



wpd Finland Oy

Hietavaaran tuulivoimahankkeen välkeselvitys

101023884-001, 04.12.2023

Tekijä
AFRY Finland Oy
Juulianna Lähteinen

E-mail
juulianna.lahteinen@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
001

Asiakas
wpd Finland Oy
Samuel Peltoniemi

Päivämäärä
04/12/2023

Projektinumero
101023884-001

Raportin tila
VALMIS

Hietavaaran tuulivoimahankkeen välkeselvitys

Tiivistelmä

Raportti sisältää arvion Puolangan kunnan alueelle suunnitellun Hietavaaran tuulivoimapuiston aiheuttamista välkevaikutuksista. Arviointi tehdään laskennallisten mallien avulla kymmenen voimalan toteutusvaihtoehdolle Kaavaluonnos 2. Välkevaikutusten arvioinnissa huomioidaan lisäksi naapuripuisto Varsavaara. Tulosten arvioinnissa käytetään ympäristöhallinnon esittämiä ohjearvoja tuulivoimarakentamisen suunnitteluun.

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	04.12.2023/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	04.12.2023/ 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	6
2.1	Välkevaikutus.....	6
2.2	Välkkeen rajoittaminen.....	6
2.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	6
2.4	Ohjearvot	7
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	8
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	8
3.2	Todennäköinen välkevaikutus.....	12
3.3	Hietavaaran ja Varsavaaran tuulivoimapuistojen yhteisvaikutus.....	14
4	Yhteenveto	19
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	20
6	Viitteet.....	22

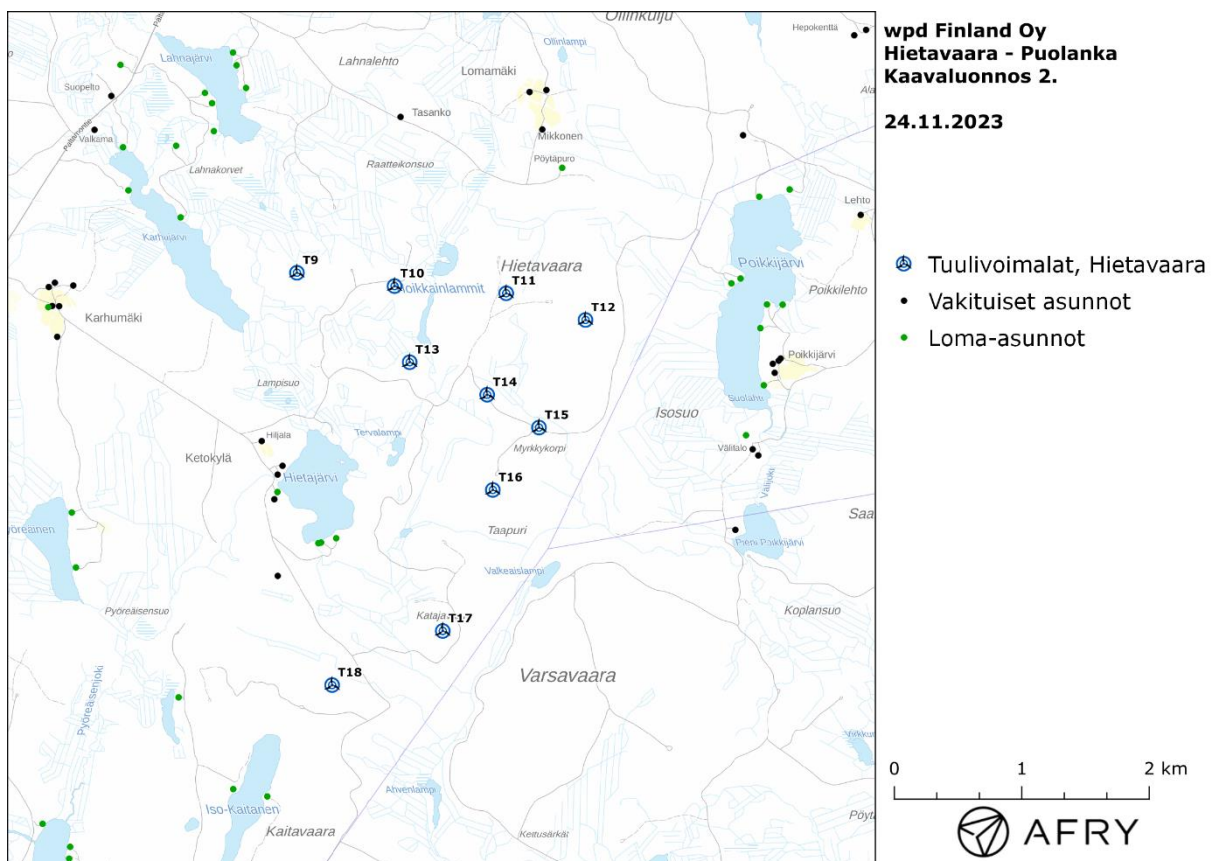
1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Puolangan kunnan alueelle suunnitellun Hietavaaran tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Vaikutusten arviointi on tehty kymmenen voimalan toteutusvaihtoehdolle Kaavaluonnos 2. Kyseisen toteutusvaihtoehdon voimalapaikat noudattavat YVA-selostuksen toteutusvaihtoehdoista VE1:n voimalapaikkoja. Voimaloiden sijainnit on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1).

Välkemallinnuksissa huomioidaan lisäksi Hietavaaran voimaloiden yhteisvaikutukset Paltamon puolelle suunnitellun Varsavaaran tuulivoimapuiston kanssa. Yhteisvaikutuksia käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.3.

Mallinnuksissa Hietavaaran ja Varsavaaran voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 200 m. Voimaloiden lapaprofiili on määritetty voimalatyypin N163 valmistajan ilmoittaman lapaprofiilin avulla, jonka pituus on kasvatettu 100 metriin. Profiilia on samalla levennetty siten, että lavan levein kohta on 4,5 m (N163:n lapaprofiilin levein kohta on 4,15 m).

Karttakuvassa 1 on esitetty voimaloiden lähellä sijaitsevien asuntojen sijainnit Maanmittauslaitoksen maastotietokannan mukaisesti. Alueen rakennukset käsitellään tarkemmin luvussa 3.1.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Hietavaaran hankealueella kymmenen voimalan toteutusvaihtoehdolla Kaavaluonnos 2.

Taulukko 1: Hietavaaran tuulivoimaloiden (10 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T9	539728	7163798	227
T10	540493	7163693	239
T11	541369	7163637	295
T12	541991	7163427	252
T13	540612	7163096	242
T14	541219	7162841	270
T15	541626	7162584	248
T16	541264	7162095	254
T17	540871	7160988	267
T18	540004	7160564	248

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 perustuu todennäköisen tilanteen mallinnukseen.

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 Oulun sääasemalta, josta etäisyys hankealueeseen on noin 120 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 suunnitteluohjearvoja välkkeen määrälle suhteessa asutukseen tai muuhun altistuvaan kohteeseen [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.

3 Tuulivoimakohteen väkemannus

3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola -mallinnusohjelmistolla, joka huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoima-alueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuuliturbiinien dimensiot. Laskennan tuloksena saadaan tieto siitä, kuinka monta tuntia vuodessa alueen eri kohteet ovat välkevaikutuksen alaisena. Tulosta havainnollistetaan tasa-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 2 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 väkelaskennan maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä turbiinin lapa ei ole vakioleveytinen: 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 väkelaskennassa ei ole käytetty tavanomaista maksimietäisyyttä, vaan on huomioitu turbiinin muuttuva lapaprofiili.

Väkelaskennassa voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lapaprofiili on arvioitu voimalatyypin N163 valmistajan ilmoittamalla lavan profiilitiedolla, joka on skaalattu 100 m pitkän lavan mitalle. Samalla lavan profiilia on levennetty siten, että profiilin levein kohta levenee 4,5 metriin. 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 väkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua väketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [1] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammassa tuulissa turbiinit ovat paikallaan, jolloin roottorin pyörimisestä aiheutuvaa valon välekymistä ei esiinny. Suomen tuuliatlaksen tuulisuusestimaatti on otettu tuulivoima-alueen keskeltä korkeudelta 200 m, ja sen perusteella lasketut suuntasektorikohtaiset osuudet turbiinin käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 2).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Oulun 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: Suuntasektoriokohtaiset 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	0,156	0,169	0,160	0,171	0,143	0,135

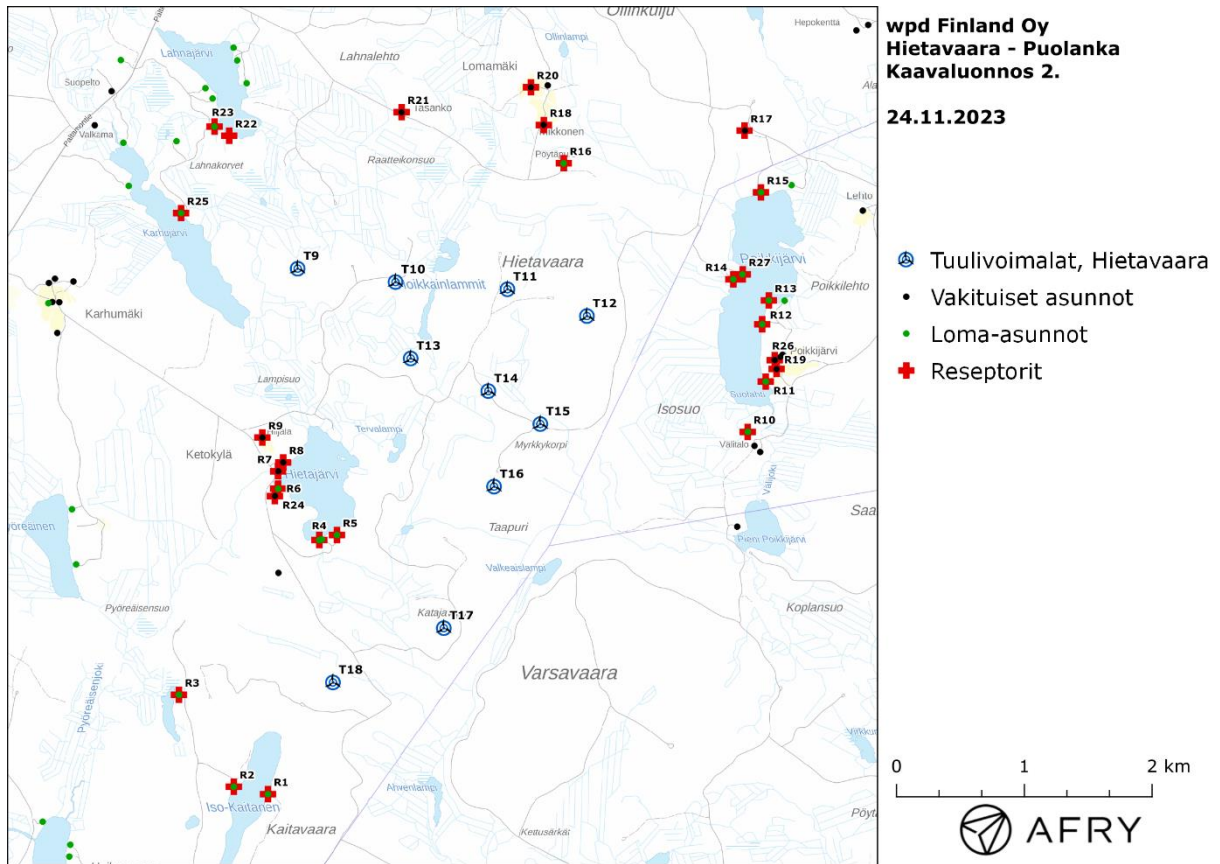
Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Oulun sääasemalla.

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 27 vertailurakennusta, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Vertailurakennusten sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Rakennukset sijaitsevan noin 1-2 km etäisyydellä voimaloista.

Taulukko 4: Reseptoreiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]
R1	539496	7159690	189
R2	539228	7159747	190
R3	538800	7160467	189
R4	539897	7161676	220
R5	540036	7161714	229
R6	539575	7162078	222
R7	539575	7162213	221
R8	539615	7162283	222
R9	539452	7162477	240
R10	543249	7162521	188
R11	543390	7162914	185
R12	543363	7163362	186
R13	543415	7163548	188
R14	543136	7163714	188
R15	543354	7164392	187
R16	541811	7164621	257
R17	543225	7164875	212
R18	541654	7164919	262
R19	543475	7163013	196
R20	541553	7165214	269
R21	540541	7165020	246
R22	539193	7164835	218
R23	539078	7164907	214
R24	539550	7162019	227
R25	538816	7164230	214
R26	543461	7163082	199
R27	543210	7163752	186



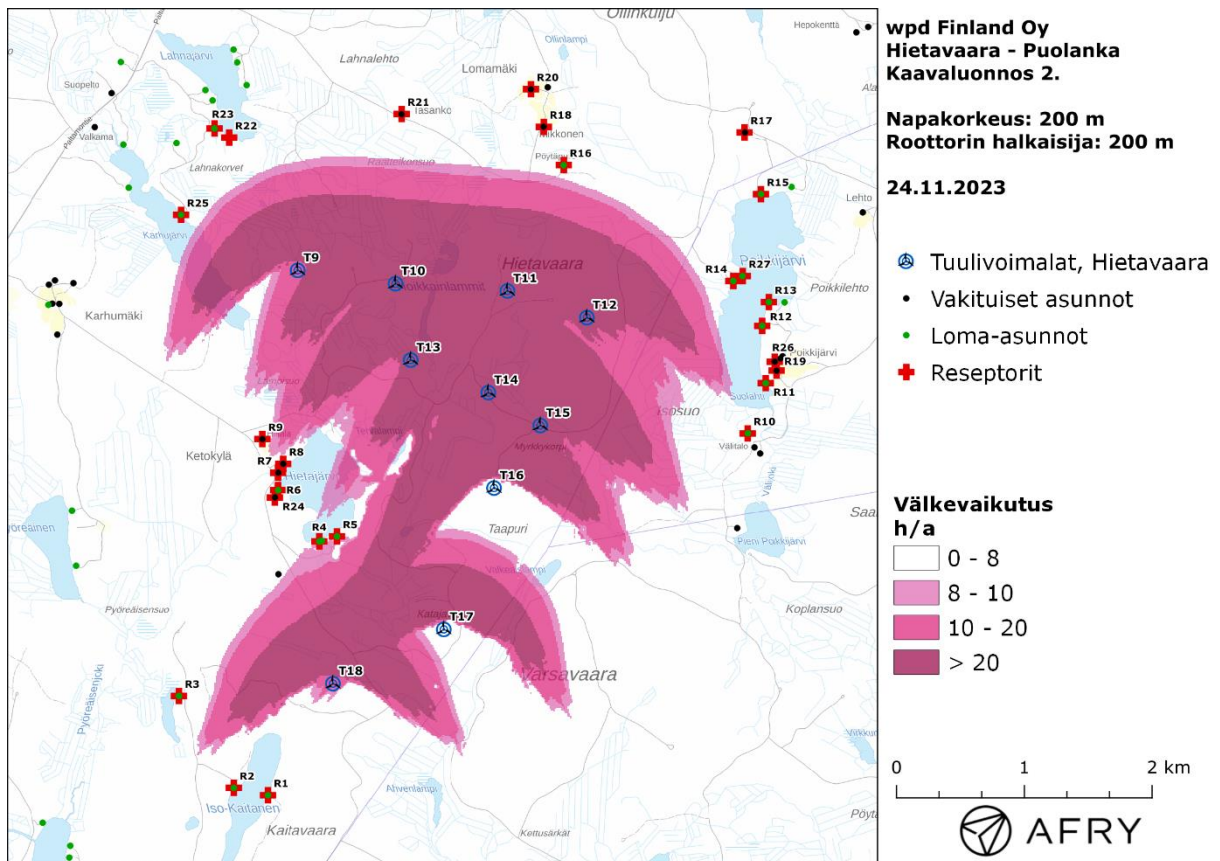
Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

3.2 Todennäköinen välkevaikutus

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

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).

Välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptorin R5 kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 6). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).



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

Taulukko 5: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptoreiden kohdilla, kun pelkästään Hietavaaran voimalat huomioidaan.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välke aika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälke aika [min]
R1	0:00	0
R2	1:16	3
R3	2:42	7
R4	4:15	7
R5	7:40	8
R6	3:53	4
R7	5:10	5
R8	5:52	6
R9	5:58	8
R10	4:43	6
R11	3:03	5
R12	2:37	8
R13	2:01	7
R14	3:27	9
R15	0:48	3
R16	5:48	7
R17	0:30	2
R18	3:11	6
R19	2:20	6
R20	1:43	4
R21	3:02	7
R22	2:25	5
R23	1:41	4
R24	3:10	4
R25	4:24	10
R26	2:22	7
R27	2:41	7

Taulukko 6: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R5 kohdalla, kun pelkästään Hietavaaran voimalat huomioidaan.

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	0:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:01
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:01
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	1:23	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:23
Huhtikuu	0:00	0:00	0:10	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:10
Toukokuu	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
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	0:24	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:24
Elokuu	0:00	0:00	1:19	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:19
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:20	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:20
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:37	0:18	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:03
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:11	0:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:15
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	3:37	0:00	2:20	0:29	1:13	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	7:40

3.3 Hietavaaran ja Varsavaaran tuulivoimapuistojen yhteisvaikutus

Tässä luvussa arvioidaan Hietavaaran sekä läheisen suunnitteilla olevan Varsavaaran tuulivoimapuiston välkkeen yhteisvaikutuksia. Varsavaaran tuulivoimapuistoon on suunnitteilla 21 voimalaa, ja lähimmät niistä sijaitsevat alle 800 metrin etäisyydellä Hietavaaran voimaloista. Varsavaaran voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m sekä roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lapa-profiilina on käytetty samaa profiilia kuin Hietavaaran voimaloille. Varsavaaran voimalakoordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 7).

Välkkeen yhteisvaikutuksia on arvioitu taulukossa 4 esitettyjen reseptorien lisäksi 32 lisäreseptorin kohdalla. Lisäreseptorien koordinaatit on esitetty taulukossa (Taulukko 8). Välkkeen yhteisvaikutuksia on arvioitu siis yhteensä 59 reseptoripisteen kohdalla.

Hietavaaran ja Varsavaaran todennäköisen välkkeen yhteisvaikutusten mallinnus on esitetty karttakuvana (Kuva 4). Vätkemallinnuksen mukaan vuotuinen todennäköinen välkevaikutus ylittyy kahden lisäreseptorin (Y23 ja Y28) kohdalla. Myös päiväkohtainen maksimivälke ylittää 30 minuutin ohjearvon reseptorin Y23 kohdalla. Ylitykset aiheutuvat pelkästään Varsavaaran voimaloista. Muiden asuin- ja lomarakennusten kohdalla vuotuiset todennäköiset välkevaikutukset sekä päiväkohtaiset maksimivälkkeet jäävät alle Ruotsin ohjearvojen.

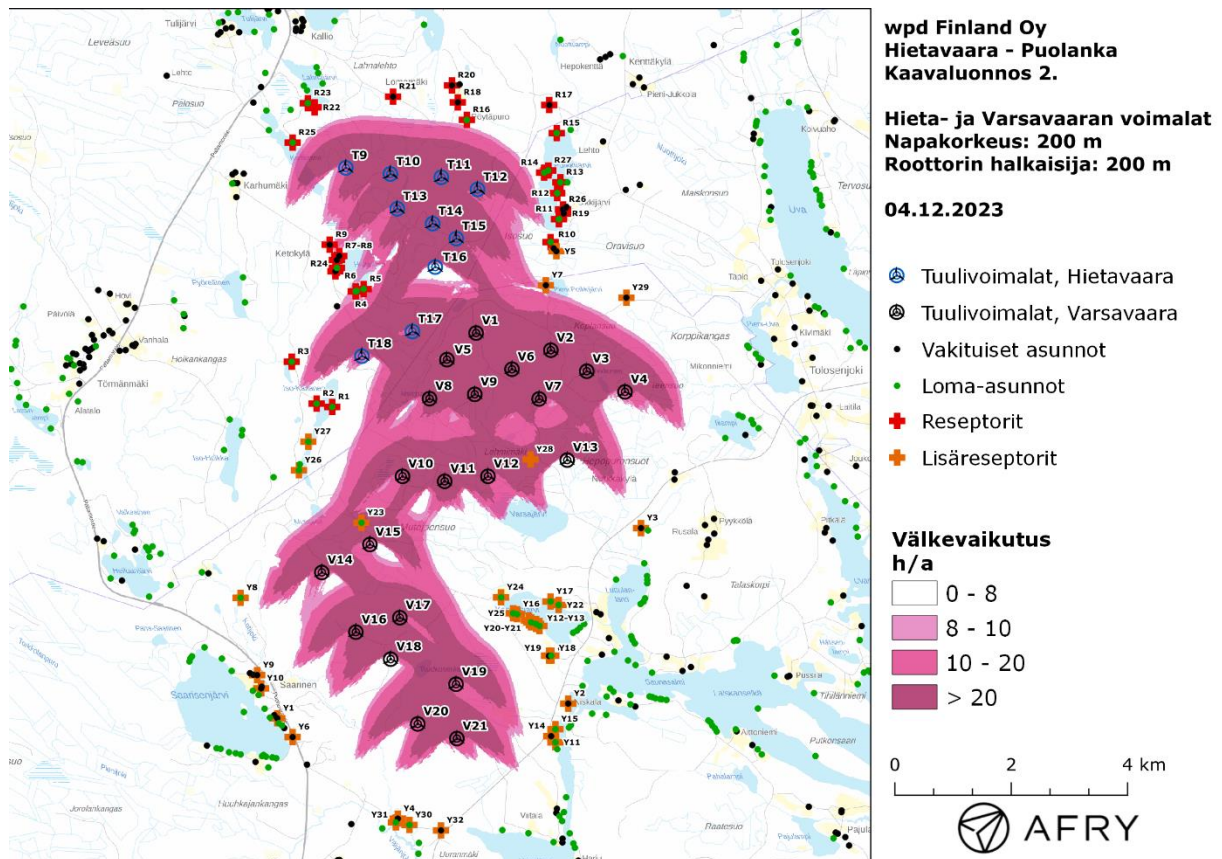
Välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptoreiden R5 ja Y7 kohdalla on esitetty taulukoissa 10-11. Taulukoissa esitettyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).

Taulukko 7: Varsavaaran tuulivoimaloiden (21 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
V1	541966	7160962	285
V2	543251	7160667	196
V3	543868	7160306	183
V4	544525	7159951	186
V5	541465	7160505	261
V6	542583	7160340	263
V7	543049	7159830	199
V8	541166	7159835	226
V9	541943	7159909	244
V10	540702	7158501	193
V11	541426	7158415	176
V12	542170	7158501	166
V13	543532	7158780	170
V14	539315	7156850	193
V15	540141	7157330	187
V16	539900	7155825	200
V17	540656	7156073	181
V18	540498	7155361	174
V19	541621	7154930	180
V20	540963	7154248	194
V21	541636	7153997	211

Taulukko 8: Lisäreseptoreiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Lisäreseptorit	E	N	Maaston korkeus [m]
Y1	538552	7154342	165
Y2	543550	7154595	139
Y3	544802	7157610	158
Y4	540622	7152618	134
Y5	543347	7162364	185
Y6	538815	7154019	167
Y7	543167	7161780	174
Y8	537922	7156413	157
Y9	538206	7155084	164
Y10	538275	7154857	163
Y11	543330	7153930	141
Y12	542998	7155962	149
Y13	543057	7155930	150
Y14	543257	7154036	148
Y15	543331	7154155	142
Y16	542672	7156131	149
Y17	543248	7156349	148
Y18	543260	7155417	151
Y19	543221	7155417	150
Y20	542877	7156024	155
Y21	542913	7155991	152
Y22	543386	7156288	146
Y23	539998	7157702	182
Y24	542398	7156419	145
Y25	542603	7156147	150
Y26	538925	7158603	190
Y27	539085	7159093	190
Y28	542904	7158788	188
Y29	544550	7161567	196
Y30	540823	7152510	135
Y31	540589	7152554	135
Y32	541364	7152418	150



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinuksissa huomioidaan Hietavaaran ja Varsavaaran voimalat.

Taulukko 9: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina 59 reseptorin kohdalla, kun mallinuksissa huomioidaan Hietavaaran ja Varsavaaran voimat.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välke aika [h:min]	Todennäköinen päiväkohtainen maksimivälke aika [min]	Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välke aika [h:min]	Todennäköinen päiväkohtainen maksimivälke aika [min]
R1	0:00	0	Y1	0:30	2
R2	2:10	3	Y2	0:46	3
R3	2:42	7	Y3	2:02	4
R4	4:15	7	Y4	0:00	0
R5	7:51	8	Y5	4:39	5
R6	3:53	4	Y6	0:57	3
R7	5:10	5	Y7	7:22	11
R8	5:52	6	Y8	2:14	6
R9	5:58	8	Y9	0:59	4
R10	5:28	6	Y10	1:11	3
R11	3:19	5	Y11	1:36	5
R12	2:37	8	Y12	0:47	3
R13	2:01	7	Y13	0:44	3
R14	3:27	9	Y14	1:50	6
R15	0:48	3	Y15	1:26	4
R16	5:48	7	Y16	1:15	3
R17	0:30	2	Y17	0:11	2
R18	3:11	6	Y18	0:47	3
R19	2:28	6	Y19	0:50	4
R20	1:43	4	Y20	0:52	3
R21	3:02	7	Y21	0:51	3
R22	2:25	5	Y22	0:09	1
R23	1:41	4	Y23	37:57	34
R24	3:10	4	Y24	1:26	3
R25	4:24	10	Y25	1:23	3
R26	2:29	7	Y26	1:21	4
R27	2:41	7	Y27	1:09	3
			Y28	37:00	25
			Y29	2:25	5
			Y30	0:00	0
			Y31	0:00	0
			Y32	0:00	0

Taulukko 10: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R5 kohdalla, kun Hietavaaran ja Varsavaaran voimat huomioidaan.

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	0:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:01
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:01	0:00	1:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:02
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:04	1:24	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:28
Huhtikuu	0:00	0:00	0:10	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:10
Toukokuu	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
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	0:24	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:24
Elokuu	0:00	0:00	1:19	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:19
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:03	0:20	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:23
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:39	0:18	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:05
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:11	0:04	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:15
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	3:37	0:07	2:24	0:29	1:13	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	7:51

Taulukko 11: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] lisäreseptorin Y7 kohdalla, kun Hietavaaran ja Varsavaaran voimat huomioidaan.

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	0:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:08
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:05	0:42	1:21	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	2:15
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:37	0:01	0:00	0:00	0:00	0:38
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:16	0:00	0:00	0:16
Toukokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:51	0:00	0:00	0:51
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	0:46	0:00	0:00	0:46
Elokuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:17	0:00	0:00	0:17
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:22	0:00	0:00	0:00	0:00	0:22
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:02	0:42	0:19	0:13	0:00	0:00	0:00	0:00	1:17
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:02	0:24	0:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:33
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	0:09	1:48	1:55	1:20	0:01	2:10	0:00	0:00	7:22

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Puolangan kunnan alueelle suunnitellun Hietavaaran tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennalliset arviot. Vaikutusten arviointi tehtiin kymmenen voimalan toteutusvaihtoehdolle Kaavaluonnos 2. Mallinuksissa otettiin lisäksi huomioon yhteisvaikutukset Paltamon puolelle suunnitellun Varsavaara tuulipuiston kanssa.

Välkemallinnuksen mukaan vuotuinen todennäköinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon kaikkien alueen loma- ja asuinrakennusten kohdilla, kun pelkästään Hietavaaran voimalat huomioidaan. Hietavaaran ja Varsavaaran tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutukset ylittyvät kahden rakennuksen kohdalla. Ohjearvon ylitykset aiheutuvat kuitenkin pelkästään Varsavaaran voimaloista.

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 roottorikehän läpinäkyvällä taivaanpallon osuudella. Turbiinien yhteisvaikutus saadaan summaamalla turbiinikohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämässä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen turbiinien eri orientaatioille, joita skaalataan suuntaakohtaisilla 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.

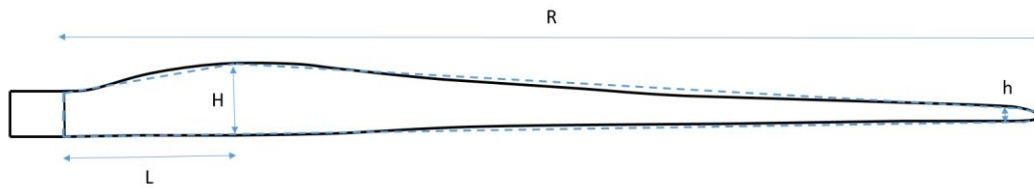
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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 5) on esitetty malli tyypillisestä profilista, jossa lavan maksimileveys on H etäisyydellä L lavan tyvestä. Lavan kokonaispituus on R ja lavan leveys 90 % etäisyydellä tyvestä on h . Lavan oletetaan kapenevan lineaarisesti arvosta H arvoon h liikuttaessa maksimikohdasta kärkeen. Tavanomaisesti välkelaskennassa turbiinin keskimääräinen leveys on määritetty parametrien H ja h keskiarvona.



Kuva 5: Turbiinin lavan malliprofiili.

Tämän raportin väkelaskennassa käytetään turbiinivalmistajan ilmoittamiin tietoihin perustuvaa lavan profiilitietoa. 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.