

Liite 21

Laineen merituulivoimapaiston välkeselvitys



OX2 Finland Oy

Laineen merituulipuiston väikeselvitys

101017094-027

Tekijä
Mika Laitinen

pvm
17/04/2023

Osasto
Wind and Solar Power and New Energy Systems

Projektinnumero
101017094-027

E-mail
mika.laitinen@afry.com

Raporttiversio
002

Raportin tila
VALMIS

Asiakas

OX2 Finland Oy
Olli Takalammi

Laineen merituulipuiston välkeselvitys

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatiija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	22.12.2022/ Mika Laitinen, Senior Consultant	22.12.2022/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Alkuperäinen
002	17.04.2023/ Mika Laitinen, Senior Consultant	17.04.2023/ Erkki Heikkola, Senior Consultant	Lisätty toteutusvaihtoehto 2

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>.

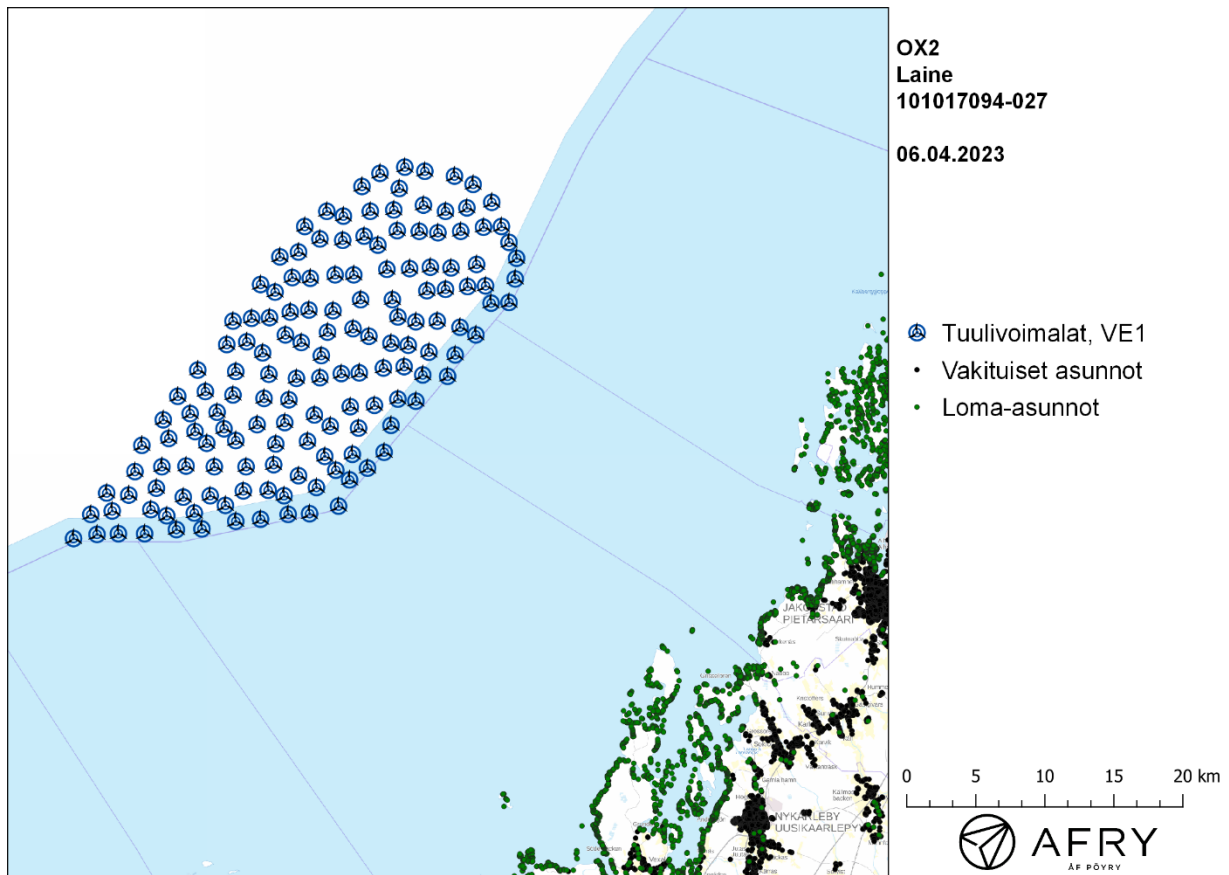
Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	10
2.1	Välkevaikutus	10
2.2	Välkkeen rajoittaminen	10
2.3	Arvioinnin epävarmuudet	10
2.4	Ohjearovot	11
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus	12
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	12
3.2	Välkevaikutus	14
4	Yhteenveto	18
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	19
6	Viitteet	21

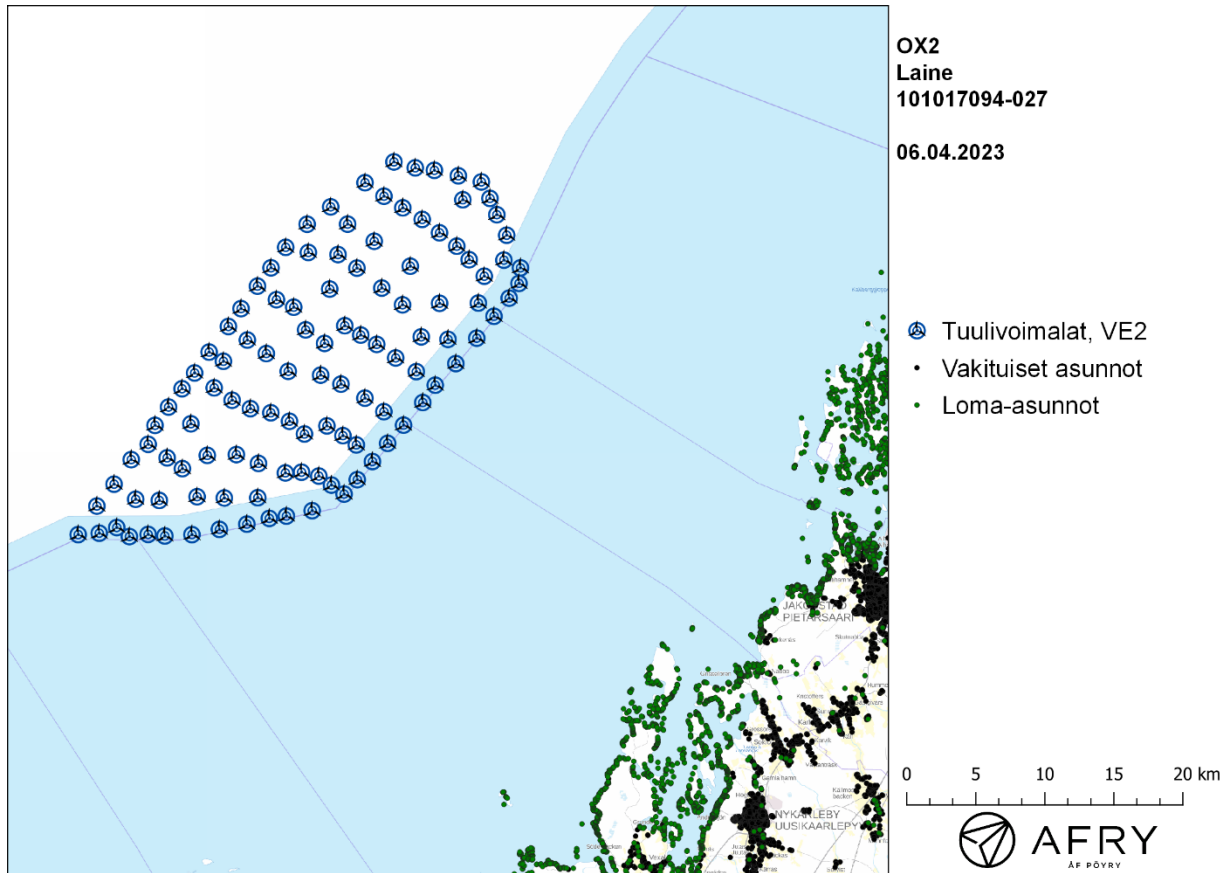
1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Laineen merituulipuiston aiheuttamaa välkevaikutusta laskennallisten mallien avulla. Laineen hankealue sijaitsee Pohjanlahdella Pietarsaaren edustalla, yli 20 km etäisyydellä Suomen maa-alueista. Voimaloiden etäisyys Ruotsin saariin on lähimmillään noin 28 km. Arviointi tehdään kahdelle toteutusvaihtoehdolle: vaihtoehdossa VE1 on 150 voimalaa ja vaihtoehdossa VE2 on 113 voimalaa. Voimaloiden sijainnit on esitetty karttapohjalla kuvissa (Kuva 1 ja Kuva 2) ja koordinaatit annettu taulukossa (Taulukko 1 ja Taulukko 2).

Mallinnuksissa voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 340 m.



Kuva 1: Tuulivoimaloiden sijainnit Laineen merituulipuiston vaihtoehdolla VE1.



Kuva 2: Tuulivoimaloiden sijainnit Laineen merituulipuiston vaihtoehdolla VE2.

Taulukko 1: Laineen vaihtoehdon VE1 merituulivoimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Voimala	E	N	Voimala	E	N
T1	255899	7098049	T76	251299	7085949
T2	241849	7090199	T77	257499	7091649
T3	228299	7071799	T78	236249	7074799
T4	245449	7090649	T79	244599	7076349
T5	245399	7073599	T80	252299	7098699
T6	248599	7090899	T81	237849	7082449
T7	237599	7072499	T82	240599	7075249
T8	255649	7091399	T83	256349	7094049
T9	247699	7083749	T84	249599	7076899
T10	250499	7098249	T85	245349	7088349
T11	233449	7072149	T86	244449	7083399
T12	241849	7073199	T87	260399	7092099
T13	233249	7078549	T88	238199	7074899
T14	253099	7081749	T89	251749	7094099
T15	258149	7090099	T90	244599	7092549
T16	231549	7072149	T91	232299	7074949
T17	239199	7079749	T92	254149	7091449
T18	243599	7080199	T93	252249	7084249
T19	259849	7088899	T94	249099	7089099
T20	237299	7083999	T95	247299	7076749
T21	250099	7081449	T96	260299	7090599
T22	252649	7091349	T97	239849	7082199
T23	253749	7098399	T98	248999	7083799
T24	244799	7085999	T99	242399	7075299
T25	247499	7074149	T100	249349	7093699
T26	246649	7095499	T101	251799	7081899
T27	235749	7072449	T102	245749	7080749
T28	240049	7073049	T103	244149	7090699
T29	254649	7087549	T104	253349	7094049
T30	237099	7079549	T105	233899	7073899
T31	248349	7081349	T106	245899	7075499
T32	257249	7097449	T107	242099	7081949
T33	257449	7086549	T108	247099	7088299
T34	229999	7072099	T109	251399	7089099
T35	242499	7087799	T110	246149	7083449
T36	243849	7073549	T111	257999	7094349
T37	241599	7080049	T112	255399	7083549
T38	251299	7079999	T113	239399	7085849
T39	250999	7091299	T114	234699	7076999
T40	249799	7095499	T115	239299	7074199
T41	251799	7087849	T116	247799	7093399



T42	235199	7079049	T117	250749	7084149
T43	245249	7078849	T118	229549	7073549
T44	241199	7087749	T119	243249	7092199
T45	258599	7096149	T120	256849	7090049
T46	248549	7086999	T121	243999	7088199
T47	241999	7085249	T122	255249	7089849
T48	238499	7076999	T123	249699	7086449
T49	259299	7094399	T124	259849	7093249
T50	250799	7078049	T125	234799	7080399
T51	253649	7095949	T126	235049	7073449
T52	256299	7087099	T127	248949	7079799
T53	236449	7077049	T128	254699	7093949
T54	232749	7076649	T129	243549	7074899
T55	245049	7094399	T130	251899	7097149
T56	242799	7077149	T131	248299	7076049
T57	248499	7077899	T132	249199	7097299
T58	256799	7095749	T133	253599	7083649
T59	246249	7085049	T134	231099	7073799
T60	239849	7087549	T135	240049	7078899
T61	240799	7076999	T136	258549	7088849
T62	253099	7087499	T137	236749	7080849
T63	251499	7095599	T138	240849	7086049
T64	247849	7095149	T139	250349	7093049
T65	230699	7075099	T140	237049	7073649
T66	246499	7077749	T141	242899	7089649
T67	240049	7083899	T142	246899	7079949
T68	234299	7075449	T143	242949	7078649
T69	255949	7085099	T144	238699	7080949
T70	246149	7093499	T145	253899	7089749
T71	254049	7085299	T146	243649	7086549
T72	247249	7090899	T147	237949	7078699
T73	255249	7095499	T148	246699	7086749
T74	242449	7083699	T149	243899	7081849
T75	235849	7082099	T150	252549	7085799

Taulukko 2: Laineen vaihtoehdon VE2 merituulivoimaloiden sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Voimala	E	N	Voimala	E	N
T1	246069	7076180	T58	257630	7088709
T2	259862	7089065	T59	256179	7097924
T3	252208	7079869	T60	242998	7088954
T4	236876	7071939	T61	238866	7072319
T5	237070	7083648	T62	247673	7082838
T6	241697	7077095	T63	232800	7074499
T7	249107	7086392	T64	252135	7088582
T8	228635	7071941	T65	245029	7079227
T9	254505	7082762	T66	240891	7086031
T10	247900	7074873	T67	248155	7094425
T11	239518	7087012	T68	236800	7079966
T12	233706	7078480	T69	253132	7083742
T13	243944	7080146	T70	248787	7078436
T14	258966	7095108	T71	243853	7083766
T15	257512	7086166	T72	258761	7087751
T16	240856	7072699	T73	240097	7077736
T17	232344	7071799	T74	247950	7087068
T18	243669	7092746	T75	245224	7094418
T19	246201	7083491	T76	229987	7074007
T20	252153	7095606	T77	258467	7096289
T21	260679	7091258	T78	252698	7091379
T22	231236	7075592	T79	241647	7074611
T23	249954	7077233	T80	250265	7085715
T24	250633	7089796	T81	253059	7098502
T25	237989	7077677	T82	238488	7082569
T26	241625	7089934	T83	232478	7077371
T27	254443	7098322	T84	253601	7081506
T28	239789	7081671	T85	242605	7091260
T29	246930	7095676	T86	246984	7075527
T30	243720	7073281	T87	237250	7074683
T31	249409	7081824	T88	259681	7093622
T32	256963	7091850	T89	255428	7086079
T33	246857	7089725	T90	248832	7091241
T34	235182	7081179	T91	233702	7071955
T35	257847	7097483	T92	240433	7088306
T36	234511	7074417	T93	253561	7094766
T37	251638	7084734	T94	251055	7078548
T38	242264	7085051	T95	242483	7073114
T39	247816	7079106	T96	242593	7080764
T40	239222	7074592	T97	250789	7096447
T41	250085	7093184	T98	236162	7082505



T42	254819	7088690	T99	258058	7090654
T43	251512	7098932	T100	244251	7088409
T44	230160	7072041	T101	234202	7079852
T45	245113	7086768	T102	256065	7092828
T46	255995	7084324	T103	244816	7076461
T47	243648	7076409	T104	253491	7086262
T48	238122	7085158	T105	231429	7072452
T49	254813	7093797	T106	260573	7090133
T50	234913	7071841	T107	248853	7075918
T51	241112	7081063	T108	247459	7092221
T52	245310	7092375	T109	246486	7085788
T53	259478	7091818	T110	236186	7076717
T54	245588	7073672	T111	239158	7084492
T55	249416	7097427	T112	256504	7096191
T56	235079	7077500	T113	246655	7079814
T57	250782	7080843			

2 Tuulivoimaloiden välke

2.1 Välkevaikutus

Välkevaikutuksella tarkoitetaan tilannetta, jossa Auringon paisteen ja tarkastelupisteen väliin jäävän voimalan lavat aiheuttavat välkkyvän varjon. Välke voi ulottua pisimmillään 1–3 km etäisyydelle voimalasta. Välkevaikutuksen etäisyyteen ja keston vaikuttavat tuulivoimalan korkeus ja roottorin halkaisija, vuoden- ja vuorokaudenaika, maaston muodot sekä näkyvyyttä rajoittavat tekijät kuten kasvillisuus ja pilvisuus.

Suomen sijainnin vuoksi yksittäisen tuulivoimalan välkevaikutus kohdistuu valtaosin voimalan pohjoispuolelle (päiväaika) sekä lounais- ja kaakkoispuolille (aamu- ja iltatimet). Suomessa voimala aiheuttaa välkevaikutusta eteläpuolelleen vain pohjoisen napapiirin pohjoispuolella.

Välkevaikutuksen laskenta voi perustua joko teoreettisen maksimivälkkeen tai todennäköisen tilanteen mallinnukseen:

- Teoreettisen maksimivälkkeen laskennassa oletetaan, että päiväaikaan Aurinko paistaa jatkuvasti, tuulivoimalan roottori pyörii jatkuvasti, ja roottori on aina kohtisuorassa Aurinkoa kohden.
- Todennäköisen tilanteen mallinnuksessa otetaan huomioon paikallinen tilastollinen aineisto auringonpaisteen määrästä ja ajoittumisesta sekä tuulen suuntien ja nopeuksien jakautumisesta.

Tämän selvityksen väkelaskenta on tehty mallintamalla sekä todennäköinen välkeaika että teoreettinen maksimivälke.

2.2 Välkkeen rajoittaminen

Välkevaikutusta voidaan vähentää voimalakohtaisella välkkeen hallintatyökalulla (shadow flicker protection system), joka sisältää valoanturin ja välkkeenhallintasovelluksen. Työkalun avulla voimala voidaan pysäyttää joko havaitun auringonpaisteen perusteella ja/tai haluttuina vuoden- ja kellon-aikoina. Pysäytetty voimala ei aiheuta välkettä.

2.3 Arvioinnin epävarmuudet

Mallinnettu välkevaikutus edustaa todennäköistä tilannetta perustuen auringonpaisteen ja tuulisuuden tilastolliseen aineistoon. Yksittäisen vuoden sääolosuhteet saattavat poiketa merkittävästi keskimääräisistä olosuhteista, jolloin vuotuinen välkevaikutus voi poiketa mallinnetusta arvosta.

Puusto voi rajoittaa merkittävästi näkyvyyttä turbiineille ja vähentää vuotuista välkevaikutusta. Puuston näkyvyyttä peittävä vaikutus vaihtelee kuitenkin vuosien ja vuodenaikojen suhteen, mikä lisää arvioinnin epävarmuutta. Mallinnuksen tuloksiin vaikuttaa myös käytettävien tausta-aineistojen tarkkuus ja mallintamisessa on tehtävä yleistyksiä liittyen puuston tiheyteen ja korkeuteen.

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

2.4 Ohjearvot

Tuulivoimaloiden välkevaikutukselle ei ole Suomessa määritelty ohjearvoja. Ympäristöministeriön ohjeissa tuulivoimapuiston suunnitteluun suositellaan käytettäväksi muiden maiden suosituksia välkemäärien osalta [1]. Tässä selvityksessä välkeajoja verrataan Ruotsin, Tanskan ja Saksan ohjearvoihin.

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

3 Tuulivoimakohteen välkemallinnus

3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola mallinnusohjelmistolla. Ohjelmiston laskentamalli huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoimalueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä 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 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 ihmissilmän 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 voimaloille on käytetty napakorkeutta 200 m ja roottorin halkaisijaa 340 m. Voimaloiden lavan muodolle on käytetty profiilia, jonka maksimileveys on 8,6 m 10 % etäisyydellä lavan tyvestä ja joka kapenee lineaarisesti arvoon 3,4 m 90 % etäisyydellä lavan tyvestä. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Todelliseen välkevaikutukseen vaikuttavat turbiinien käyttöaste, puusto ja paikallinen säätä (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 tuuliatlaksista [3] 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 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 maksimipaistetuntien määrästä [4]. Sääaseman mittausten perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 4). Suunta-kohtaisesti 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
Yli 3 m/s osuus	0,156	0,256	0,196	0,118	0,092	0,114

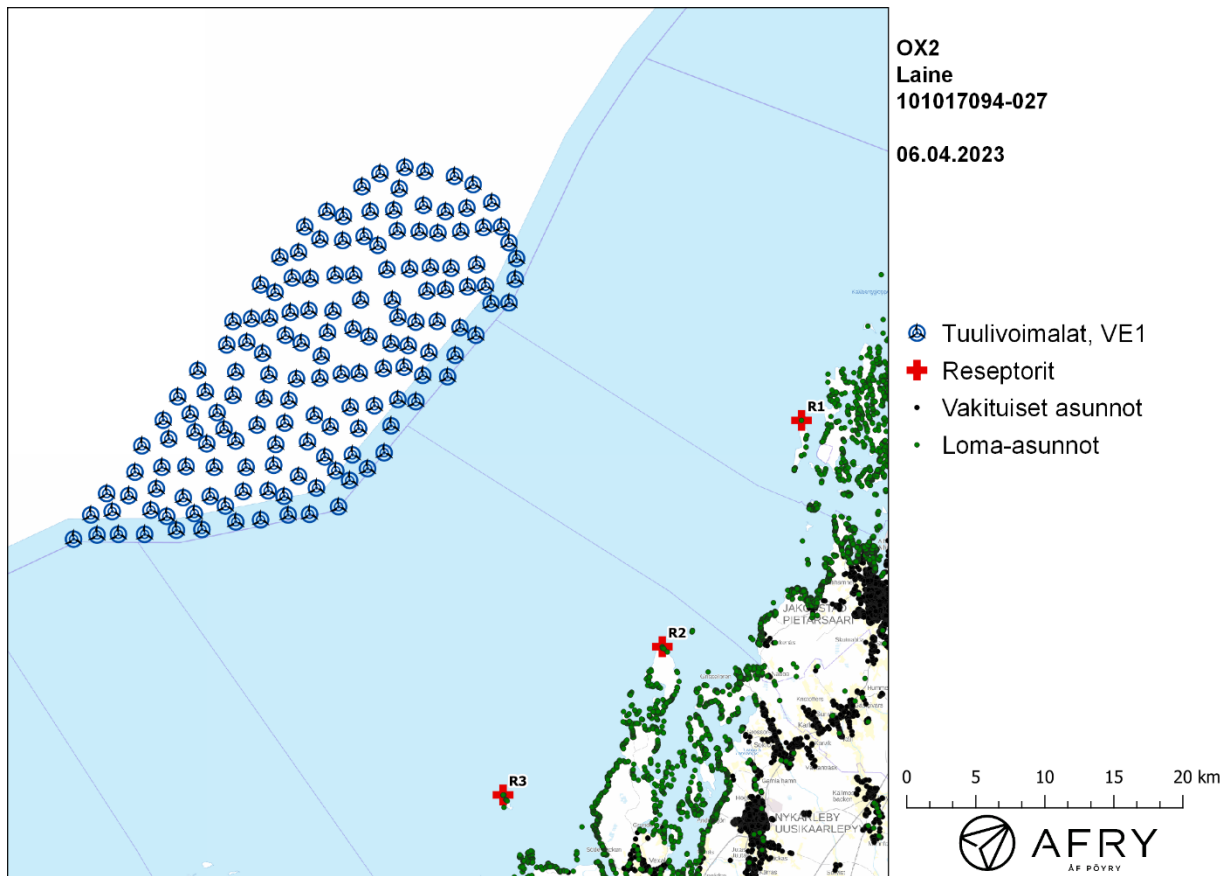
Taulukko 4: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Pelmaan sääasemalla.

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	0,119

Taulukossa (Taulukko 5) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 3 vertailukiinteistöä, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Kiinteistöjen sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 3). Kiinteistöt sijaitsevat lähimmillään 22–26 km etäisyydellä voimaloista. Kartoissa näkyvät vakituiset ja vapaa-ajan asuinrakennukset on ladattu Maanmittauslaitoksen maastotietokannasta.

Taulukko 5: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	281049	7080377	2,0	loma-asunto
R2	270962	7064006	1,4	loma-asunto
R3	259427	7053286	2,4	loma-asunto



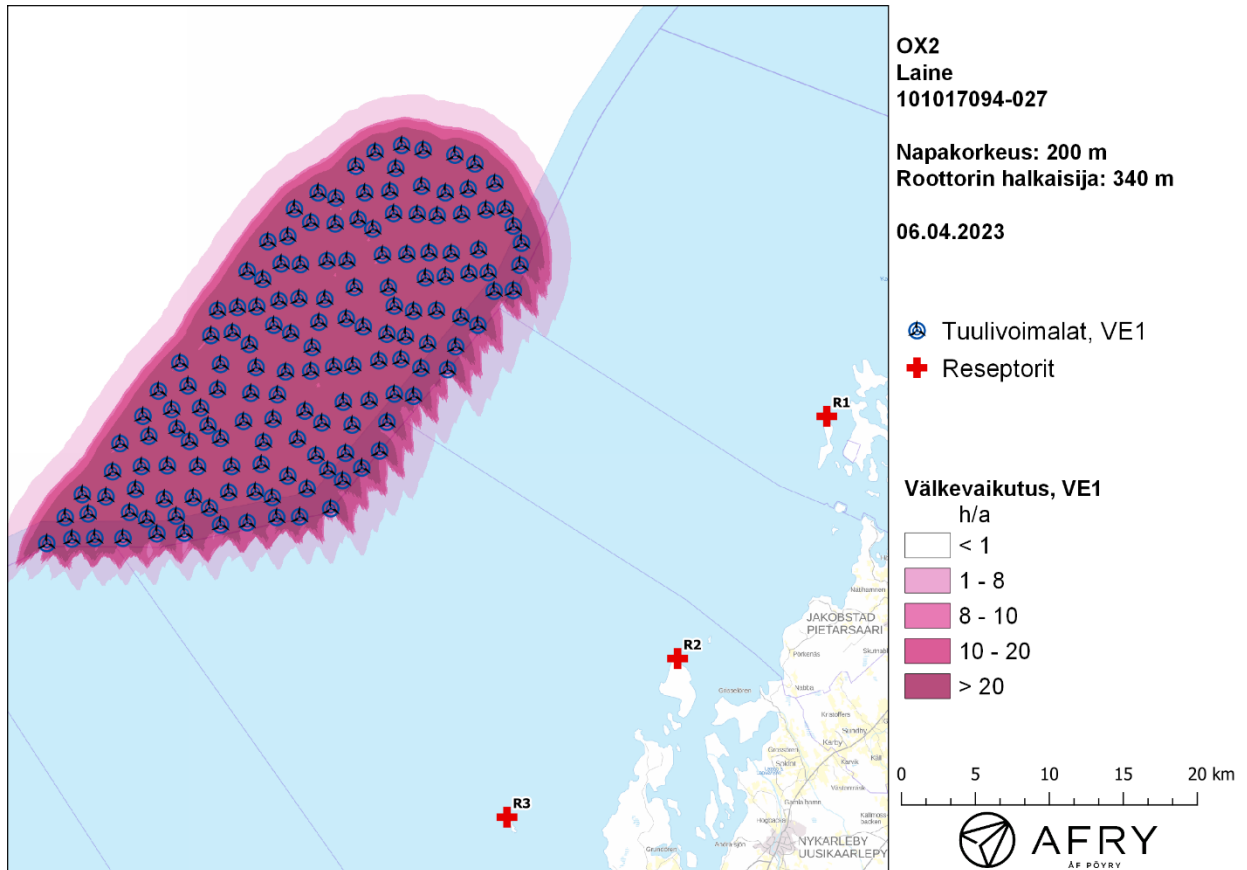
Kuva 3: Reseptoreiden paikat Laineen merituulipuiston hankealueella.

3.2 Välkevaikutus

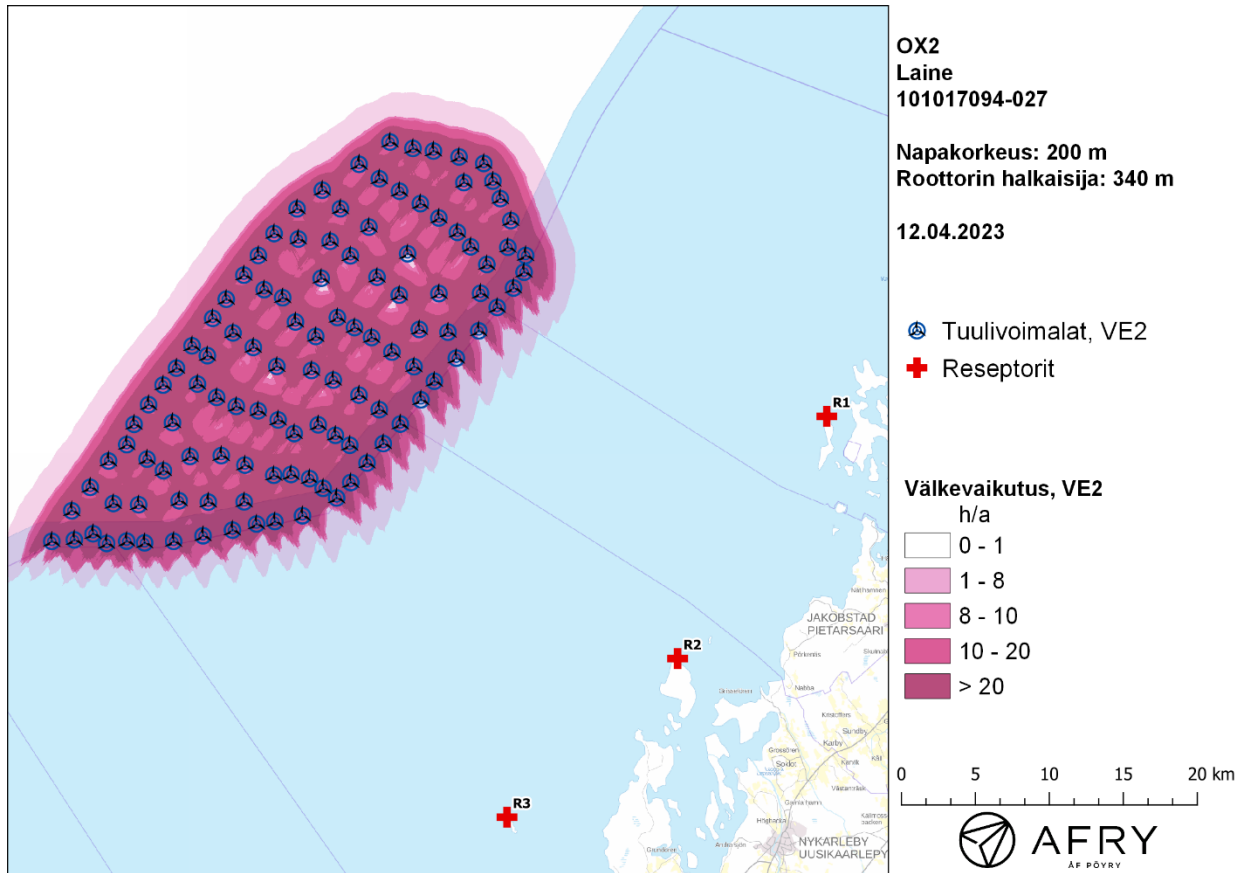
Mallinnetut arviot todennäköisen välkeajan vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvina (Kuva 4 ja Kuva 5). Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona Maanmittauslaitoksen maastotietokannan sisältämiä tietoja.

Taulukkoon (Taulukko 6) on listattu todennäköinen välkeevaikutus reseptoreiden kohdilla molemmille toteutusvaihtoehdoille, sekä vuotuisena tuntimääränä että suurimpana päiväkohtaisena arvona. Taulukossa (Taulukko 7) on lueteltu vastaavat reseptorikohtaiset välkeajat teoreettiselle maksimivälkkeelle.

Mallinnusten perusteella Laineen merituulivoimaloista ei aiheudu välkevaikutusta alueen asutukselle. Voimaloiden välkevaikutus rajoittuu merelle, eikä ulotu Suomen tai Ruotsin asutukseen saakka. Koska välkevaikutuksen alueella ei ole asutusta, välkevaikutuksen ohjeavrot eivät ylitä.



Kuva 4: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus Laineen merituulipuiston vaihtoehdolla VE1.



Kuva 5: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus Laineen merituulipuiston vaihtoehdolla VE2.

Taulukko 6: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus ja suurin päiväkohtainen välkeaika reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	VE1 todennäköinen vuotuinen välke	VE1 todennäköinen päiväkohtainen maksimi	VE2 todennäköinen vuotuinen välke	VE2 todennäköinen päiväkohtainen maksimi
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

Taulukko 7: Teoreettisen maksimivälkkeen vuotuinen määrä ja suurin päiväkohtainen arvo reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	VE1 teoreettinen vuotuinen maksimivälke	VE1 teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke	VE2 teoreettinen vuotuinen maksimivälke	VE2 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

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Perämerelle suunnitellun Laineen merituulipuiston ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Vaikutusten arvio on tehty 150 voimalan toteutusvaihtoehdolle VE1 ja 113 voimalan vaihtoehdolle VE2.

Mallinnusten perusteella Laineen voimaloista ei aiheudu välkevaikutusta asutukselle. Laineen voimaloiden välkevaikutus rajoittuu merialueille, eikä välkevaikutusta esiinny ollenkaan Suomen tai Ruotsin maa-alueilla.

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 roottorikehien 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.

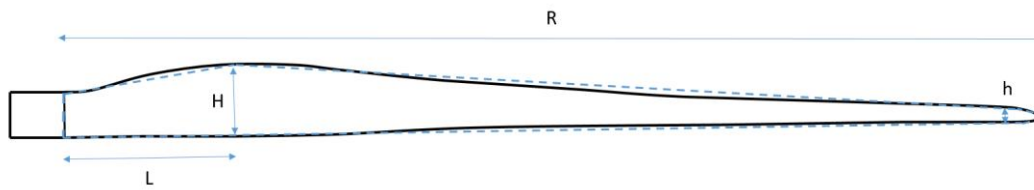
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmän havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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 6) 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 6: Turbiinin lavan yksinkertaistettu profiili.

Tämän raportin väkelaskennassa lavan leveys on mallinnettu kahteen leveysarvoon H ja h perustuvalla lineaarisella approksimaatiolla. 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] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016. Ympäristöministeriö, 2016.
- [2] Boverket: Vindkraftshandboken, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.
- [3] B. Tammelin et al.: Production of the Finnish Wind atlas. Wind Energy, 2011.
- [4] P. Pirinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2012:1.