



Semecon Oy

Malakankaan ja läheisten tuulivoimapuistojen yhteisvaikutusten välkeselvitys

101022365-001, 31.10.2023

Tekijä
AFRY Finland Oy
Juulianna Lähteinen

E-mail
juulianna.lahteinen@afry.com

Osasto
Wind and Solar Finland

Raporttiversio
001

Asiakas
Semecon Oy
Olli Malkamäki

Päivämäärä
31/10/2023

Projektinumero
101022365-001

Raportin tila
LUONNOS

Malakakankaan ja lähteisten tuulivoimapuistojen yhteisvaikutusten välkesselvitys

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	31.10.2023/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	31.10.2023/ Mika Laitinen, Senior Consultant	Alkuperäinen

Aineistojen käyttöoikeudet

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

Sisällysluettelo

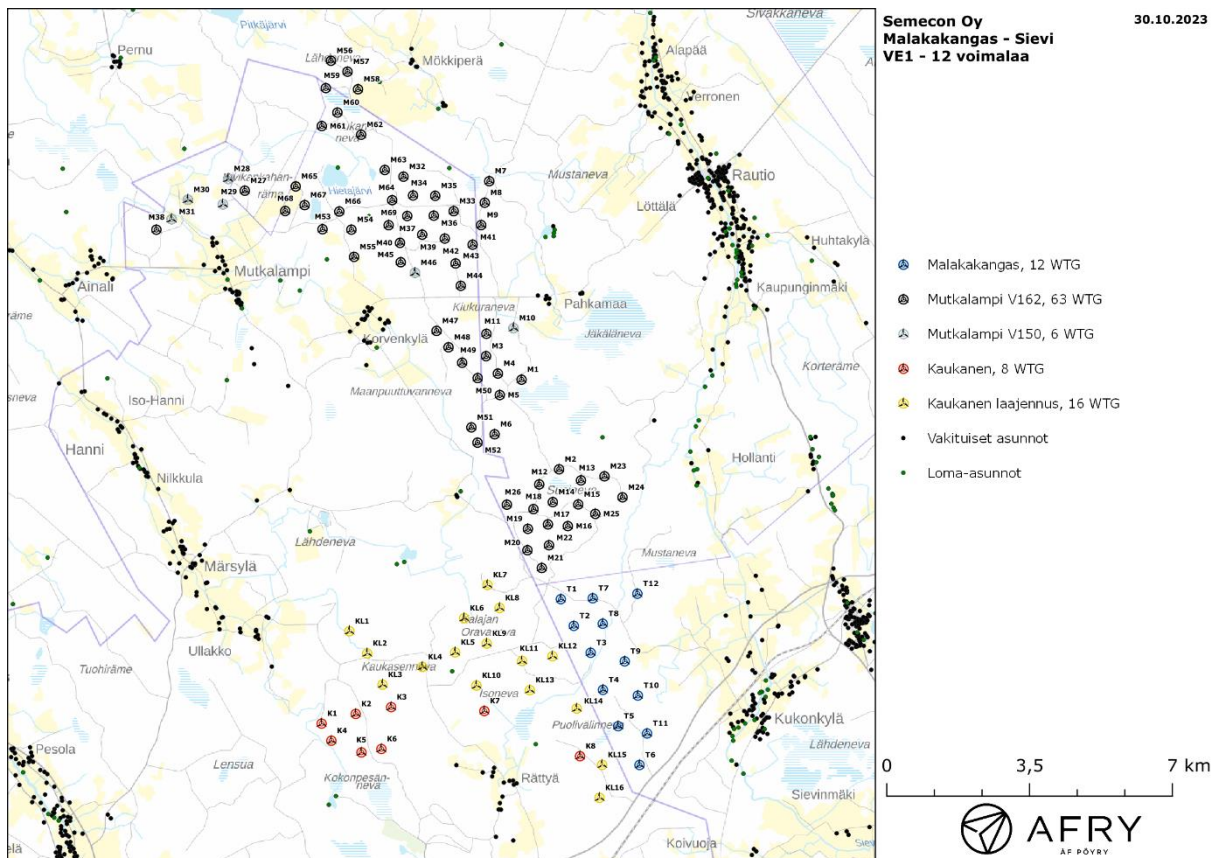
1	Johdanto	4
2	Tuulivoimaloiden välke	7
2.1	Välkevaikutus.....	7
2.2	Välkkeen rajoittaminen.....	7
2.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	7
2.4	Ohjeavot	8
3	Välkemallinnus.....	9
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	9
3.2	Malakakankaan ja naapuripuistojen todennäköinen välkevaikutus.....	12
3.3	Malakakankaan ja naapuripuistojen teoreettinen välkevaikutus	14
4	Yhteenveto	16
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	17
6	Viitteet.....	19

1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Sievin kunnan alueelle suunnitellun Malakakankaan tuulivoimapuiston sekä lähteisten toiminnassa ja suunnitteilla olevien tuulivoimapuistojen väkkeen yhteisvaikutuksia laskennallisten mallien avulla. Tuulivoimapuistojen väkkeen yhteisvaikutukset ovat suurimmat Malakakankaan sijoitussuunnitelmalla VE1, joten riittää tarkastella väkkeen yhteisvaikutuksia pelkästään Malakakankaan 12 voimalan sijoitussuunnitelmalla VE1. Malakakankaan välittömässä läheisyydessä on kaksi toiminnassa olevaa tuulivoimapuistoa sekä suunnitteilla yksi tuulivoimapuisto, jotka huomioidaan selvityksen mallinnuksissa:

- Mutkalampi, 69 voimalaa (toiminnassa)
- Kaukanen, 8 voimalaa (toiminnassa)
- Kaukanen laajennus, 16 voimalaa (suunnitteilla)

Mutkalammin lähimmät voimalat sijaitsevat n. 900 metrin etäisyydellä, Kaukasen lähimmät voimalat n. 1,2 km etäisyydellä ja Kaukasen laajennukseen suunnitellut voimalat lähimmillään n. 800 metrin etäisyydellä Malakakankaan voimaloista. Kaukasen laajennuksen voimalat ovat vielä suunnitteilla, joten voimaloiden sijainnit voivat vielä muuttua kyseisen hankkeen edetessä. Tässä selvityksessä Kaukasen laajennukselle on käytetty 25.09.2023 saatua layout suunnitelmaa. Voimaloiden sijainnit on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukoissa (Taulukko 1-Taulukko 4).



Kuva 1: Malakakankaan sekä lähteisten tuulivoimapuistojen voimaloiden sijainnit.

Taulukko 1: Malakakankaan tuulivoimaloiden (VE1 - 12 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla. Malakakankaan VE2 suunnitelmasta on poistettu voimat T5, T6 ja T10-T12.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	360035	7097920	85
T2	360353	7097266	85
T3	360766	7096606	85
T4	361067	7095697	88
T5	361440	7094807	89
T6	361964	7093856	90
T7	360817	7097941	76
T8	361063	7097318	77
T9	361601	7096396	85
T10	361923	7095557	82
T11	362150	7094628	84
T12	361911	7098053	76

Taulukko 2: Kaukasen tuulivoimaloiden (8 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
K1	358161	7095179	82
K2	355877	7095274	103
K3	355009	7095107	105
K4	354172	7094870	96
K5	354412	7094451	107
K6	355147	7094164	107
K7	355636	7094247	89
K8	360505	7094071	97

Taulukko 3: Kaukasen laajennuksen tuulivoimaloiden (16 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla. Sijoitussuunnitelma on 25.09.2023 saadun tiedon mukainen.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
KL1	354853	7097134	79
KL2	355289	7096590	91
KL3	355664	7095824	96
KL4	356641	7096260	103
KL5	357445	7096615	92
KL6	357666	7097455	84
KL7	358235	7098268	91
KL8	358534	7097703	87
KL9	358219	7096833	85
KL10	357968	7095802	90
KL11	359085	7096404	86
KL12	359831	7096523	84

KL13	359277	7095690	86
KL14	360424	7095240	83
KL15	361047	7093860	88
KL16	360983	7093052	92

Taulukko 4: Mutkalammen tuulivoimaloiden (69 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]	Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
M1	359072	7103298	78	M36	356921	7107319	62
M2	359993	7101103	76	M37	356270	7107310	57
M3	358202	7103875	80	M38	350122	7106975	40
M4	358493	7103449	80	M39	356637	7106853	62
M5	358539	7102922	76	M40	356094	7106652	58
M6	358413	7101960	69	M41	357874	7106607	63
M7	358281	7108163	61	M42	357191	7106757	61
M8	358170	7107635	60	M43	357455	7106147	64
M9	358082	7107087	67	M44	357583	7105600	71
M10	358877	7104562	68	M45	356111	7106177	58
M11	358211	7104423	76	M46	356460	7105920	65
M12	359506	7100732	74	M47	356988	7104494	68
M13	360529	7100831	84	M48	357283	7104093	71
M14	359839	7100299	75	M49	357616	7103714	67
M15	360463	7100241	76	M50	357998	7103337	67
M16	360207	7099710	72	M51	357843	7102130	76
M17	359720	7099752	78	M52	357993	7101756	69
M18	359364	7100127	76	M53	354195	7106985	54
M19	359228	7099643	76	M54	354902	7106976	55
M20	359217	7099119	79	M55	354968	7106309	55
M21	359569	7098683	86	M56	354400	7111115	48
M22	359746	7099241	83	M57	354806	7110847	49
M23	361104	7100930	82	M58	355065	7110416	51
M24	361547	7100416	72	M59	354275	7110444	53
M25	360880	7100011	75	M60	354560	7109846	56
M26	358713	7100236	70	M61	354176	7109514	51
M27	352290	7107930	48	M62	355140	7109301	51
M28	351884	7108222	47	M63	355721	7108438	58
M29	351753	7107598	45	M64	355902	7107698	59
M30	350894	7107708	43	M65	353538	7108035	51
M31	350494	7107232	40	M66	354605	7107420	53
M32	356178	7108274	57	M67	353757	7107576	50
M33	357410	7107428	65	M68	353280	7107433	50
M34	356413	7107814	58	M69	355816	7107084	56
M35	356956	7107805	63				

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 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 Pelmaan sääasemalta, josta etäisyys Malakakankaan hankealueeseen on noin 140 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]. Tanskassa on määritetty vuotuisen välketuntimäärän suositusarvoksi 10 h. Ruotsissa vastaava suositusarvo on 8 h ja korkeintaan 30 min päivässä [2]. Näiden ohjearvojen käyttö edellyttää todennäköisen välketilanteen laskentaa. Mikäli välketuntien arvioinnissa käytetään laskennallista maksimituntimäärää, voidaan vuotuisen välkevaikutuksen ohjearvona käyttää Saksassa käytettävää 30 h raja-arvoa. Tässä raportissa mallinnettujen välketasojen arvioinnissa käytetään Ruotsin suunnitteluohjeissa annettuja ohjearvoja todennäköisen välkkeen tapauksessa. Teoreettisen maksimivälkkeen arvioinnissa käytetään Saksan 30 tunnin raja-arvoa vuodessa ja 30 minuuttia päivässä.

3 Välkemallinnus

3.1 Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto

Tuulivoimaloiden aiheuttama välkevaikutus (shadow flicker) arvioitiin AFRY Numerola -mallinnusohjelmistolla, joka huomioi auringon paikan vuoden eri aikoina, tuulivoima-alueen ja sen ympäristön maastonmuodot sekä tuuliturbiinien dimensiot. Laskennan tuloksena saadaan 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 2 m korkeudelle. Auringonpaistekulman rajana horisontista käytettiin kolmea astetta, jonka alle menevää säteilyä ei oteta huomioon varjostuksessa.

Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, että välkevaikutus huomioidaan mikäli lapa peittää vähintään 20 % Auringosta. Käytännössä tämä asettaa lavan leveydestä riippuvan maksimietäisyyden yksittäisen turbiinin aiheuttamalle välkevaikutukselle, eikä sen ulkopuolella välkevaikutusta ole.

Yleensä väkelaskennan maksimietäisyyden laskenta perustuu lavan keskimääräiseen leveyteen, joka määrää maksimietäisyyden. Käytännössä turbiinin lapa ei ole 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 Malakakankaan ja Kaukasen laajennuksen voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 172 m. Voimaloiden lapaprofiili on arvioitu voimalatyyppin Vestas V162 valmistajan ilmoittamalla lavan profiilitiedolla, joka on skaalattu lavan pituuden ja leveyden suhteen vastaamaan 172 metrin roottorin halkaisijaa. Kaukasen voimaloille ja osalle Mutkalammin voimaloista on käytetty roottorin halkaisijaa 162 m ja Vestas V162 valmistajan ilmoittamaa lavan profiilitietoa. V150 turbiinityypillä oleville Mutkalammin voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 150 m ja Vestas V150 valmistajan ilmoittamaa lavan profiilitietoa. Taulukossa (Taulukko 5) on esitetty mallinnuksessa käytetyt voimatiedot. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Taulukko 5: Mallinuksissa tuulivoimapuistoille käytetyt voimalamitat.

Tuulivoimapuisto	Voimaloiden lukumäärä	Napakorkeus	Roottorin halkaisija	Kokonaiskorkeus
Malakakangas	12	214 m	172 m	300 m
Kaukanen laajennus	16	214 m	172 m	300 m
Mutkalampi	6	145 m	150 m	220 m
Mutkalampi	63	139 m	162 m	220 m
Kaukanen	8	149 m	162 m	230 m

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 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 6).

Paikallinen pilvisuus on huomioitu skaalaamalla eri roottoriorientaatioilla laskettuja varjostusaikoja Pelmaan sääasemalta mitattujen auringonpaistetuntien suhteellisella osuudella teoreettisesta maksimipaistetuntien määrästä [3]. Sääaseman mittauksen perusteella lasketut kuukausittaiset auringonpaisteen todennäköisyydet on koottuna taulukkoon (Taulukko 7). Suuntakohtaisesti skaalatut välketuntimäärät yhteen laskien saadaan arvio todellisesta, säätilan huomioonottavasta välketuntimäärästä tarkastelualueella.

Taulukko 6: Suuntasektorikohtaiset 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	0,170	0,192	0,177	0,125	0,117	0,144

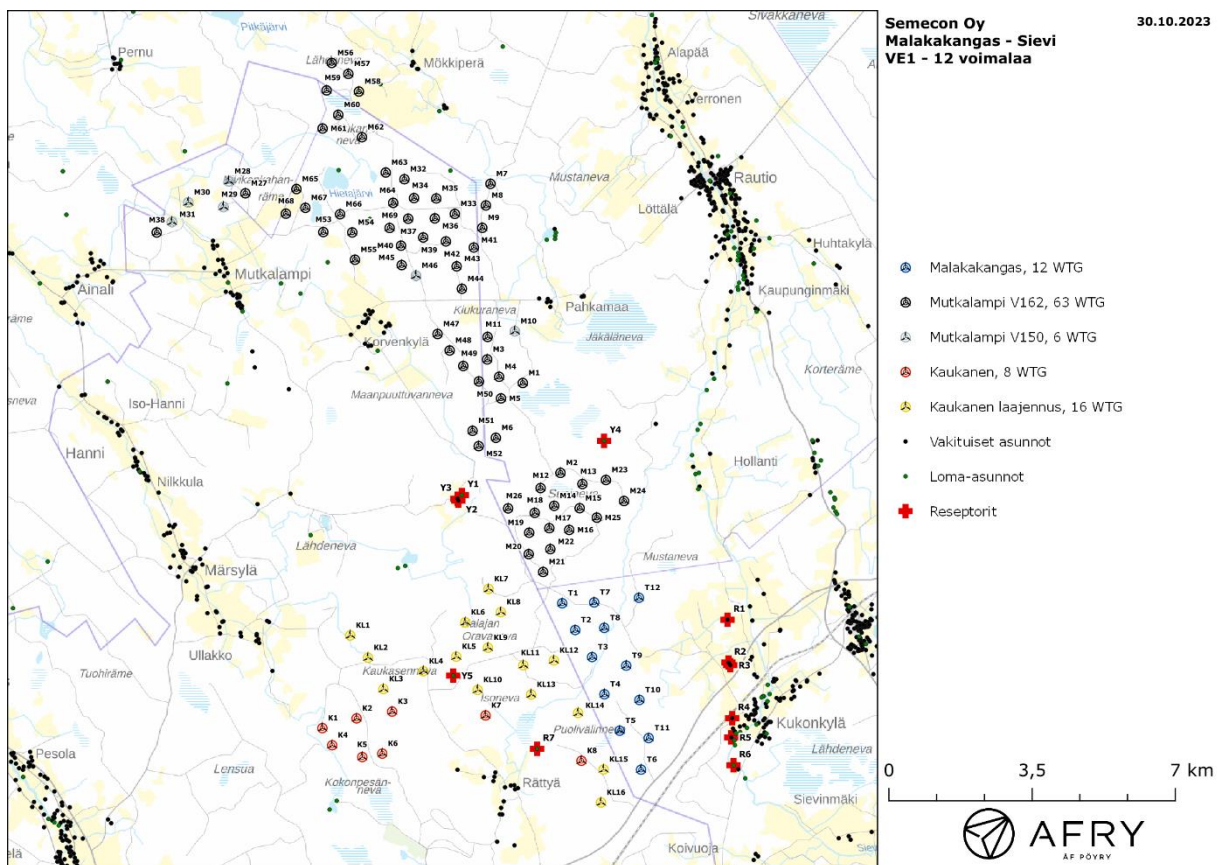
Taulukko 7: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Pelmaan sääasemalla.

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 8) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 12 vertailurakennusta, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Lähimmät rakennukset sijaitsevan noin 2-2,4 km etäisyydellä voimaloista.

Taulukko 8: Vertailupisteiden koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	364080	7097513	69	vakituinen asuinrakennus
R2	364100	7096469	74	vakituinen asuinrakennus
R3	364147	7096405	72	vakituinen asuinrakennus
R4	364191	7095111	74	vakituinen asuinrakennus
R5	364169	7094643	75	vakituinen asuinrakennus
R6	364223	7093961	74	lomarakennus
R7	359422	7094363	88	lomarakennus
Y1	357583	7100560	71	lomarakennus
Y2	357498	7100421	75	vakituinen asuinrakennus
Y3	357477	7100469	72	vakituinen asuinrakennus
Y4	361058	7101884	78	lomarakennus
Y5	357374	7096150	104	lomarakennus



Kuva 2: Reseptoreiden paikat tuulivoimapuiston hankealueella.

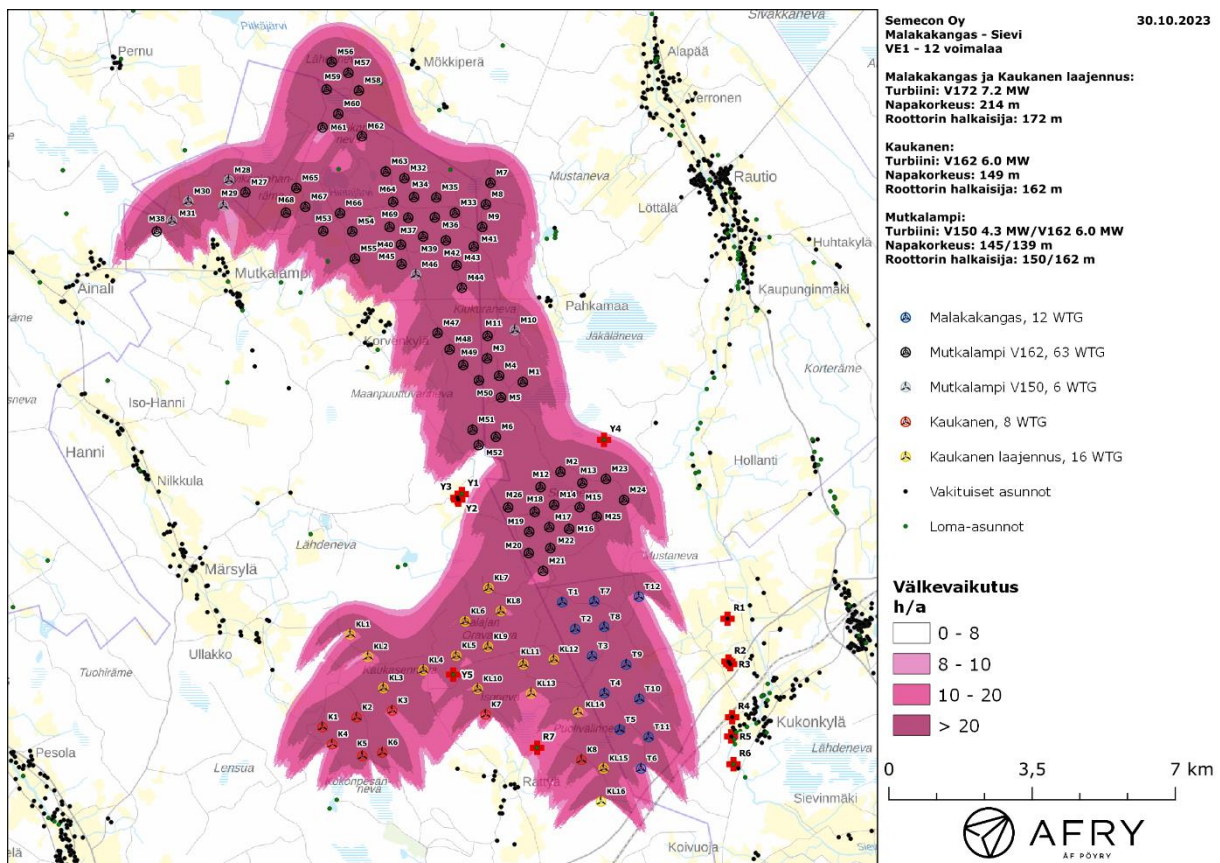
3.2 Malakakankaan ja naapuripuistojen todennäköinen välkevaikutus

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

Yhteisvaikutusmallinnuksen perusteella vuotuinen todennäköinen välkevaikutus ylittyy kolmessa reseptoripisteessä. Reseptorien Y4 ja Y5 kohdalla Malakakankaan voimaloista ei aiheudu välkevaikutuksia vaan ohjearvon ylitykset aiheutuvat naapuripuistojen voimaloista.

Reseptorin R7 kohdalla todennäköisen välkkeen yhteisvaikutukset ovat 11 h ja 42 min. Malakakankaan voimaloista aiheutuu kyseiseen reseptoripisteeseen vuotuista todennäköistä välkevaikutusta 2 h ja 30 min. Välkkeen 8 tunnin ohjearvo ylittyy siis jo ennen Malakakankaan voimaloiden huomiointia. Päiväkohtainen todennäköinen välkeaika alittaa 30 minuutin ohjearvon kaikkien alueen asuntojen kohdalla. Vuotuiset todennäköiset välkevaikutusajat ja suurimmat päiväkohtaiset maksimivälkkeet reseptorien kohdalla on lueteltu taulukossa (Taulukko 9).

Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptorin R7 kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 10). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talvi-aika).



Kuva 3: Todennäköinen välkevaikutus, kun mallinnuksessa huomioidaan Malakakankaan vaihtoehto VE1, Mutkalammi, Kaukanen sekä Kaukanen laajennus.

Taulukko 9: Vuotuinen todennäköinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptoreiden kohdalla.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkeika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeika [min]
R1	0:20	2
R2	0:12	2
R3	0:11	2
R4	0:39	3
R5	0:53	3
R6	0:39	2
R7	11:42	10
Y1	4:59	9
Y2	4:20	8
Y3	4:01	8
Y4	11:23	15
Y5	31:56	19

Taulukko 10: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto minuutteina reseptorin R7 kohdalla.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:11	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:11
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	1:49	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:49
Huhtikuu	0:00	0:00	0:17	0:12	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:29
Toukokuu	0:00	0:15	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:24	0:55	0:00	1:35
Kesäkuu	0:00	1:20	0:17	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:08	0:00	2:44
Heinäkuu	0:00	0:11	0:42	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:16	0:00	2:09
Elokuu	0:00	0:00	0:16	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:32	0:00	0:49
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	1:48	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:48
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:10	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:10
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	1:45	1:32	3:49	0:20	0:00	0:00	0:00	0:00	0:24	3:51	0:00	11:42

3.3 Malakakankaan ja naapuripuistojen teoreettinen välkevaikutus

Teoreettisen maksimivälkkeen vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 11). Yhteisvaikutusmallinnuksen perusteella teoreettinen vuotuinen välkevaikutus ylittyy kolmen reseptoripisteen kohdalla. Mallinnuksen perusteella Malakakankaan voimat eivät aiheuta teoreettista välkettä reseptoripisteisiin Y4 ja Y5, joissa 30 tunnin ohjearvo ylittyy. Ylitykset aiheutuvat muiden tuulivoimapuistojen voimaloista.

Reseptorin R7 kohdalla teoreettisen välkkeen yhteisvaikutukset ovat 49 h ja 47 min. Mallinnuksen mukaan Malakakankaan voimaloista aiheutuu reseptoripisteeseen teoreettista välkevaikutusta 9 h ja 2 min. Teoreettiselle välkevaikutukselle käytetty Saksan 30 tunnin raja-arvo ylittyy jo ilman Malakakankaan voimaloiden huomiointia. Lisäksi päiväkohtainen teoreettinen maksimivälke ylittää Saksan 30 minuutin raja-arvon kuudessa reseptoripisteessä.

Suomen olosuhteissa Saksan teoreettisen maksimivälkkeen ohjearvoihin vertaaminen voi antaa harhaanjohtavan kuvan välkevaikutuksesta. Suomessa aurinko paistaa eri kulmasta kuin Saksassa ja auringonpaisteen todennäköisyys on erilainen. Suomessa aurinko paistaa talvella hyvin viistosti, mikä voi aiheuttaa suuren teoreettisen maksimivälkkeen. Talvisin auringonpaisteen todennäköisyys on kuitenkin Suomessa hyvin alhainen.

Taulukko 11: Vuotuinen teoreettinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina reseptorien kohdalla, kun mallinuksissa huomioidaan Malakakankaan vaihtoehto VE1, Mutkalampi, Kaukanen sekä Kaukanen laajennus.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välkekaika [h:min]	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkekaika [min]
R1	1:26	9
R2	0:59	8
R3	0:55	8
R4	2:55	11
R5	4:09	12
R6	2:56	10
R7	49:47	47
Y1	25:46	42
Y2	22:26	37
Y3	20:55	35
Y4	74:54	63
Y5	142:49	78

Taulukko 12: Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R7 kohdalla.

Kellonaika	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Tammikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	1:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:07
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	8:12	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	8:12
Huhtikuu	0:00	0:00	1:07	0:56	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:03
Toukokuu	0:00	0:49	0:02	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:44	3:31	0:00	6:06
Kesäkuu	0:00	4:40	1:10	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	4:19	0:00	10:09
Heinäkuu	0:00	0:51	2:22	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	5:07	0:00	8:20
Elokuu	0:00	0:00	1:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:27	0:00	3:34
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	9:08	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	9:08
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	1:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:07
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	6:20	5:48	18:16	2:15	0:00	0:00	0:00	0:00	1:44	15:24	0:00	49:47

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Sievin kunnan alueelle suunnitellun Malakakankaan tuulivoimapuiston sekä läheisten toiminnassa ja suunnitteilla olevien tuulivoimapuistojen ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Mallinuksissa huomioitiin Malakakankaan lisäksi kaksi toiminnassa olevaa naapuripuistoa Mutkalampi ja Kaukanen sekä suunnitteilla oleva Kaukanen laajennus.

Yhteisvaikutusmallinnuksen perusteella vuotuinen todennäköinen välkevaikutus ylittää Ruotsin 8 tunnin ohjearvon kolmen rakennuksen kohdalla. Todennäköinen päiväkohtainen maksimi jää alle 30 minuutin ohjearvon.

Saksan 30 tunnin raja-arvo vuotuiselle teoreettiselle maksimivälkkeelle ylittyy kolmessa reseptoripisteessä. Tämän lisäksi teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke aika ylittää 30 minuutin raja-arvon kuudessa reseptoripisteessä.

5 Välkevaikutuksen laskentamenetelmä

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

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

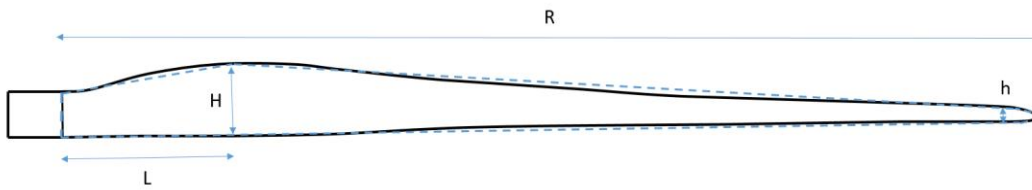
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään, 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 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 malliprofiili.

Tämän raportin väkelaskennassa käytetään turbiinivalmistajan ilmoittamiin tietoihin perustuvaa lavan profiilitietoa. Laskennassa huomioitava roottorin säde vaihtelee välillä $[0, R]$ riippuen tarkastelupisteen etäisyydestä turbiineihin sekä lavan leveydestä ja sitä vastaavasta Auringon peittoasteesta. Tällä tavoin väkelaskennassa huomioidaan turbiinin muuttuva lapaprofiili, ja saadaan realistisempia tuloksia kuin olettamalla tietty keskimääräinen lavan leveys ja sitä vastaava kiinteä maksimietäisyys.

6 Viitteet

- [1] B. Tammelin et al.: Production of the Finnish Wind atlas. Wind Energy, 2011.
- [2] Boverket: *Vindkraftshandboken*, Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden, 2009.
- [3] P. Jokinen et al.: Tilastoja Suomen ilmastosta ja merestä 1990-2020, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2021:8.
- [4] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päiväys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5|2016.