



Ilmatar Kajaani Oy

Löytösuon tuulivoimapuiston välkeselvitys

101021368-033, 19.02.2025

Tekijä
AFRY Finland Oy
Veera Hatulainen

E-mail
veera.hatulainen@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
002

Asiakas
Ilmatar Kajaani Oy
Inka Hirvonen

Päivämäärä
19/02/2025

Projektinumero
101021368-033

Raportin tila
VALMIS

Löytösuo tuulivoimapuiston välkeselvitys

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatiija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	05.09.2024/ Veera Hatulainen Technical Consultant	05.09.2024/ Mika Laitinen, Senior Consultant	Alkuperäinen
002	19.02.2025/ Mika Laitinen, Senior Consultant	19.02.2025/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Karttojen asunnot on ladattu uudestaan Maanmittauslaitoksen maastotietokannasta

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

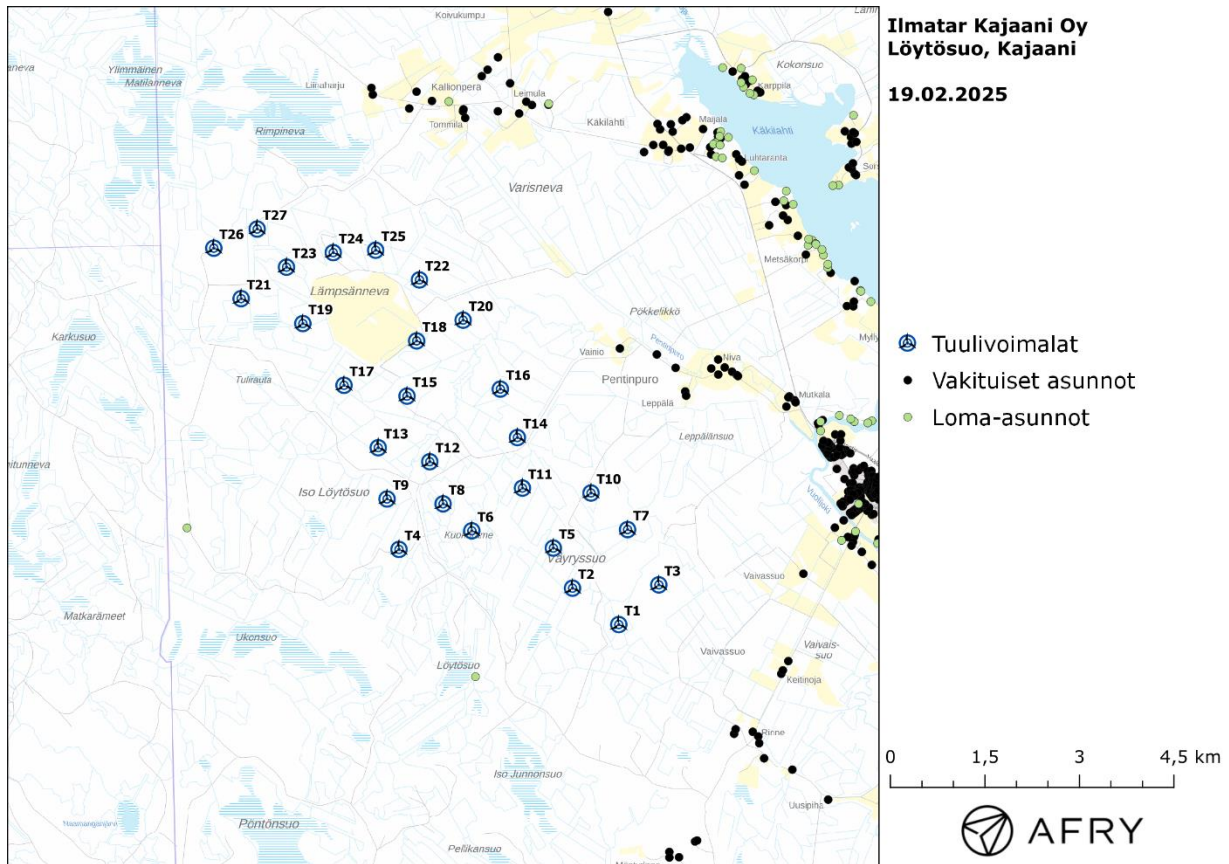
1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	6
2.1	Välkevaikutus	6
2.2	Välkkeen rajoittaminen	6
2.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	6
2.4	Ohjeavot	7
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	8
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	8
3.2	Välkevaikutus	11
3.3	Löytösuo ja läheisten tuulivoimapuistojen yhteisvaikutus	14
4	Yhteenveto	17
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	18
6	Viitteet	20

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Kajaanin kaupungin alueelle suunnitellun Löytösuo tuulivoimapaiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Arviointi on tehty 27 voimalansijoitus suunnitelmalle. Voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1).

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

Selvityksessä arvioidaan myös Löytösuo ja läheisen toiminnassa olevien Piiparinmäen ja Metsälamminkankaan tuulivoimapaistojen sekä suunnitteilla olevien Kokkosuo, Luolakankaan ja Pyöriännevan tuulivoimapaistojen välkkeen yhteisvaikutuksia.



Kuva 1: Löytösuo tuulivoimaloiden sijainnit.

Taulukko 1: Löytösuo voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus voimalapaikalla.

Tuulivoimalat	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	496146	7115095	150
T2	495412	7115671	148
T3	496782	7115724	158
T4	492659	7116286	146
T5	495108	7116307	146
T6	493815	7116581	151
T7	496286	7116601	144
T8	493359	7117009	146
T9	492470	7117086	144
T10	495706	7117180	145
T11	494618	7117258	142
T12	493147	7117676	140
T13	492330	7117898	143
T14	494538	7118060	138
T15	492786	7118716	139
T16	494267	7118828	136
T17	491787	7118889	144
T18	492939	7119592	137
T19	491134	7119867	147
T20	493677	7119921	135
T21	490154	7120262	155
T22	492984	7120559	139
T23	490874	7120761	147
T24	491616	7120992	148
T25	492289	7121030	143
T26	489721	7121062	161
T27	490409	7121366	155

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 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 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 kellon-aikoina. Pysäytetty voimala ei aiheuta välkettä.

2.3 Arvioinnin epävarmuudet

Mallinnettu välkevaikutus edustaa todennäköistä tilannetta perustuen auringonpaisteen ja tuulisuuden tilastolliseen aineistoon. Yksittäisen vuoden sääolosuhteet saattavat poiketa merkittävästi keskimääräisistä olosuhteista, jolloin vuotuinen välkevaikutus voi poiketa mallinnetusta arvosta. Aurinkopaisteen aineisto on saatu Oulun sääasemalta, josta etäisyys hankealueeseen on noin 107 kilometriä.

Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta voimaloiden näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä tuulivoimaloille 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 [1]. Tässä selvityksessä välkearvoja 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.

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, tuulivoimalueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuulivoimaloiden 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, tuulivoimalan 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.

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 Löytösuo voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloille on käytetty tuulivoimalatyypin Vestas V162 6,2 MW lapaprofiilia skaalattuna roottorin halkaisijalle 200 m. Lapaprofiilia on skaalattu sekä pidemmäksi että leveämmäksi. Skaalatun lavan maksimileveys on 4,6 m. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat tuulivoimaloiden käyttöaste, puusto ja paikallinen säätäjä (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 tuulivoimaloiden 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 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 käyntinopeusväliille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 2).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Oulun lentoasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä (Taulukko 3). Sääsaman mittauksen perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 3). Suunta-kohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioon-ottavasta 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	0,182	0,163	0,167	0,156	0,129	0,139

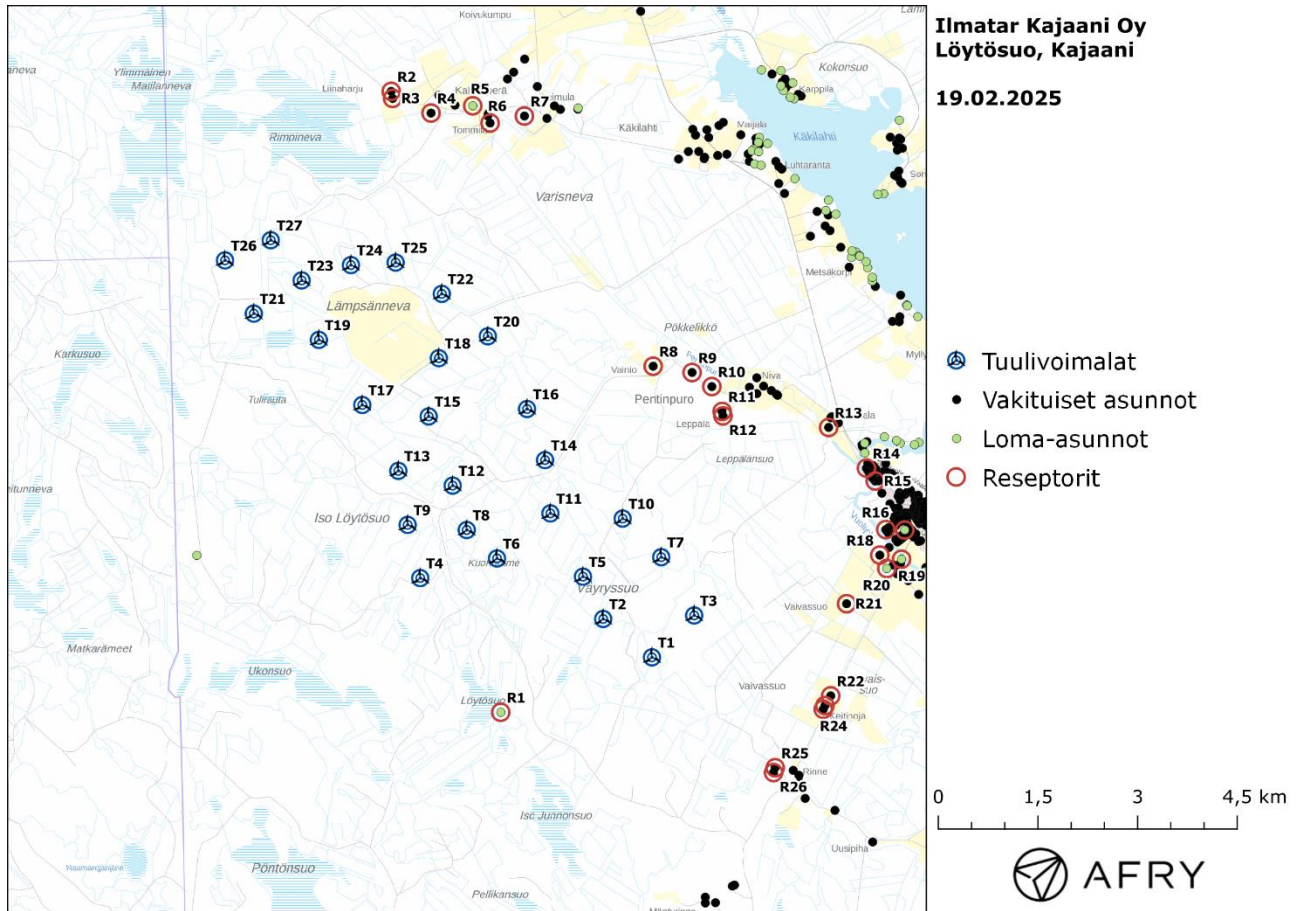
Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Oulun lentoasemalla.

Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,152
Helmikuu	0,289
Maaliskuu	0,377
Huhtikuu	0,455
Toukokuu	0,469
Kesäkuu	0,451
Heinäkuu	0,452
Elokuu	0,413
Syyskuu	0,340
Lokakuu	0,229
Marraskuu	0,151
Joulukuu	0,070

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 26 vertailurakennusta, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Rakennusten sijaintipisteitä kutsutaan reseptori-pisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Kartoissa näkyvät vakituiset ja vapaa-ajan asuinrakennukset on ladattu Maanmittauslaitoksen maastotietokannasta. Reseptorit sijaitsevat lähimmillään 2,0–3,4 km etäisyydellä voimaloista.

Taulukko 4: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	493872	7114266	156	loma-asunto
R2	492224	7123601	145	vakituinen asuinrakennus
R3	492244	7123495	145	vakituinen asuinrakennus
R4	492823	7123275	143	vakituinen asuinrakennus
R5	493451	7123384	141	loma-asunto
R6	493712	7123125	141	vakituinen asuinrakennus
R7	494228	7123230	139	vakituinen asuinrakennus
R8	496166	7119469	131	vakituinen asuinrakennus
R9	496752	7119374	131	vakituinen asuinrakennus
R10	497049	7119163	129	vakituinen asuinrakennus
R11	497204	7118789	129	vakituinen asuinrakennus
R12	497217	7118722	128	vakituinen asuinrakennus
R13	498807	7118548	128	vakituinen asuinrakennus
R14	499376	7117936	125	vakituinen asuinrakennus
R15	499508	7117742	124	vakituinen asuinrakennus
R16	499667	7117013	127	vakituinen asuinrakennus
R17	499953	7117006	132	loma-asunto
R18	499577	7116629	130	vakituinen asuinrakennus
R19	499904	7116567	125	loma-asunto
R20	499682	7116427	128	loma-asunto
R21	499077	7115898	130	vakituinen asuinrakennus
R22	498838	7114513	130	vakituinen asuinrakennus
R23	498751	7114366	130	vakituinen asuinrakennus
R24	498726	7114311	130	vakituinen asuinrakennus
R25	498002	7113432	143	vakituinen asuinrakennus
R26	497978	7113359	143	vakituinen asuinrakennus



Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapaiston hankealueella.

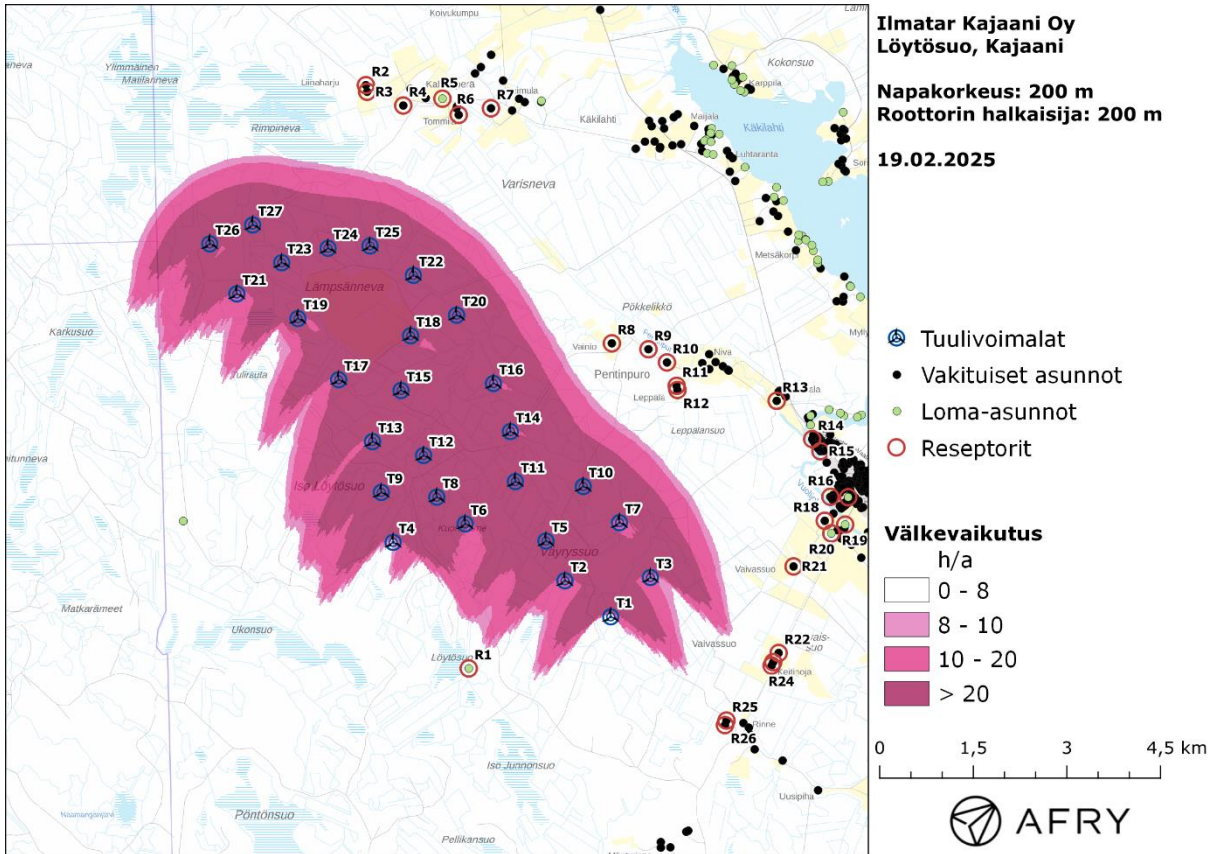
3.2 Välkevaikutus

Mallinnettu todennäköinen vuotuinen väkjetuntien määrä on esitetty karttakuvassa (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.

Taulukoissa (Taulukko 5) on lueteltu todennäköinen välkevaikutus ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla, sekä vuotuisena tuntimääränä että suurimpana päiväkohtaisena arvona. Mallinnusten perusteella todennäköinen vuotuinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja vakituisten asuinrakennusten kohdalla. Myös todennäköinen päiväkohtainen välke aika jää alle Ruotsin 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdalla.

Vuotuinen teoreettinen maksimivälke alittaa Saksan 30 tunnin raja-arvon alueen kaikkien asuntojen kohdilla. Myös teoreettisen maksimivälkkeen suurin päiväkohtainen arvo jää alle Saksan 30 minuutin raja-arvon kaikkien asuntojen kohdilla.

Suurin välkevaikutus kohdistuu reseptoriin R1. Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen tämän reseptorin kohdalla on esitetty taulukoissa (Taulukko 6). Taulukoissa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



Kuva 3: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus.

Taulukko 5: Välkeajat reseptoreittain. Taulukossa on esitetty vuotuinen välke aika 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	3:14	0:04	11:28	0:16
R2	0:00	0:00	0:00	0:00
R3	0:13	0:01	0:06	0:00
R4	0:20	0:01	3:30	0:12
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	1:25	0:04	9:11	0:15
R9	0:12	0:01	2:06	0:10
R10	0:16	0:02	1:57	0:10
R11	0:40	0:02	5:06	0:12
R12	0:44	0:02	5:32	0:13
R13	0:00	0:00	0:00	0:00
R14	0:00	0:00	0:00	0:00
R15	0:00	0:00	0:00	0:00
R16	0:00	0:00	0:00	0:00
R17	0:00	0:00	0:00	0:00
R18	0:00	0:00	0:00	0:00
R19	0:00	0:00	0:00	0:00
R20	0:00	0:00	0:00	0:00
R21	0:21	0:02	1:41	0:10
R22	0:33	0:03	2:13	0:10
R23	0:40	0:03	2:33	0:11
R24	0:42	0:03	2:39	0:10
R25	0:45	0:03	2:50	0:09
R26	0:00	0:00	0:00	0:00

Taulukko 6: Todennäköisen vuotuisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuuksina 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	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Huhtikuu	0:00	0:00	0:13	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:13
Toukokuu	0:00	0:31	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:31
Kesäkuu	0:00	1:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:07
Heinäkuu	0:00	1:12	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:12
Elokuu	0:00	0:00	0:12	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:12
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	2:50	0:25	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	3:14

3.3 Löytösuo ja läheisten tuulivoimapuistojen yhteisvaikutus

Tässä luvussa arvioidaan Löytösuo voimaloiden ja läheisten toiminnassa olevien Piiparinmäen ja Metsälamminkankaan tuulivoimapuistojen, sekä suunnitteilla olevien Kokkosuo, Luolakankaan ja Pyöriännevan tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutuksia.

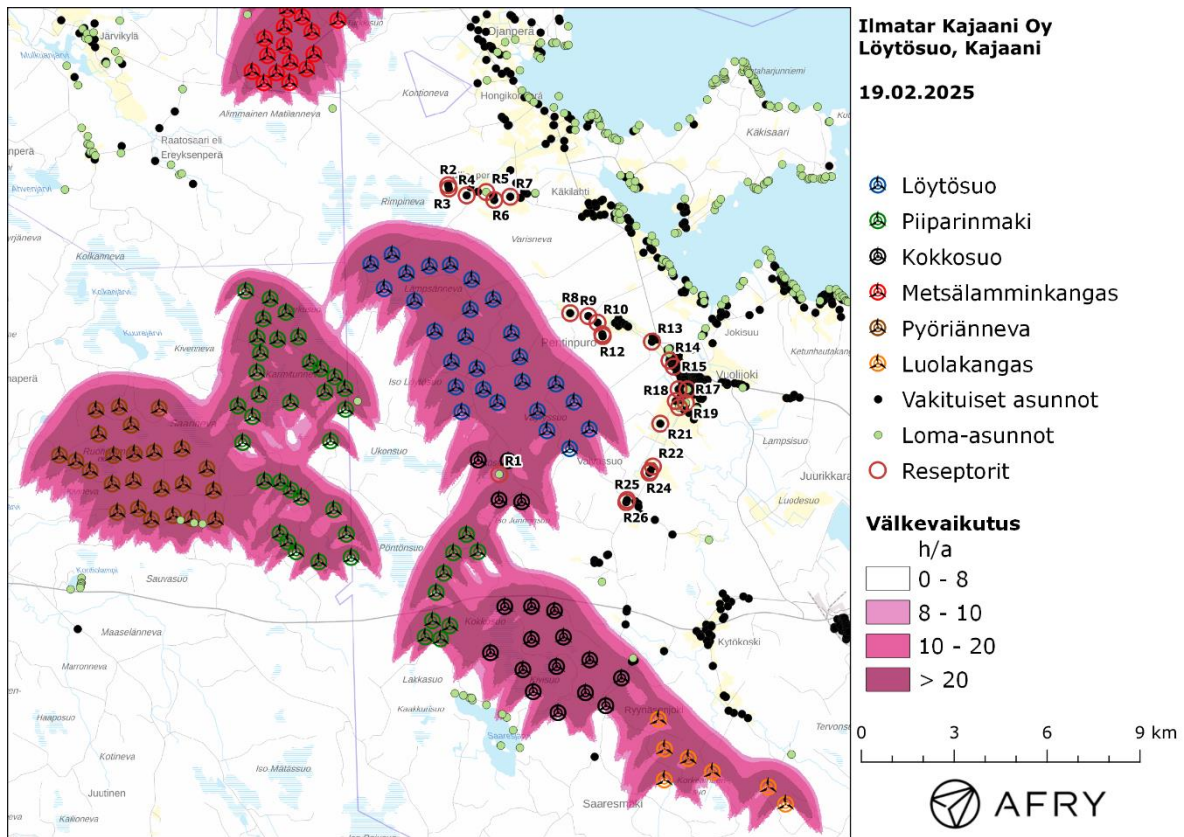
Piiparinmäen tuulivoimapuistossa on 41 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 3 km etäisyydellä Löytösuo voimaloista. Kokkosuo tuulivoimapuistoon on suunnitteilla 18 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 1,5 km etäisyydellä Löytösuo voimaloista. Luolakankaan tuulivoimapuistoon on suunnitteilla 7 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 9 km etäisyydellä Löytösuo voimaloista. Metsälamminkankaan tuulivoimapuistoon on suunnitteilla 24 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 6 km etäisyydellä Löytösuo voimaloista. Pyöriännevan tuulivoimapuistoon on suunnitteilla 24 voimalaa, joista lähimmät ovat noin 8,5 km etäisyydellä Löytösuo voimaloista.

Mallinnuksissa voimaloille on käytetty taulukossa (Taulukko 7) lueteltuja napakorkeuksia ja voimalatyyppejä.

Taulukko 7: Läheisten tuulipuistojen mallinnuksessa käytetyt napakorkeudet ja voimalatyypit. Piiparinmäen voimaloissa on kahta eri voimalatyyppiä: V150-5.6MW (28 voimalaa) ja V150-4.2MW (13 voimalaa). Molemmilla voimalamalleilla on samanlainen lapaprofiili. Pyöriännevan voimaloille on käytetty tulevaisuuden 10 MW:n tehoista voimalaa, jonka roottorin halkaisija on 210 m. Tällaista voimalaa ei ole vielä saatavilla ja FCG:n melu- ja välkeselvityksessä tälle voimalalla on käytetty nimeä Generic 210-10.0 MW

Tuulivoimapuisto	Napakorkeus [m]	Voimalatyyppi/roottorin halkaisija
Piiparinmäki	155	Vestas V150-5.6MW ja Vestas V150-4.2MW, 150 m roottorin halkaisija
Metsälamminkangas	141 ja 151 m	GE158 5.5MW, 158 m roottorin halkaisija
Kokkosuo	200	Vestas V162, skaalattu 200 m roottorin halkaisija
Pyöriänneva	195	Generic210-10MW, 210 m roottorin halkaisija
Luolakangas	200	Vestas V162, skaalattu 200 m roottorin halkaisija

Löytösuo, Piiparinmäen, Kokkosuo, Luolakangas, Metsälamminkankaan ja Pyöriännevan todennäköisen välkkeen yhteisvaikutusten mallinnus on esitetty karttakuvana (Kuva 4). Todennäköiset välkeajat ja teoreettisen maksivälke reseptoreiden kohdilla on listattu taulukossa (Taulukko 8). Mallinnusten perusteella Löytösuo ja läheisten tuulipuistojen voimaloista aiheutuu vain vähäisiä välkkeen yhteisvaikutuksia asutukselle. Reseptorin R1 kohdalla todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ylittää Ruotsin ja Tanskan ohjearvot jo pelkästään Kokkosuo voimaloiden vaikutuksesta. Löytösuo osuus reseptoriin R1 kohdistuvasta todennäköisestä vuotuisesta välkevaikutuksesta on vain 3 tuntia 14 minuuttia, eivätkä ohjearvojen ylitykset johdu Löytösuo voimaloista. Muiden reseptoreiden kohdilla välkkeen yhteisvaikutuksia ei ole ollenkaan. Löytösuo ja lähelle rakennettujen tai suunniteltujen tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutukset ovat siis vähäisiä, eikä yhteisvaikutuksista aiheudu välkevaikutuksen ohjearvojen ylityksiä.



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinuksissa huomioidaan Löytösuo ja läheiset tuulivoimapuistot.

Taulukko 8: Välkeajat reseptoreittain, kun mallinuksissa huomioidaan läheisten tuulivoimapuistojen voimat. Taulukossa on esitetty vuotuinen välke aika 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	21:06	0:18	72:54	1:22
R2	0:00	0:00	0:00	0:00
R3	0:13	0:01	0:06	0:00
R4	0:20	0:01	3:30	0:12
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	1:25	0:04	9:11	0:15
R9	0:12	0:01	2:06	0:10
R10	0:16	0:02	1:57	0:10
R11	0:40	0:02	5:06	0:12
R12	0:44	0:02	5:32	0:13
R13	0:00	0:00	0:00	0:00
R14	0:00	0:00	0:00	0:00
R15	0:00	0:00	0:00	0:00
R16	0:00	0:00	0:00	0:00
R17	0:00	0:00	0:00	0:00
R18	0:00	0:00	0:00	0:00
R19	0:00	0:00	0:00	0:00
R20	0:00	0:00	0:00	0:00
R21	0:21	0:02	1:41	0:10
R22	0:33	0:03	2:13	0:10
R23	0:40	0:03	2:33	0:11
R24	0:42	0:03	2:39	0:10
R25	0:45	0:03	2:50	0:09
R26	0:00	0:00	0:00	0:00

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Kajaanin kaupungin alueelle suunnitellun Löytösuo tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arvio on tehty 27 voimalan sijoitussuunnitelmalle. Selvityksessä on arvioitu myös Löytösuo ja läheisten toiminnassa olevien Piiparinmäen ja Metsälamminkankaan tuulivoimapuistojen, sekä suunnitteilla olevien Kokkosuo, Luolakankaan ja Pyöriännevan välkkeen yhteisvaikutuksia.

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja, ja ympäristöministeriö suosittelee käyttämään muiden maiden ohjearvoja. Mallinnusten 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 kaikkien asuntojen kohdilla. Myös teoreettisen maksimivälkkeen päiväkohtainen arvo alittaa Saksan 30 minuutin raja-arvon kaikkien asuntojen kohdilla.

Löytösuo ja lähelle rakennettujen tai suunniteltujen tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutukset ovat vähäisiä, eikä yhteisvaikutuksista aiheudu välkevaikutuksen ohjearvojen ylityksiä.

5 Välkevaikutuksen laskentamenetelmä

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

Tiettyyn pisteeseen kohdistuvaa vuotuista välkevaikutusta laskettaessa tarkastellaan sitä osaa taivaanpallosta, joka näkyy pisteeseen tuulivoimaloiden roottorikehien läpi. Näkyvyyden arvioinnissa otetaan huomioon paikallinen maaston korkeusaineisto. Mikäli kääntöpiirien väliin asettuva nauha ei näy roottorikehien läpi, tarkastelupisteeseen ei kohdistu välkevaikutusta. Muussa tapauksessa yksittäisen tuulivoimalan aiheuttamien välketuntien määrä saadaan integroimalla tiheysfunktioita tuulivoimalan roottorikehien läpinäkyvällä taivaanpallon osuudella. Tuulivoimaloiden yhteisvaikutus saadaan summaamalla voimalakohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämässä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen voimaloiden eri orientaatioille, joita skaalataan suuntaakohtaisilla 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.

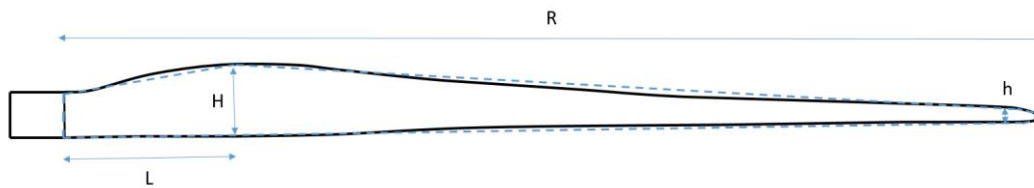
Tuulivoimalan lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle voimalasta, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu tuulivoimalan lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa 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 voimalan 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 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 tuulivoimalan keskimääräinen leveys on määritetty parametrien H ja h keskiarvona.



Kuva 5: Tuulivoimalan lavan yksinkertaistettu profiili.

Tämän raportin väkelaskennassa 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 väkelaskennassa huomioidaan tuulivoimalan muuttuva lapaprofiili, ja saadaan realistisempia tuloksia kuin olettamalla tietty keskimääräinen lavan leveys ja sitä vastaava kiinteä maksimietäisyys.

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.