

# Tuulivoimahankkeen välkeselvitys

KOKKONEVA – PERHO, LAYOUT 1 (34 VOIMALAA)

KALLE AUVINEN

13.12.2021

## Raportin nimi ja tunnus

Tuulivoimahankkeen välkeselvitys: Kokkoneva – Perho, Layout 1 (34 voimalaa)  
TV-2021-686-1, 13.12.2021

## Asiakas

FCG Finnish Consulting Group Oy

## Raportin tekijät

Kalle Auvinen, Numerola Oy  
[kalle.auvinen@numerola.fi](mailto:kalle.auvinen@numerola.fi)

## Asiatarkastus

Erkki Heikkola ja Pasi Tarvainen

## Aineistojen käyttöoikeudet

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

## Tiivistelmä

Raportti sisältää arvion Perhon kunnan alueelle suunnitellun 34 voimalan Kokkoneva tuulivoimapuiston (Layout 1) aiheuttamista välkevaikutuksista. Arviointi tehdään laskennallisten menetelmien avulla. Välkevaikutusten arvioinnissa otetaan huomioon myös Kokkonevan tuulivoimapuiston kaakkoispuolella sijaitseva Limakon tuulivoimapuisto. Tuulivoimaloiden aiheuttamat välkevaikutukset mallinnetaan käyttäen Kokkonevan tuulivoimaloille roottorin halkaisijaa 199 m ja napakorkeutta 200,5 m ja Limakon tuulivoimaloille roottorin halkaisijaa 131 m ja napakorkeutta 144 m. Tulosten arvioinnissa käytetään ympäristöhallinnon esittämiä ohjearvoja tuulivoimarakentamisen suunnitteluun.

## Versiohistoria

Revisio	Päiväys	Muutokset	Tekijät
00	13.12.2021		Kalle Auvinen

## Tulosten käyttö- ja jakeluoikeudet

Tämä raportti on luottamuksellinen ja laadittu yksinomaan raportissa mainitun vastaanottajan (Asiakas) käyttöön.

Asiakas voi kuitenkin käyttää tämän selvityksen tuloksia lähtötietoina raportissa mainitun kohteen tuulivoimaan liittyvissä jatkoselvityksissä ja suunnittelutyössä (ympäristöselvitykset, kaavoitus jne.) sekä hankkeen toimijoiden valinnassa. Tulosten jakelu selvitysten osapuolille (esim. hankekehittäjä, kaavoittaja, viranomaiset) on myös sallittu, mutta tieto jakelusta on toimitettava Numerola Oy:lle.

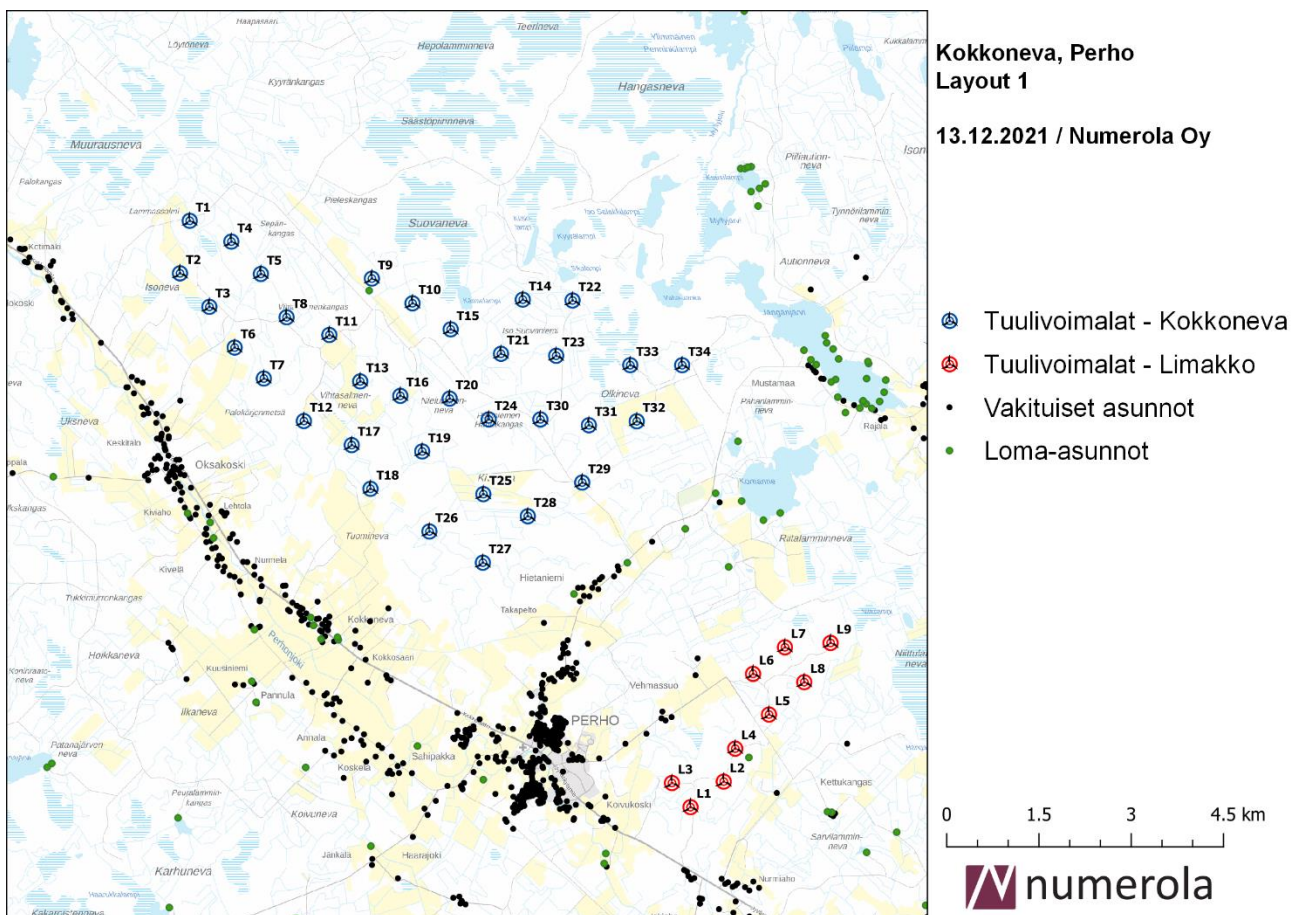
Muutoin aineiston esittely ja jakaminen edellyttävät Numerolan lupaa.

## Sisällysluettelo

1	Johdanto .....	4
2	Tuulivoimaloiden välke .....	6
2.1	Välkevaikutus .....	6
2.2	Ohjeavot .....	6
2.3	Arvioinnin epävarmuudet .....	6
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus .....	7
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto .....	7
3.2	Välkevaikutus .....	10
4	Yhteenveto .....	12
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä .....	13
6	Viitteet .....	15

# 1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Perhon kunnan alueelle suunnitellun 34 voimalan Kokkonevan tuulivoimapuiston (Layout 1) aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Välkevaikutuksen arvioinnissa otetaan huomioon myös Kokkonevan tuulivoimapuiston kaakkoispuolella sijaitseva yhdeksän tuulivoimalan tuulivoimapuisto Limakko. Kohteeseen suunniteltujen tuulivoimaloiden paikat on esitetty kuvassa (Kuva 1) yhdessä Limakon tuulivoimaloiden kanssa. Kokkonevan tuulivoimaloiden koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 1). Mallinuksissa Kokkonevan tuulivoimaloille on käytetty napakorkeutta 200,5 m ja roottorin halkaisijaa 199 m. Limakon tuulivoimaloille puolestaan käytetään napakorkeutta 144 m ja roottorin halkaisijaa 131 m.



**Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Kokkonevan tuulipuiston alueella.**

**Taulukko 1: Kokkonevan voimaloiden (Layout 1) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.**

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	364549	7020711	161
T2	364391	7019858	159
T3	364869	7019314	161
T4	365226	7020373	163
T5	365706	7019848	162
T6	365280	7018652	158
T7	365754	7018149	161
T8	366124	7019144	165
T9	367511	7019773	168
T10	368171	7019371	169
T11	366819	7018857	165
T12	366405	7017459	163
T13	367321	7018103	165
T14	369964	7019431	174
T15	368792	7018948	169
T16	367973	7017868	168
T17	367183	7017068	163
T18	367488	7016358	161
T19	368329	7016965	166
T20	368775	7017823	165
T21	369610	7018551	170
T22	370773	7019417	175
T23	370507	7018519	175
T24	369410	7017485	167
T25	369323	7016271	167
T26	368446	7015665	165
T27	369315	7015158	169
T28	370046	7015912	168
T29	370930	7016460	171
T30	370250	7017485	172
T31	371039	7017390	174
T32	371817	7017455	173
T33	371711	7018367	175
T34	372555	7018366	179

## 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 iltajat). 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 Ohjearvot

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja. Ympäristöministeriön ohjeissa tuulivoimapuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia väkemäärien osalta [4]. Tanskassa on määritetty vuotuisen väkjetuntimäärän suositusarvoksi 10 h. Ruotsissa vastaava suositusarvo on 8 h ja korkeintaan 30 min päivässä [2]. Näiden ohjearvojen käyttö edellyttää todennäköisen välke-tilanteen laskentaa. Mikäli väkjetuntien arvioinnissa käytetään laskennallista maksimituntimäärää, voidaan vuotuisen välkevaikutuksen ohjearvona käyttää Saksassa käytettävää 30 h raja-arvoa. Tässä raportissa mallinnettujen väkjetasojen arvioinnissa käytetään Ruotsin suunnitteluohjeissa annettuja ohjearvoja.

### 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.

Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Avoimilla alueilla mallinnettu välkevaikutus vastaa todellista tilannetta, mutta puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Puuston näkyvyyttä peittävä vaikutus vaihtelee vuosien ja vuodenaikojen suhteen, mikä myös lisää arvioinnin epävarmuutta.

Rakennuksiin kohdistuvan välkkeen laskennassa käytetään ns. kasvihuone-oletusta, jolloin rakennukseen kohdistuva välkevaikutus huomioidaan riippumatta suunnasta. Todellisuudessa välkevaikutus kohdistuu rakennuksen sisätiloihin vain ikkunoiden suunnasta.

### 3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

#### 3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin geometrisella laskentamallilla, joka huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoima-alueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuuliturbiinien dimensiot (Numerola Oy:n implementoitu malli). 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, turbiinin ja tarkastelupisteen kautta kulkeva jana leikkaa maanpintaa, niin varjostusta ei esiinny. Välkevaikutus laskettiin 1,5 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 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. Tässä selvityksessä väkelaskennassa ei ole käytetty tavanomaista maksimietäisyyttä, vaan on huomioitu turbiinin muuttuva lapaprofiili.

Väkelaskennassa Kokkonevan voimaloille on käytetty napakorkeutta 200,5 m ja roottorin halkaisijaa 199 m. Voimaloille on käytetty asiakkaan toimittamaa, turbiinityypin SHT199 7,7 MW, lapaprofiilia. Limakon voimaloille on puolestaan käytetty napakorkeutta 144 m, roottorin halkaisijaa 131 m sekä turbiinityypin N131 3,0 MW teknisten tietojen pohjalta arvioitua lapaprofiilia. Limakossa käytössä olevissa voimaloissa lavan maksimihalkaisija tyven lähellä oli 3,94 m ja lavan halkaisijaksi 90 % etäisyydellä lavan kärkeä (117,9 m) arvioitiin olevan 1,10 m. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat turbiinien käyttöaste, puusto ja paikallinen säätö (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 välkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua välketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [1] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammissa



tuulissa turbiinit 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 turbiinin käyntinopeusvälille osuville 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). Suuntakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta 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
<b>Yli 3 m/s osuus</b>	0,163	0,182	0,190	0,130	0,130	0,144

**Taulukko 3: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Seinäjoen Pelmaan sääasemalla.**

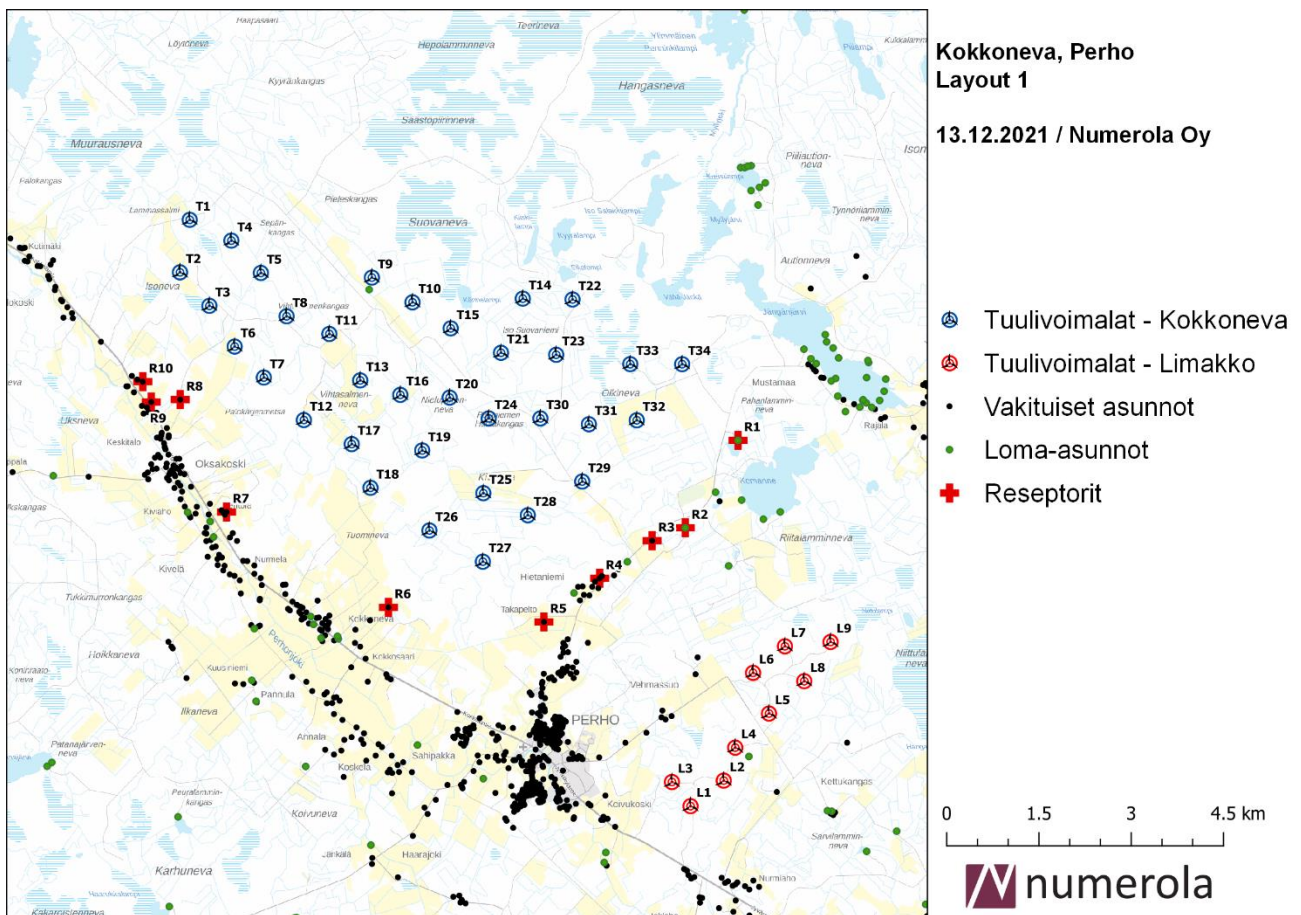
Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,168
Helmikuu	0,317
Maaliskuu	0,359
Huhtikuu	0,441
Toukokuu	0,488
Kesäkuu	0,452
Heinäkuu	0,466
Elokuu	0,424
Syyskuu	0,361
Lokakuu	0,254
Marraskuu	0,171
Joulukuu	0,199

Taulukossa (Taulukko 4) on määritelty Kokkonevan tuulivoimaloiden ympäristöstä kymmenen vertailukiinteistöä, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Pisteet sijaitsevat noin 1,2–1,9 km etäisyydellä lähimmistä voimaloista.

Alueen rakennustieto perustuu Maanmittauslaitoksen maastotietokannan aineistoon, jossa on eritelty alueen loma-asunnot ja vakituiset asunnot. Kyseisen tietokannan mukaan noin 200 m tuulivoimalan T9 eteläpuolella sijaitsee yksi loma-asunnoksi luokiteltu kiinteistö. Asiakkaalta saatujen tietojen mukaan tämä luokitus ei todellisuudessa pidä paikkaansa. Tämän vuoksi kyseistä rakennusta ei valittu reseptoripisteeksi eikä sitä huomioitu välkevaikutusten jatkotarkasteluissa.

Taulukko 4: Vertailupisteiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	373464	7017127	177	Loma-asunto
R2	372608	7015705	180	Loma-asunto
R3	372068	7015496	173	Vakituinen asunto
R4	371215	7014885	171	Vakituinen asunto
R5	370309	7014177	161	Vakituinen asunto
R6	367781	7014414	158	Vakituinen asunto
R7	365150	7015963	158	Vakituinen asunto
R8	364396	7017788	155	Vakituinen asunto
R9	363925	7017749	155	Vakituinen asunto
R10	363787	7018079	155	Vakituinen asunto



Kuva 2: Vertailupisteiden paikat Kokkonevan tuulipuiston alueella.

### 3.2 Välkevaikutus

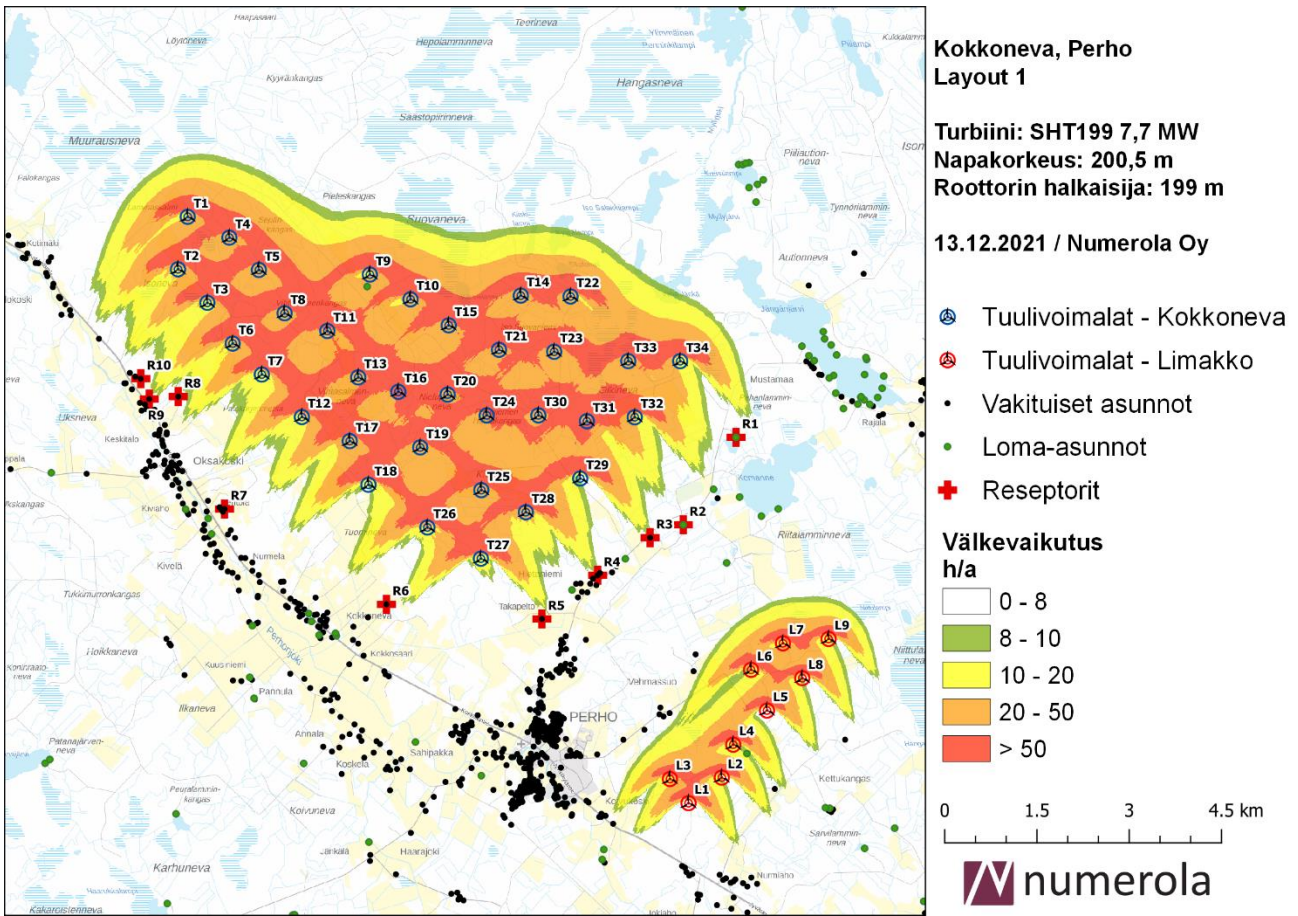
Mallinnetut arviot todellisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Suomen olosuhteissa puusto rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja.

Vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat vertailukiinteistöjen kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 5). Mallinnusten perusteella vuotuinen välkevaikutus jää alle 8 tunnin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdalla. Myös päiväkohtainen välkeaika jää alle 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja vakituisten asuntojen kohdalla.

Suurin välkevaikutus kohdistuu kiinteistöön R4. Välkkeen tarkempi ajoittuminen tämän kiinteistön kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 6). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).

**Taulukko 5: Vuotuinen välkevaikutus ja päiväkohtainen maksimivälke reseptoreiden kohdilla.**

Reseptori	Välkevaikutus [h:min]	Päiväkohtainen maksimivälke [min]
<b>R1</b>	2:41	5
<b>R2</b>	2:53	4
<b>R3</b>	6:36	11
<b>R4</b>	6:49	9
<b>R5</b>	4:10	7
<b>R6</b>	2:56	6
<b>R7</b>	1:19	4
<b>R8</b>	6:36	10
<b>R9</b>	6:07	9
<b>R10</b>	3:43	7



Kuva 3: Tuulivoimaloiden aiheuttama välketuntien määrä ilman puuston vaikutusta.

Taulukko 6: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R4 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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Helmikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Maaliskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Huhtikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	0	0	0:26
Toukokuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	86	0	1:26
Kesäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	124	0	2:04
Heinäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	140	0	2:20
Elokuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12	0	0:13
Syyskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0	0:21
Lokakuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Marraskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Joulukuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
<b>Yhteensä</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:48</b>	<b>6:01</b>	<b>0:00</b>	<b>6:49</b>

## 4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Perhon kunnan alueelle suunnitellun 34 tuulivoimalan Kokkonevan tuulivoimapuiston (Layout 1) ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Välkevaikutusten arvioinnissa otettiin huomioon Kokkonevan tuulivoimapuiston kaakkoispuolella sijaitseva Limakon tuulivoimapuisto. Kokkonevan tuulivoimaloiden välkevaikutusten arvio tehtiin roottorin halkaisijalla 199 m ja napakorkeudella 200,5 m. Limakon tuulivoimaloilla käytettiin roottorin halkaisijaa 131 m ja napakorkeutta 144 m.

Mallinnuksen mukaan vuotuinen välkevaikutus jää alle 8 tunnin ohjearvon alueen kaikkien vakituisten ja vapaa-ajan asuntojen kohdilla. Päiväkohtainen välkeaika alittaa 30 minuutin ohjearvon alueen kaikkien asuntojen kohdilla.

## 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 läpi näkyvällä taivaanpallon osuudella. Turbiinien yhteisvaikutus saadaan summaamalla turbiinikohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämässä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen turbiinien eri orientaatioille, joita skaalataan suuntakohtaisilla tuulusuusosuuksilla.

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.

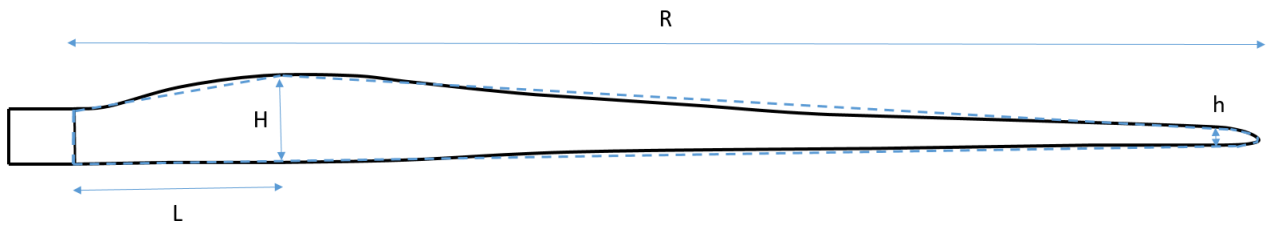
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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 4) 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 turbiinin keskimääräinen leveys määritetään parametrien  $H$  ja  $h$  keskiarvona (esim. WindPRO Shadow).



**Kuva 4: Turbiinin lavan yksinkertaistettu profiili.**

Tämän raportin väkelaskennassa käytetään turbiinivalmistajalta saatua 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.



# Tuulivoimahankkeen välkeselvitys

KOKKONEVA – PERHO, LAYOUT 2 (42 VOIMALAA)

JUULIANNA LÄHTEINEN

16.05.2022

## Raportin nimi ja tunnus

Tuulivoimahankkeen välkeselvitys: Kokkoneva – Perho, Layout 2 (42 voimalaa)  
TV-2021-686-2, 16.05.2022

## Asiakas

Liisa Karhu  
FCG Finnish Consulting Group Oy

## Raportin tekijät

Juulianna Lähteinen, Numerola Oy  
[juulianna.lahteinen@numerola.fi](mailto:juulianna.lahteinen@numerola.fi)

## Asiatarkastus

Erkki Heikkola ja Pasi Tarvainen

## Aineistojen käyttöoikeudet

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

## Tiivistelmä

Raportti sisältää arvion Perhon kunnan alueelle suunnitellun 42 voimalan Kokkoneva tuulivoimapuiston (Layout 2) aiheuttamista välkevaikutuksista. Arviointi tehdään laskennallisten menetelmien avulla. Välkevaikutusten arvioinnissa otetaan huomioon myös Kokkonevan tuulivoimapuiston kaakkoispuolella sijaitseva Limakon tuulivoimapuisto. Tuulivoimaloiden aiheuttamat välkevaikutukset mallinnetaan käyttäen Kokkonevan tuulivoimaloille roottorin halkaisijaa 170 m ja napakorkeutta 215 m ja Limakon tuulivoimaloille roottorin halkaisijaa 131 m ja napakorkeutta 144 m. Tulosten arvioinnissa käytetään ympäristöhallinnon esittämiä ohjearvoja tuulivoimarakentamisen suunnitteluun.

## Versiohistoria

Revisio	Päiväys	Muutokset	Tekijät
00	13.12.2021		Kalle Auvinen
01	16.05.2022	Voimaloiden koordinaatit muuttuneet	Juulianna Lähteinen

## Tulosten käyttö- ja jakeluoikeudet

Tämä raportti on luottamuksellinen ja laadittu yksinomaan raportissa mainitun vastaanottajan (Asiakas) käyttöön.

Asiakas voi kuitenkin käyttää tämän selvityksen tuloksia lähtötietoina raportissa mainitun kohteen tuulivoimaan liittyvissä jatkoselvityksissä ja suunnittelutyössä (ympäristöselvitykset, kaavoitus jne.) sekä hankkeen toimijoiden valinnassa. Tulosten jakelu selvitysten osapuolille (esim. hankekehittäjä, kaavoittaja, viranomaiset) on myös sallittu, mutta tieto jakelusta on toimitettava Numerola Oy:lle.

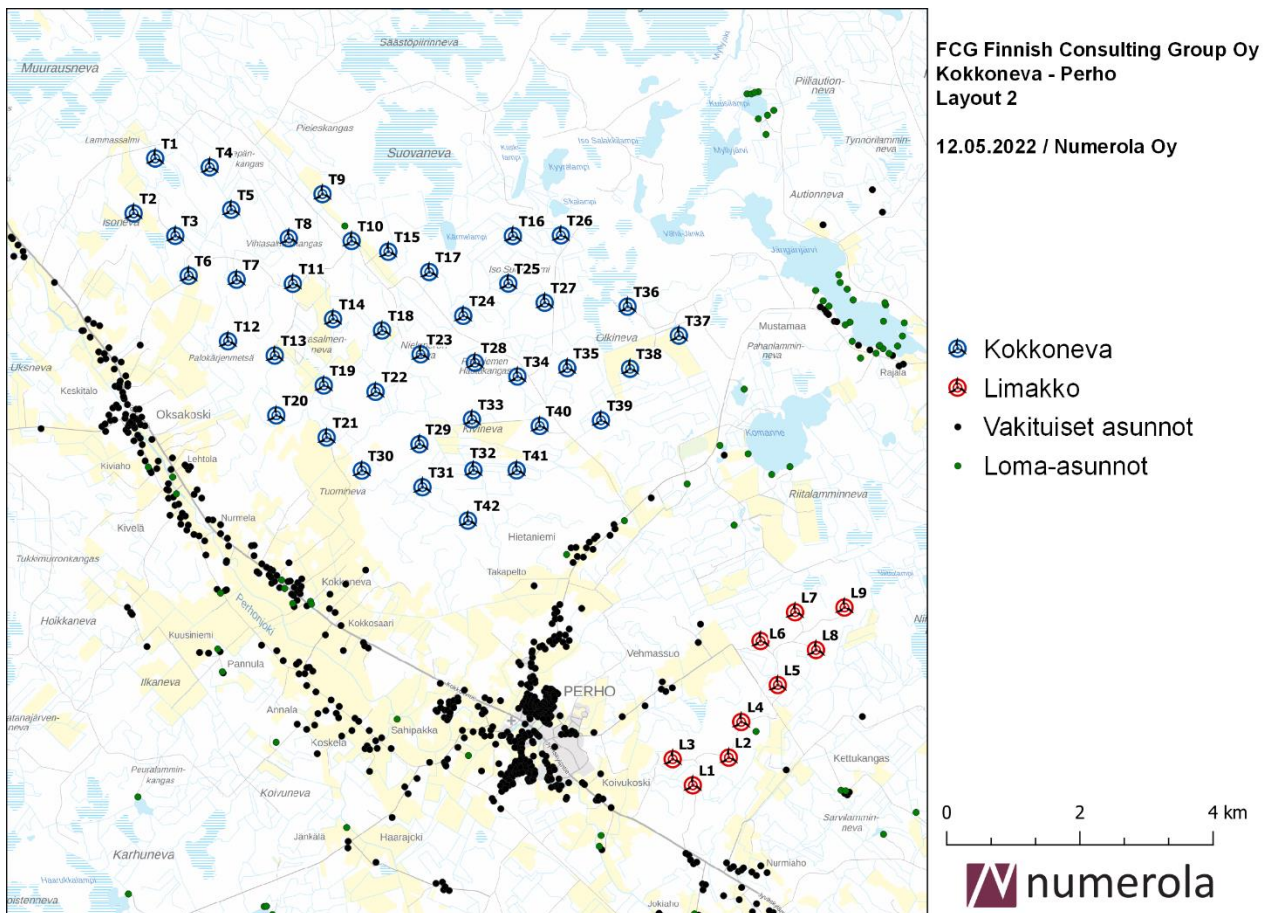
Muutoin aineiston esittely ja jakaminen edellyttävät Numerolan lupaa.

## Sisällysluettelo

1	Johdanto .....	4
2	Tuulivoimaloiden välke .....	6
2.1	Välkevaikutus .....	7
2.2	Ohjeavot .....	7
2.3	Arvioinnin epävarmuudet .....	7
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus .....	8
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto .....	8
3.2	Välkevaikutus .....	11
4	Yhteenveto .....	13
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä .....	14
6	Viitteet .....	16

# 1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Perhon kunnan alueelle suunnitellun 42 voimalan Kokkonevan tuulivoimapuiston (Layout 2) aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Välkevaikutuksen arvioinnissa otetaan huomioon myös Kokkonevan tuulivoimapuiston kaakkoispuolella sijaitseva yhdeksän tuulivoimalan tuulivoimapuisto Limakko. Kokkonevan kohteeseen suunniteltujen tuulivoimaloiden paikat on esitetty kuvassa (Kuva 1) yhdessä Limakon tuulivoimaloiden kanssa. Kokkonevan tuulivoimaloiden koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 1) ja Limakon tuulivoimaloiden koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 2). Mallinuksissa Kokkonevan tuulivoimaloille on käytetty napakorkeutta 215 m ja roottorin halkaisijaa 170 m. Limakon tuulivoimaloille puolestaan käytetään napakorkeutta 144 m ja roottorin halkaisijaa 131 m.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Kokkonevan tuulipuiston alueella.

**Taulukko 1: Kokkonevan voimaloiden (Layout 2) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.**

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	364619	7020590	161
T2	364295	7019766	159
T3	364921	7019430	162
T4	365438	7020457	163
T5	365760	7019821	162
T6	365122	7018830	159
T7	365841	7018772	162
T8	366625	7019392	166
T9	367131	7020056	163
T10	367568	7019353	165
T11	366686	7018711	165
T12	365712	7017848	161
T13	366414	7017634	163
T14	367290	7018180	165
T15	368119	7019191	168
T16	369990	7019427	173
T17	368733	7018887	169
T18	368025	7018010	167
T19	367150	7017185	163
T20	366437	7016736	160
T21	367193	7016404	161
T22	367927	7017090	166
T23	368604	7017652	165
T24	369244	7018230	171
T25	369921	7018714	173
T26	370710	7019437	174
T27	370467	7018426	175
T28	369419	7017526	168
T29	368587	7016303	167
T30	367722	7015908	161
T31	368632	7015659	165
T32	369397	7015913	167
T33	369375	7016675	166
T34	370058	7017319	170
T35	370806	7017445	173
T36	371711	7018367	175
T37	372482	7017933	176
T38	371748	7017436	173
T39	371312	7016662	171
T40	370393	7016577	169
T41	370046	7015912	168
T42	369315	7015158	169

**Taulukko 2: Limakon voimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.**

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
L1	372691	7011187	166
L2	373231	7011602	174
L3	372389	7011579	164
L4	373418	7012137	178
L5	373967	7012691	174
L6	373708	7013352	180
L7	374226	7013783	195
L8	374540	7013217	187
L9	374968	7013854	193

## Tuulivoimaloiden välke

### 1.1 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 iltajat). 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.

### 1.2 Ohjearvot

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja. Ympäristöministeriön ohjeissa tuulivoimapaiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia väkemmärien osalta [4]. Tanskassa on määritetty vuotuisen väkjetuntimäärän suositusarvoksi 10 h. Ruotsissa vastaava suositusarvo on 8 h ja korkeintaan 30 min päivässä [2]. Näiden ohjearvojen käyttö edellyttää todennäköisen välke-tilanteen laskentaa. Mikäli väkjetuntien arvioinnissa käytetään laskennallista maksimituntimäärää, voidaan vuotuisen välkevaikutuksen ohjearvona käyttää Saksassa käytettävää 30 h raja-arvoa. Tässä raportissa mallinnettujen väkjetasojen arvioinnissa käytetään Ruotsin suunnitteluohjeissa annettuja ohjearvoja.

### 1.3 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.

Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Avoimilla alueilla mallinnettu välkevaikutus vastaa todellista tilannetta, mutta puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Puuston näkyvyyttä peittävä vaikutus vaihtelee vuosien ja vuodenaikojen suhteen, mikä myös lisää arvioinnin epävarmuutta.

Rakennuksiin kohdistuvan väkkeen laskennassa käytetään ns. kasvihuone-oletusta, jolloin rakennukseen kohdistuva välkevaikutus huomioidaan riippumatta suunnasta. Todellisuudessa välkevaikutus kohdistuu rakennuksen sisätiloihin vain ikkunoiden suunnasta.



## 2 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

### 2.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin geometrisella laskentamallilla, joka huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoima-alueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuuliturbiinien dimensiot (Numerola Oy:n implementoitu malli). 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, turbiinin ja tarkastelupisteen kautta kulkeva jana leikkaa maanpintaa, niin varjostusta ei esiinny. Välkevaikutus laskettiin 1,5 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 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. Tässä selvityksessä väkelaskennassa ei ole käytetty tavanomaista maksimietäisyyttä, vaan on huomioitu turbiinin muuttuva lapaprofiili.

Väkelaskennassa Kokkonevan voimaloille on käytetty napakorkeutta 215 m ja roottorin halkaisijaa 170 m. Voimaloille on käytetty asiakkaan toimittamaa, turbiinityypin SG170 6,0 MW, lapaprofiilia. Limakon voimaloille on puolestaan käytetty napakorkeutta 144 m, roottorin halkaisijaa 131 m sekä turbiinityypin N131 3,0 MW teknisten tietojen pohjalta arvioitua lapaprofiilia. Limakossa käytössä olevissa voimaloissa lavan maksimihalkaisija tyven lähellä oli 3,94 m ja lavan halkaisijaksi 90 % etäisyydellä lavan kärkeä (117,9 m) arvioitiin olevan 1,10 m. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 4.

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 välkkeen kannalta efektiivisesti saman roottorin orientaation. Kullakin tuulen suunnalla laskettua välketuntimäärää on skaalattu Suomen tuuliatlaksesta [1] saatavan suuntasektorin esiintymisfrekvenssillä ja suuntakohtaisesta nopeusjakaumasta määritellyn turbiinin käyntinopeuksien ajallisella osuudella. Käynnistysnopeutta alemmissa tai pysäytysnopeutta korkeammissa

tuulissa turbiinit 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 turbiinin käyntinopeusvälille osuville tuulille on lueteltu taulukossa (Taulukko 3).

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

**Taulukko 3: Suuntasektorikohtaiset osuudet yli 3 m/s tuulennopeuksille Suomen tuuliatlaksen perusteella.**

Suuntasektori	0/180	30/210	60/240	90/270	120/300	150/330
<b>Yli 3 m/s osuus</b>	0,163	0,182	0,190	0,130	0,130	0,144

**Taulukko 4: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Seinäjoen Pelmaan sääasemalla.**

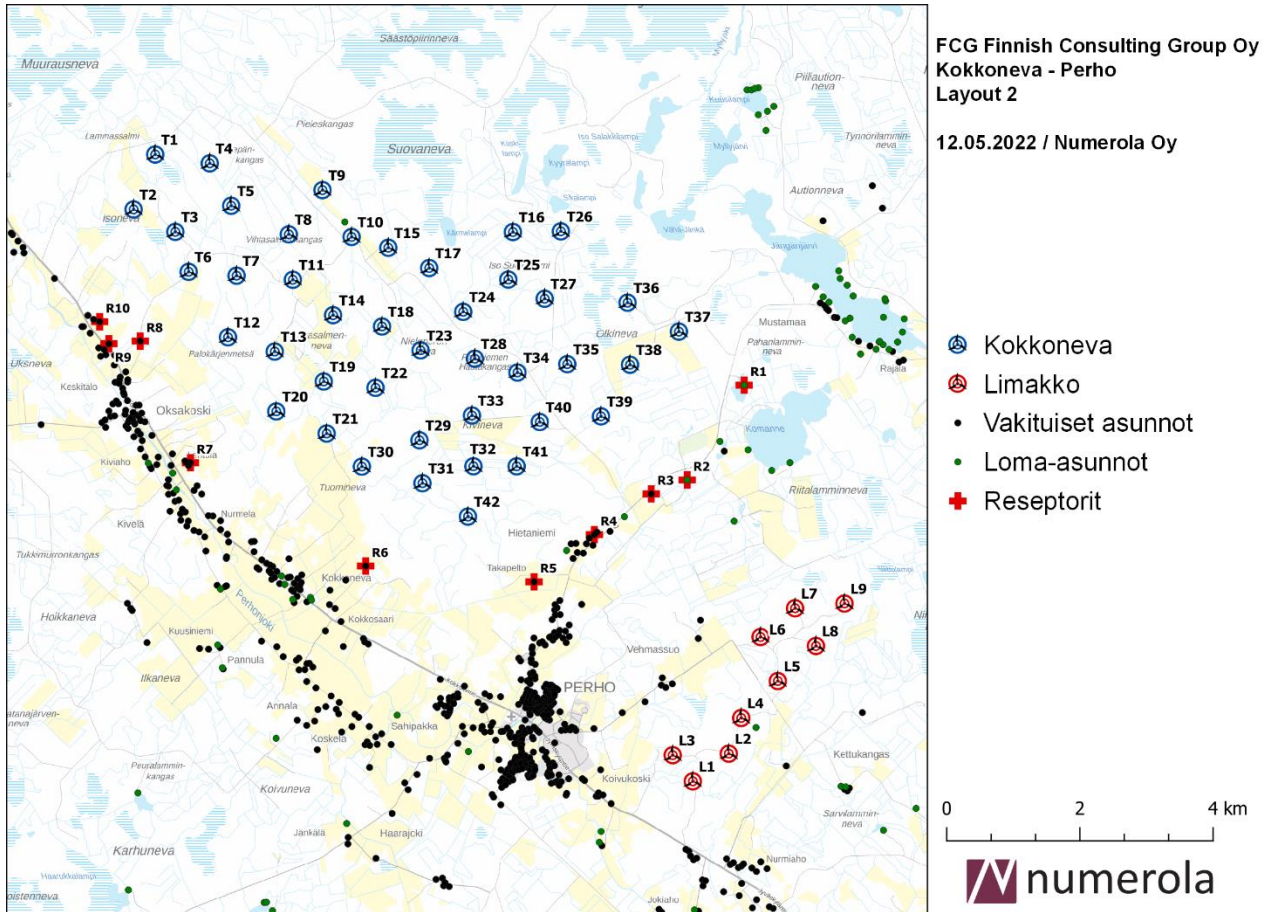
Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,168
Helmikuu	0,317
Maaliskuu	0,359
Huhtikuu	0,441
Toukokuu	0,488
Kesäkuu	0,452
Heinäkuu	0,466
Elokuu	0,424
Syyskuu	0,361
Lokakuu	0,254
Marraskuu	0,171
Joulukuu	0,199

Taulukossa (Taulukko 5) on määritelty Kokkonevan tuulivoimaloiden ympäristöstä kymmenen vertailukiinteistöä, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Pisteet sijaitsevat noin 1,2–1,6 km etäisyydellä lähimmistä voimaloista.

Alueen rakennustieto perustuu Maanmittauslaitoksen maastotietokannan aineistoon, jossa on eritelty alueen loma-asunnot ja vakituiset asunnot. Kyseisen tietokannan mukaan noin 150 m tuulivoimalan T10 pohjoispuolella sijaitsee yksi loma-asunnoksi luokiteltu kiinteistö. Asiakkaalta saatujen tietojen mukaan tämä luokitus ei todellisuudessa pidä paikkaansa. Tämän vuoksi kyseistä rakennusta ei valittu reseptoripisteeksi eikä sitä huomioitu välkevaikutusten jatkotarkasteluissa.

Taulukko 5: Vertailupisteiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	373464	7017127	177	Loma-asunto
R2	372608	7015705	180	Loma-asunto
R3	372068	7015496	173	Vakituinen asunto
R4	371215	7014885	171	Vakituinen asunto
R5	370309	7014177	161	Vakituinen asunto
R6	367781	7014414	158	Vakituinen asunto
R7	365150	7015963	158	Vakituinen asunto
R8	364396	7017788	155	Vakituinen asunto
R9	363925	7017749	155	Vakituinen asunto
R10	363787	7018079	155	Vakituinen asunto



Kuva 2: Vertailupisteiden paikat Kokkonevan tuulipuiston alueella.

## 2.2 Välkevaikutus

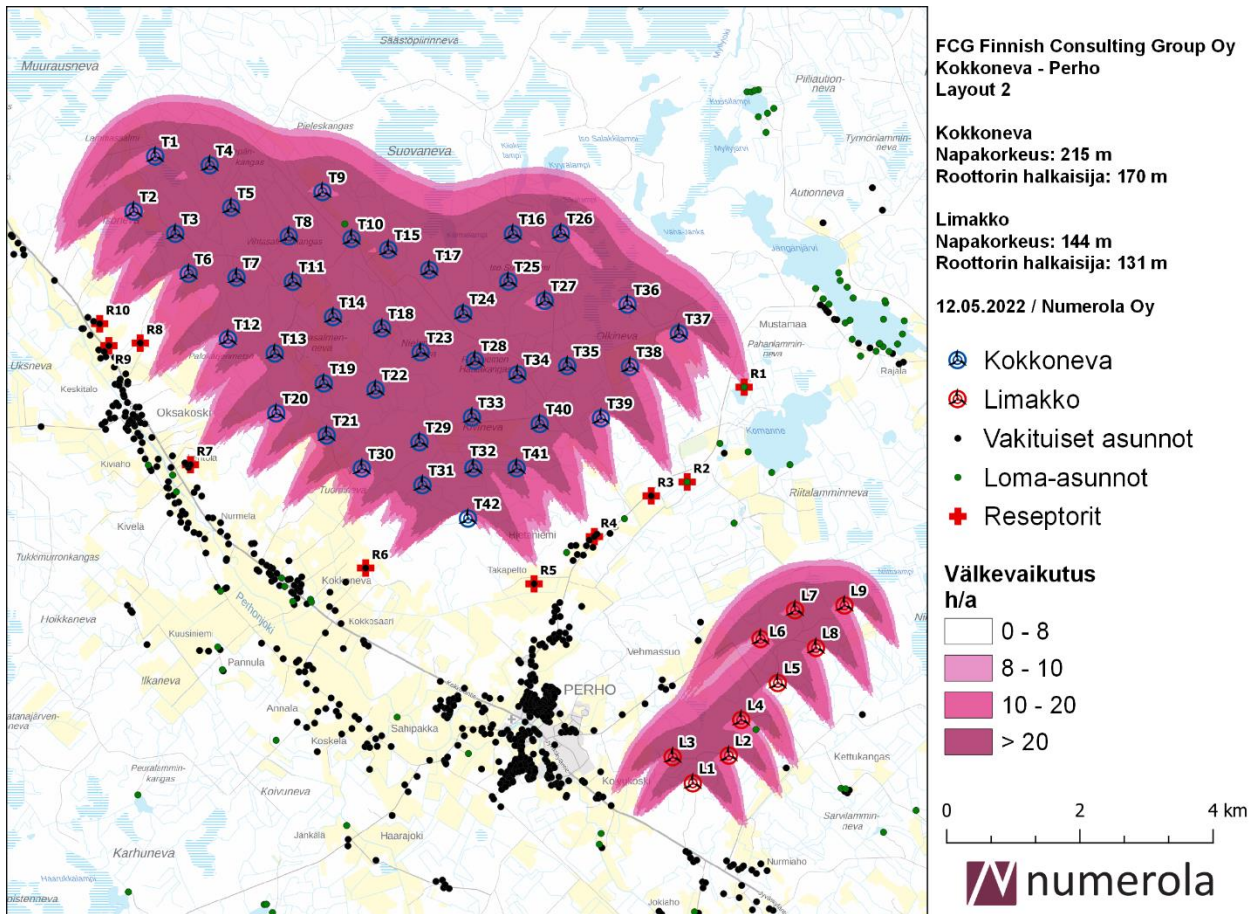
Mallinnetut arviot todellisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Suomen olosuhteissa puusto rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja.

Vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat vertailukiinteistöjen kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 6). Mallinnusten perusteella vuotuinen välkevaikutus jää alle 8 tunnin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja asuinrakennusten kohdalla. Myös päiväkohtainen välkeaika jää alle 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen loma-asuntojen ja vakituisten asuntojen kohdalla.

Suurin välkevaikutus kohdistuu kiinteistöön R1. Välkkeen tarkempi ajoittuminen tämän kiinteistön kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 7). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).

**Taulukko 6: Vuotuinen välkevaikutus ja päiväkohtainen maksimivälke reseptoreiden kohdilla.**

Reseptori	Välkevaikutus [h:min]	Päiväkohtainen maksimivälke [min]
R1	6:50	9
R2	2:28	6
R3	1:13	3
R4	4:54	6
R5	1:56	4
R6	2:03	5
R7	4:54	7
R8	5:41	7
R9	1:31	4
R10	5:33	7



Kuva 3: Tuulivoimaloiden aiheuttama välketuntien määrä ilman puuston vaikutusta.

Taulukko 7: Välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minutteina 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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Helmikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Maaliskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0:08
Huhtikuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0:25
Toukokuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	46	0	0:56
Kesäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	161	0	2:41
Heinäkuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	122	0	2:02
Elokuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	7	0	0:22
Syyskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	8	7	0	0	0:15
Lokakuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Marraskuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
Joulukuu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0:00
<b>Yhteensä</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:00</b>	<b>0:17</b>	<b>0:58</b>	<b>5:36</b>	<b>0:00</b>	<b>6:50</b>

### 3 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Perhon kunnan alueelle suunnitellun 42 tuulivoimalan Kokkonevan tuulivoimapuiston (Layout 2) ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Välkevaikutusten arvioinnissa otettiin huomioon Kokkonevan tuulivoimapuiston kaakkoispuolella sijaitseva Limakon tuulivoimapuisto. Kokkonevan tuulivoimaloiden välkevaikutusten arvio tehtiin roottorin halkaisijalla 170 m ja napakorkeudella 215 m. Limakon tuulivoimaloilla käytettiin roottorin halkaisijaa 131 m ja napakorkeutta 144 m.

Mallinnuksen mukaan vuotuinen välkevaikutus jää alle 8 tunnin ohjearvon alueen kaikkien vakituisten ja vapaa-ajan asuntojen kohdilla. Päiväkohtainen välkeaika alittaa 30 minuutin ohjearvon alueen kaikkien asuntojen kohdilla.

## 4 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 roottorikehien läpi näkyvällä taivaanpallon osuudella. Turbiinien yhteisvaikutus saadaan summaamalla turbiinikohtaiset välketunnit ottaen kuitenkin huomioon mahdolliset päällekkäisyydet roottorikehien peittämässä alueissa. Laskenta suoritetaan erikseen turbiinien eri orientaatioille, joita skaalataan suuntakohtaisilla tuulusuusosuuksilla.

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.

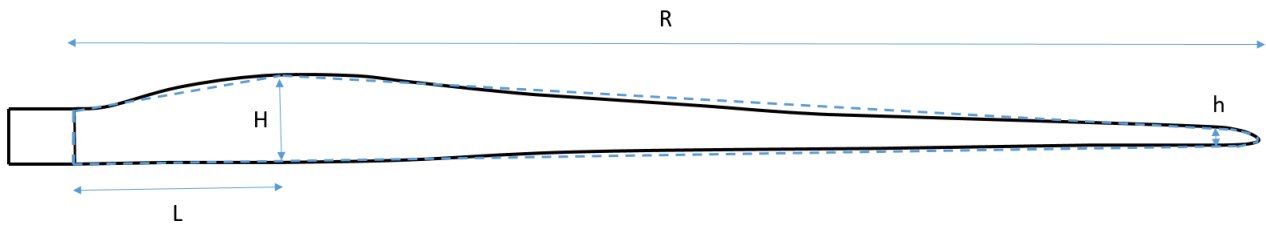
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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 4) 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 turbiinin keskimääräinen leveys on määritetty parametrien  $H$  ja  $h$  keskiarvona.



**Kuva 4: Turbiinin lavan yksinkertaistettu profiili.**

Tämän raportin väkelaskennassa käytetään turbiinivalmistajalta saatua 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.



## 5 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. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016.