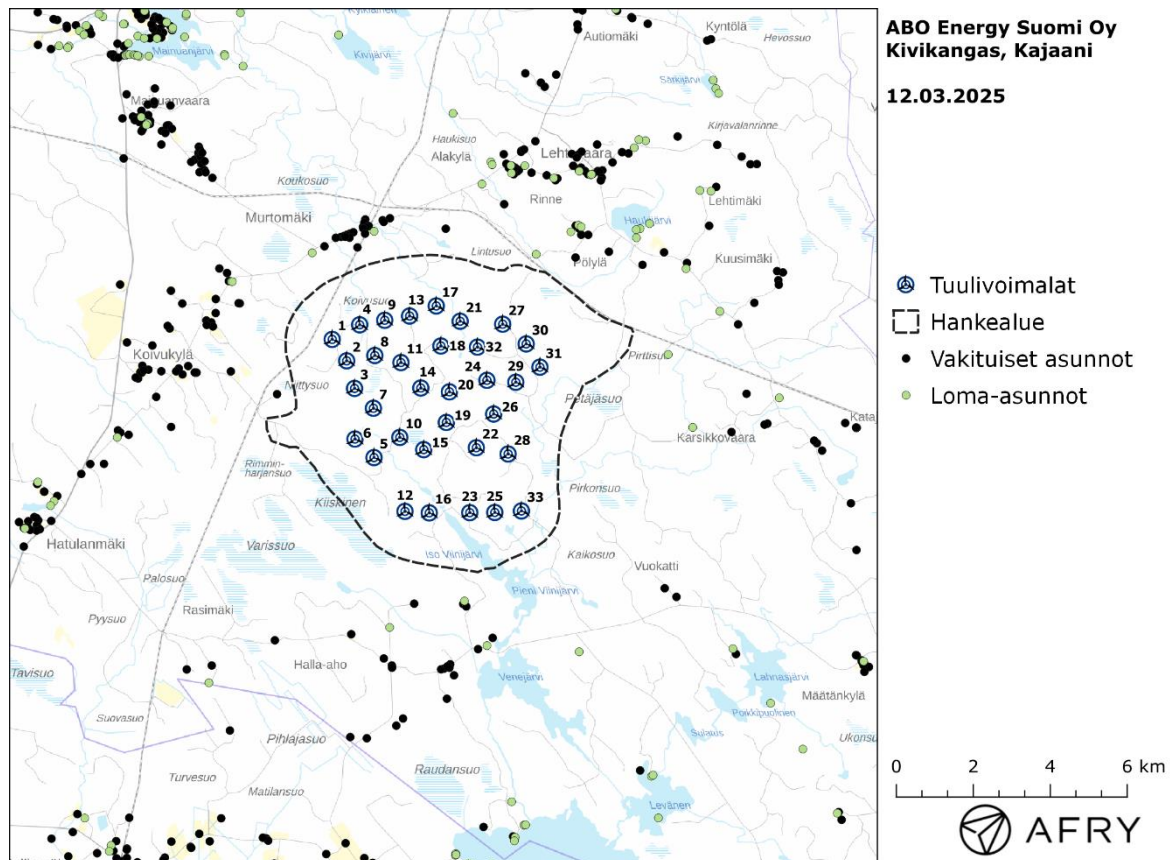
Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	6
2.1	Välkevaikutus.....	6
2.2	Välkkeen rajoittaminen.....	6
2.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	6
2.4	Ohjeavot	7
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	8
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	8
3.2	Todennäköinen välkevaikutus.....	12
3.3	Teoreettinen välkevaikutus	14
3.4	Kivikankaan ja läheisten tuulivoimapuistojen yhteisvaikutukset	16
4	Yhteenveto	21
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	22
6	Viitteet.....	24

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Kajaanin kaupungin alueelle suunnitellun Kivikankaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty 33 voimalan sijoitus-suunnitelmalle. Voimaloiden sijainnit on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1).

Selvityksessä arvioidaan myös väkkeen yhteisvaikutuksia Kivikankaan läheisyyteen suunniteltujen naapuripuistojen kanssa. Huomioitavat naapuripuistot ovat Kivikangas 2, Kukkokangas, Katajamäki sekä Sivakkalehto. Näiden tuulivoimapuistojen voimaloiden sijainnit ja yhteisvaikutukset on kuvattu tarkemmin luvussa 3.4.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Kivikankaan hankealueella.

Taulukko 1: Kivikankaan tuulivoimaloiden (33 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla.

Tuulivoimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
01	527425	7101617	175
02	527801	7101061	173
03	528006	7100345	175
04	528139	7101996	168
05	528511	7098551	184
06	528017	7099031	182
07	528496	7099831	178
08	528532	7101199	171
09	528790	7102113	169
10	529181	7099074	176
11	529211	7101016	184
12	529316	7097155	195
13	529436	7102224	184
14	529727	7100356	205
15	529803	7098757	177
16	529947	7097116	172
17	530129	7102485	176
18	530249	7101446	192
19	530390	7099463	206
20	530470	7100256	184
21	530749	7102088	178
22	531170	7098806	196
23	530999	7097122	175
24	531445	7100556	186
25	531649	7097127	170
26	531620	7099681	192
27	531854	7102012	188
28	531995	7098644	193
29	532195	7100506	179
30	532465	7101500	188
31	532822	7100897	186
32	531199	7101417	178
33	532341	7097166	173

2 Tuulivoimaloiden välke

2.1 Välkevaikutus

Välkevaikutuksella tarkoitetaan tilannetta, jossa Auringon paisteen ja tarkastelupisteen väliin jäävän voimalan lavat aiheuttavat välkkyvän varjon. Välke voi ulottua pisimmillään 1–3 km etäisyydelle voimalasta. Välkevaikutuksen etäisyyteen ja keston vaikuttavat tuulivoimalan korkeus ja roottorin halkaisija, vuoden- ja vuorokaudenaika, maaston muodot sekä näkyvyyttä rajoittavat tekijät kuten kasvillisuus ja pilvisuus.

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

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

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

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

2.2 Välkkeen rajoittaminen

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

2.3 Arvioinnin epävarmuudet

Mallinnettu todennäköinen välkevaikutus perustuu auringonpaisteen ja tuulisuuden tilastolliseen aineistoon. Yksittäisen vuoden sääolosuhteet saattavat poiketa merkittävästi keskimääräisistä olosuhteista, jolloin vuotuinen välkevaikutus voi poiketa mallinnetusta arvosta. Auringonpaisteen aineisto on saatu Siilinjärven sääasemalta, josta etäisyys hankealueeseen on noin 110 km.

Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta voimaloiden näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Puuston näkyvyyttä peittävä vaikutus vaihtelee kuitenkin vuosien ja vuodenaikojen suhteen, minkä vuoksi puuston välkettä vähentävää vaikutusta ei pystytä arvioimaan tarkasti.

Rakennuksiin kohdistuvan välkkeen laskennassa käytetään ns. kasvihuone-oletusta, jolloin rakennukseen kohdistuva välkevaikutus huomioidaan riippumatta suunnasta. Välkevaikutuksen laskennallinen arvio kuvaa siis välkevaikutusta ulkona. Rakennusten sisätiloissa välkevaikutus on yleensä vähäisempi, koska 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 [4]. 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 todennäköisen välkkeen tapauksessa. Teoreettisen maksimivälkkeen arvioinnissa käytetään Saksan 30 tunnin raja-arvoa vuodessa ja 30 minuuttia päivässä.

3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola -mallinnus-ohjelmistolla, joka huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoima-alueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuulivoimaloiden dimensiot. 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, tuulivoimalan ja tarkastelupisteen kautta kulkeva jana leikkaa maanpintaa, niin varjostusta ei esiinny. Välkevaikutus laskettiin 2 m korkeudelle. Auringonpaistekulman rajana horisontista käytettiin kolmea astetta, jonka alle menevää säteilyä ei oteta huomioon varjostuksessa.

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

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

Väkelaskennassa voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m, roottorin halkaisijaa 200 m ja lapaprofiilia, jonka maksimileveys on 4,8 m ja joka kapenee lineaarisesti arvoon 1,5 m 90 % etäisyydellä lavan tyvestä. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat tuulivoimaloiden 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 tuulivoimalan orientaatio voidaan määrittää, jolloin roottori oletetaan tiettyyn suuntaan asetetuksi ympyrätasoksi. Todennäköisen välkevaikutuksen laskenta on suoritettu kuudella eri tuulivoimalan 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 tuulivoimalan käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammissa tuulissa tuulivoimalat ovat paikallaan, jolloin roottorin pyörimisestä aiheutuvaa valon välkkymistä ei esiinny. Suomen tuuliatlaksen tuulisuusestimaatti on otettu tuulivoima-alueen keskeltä korkeudelta 200 m, ja sen perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet tuulivoimalan käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 2).

Paikallinen pilvisyys on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Siilinjärven sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [3]. 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: Suuntasektori-kohtaiset 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	0,194	0,170	0,129	0,126	0,128	0,187

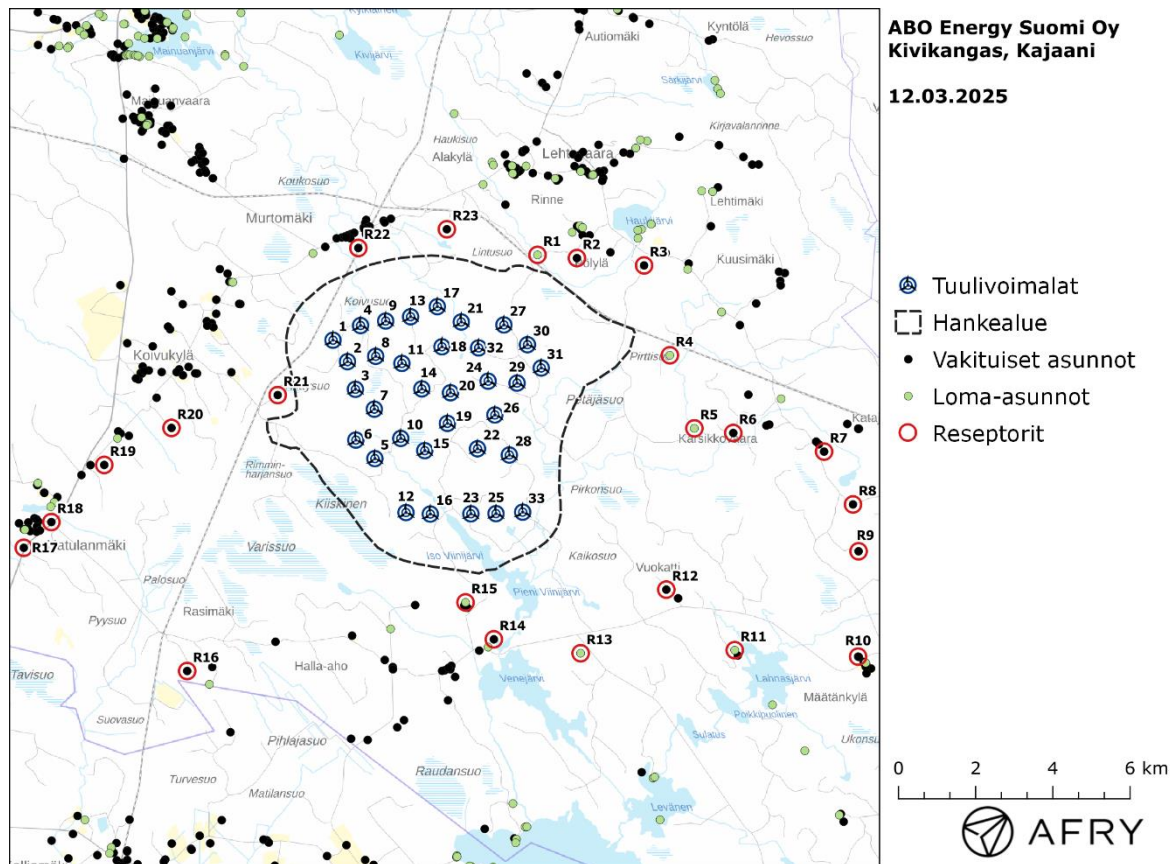
Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Siilinjärven sääasemalla.

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 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 23 vertailurakennusta, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Pisteet sijaitsevat lähimmillään 2,0 km etäisyydellä voimaloista. Alueen rakennustieto perustuu Maanmittauslaitoksen maastotietokannan aineistoon, jossa on eritelty alueen asuin- ja lomarakennukset.

Taulukko 4: Reseptorien 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	219	lomarakennus
R5	536793	7099330	199	lomarakennus
R6	537801	7099210	207	vakituinen asuinrakennus
R7	540154	7098728	236	vakituinen asuinrakennus
R8	540904	7097360	226	vakituinen asuinrakennus
R9	541048	7096148	214	vakituinen asuinrakennus
R10	541036	7093422	217	vakituinen asuinrakennus
R11	537839	7093588	184	lomarakennus
R12	536065	7095156	201	vakituinen asuinrakennus
R13	533845	7093508	193	lomarakennus
R14	531596	7093869	173	vakituinen asuinrakennus
R15	530862	7094825	176	lomarakennus
R16	523649	7093049	192	vakituinen asuinrakennus
R17	519414	7096238	192	vakituinen asuinrakennus
R18	520128	7096904	195	vakituinen asuinrakennus
R19	521499	7098383	192	vakituinen asuinrakennus
R20	523242	7099341	172	vakituinen asuinrakennus
R21	525995	7100191	201	vakituinen asuinrakennus
R22	528085	7103999	157	vakituinen asuinrakennus
R23	530378	7104484	172	vakituinen asuinrakennus



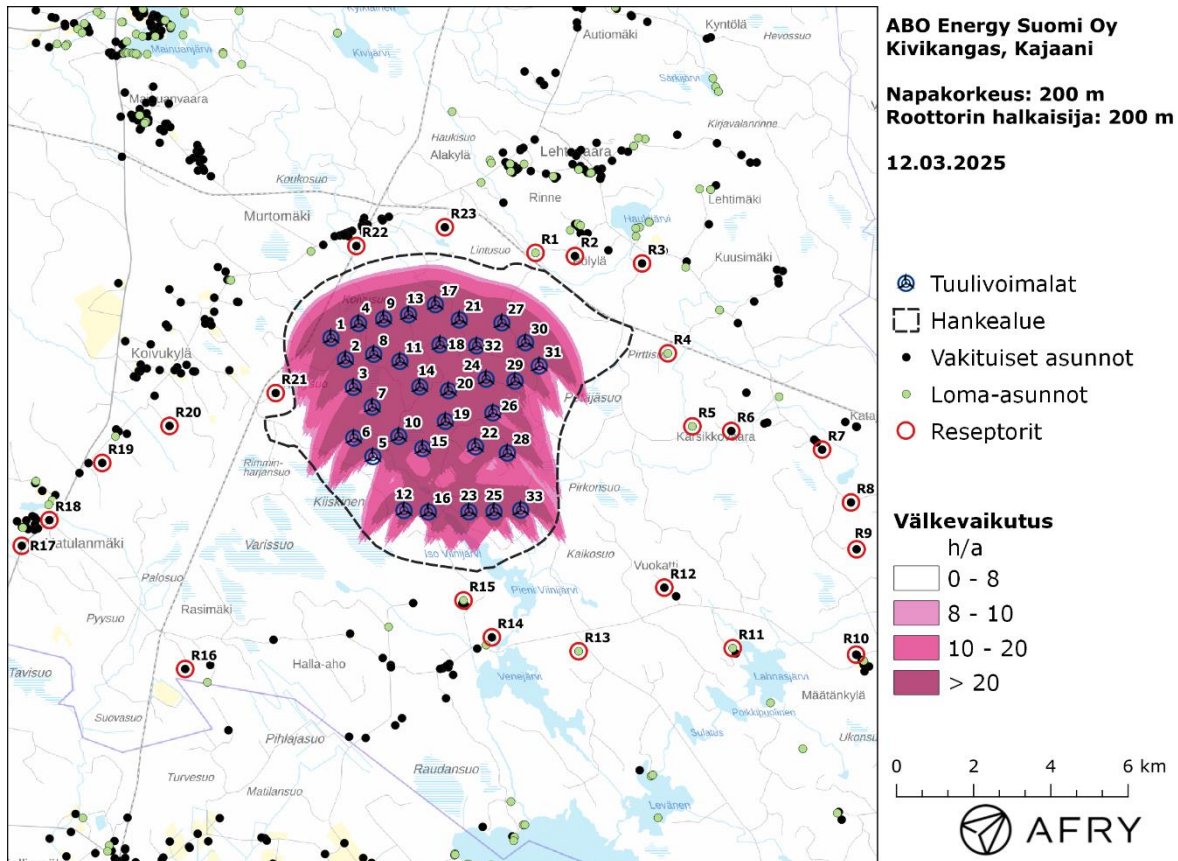
Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapaiston hankealueella.

3.2 Todennäköinen välkevaikutus

Mallinnetut arviot todennäköisten väketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta tuulivoimaloiden näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja.

Mallinnusten perusteella vuotuinen todennäköinen välkevaikutus jää alle 8 tunnin ohjearvon kaikkien lähialueen asuin- ja lomarakennusten kohdalla. Myös päiväkohtainen todennäköinen välke aika alittaa 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen asuntojen kohdalla. Vuotuiset todennäköiset välkevaikutusajat ja suurimmat päiväkohtaiset maksimivälkkeet reseptorien kohdalla on lueteltu taulukossa (Taulukko 5).

Suurin todennäköinen välkevaikutus kohdistuu reseptoriin R21, jonka kohdalla vuotuinen todennäköinen välke aika on 4 tuntia ja 6 minuuttia. Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen kyseisen reseptorin kohdalla on esitetty taulukossa 6. Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aika-vyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 3: Tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköisen välkkeen määrä ilman puuston vaikutusta.

Taulukko 5: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina [h:min] reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeaika	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaika
R1	0:37	0:02
R2	0:00	0:00
R3	0:00	0:00
R4	0:00	0:00
R5	0:00	0:00
R6	0:00	0:00
R7	0:00	0:00
R8	0:00	0:00
R9	0:00	0:00
R10	0:00	0:00
R11	0:00	0:00
R12	0:00	0:00
R13	0:00	0:00
R14	0:00	0:00
R15	0:00	0:00
R16	0:00	0:00
R17	0:00	0:00
R18	0:00	0:00
R19	0:00	0:00
R20	0:00	0:00
R21	4:06	0:05
R22	1:08	0:03
R23	0:44	0:02

Taulukko 6: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R21 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	0:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:04	0:02	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:06
Huhtikuu	0:00	0:00	0:08	0:18	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:26
Toukokuu	0:00	0:18	0:17	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:35
Kesäkuu	0:00	1:10	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:10
Heinäkuu	0:00	1:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:01
Elokuu	0:00	0:00	0:23	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:23
Syyskuu	0:00	0:00	0:03	0:13	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:16
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04
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	2:29	0:52	0:39	0:06	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	4:06

3.3 Teoreettinen välkevaikutus

Teoreettisen maksimivälkkeen vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdalla on lueteltu taulukossa (Taulukko 7). Mallinnusten perusteella teoreettinen vuotuinen maksimivälke jää alle Saksan 30 tunnin raja-arvon kaikkien alueen asuin- ja lomarakennusten kohdalla. Myös teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke jää alle Saksan 30 minuutin päiväkohtaisen raja-arvon kaikkien asuin- ja lomarakennusten kohdalla.

Suurin teoreettinen välkevaikutus kohdistuu reseptoriin R21, jonka kohdalla maksimivälke on 17 tuntia ja 21 minuuttia. Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen kyseisen reseptorin kohdalla on esitetty taulukossa 8. Ajoittumistaulukosta nähdään, että teoreettista välkettä syntyy eniten varhain aamusta. Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).

Taulukko 7: Vuotuinen teoreettinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina [h:min] reseptoreiden kohdalla.

Reseptori	Teoreettinen vuotuinen välke aika	Teoreettisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälke aika
R1	6:27	0:14
R2	0:00	0:00
R3	0:00	0:00
R4	0:00	0:00
R5	0:00	0:00
R6	0:00	0:00
R7	0:00	0:00
R8	0:00	0:00
R9	0:00	0:00
R10	0:00	0:00
R11	0:00	0:00
R12	0:00	0:00
R13	0:00	0:00
R14	0:00	0:00
R15	0:00	0:00
R16	0:00	0:00
R17	0:00	0:00
R18	0:00	0:00
R19	0:00	0:00
R20	0:00	0:00
R21	17:21	0:15
R22	8:01	0:16
R23	8:49	0:21

Taulukko 8: Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R21 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	0:27	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:27
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:21	0:11	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:32
Huhtikuu	0:00	0:00	0:35	1:17	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:52
Toukokuu	0:00	1:06	1:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:15
Kesäkuu	0:00	4:36	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	4:36
Heinäkuu	0:00	3:39	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:39
Elokuu	0:00	0:00	1:44	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:44
Syyskuu	0:00	0:00	0:22	1:16	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:38
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:38	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:38
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	9:21	3:49	3:33	0:38	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	17:21

3.4 Kivikankaan ja läheisten tuulivoimapuistojen yhteisvaikutukset

Tässä luvussa arvioidaan Kivikankaan voimaloiden ja läheisten tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutuksia. Kivikankaan läheisyyteen on suunnitteilla neljä tuulivoimapuistoa, joiden kanssa voi esiintyä välkkeen yhteisvaikutuksia:

- Kivikangas 2 (18 voimalaa)
- Kukkokangas (6 voimalaa)
- Sivakkalehto (VE1, 35 voimalaa)
- Katajamäki (51 voimalaa)

Naapuripuistojen koordinaatit on annettu taulukoissa 9-12. Välkemallinnuksissa kaikkien puistojen voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m, roottorin halkaisijaa 200 m sekä samaa lapaprofiilia kuin Kivikankaan voimaloille (maksimileveys 4,8 m ja leveys 90 % etäisyydellä tyvestä 1,5 m).

Taulukko 9: Kivikangas 2 tuulivoimaloiden (18 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla.

Tuulivoimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
K01	533341	7097311	169
K02	533577	7096491	171
K03	533012	7095326	165
K04	533994	7097206	175
K05	533613	7095499	170
K06	534465	7096624	188
K07	534185	7095824	174
K08	535462	7097864	185
K09	535995	7097547	191
K10	536555	7097098	218
K11	537133	7096887	221
K12	537741	7096420	199
K13	538553	7097292	192
K14	538457	7096471	194
K15	538230	7095666	189
K16	539081	7096487	190
K17	539571	7094800	188
K18	538846	7095554	190

Taulukko 10: Kukkokankaan tuulivoimaloiden (6 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla.

Tuulivoimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
WTG01	521360	7095318	178
WTG02	521095	7094331	164
WTG03	522355	7095878	172
WTG04	522961	7096992	173
WTG05	521311	7093513	161
WTG06	521775	7094674	167

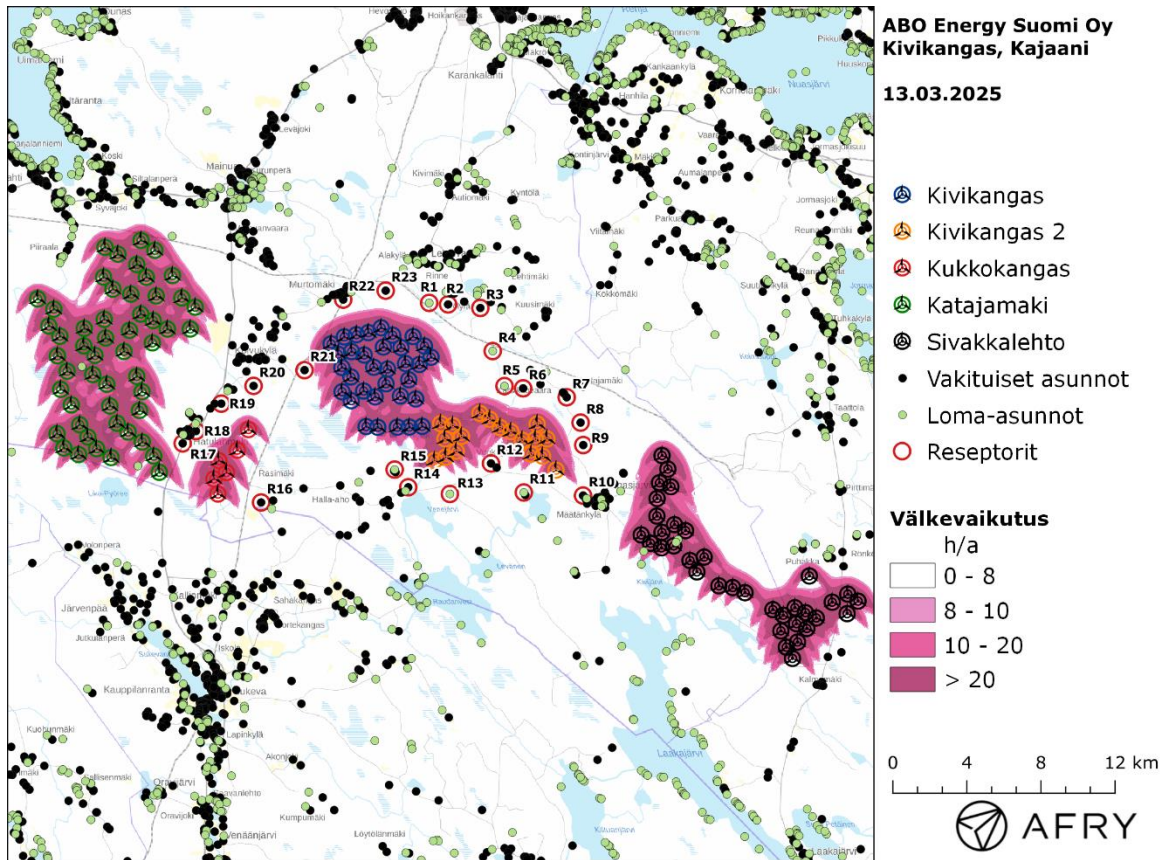
Taulukko 11: Sivakkalehdon tuulivoimaloiden (35 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla.

Tuuli-voimalat	E	N	Maaston korkeus [m]	Tuuli-voimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
WT01	545299	7095589	234	WT19	549779	7088188	192
WT02	545612	7094859	221	WT20	551284	7087274	192
WT03	545161	7094122	218	WT21	551847	7086968	195
WT04	545774	7093908	208	WT22	551717	7086127	187
WT05	545033	7093271	210	WT23	552474	7087378	212
WT06	545022	7092324	193	WT24	553043	7087112	218
WT07	545971	7091861	194	WT25	553629	7086821	212
WT08	546567	7091537	195	WT26	552556	7086515	197
WT09	545294	7091441	190	WT27	553119	7086254	203
WT10	544174	7091308	191	WT28	552617	7085526	188
WT11	544676	7090856	186	WT29	552010	7085249	189
WT12	545269	7090607	180	WT30	552344	7084638	196
WT13	545930	7090712	190	WT31	554489	7087675	218
WT14	547573	7090111	200	WT32	555330	7088109	231
WT15	546806	7089926	188	WT33	555883	7087732	239
WT16	547182	7089310	189	WT34	555295	7087056	221
WT17	548368	7088558	192	WT35	553254	7089088	220
WT18	549117	7088464	200				

Taulukko 12: Katajamäen tuulivoimaloiden (51 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla.

Tuuli-voimalat	E	N	Maaston korkeus [m]	Tuuli-voimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
KA1	515909	7106459	165	KA27	512447	7103491	148
KA2	515210	7106831	165	KA28	511576	7104046	148
KA3	516931	7105901	146	KA29	516239	7101210	191
KA4	517160	7107206	143	KA30	516931	7099863	198
KA5	517906	7106667	137	KA31	517213	7099034	198
KA6	517446	7105214	147	KA32	517075	7098024	180
KA7	517980	7104206	148	KA33	515475	7098267	166
KA8	518858	7105305	147	KA34	517226	7096320	172
KA9	519364	7104099	155	KA35	517845	7095564	169
KA10	520088	7103598	173	KA36	518144	7094686	177
KA11	519817	7102420	158	KA37	516462	7096860	175
KA12	517144	7103226	167	KA38	515866	7097332	170
KA13	517816	7102875	161	KA39	514763	7095958	168
KA14	518583	7102417	153	KA40	513785	7095645	174
KA15	517771	7101673	169	KA41	512989	7095998	185
KA16	516534	7102343	178	KA42	512622	7096766	188
KA17	515249	7101935	175	KA43	514288	7096590	176
KA18	514670	7100997	171	KA44	513847	7097251	183
KA19	514555	7099960	173	KA45	513394	7098322	188
KA20	515309	7099437	168	KA46	512819	7099163	179
KA21	514070	7101510	164	KA47	515539	7095480	163
KA22	514093	7102453	154	KA48	515171	7102940	163
KA23	512778	7102030	158	KA49	516610	7104302	158
KA24	512646	7100974	160	KA50	515639	7104571	166
KA25	513168	7100143	163	KA51	515136	7105219	161
KA26	512181	7102585	153				

Todennäköisen välkkeen yhteisvaikutukset on esitetty karttakuvassa (Kuva 4). Yhteisvaikutusten todennäköiset väleajat ja teoreettiset maksimivälkkeet on esitetty reseptorikohtaisesti taulukossa (Taulukko 13). Yhteisvaikutusten mallinnuksen perusteella sekä todennäköinen väleaja että teoreettinen maksimivälke jäävät alle raja-arvojen kaikkien ympäristössä sijaitsevien asuin- ja lomarakennusten kohdilla. Mallinnusten perusteella Kivikankaaseen suunnitelluilla voimaloilla ei ole välkkeen yhteisvaikutuksia naapuripuistojen voimaloiden kanssa ympäröivään asutukseen.



Kuva 4: Kivikankaan ja neljän naapuripuiston (Kivikangas 2, Kukkokangas, Katajamäki ja Sivakkalehto) tuulivoimaloiden aiheuttama todennäköinen väiketuntien määrä ilman puuston vaikutusta.

Taulukko 13: Todennäköinen välkevaikutus ja teoreettinen maksimivälke [h:min] reseptoreiden kohdilla, kun mallinuksissa huomioidaan Kivikankaan voimaloiden lisäksi neljän naapuripuiston (Kivikangas 2, Kukkokangas, Sivakkalehto ja Katajamäki) voimalat.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välke	Todennäköinen päiväkohtainen maksimivälke	Teoreettinen vuotuinen maksimivälke	Teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke
R1	0:37	0:02	6:27	0:14
R2	0:00	0:00	0:00	0:00
R3	0:00	0:00	0:00	0:00
R4	0:00	0:00	0:00	0:00
R5	1:18	0:02	12:59	0:18
R6	0:47	0:02	8:22	0:20
R7	0:24	0:02	3:28	0:11
R8	0:34	0:02	3:41	0:13
R9	1:18	0:03	7:15	0:13
R10	2:33	0:05	9:28	0:15
R11	0:58	0:03	3:44	0:14
R12	4:03	0:04	15:58	0:16
R13	0:00	0:00	0:00	0:00
R14	2:02	0:05	7:51	0:18
R15	0:25	0:03	1:46	0:11
R16	0:45	0:02	2:56	0:08
R17	1:49	0:04	11:59	0:22
R18	0:33	0:02	4:23	0:14
R19	0:25	0:02	3:01	0:14
R20	0:13	0:01	2:35	0:09
R21	4:06	0:05	17:21	0:15
R22	1:08	0:03	8:01	0:16
R23	0:44	0:02	8:49	0:21

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Kajaanin kaupungin alueelle suunnitellun Kivikankaan tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arviointi on tehty 33 voimalan toteutusvaihtoehdolle roottorin halkaisijalla 200 m ja napakorkeudella 200 m. Raportissa on lisäksi esitetty välkkeen yhteisvaikutukset neljän naapuripuiston kanssa.

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja, ja ympäristöministeriö suosittelee käyttämään muiden maiden ohjearvoja. Tässä raportissa väketasoja on verrattu Ruotsin suunnitteluohjeissa annettuihin arvoihin todennäköisen välkkeen tapauksessa. Teoreettisen maksimivälkkeen arvioinnissa käytetään Saksan suunnitteluohjeissa annettuja raja-arvoja.

Välkevarjostusmallinnuksen perusteella Kivikankaan voimaloilla on vain vähäistä välkevaikutusta ympäröivään asutukseen. Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon kaikkien loma- ja asuinrakennusten kohdalla. Myös todennäköinen päiväkohtainen välkeaika alittaa Ruotsin 30 minuutin ohjearvon asutuksen kohdalla. Näiden lisäksi Saksan 30 tunnin raja-arvo vuotuiselle teoreettiselle maksimivälkkeelle sekä 30 minuutin raja-arvo teoreettiselle päiväkohtaiselle maksimivälkkeelle jää alle raja-arvon.

Välkkeen yhteisvaikutusten mallinnuksen perusteella Kivikankaan voimaloilla ei ole yhteisvaikutuksia naapuripuistojen voimaloiden kanssa ympäröivään asutukseen.

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 tuulivoimalan aiheuttamien välketuntien määrä saadaan integroimalla tiheysfunktioita tuulivoimalan roottorikehän läpinäkyvällä taivaanpallon osuudella. Tuulivoimaloiden yhteisvaikutus saadaan summaamalla tuulivoimalakohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämissä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen tuulivoimaloiden 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.

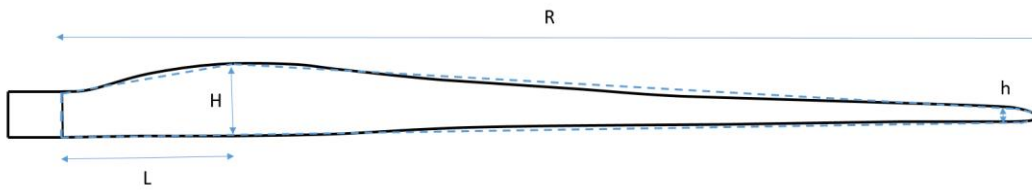
Tuulivoimalan lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle tuulivoimalasta, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu tuulivoimalan lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa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



Kuva 5: Tuulivoimalan lavan malliprofiili.

Tämän raportin välkkelaskennassa käytetään yllä olevan kuvan 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 välkkelaskennassa huomioidaan tuulivoimalan 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.