



wpd Suomi Oy

Junnunmäen tuulivoimapuiston väikeselvitys

101025804-001, 23.09.2024

Tekijä
AFRY Finland Oy
Veera Hatulainen

E-mail
veera.hatulainen@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
001

Asiakas
wpd Suomi Oy
Tiina Vikman

Päivämäärä
23/09/2024

Projektinumero
101025804-001

Raportin tila
VALMIS

Junnunmäen tuulivoimapuiston välkesselvitys

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	23.09.2024/ Veera Hatulainen, Technical Consultant	23.09.2024/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen

Aineistojen käyttöoikeudet

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

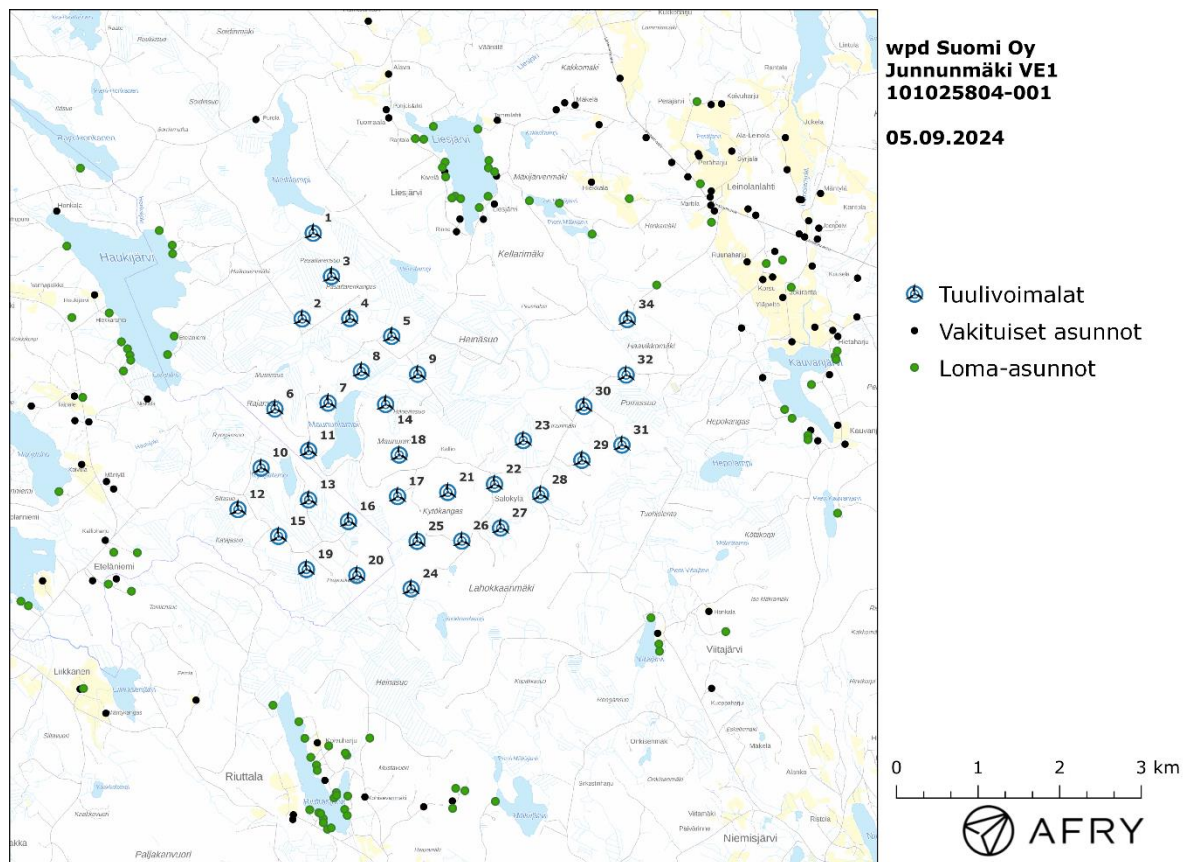
Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	8
2.1	Välkevaikutus	8
2.2	Välkkeen rajoittaminen	8
2.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	8
2.4	Ohjearovot	9
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	10
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	10
3.2	Todennäköinen välkevaikutus	14
4	Yhteenveto	19
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	20
6	Viitteet	22

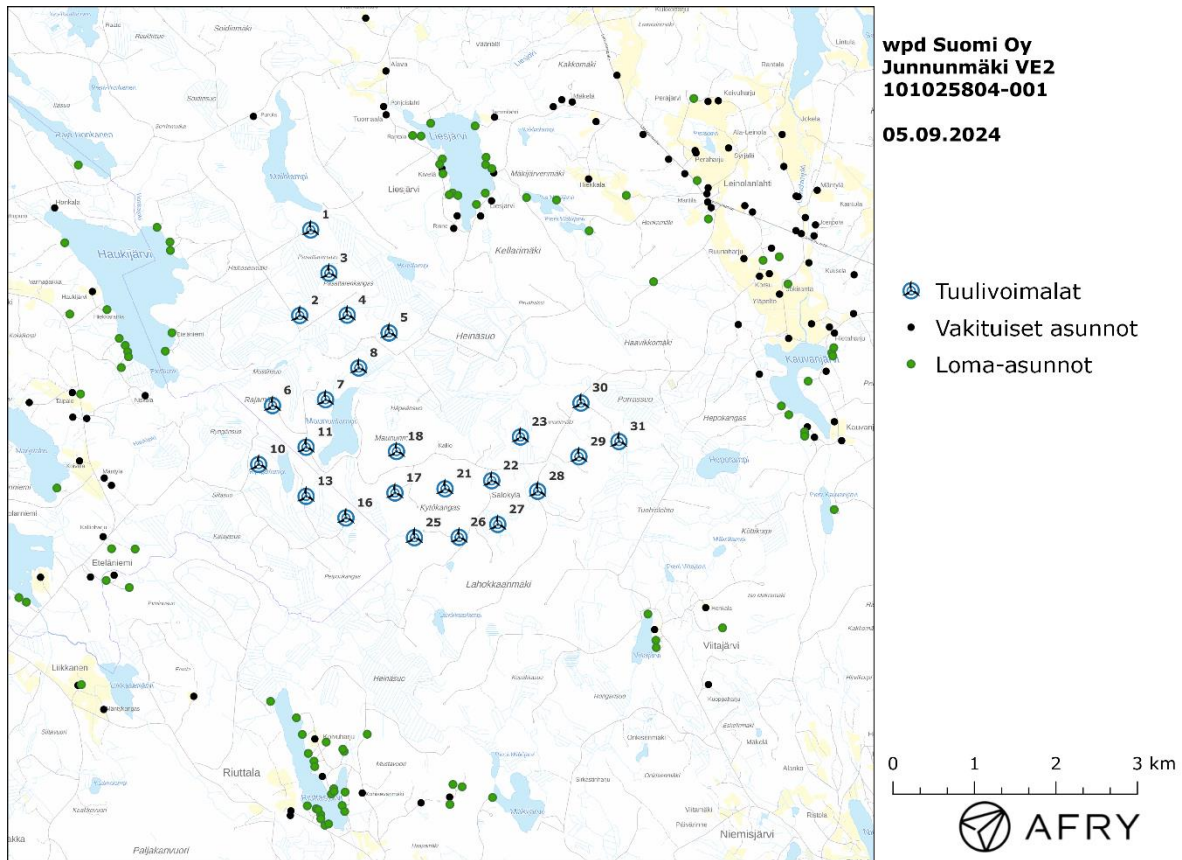
1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Kuopion kaupungin ja Tervon kunnan alueelle suunnitellun Junnunmäen tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty 33 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE1 ja 24 voimalan sijoitussuunnitelmalle VE2. Voimaloiden sijainnit on esitetty kuvissa (Kuva 1 ja Kuva 2) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1 ja Taulukko 2).

Mallinnuksissa voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lapaprofiili on määritetty voimalatyypin N175 valmistajan ilmoittaman lapaprofiilin avulla, jonka pituus on kasvatettu 100 metriin. Profiilia on samalla levennetty siten, että lavan levein kohta on 4,55 m (N175:n lapaprofiilin levein kohta on 4,3 m).



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Junnunmäen hankealueella sijoitussuunnitelmalla VE1.



Kuva 2: Tuulivoimaloiden sijainnit Junnunmäen hankealueella sijoitussuunnitelmalla VE2.

Taulukko 1: Tuulivoimaloiden (33 kpl) VE1 sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla.

Tuulivoimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
1	506228	6991024	141
2	506093	6989975	145
3	506452	6990494	149
4	506676	6989980	149
5	507189	6989762	147
6	505759	6988872	150
7	506410	6988944	146
8	506818	6989332	148
9	507508	6989297	143
10	505590	6988149	147
11	506171	6988361	151
12	505307	6987642	144
13	506171	6987759	148
14	507115	6988928	148
15	505803	6987313	142
16	506660	6987495	145
17	507262	6987801	172
18	507281	6988309	170
19	506144	6986908	136
20	506763	6986835	145
21	507877	6987851	191
22	508449	6987951	160
23	508802	6988487	147
24	507428	6986670	157
25	507501	6987253	158
26	508050	6987256	184
27	508524	6987415	172
28	509014	6987821	158
29	509520	6988245	167
30	509545	6988903	141

31	510011	6988431	139
32	510062	6989288	144
34	510077	6989967	166

Taulukko 2: Tuulivoimaloiden (24 kpl) VE2 sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla.

Tuulivoimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
1	506228	6991024	141
2	506093	6989975	145
3	506452	6990494	149
4	506676	6989980	149
5	507189	6989762	147
6	505759	6988872	150
7	506410	6988944	146
8	506818	6989332	148
10	505590	6988149	147
11	506171	6988361	151
13	506171	6987759	148
16	506660	6987495	145
17	507262	6987801	172
18	507281	6988309	170
21	507877	6987851	191
22	508449	6987951	160
23	508802	6988487	147
25	507501	6987253	158
26	508050	6987256	184
27	508524	6987415	172
28	509014	6987821	158
29	509520	6988245	167
30	509545	6988903	141
31	510011	6988431	139

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 todennäköinen välkeaika.

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 26 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.

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 suunnittelu-ohjeistuksessa 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 ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lapaprofiili on arvioitu voimalatyypin Nordex N175 valmistajan ilmoittamalla lavan profiilitiedolla, joka on skaalattu lavan pituuden ja leveyden suhteen vastaamaan 200 metrin roottorin halkaisijaa. 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 väketuntimäärää 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 3).

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

Taulukko 3: 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	0,151	0,197	0,169	0,139	0,142	0,137

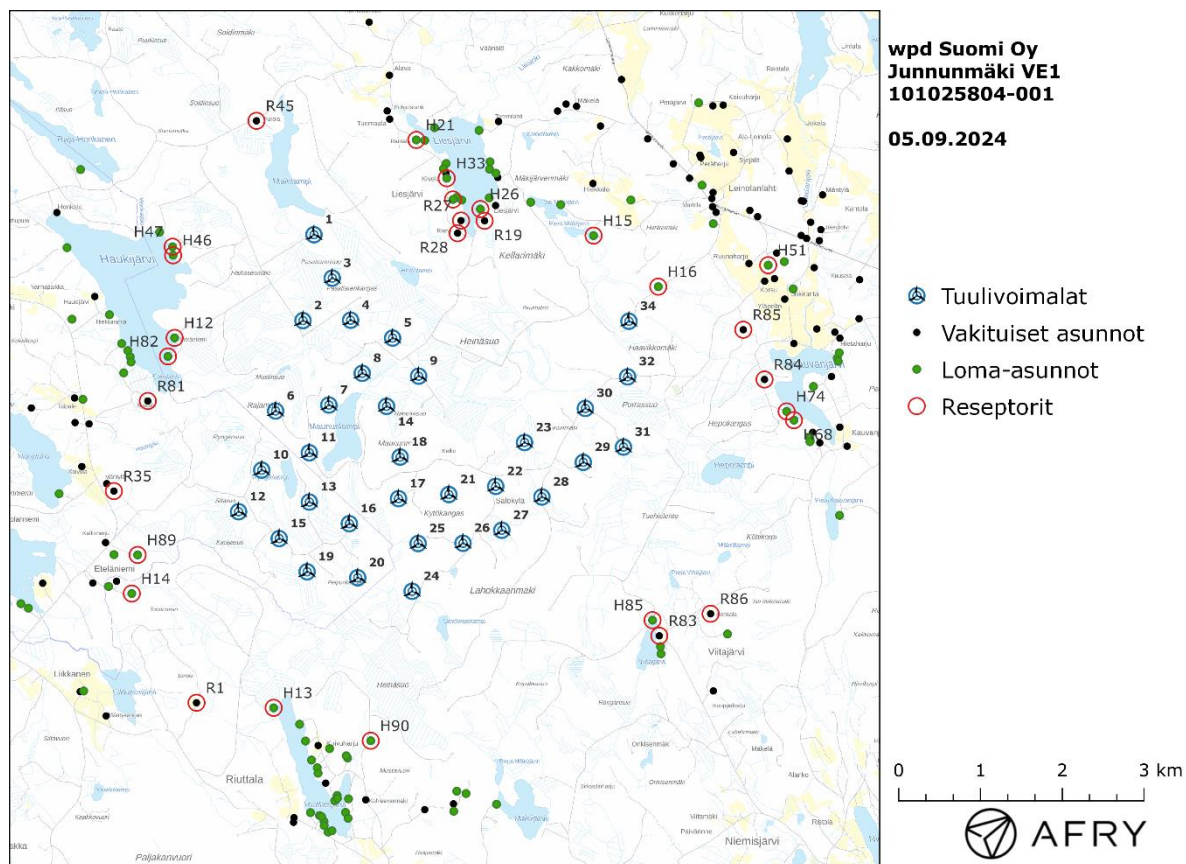
Taulukko 4: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Siilinjärven sääasemalla.

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	0,229
Lokakuu	0,186
Marraskuu	0,108
Joulukuu	0,082

Taulukossa (Taulukko 5) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 29 vertailurakennusta, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 3). Rakennukset sijaitsevan noin 0,6-2,5 km etäisyydellä voimaloista.

Taulukko 5: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
H12	504526	6989762	134	lomarakennus
H13	505736	6985245	135	lomarakennus
H14	504003	6986640	126	lomarakennus
H15	509646	6991011	128	lomarakennus
H16	510437	6990387	134	lomarakennus
H21	507480	6992179	112	lomarakennus
H26	508263	6991335	111	lomarakennus
H30	507929	6991452	116	lomarakennus
H33	507852	6991711	112	lomarakennus
H46	504507	6990771	136	lomarakennus
H47	504502	6990875	138	lomarakennus
H51	511781	6990650	115	lomarakennus
H68	512096	6988757	101	lomarakennus
H74	512006	6988865	102	lomarakennus
H82	504445	6989536	135	lomarakennus
H85	510367	6986315	153	lomarakennus
H89	504074	6987112	123	lomarakennus
H90	506923	6984843	146	lomarakennus
R1	504794	6985307	151	vakituinen asuinrakennus
R19	508315	6991192	117	vakituinen asuinrakennus
R27	508027	6991194	122	vakituinen asuinrakennus
R28	507984	6991040	122	vakituinen asuinrakennus
R35	503784	6987891	119	vakituinen asuinrakennus
R45	505527	6992413	137	vakituinen asuinrakennus
R81	504198	6988992	136	vakituinen asuinrakennus
R83	510450	6986124	155	vakituinen asuinrakennus
R84	511736	6989254	102	vakituinen asuinrakennus
R85	511477	6989862	101	vakituinen asuinrakennus
R86	511077	6986393	167	vakituinen asuinrakennus



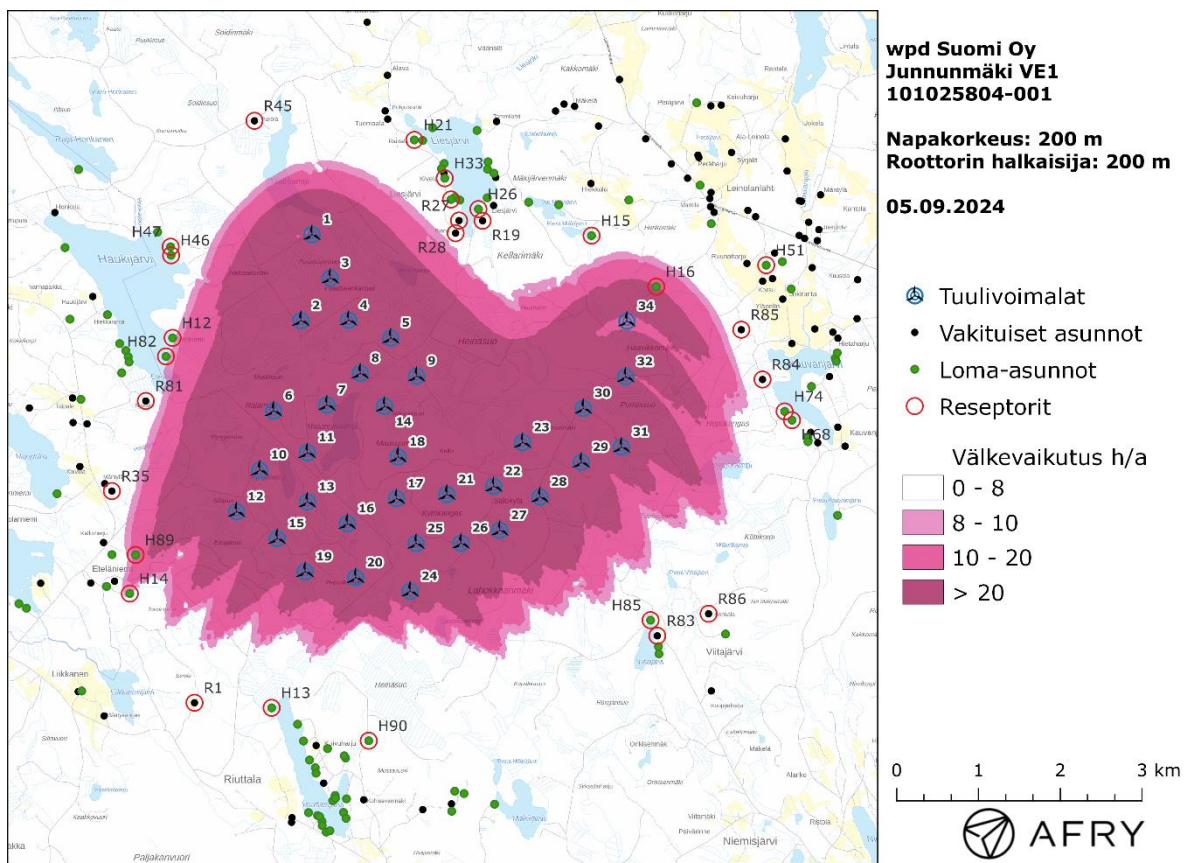
Kuva 3: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueen ympärillä.

3.2 Todennäköinen välkevaikutus

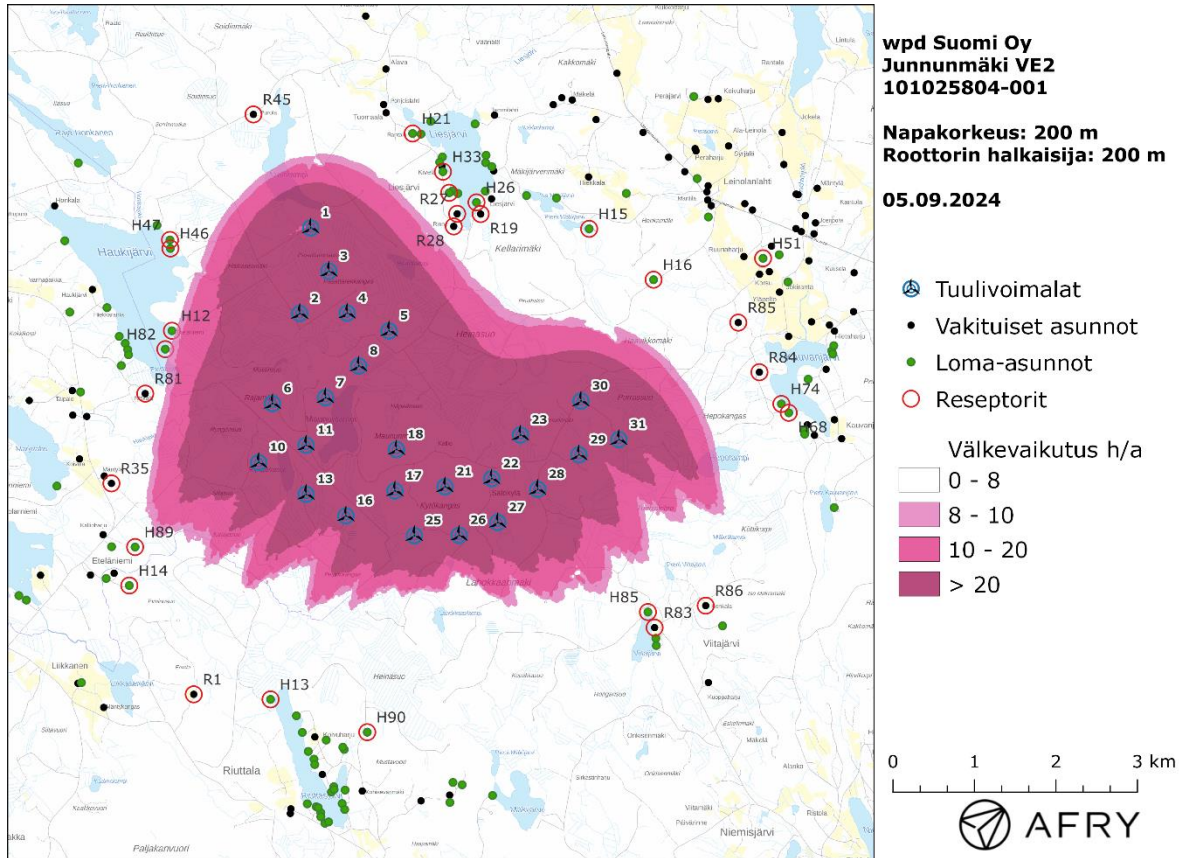
Mallinnetut arviot todennäköisten väketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvina (Kuva 4 ja Kuva 5). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta tuulivoimaloiden näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen Kuopion kaupungilta ja Tervon kunnalta saatuja rakennusrekisterin tietoja (haettu loka-marraskuussa 2023).

Mallinnusten perusteella vuotuinen todennäköinen välkevaikutus ylittää 8 tunnin ohjearvon kolmen lomarakennuksen kohdalla voimaloiden sijoitusvaihtoehdolla VE1. Sijoitusvaihtoehdolla VE2 vuotuinen todennäköinen välkevaikutus jää alle 8 tunnin ohjearvon kaikilla asuin- ja lomarakennuksilla. Päiväkohtainen todennäköinen välkeaika alittaa 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen asuntojen kohdalla molemmilla sijoitusvaihtoehdoilla. Vuotuiset todennäköiset välkevaikutusajat ja suurimmat päiväkohtaiset maksimivälkkeet reseptorien kohdalla on lueteltu taulukoissa (Taulukko 6 ja Taulukko 7).

Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptorin H16 kohdalla sijoitusvaihtoehdolla VE1 on esitetty taulukossa (Taulukko 8) ja reseptorin H12 kohdalla sijoitusvaihtoehdolla VE2 on esitetty taulukossa (Taulukko 9). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 4: Tuulivoimaloiden VE1 aiheuttama todennäköisen välkkeen määrä ilman puuston vaikutusta.



Kuva 5: Tuulivoimaloiden VE2 aiheuttama todennäköisen välkkeen määrä ilman puuston vaikutusta.

Taulukko 6: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina [h:min] reseptoreiden kohdilla sijoitusvaihtoehdolla VE1.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välke aika	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälke aika
H12	7:24	0:06
H13	1:55	0:04
H14	8:02	0:11
H15	4:01	0:06
H16	20:28	0:19
H21	1:45	0:03
H26	2:20	0:03
H30	3:17	0:04
H33	2:34	0:04
H46	3:00	0:05
H47	2:42	0:05
H51	1:02	0:03
H68	1:26	0:03
H74	2:18	0:04
H82	7:16	0:06
H85	0:53	0:03
H89	11:40	0:12
H90	0:00	0:00
R1	0:33	0:02
R19	2:39	0:04
R27	4:41	0:05
R28	6:09	0:05
R35	4:10	0:07
R45	1:20	0:04
R81	5:08	0:08
R83	0:41	0:03
R84	4:03	0:05
R85	4:58	0:07
R86	0:00	0:00

Taulukko 7: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina [h:min] reseptoreiden kohdilla sijoitusvaihtoehdolla VE2.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välke aika	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälke aika
H12	7:08	0:06
H13	0:00	0:00
H14	1:56	0:04
H15	0:26	0:01
H16	1:18	0:03

H21	1:45	0:03
H26	2:02	0:03
H30	3:11	0:04
H33	2:21	0:04
H46	3:00	0:05
H47	2:42	0:05
H51	0:00	0:00
H68	0:12	0:02
H74	0:42	0:03
H82	6:57	0:06
H85	0:53	0:03
H89	4:20	0:05
H90	0:00	0:00
R1	0:00	0:00
R19	2:17	0:04
R27	3:52	0:05
R28	5:05	0:05
R35	2:21	0:07
R45	1:20	0:04
R81	4:09	0:08
R83	0:41	0:03
R84	1:04	0:05
R85	0:45	0:02
R86	0:00	0:00

Taulukko 8: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin H16 kohdalla sijoitusvaihtoehdolla VE1.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:27	0:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:36
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:35	0:29	0:00	0:00	0:00	0:00	2:05
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:50	0:00	0:00	0:00	0:00	5:50
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:15	0:00	0:00	0:00	0:00	3:15
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	0:26	0:00	0:00	0:00	0:00	0:26
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:03	5:58	0:00	0:00	0:00	0:00	6:01
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:33	0:47	0:00	0:00	0:00	0:00	1:20
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:44	0:11	0:00	0:00	0:00	0:00	0:55
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:23	17:05	0:00	0:00	0:00	0:00	20:28

Taulukko 9: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin H12 kohdalla sijoitusvaihtoehdolla VE2.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:01
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:26	0:19	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:45
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:18	0:31	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:48
Huhtikuu	0:00	0:00	0:53	0:38	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:31
Toukokuu	0:00	0:02	0:50	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:52
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	0:43	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:43
Elokuu	0:00	0:00	0:49	0:30	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:19
Syyskuu	0:00	0:00	0:06	0:13	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:19
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:08	0:34	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:42
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:08
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	0:02	3:21	1:47	1:38	0:20	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	7:08

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Kuopion kaupungin ja Tervon kunnan alueelle suunnitellun Junnunmäen tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arviointi on tehty 33 voimalan sijoitus suunnitelmalle VE1 ja 24 voimalan sijoitus suunnitelmalle VE2, roottorin halkaisijalla 200 m ja napakorkeudella 200 m.

Välkevarjostusmallinnuksen mukaan vuotuinen todennäköinen välkevaikutus ylittää 8 tunnin ohje-arvon sijoitus suunnitelmalla VE1 kolmen lomarakennusten kohdalla. Sijoitus suunnitelmalla VE2 vuotuinen todennäköinen välkevaikutus jää alle 8 tunnin ohje-arvon kaikkien asuin- ja lomarakennusten kohdalla. Todennäköinen päiväkohtainen välkeaika alittaa 30 minuutin ohje-arvon kaikkien asuin- ja lomarakennusten kohdilla molemmilla sijoitus suunnitelmilla.

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.

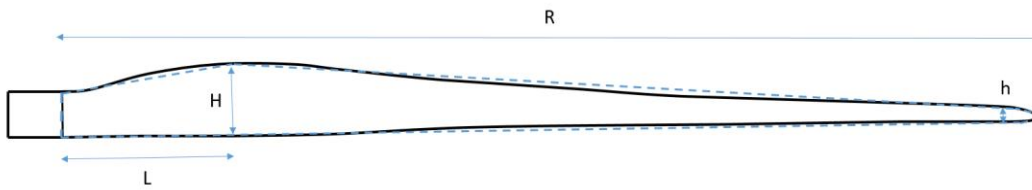
Tuulivoimalan lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle tuulivoimalasta, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu tuulivoimalan lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa 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 6) 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 6: Tuulivoimalan lavan malliprofiili.

Laskennassa huomioitava roottorin säde vaihtelee välillä $[0, R]$ riippuen tarkastelupisteen etäisyydestä turbiineihin sekä lavan leveydestä ja sitä vastaavasta Auringon peittoasteesta. Tällä tavoin väkelaskennassa 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. Jokinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta ja merestä 1981-2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.
- [4] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päiväys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016.