



ATP Palloneva Oy

Pallonevan pohjoisen tuulivoimapuiston välkeselvitys (VE2)

101024733-001, 10.05.2024

Tekijä
AFRY Finland Oy
Mika Laitinen

E-mail
mika.laitinen@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
001

Asiakas
ATP Palloneva Oy
Jaakko Leppinen

Päivämäärä
10/05/2024

Projektinumero
101024733-001

Raportin tila
VALMIS

Palloneva pohjoisen tuulivoimapuiston välkeseelvitys (VE2)

Raporttihistoria

| Versio | Pvm/Laatiija | Pvm/Tarkastaja | Merkinnät/Muutokset |
|--------|--|---|---------------------|
| 001 | 10.05.2024/ Mika Laitinen, Senior Consultant | 10.05.2024/ Erkki Heikkola, Senior Consultant | Alkuperäinen |

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>.

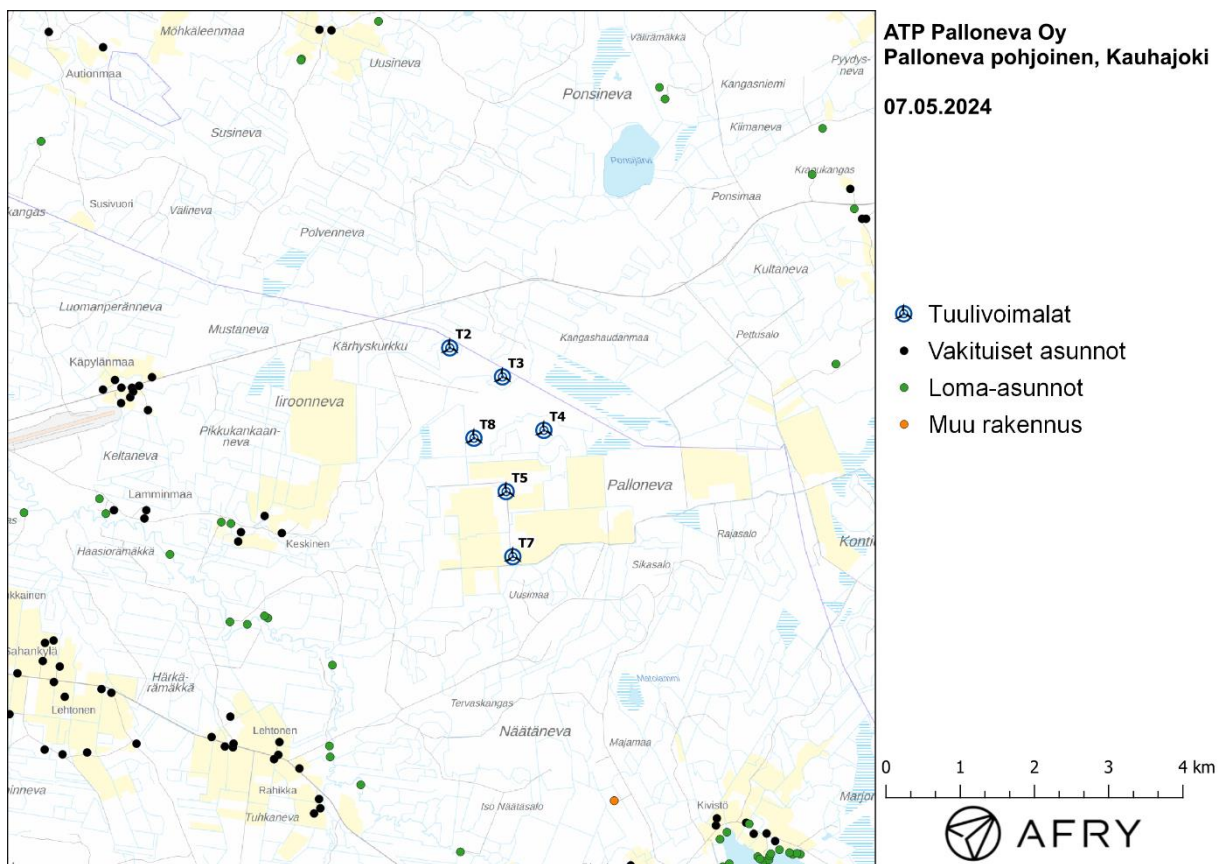
Sisällysluettelo

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Johdanto..... | 4 |
| 2 | Tuulivoimaloiden välke | 6 |
| 2.1 | Välkevaikutus..... | 6 |
| 2.2 | Välkkeen rajoittaminen | 6 |
| 2.3 | Arvioinnin epävarmuudet | 6 |
| 2.4 | Ohjearvot..... | 7 |
| 3 | Tuulivoimakohteen välkemallinnus | 8 |
| 3.1 | Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto | 8 |
| 3.2 | Todennäköinen välkevaikutus..... | 11 |
| 4 | Yhteenveto..... | 14 |
| 5 | Välkevaikutuksen laskentamenetelmä | 15 |
| 6 | Viitteet | 17 |

1 Johdanto

Selityksessä arvioidaan Kauhajoen kaupungin alueelle suunnittelun Palloneva pohjoisen tuulivoimapuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Tuulivoimapuisto on osa ATP Palloneva Oy:n yhdistettyä aurinko ja tuulivoimahanketta Palloneva pohjoinen. Arviointi on tehty kuuden voimalan suunnitelmalle VE2. Voimaloiden sijainnit on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1).

Mallinnuksissa voimaloille on käytetty napakorkeutta 214 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Näillä voimaladimensiolla on pyritty mallintamaan maksimaalisen välkevaikutus. Lopullisilla napakorkeuksilla ja voimalatyypeillä ei tulla ylittämään 300 metrin kokonaiskorkeutta.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit.

Taulukko 1: Tuulivoimaloiden (6 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

| Turbiinit | E | N | Maaston korkeus [m] |
|-----------|--------|---------|---------------------|
| T2 | 267742 | 6935366 | 140 |
| T3 | 268453 | 6934975 | 154 |
| T4 | 269011 | 6934256 | 147 |
| T5 | 268502 | 6933431 | 142 |
| T7 | 268592 | 6932555 | 136 |
| T8 | 268068 | 6934150 | 143 |

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 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 Seinäjoen Pelmaan sääasemalta, josta etäisyys hankealueeseen on noin 50 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]. Tässä selvityksessä mallinnettuja välkeajoja verrataan vakiintuneen käytännön mukaan Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvoihin. Välkkeen ohjearvoja sovelletaan asutuksen kohdalla, eikä esimerkiksi eläimiin tai luontoon kohdistuvasta välkevaikutuksesta ole ohjearvoja tai arviointikriteerejä.

Tanskassa on määritetty todennäköisen vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi korkeintaan 10 tuntia. Ruotsissa vastaava todennäköisen välkeajan suositusarvo on korkeintaan 8 tuntia vuodessa ja 30 minuuttia päivässä [2]. Teoreettisen maksimivälkkeen raja-arvot Saksassa ovat 30 tuntia vuodessa ja korkeintaan 30 minuuttia päivässä.

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 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 ihmissilmän 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 214 m ja roottorin halkaisijaa 200 m. Voimaloiden lavan leveysprofiili on mallinnettu voimalatyyppin Siemens Gamesa SG 7.0-170 lavasta: roottorin halkaisija on skaalattu 170 metristä 200 metriin ja samalla lapa on skaalattu 5 % leveämmäksi. 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 voimaloiden 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 voimalan käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammassa tuulissa voimalat 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 voimalan käyntinopeusvälille osuille tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 2).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Seinäjoen Pelmaan sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [3]. Sääaseman mittausten 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: Suuntasektori-kohtaiset osuudet yli 3 m/s tuulenopeuksille Suomen tuuliatlaksen perusteella.

| Suuntasektori | 0/180 | 30/210 | 60/240 | 90/270 | 120/300 | 150/330 |
|-----------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|
| Yli 3 m/s osuus | 0,181 | 0,209 | 0,167 | 0,128 | 0,119 | 0,135 |

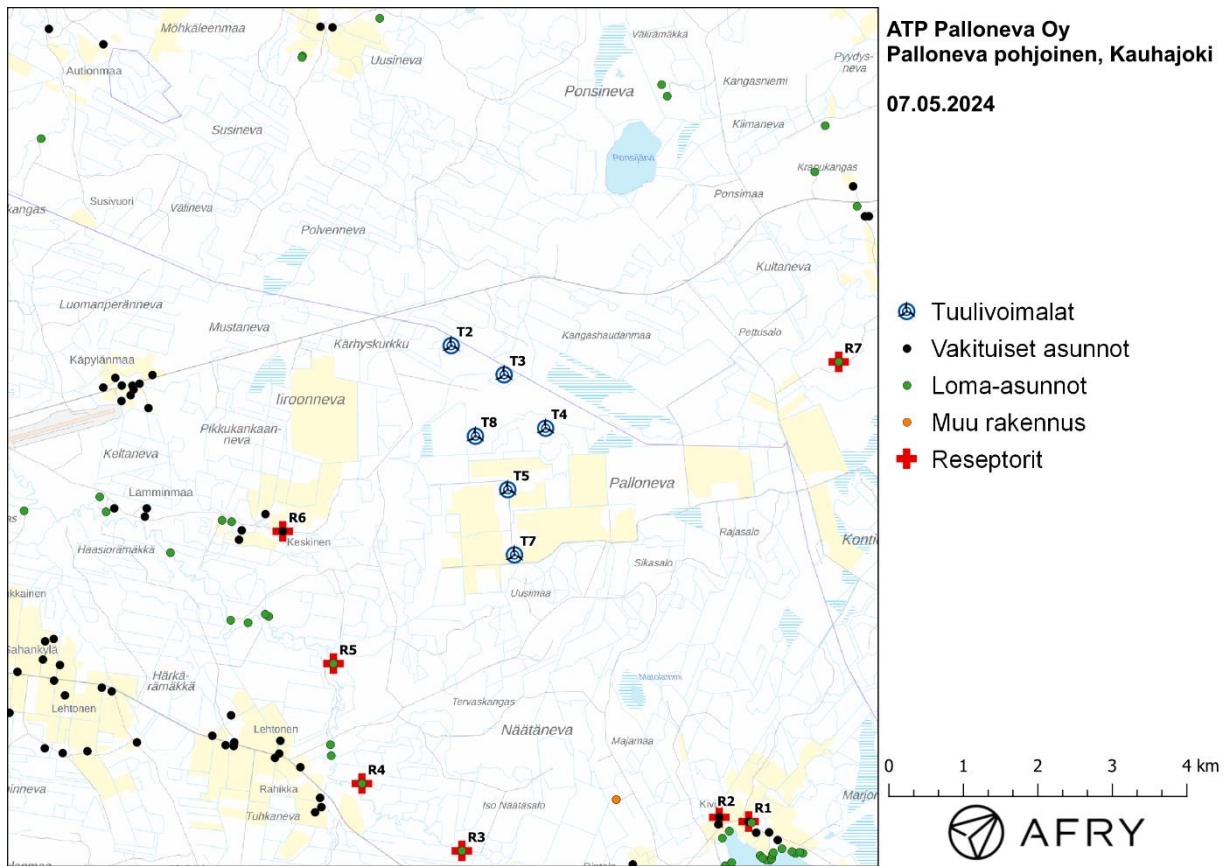
Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Pelmaan sääasemalla.

| Kuukausi | Auringonpaisteen todennäköisyys |
|-----------|---------------------------------|
| Tammikuu | 0,162 |
| Helmikuu | 0,291 |
| Maaliskuu | 0,398 |
| Huhtikuu | 0,423 |
| Toukokuu | 0,479 |
| Kesäkuu | 0,459 |
| Heinäkuu | 0,454 |
| Elokuu | 0,414 |
| Syyskuu | 0,358 |
| Lokakuu | 0,260 |
| Marraskuu | 0,150 |
| Joulukuu | 0,110 |

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä seitsemän vertailurakennusta, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Rakennusten sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Reseptorit sijaitsevat 2,8–4,8 km etäisyydellä lähimmistä voimaloista. Hankealueen kaakkoispuolella on Maanmittauslaitoksen maastotietokannassa loma-asunnoksi merkitty rakennus, mutta jolla ei ole Kauhajoen kaupungin rakennusvalvonnalta saadun tiedon mukaan rakennuslupaa. Tämä rakennus on merkitty karttoihin oranssilla ympyrällä ja selitteellä Muu rakennus. Tätä rakennusta ei huomioida välkevaikutusten arvioinnissa.

Taulukko 4: Reseptoreiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

| Reseptori | E | N | Maaston korkeus [m] | Rakennusluokitus |
|-----------|--------|---------|---------------------|--------------------------|
| R1 | 271739 | 6928971 | 144 | vakituinen asuinrakennus |
| R2 | 271344 | 6929029 | 143 | vakituinen asuinrakennus |
| R3 | 267887 | 6928578 | 141 | lomarakennus |
| R4 | 266545 | 6929482 | 139 | lomarakennus |
| R5 | 266162 | 6931093 | 135 | lomarakennus |
| R6 | 265480 | 6932870 | 130 | vakituinen asuinrakennus |
| R7 | 272949 | 6935146 | 145 | lomarakennus |



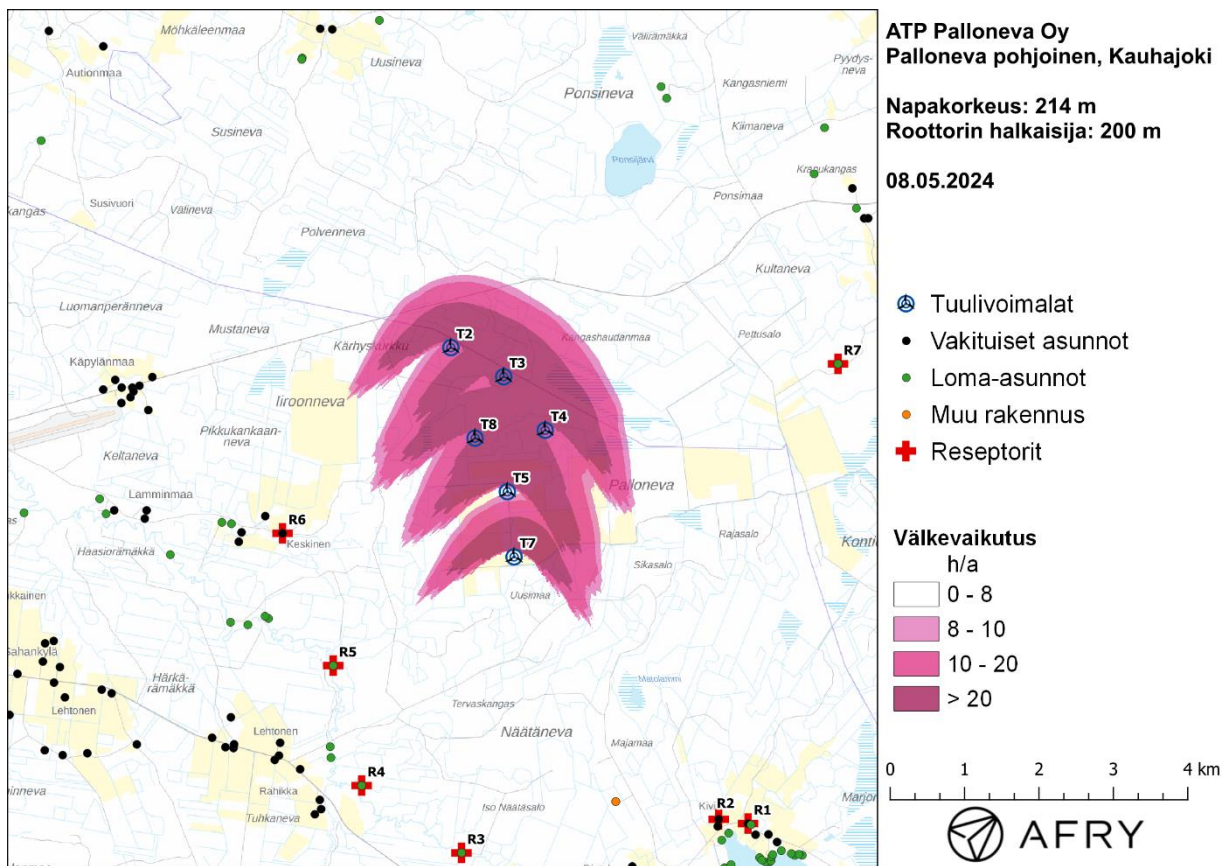
Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapaiston hankealueella.

3.2 Välkevaikutus

Mallinnetut arvio 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.

Taulukossa (Taulukko 5) on esitetty todennäköinen välkevaikutus ja teoreettinen maksimivälke reseptoreiden kohdilla, sekä vuotuisena tuntimääränä että suurimpana päiväkohtaisena välkeaikana.

Mallinnusten perusteella Palloneva pohjoisen suunnitelman VE2 tuulivoimalat eivät aiheuta välkevaikutusta vakituisten tai vapaa-ajan asuntojen kohdilla. Koska voimalat ovat vähintään 2,8 km etäisyydellä asunnoista, välke ei ulotu asuntoihin saakka. Välkevaikutus ei siis ylitä Ruotsin, Tanskan tai Saksan ohjearvoja.



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

Taulukko 5: Välkeajat tunteina ([h:min]) reseptoreiden kohdilla. Taulukossa on esitetty vuotuinen välkeaja 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 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 |
| 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 | 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 |

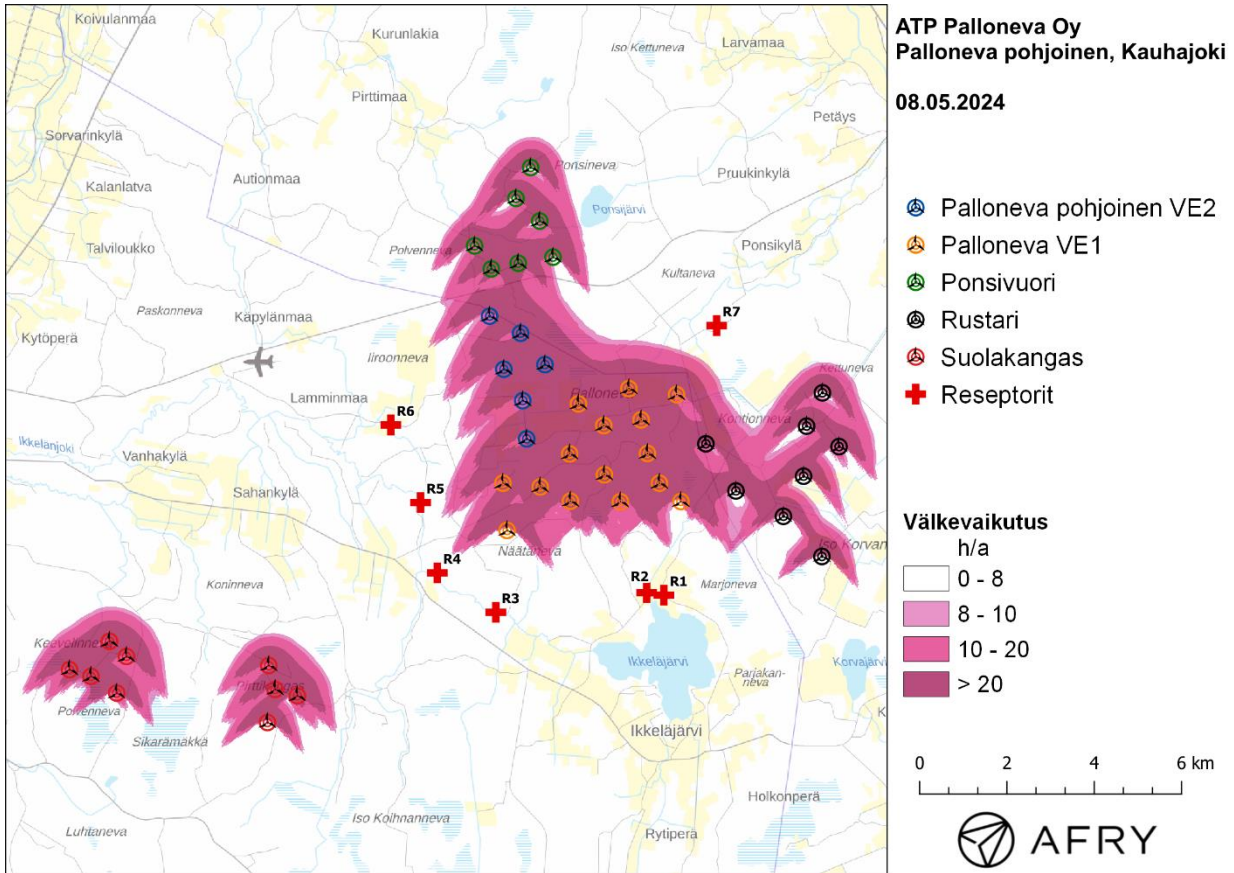
3.3 Välkkeen yhteisvaikutukset

Tässä luvussa arvioidaan Palloneva pohjoisen ja läheisten tuulivoimapuistojen välkkeen yhteisvaikutuksia. Yhteisvaikutusten arvioinnissa huomioidaan suunnitteilla oleva Pallonevan tuulivoimapuisto sekä jo toiminnassa olevat Rustarin, Ponsivuoren ja Suolakankaan tuulivoimapuistot. Pallonevan osalta yhteisvaikutusten arvio tehdään sijoittelusuunnitelmalle VE1, joka tuottaa suuremman välkevaikutuksen kuin puiston muut suunnitelmat. Vätkemallinnuksissa käytetään taulukossa (Taulukko 6) lueteltuja napakorkeuksia, roottorin halkaisijoita ja voimalatyyppejä. Mallinnuksessa käytetyt tuulivoimaloiden tiedot on saatu hankkeista vastaavilta toimijoilta. Voimaloiden lapaprofiileja on arvioitu voimalavalmistajien toimittamien tietojen perusteella.

Taulukko 6: Välkkeen yhteisvaikutusten mallinnuksissa tuulivoimapuistoille käytettävät napakorkeudet, roottorin halkaisijat ja voimalatyyppit.

| Tuulivoimapuisto | Napakorkeus [m] | Roottorin halkaisija [m] | Voimalatyyppi |
|---------------------|-----------------|--------------------------|---------------------------------------|
| Palloneva pohjoinen | 214 | 200 | skaalattu voimalatyyppistä SG 7.0-170 |
| Palloneva VE1 | 200 | 200 | skaalattu voimalatyyppistä SG 7.0-170 |
| Ponsivuori | 135 | 149 | Nordex N149 4.5MW |
| Rustari | 151 | 158 | GE158 5.5MW |
| Suolakangas | 155 | 150 | Vestas V150-4.2MW |

Todennäköisen välkkeen yhteisvaikutusten mallinnus on esitetty karttakuvana (Kuva 4). Todennäköiset välkeajat ja teoreettisen maksivälke reseptoreiden kohdilla on listattu taulukossa (Taulukko 7). Koska Palloneva pohjoisen suunnitelma VE2 ei aiheuta välkevaikutusta vakituisten ja vapaa-ajan asuntojen kohdilla, Palloneva pohjoisen suunnitelmalla VE2 ei ole myöskään välkkeen yhteisvaikutuksia asuntojen kohdilla. Palloneva pohjoisen lähelle suunnitellut tai rakennetut tuulivoimapuistot aiheuttavat välkettä reseptoreihin R4, R5 ja R7. Välkevaikutus ei ylitä ohjearvoja näiden reseptoreiden kohdilla.



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus, kun mallinuksissa huomioidaan tuulivoimapaistot Palloneva pohjoinen VE2, Palloneva VE1, Rustari, Ponsivuori ja Suolakangas.

Taulukko 7: Välkeajat ([h:min]) reseptoreittain, kun mallinuksissa huomioidaan tuulivoimapaistot Palloneva pohjoinen VE2, Palloneva VE1, Rustari, Ponsivuori ja Suolakangas. Taulukossa on esitetty vuotuinen välkeaja 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 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 |
| R2 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 |
| R3 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 |
| R4 | 3:07 | 0:06 | 11:02 | 0:23 |
| R5 | 1:37 | 0:05 | 6:44 | 0:15 |
| R6 | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0:00 |
| R7 | 0:45 | 0:02 | 7:27 | 0:18 |

4 Yhteenveto

Selvityksessä on esitetty Kauhajoen kaupungin alueelle suunnitellun Palloneva pohjoisen tuulivoimapuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arviointi on tehty kuuden voimalan suunnitelmalle VE2 napakorkeudella 214 m ja roottorin halkaisijalla 200 m. Selvityksessä on arvioitu myös välkkeen yhteisvaikutuksia lähelle suunniteltujen tai rakennettujen Pallonevan, Ponsivuoren, Rustarin ja Suolakankaan tuulivoimapuistojen kanssa.

Mallinnusten mukaan Palloneva pohjoisen suunnitelma VE2 ei aiheuta välkevaikutusta vakituisten tai vapaa-ajan asuntojen kohdilla. Palloneva pohjoisen suunnitelmalla VE2 ja läheisillä tuulivoimahankkeilla ei ole ei ole välkkeen yhteisvaikutuksia asutuksen kohdalla.

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 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.

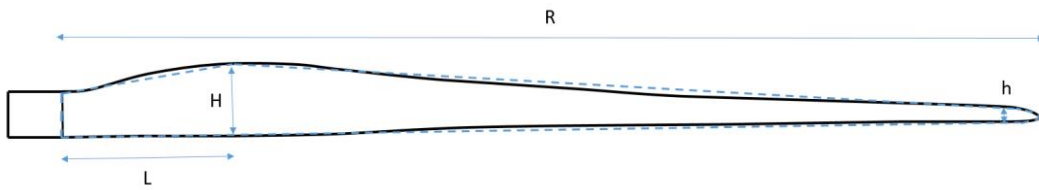
Tuulivoimalan lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle tuulivoimalasta, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu tuulivoimalan lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa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



Kuva 5: Turbiinin lavan malliprofiili.

Tämän raportin välkelaskennassa käytetään yksinkertaistettua lineaarista lavan profiilitietoa. Laskennassa huomioitava roottorin säde vaihtelee välillä $[0, R]$ riippuen tarkastelupisteen etäisyydestä turbiineihin sekä lavan leveydestä ja sitä vastaavasta Auringon peittoasteesta. Tällä tavoin välkelaskennassa huomioidaan voimalan 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 1990–2020, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2021:8.
- [4] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päiväys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016.