



Semecon Oy

Kenkäkankaan ja läheisten tuulivoimapuistojen yhteisvaikutusten välkeselvitys

101022365-002, 28.02.2024

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
28/02/2024

Projektinumero
101022365-002

Raportin tila
VALMIS

Kenkäkankaan ja läheisten tuulivoimapuistojen yhteisvaikutusten välkeseelvitys

Raporttihistoria

Versio	Pvm/Laatija	Pvm/Tarkastaja	Merkinnät/Muutokset
001	28.02.2024/ Juulianna Lähteinen, Technical Consultant	28.02.2024/ 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	8
2.1	Välkevaikutus.....	8
2.2	Välkkeen rajoittaminen.....	8
2.3	Arvioinnin epävarmuudet.....	8
2.4	Ohjeavot	9
3	Tuulivoimakohteen välkemallinnus.....	10
3.1	Mallinnusmenetelmä ja lähtöaineisto	10
3.2	Kenkäkankaan ja naapuripuistojen todennäköinen välkevaikutus	14
3.3	Kenkäkankaan ja naapuripuistojen teoreettinen välkevaikutus	17
4	Yhteenveto	18
5	Välkevaikutuksen laskentamenetelmä	19
6	Viitteet	21

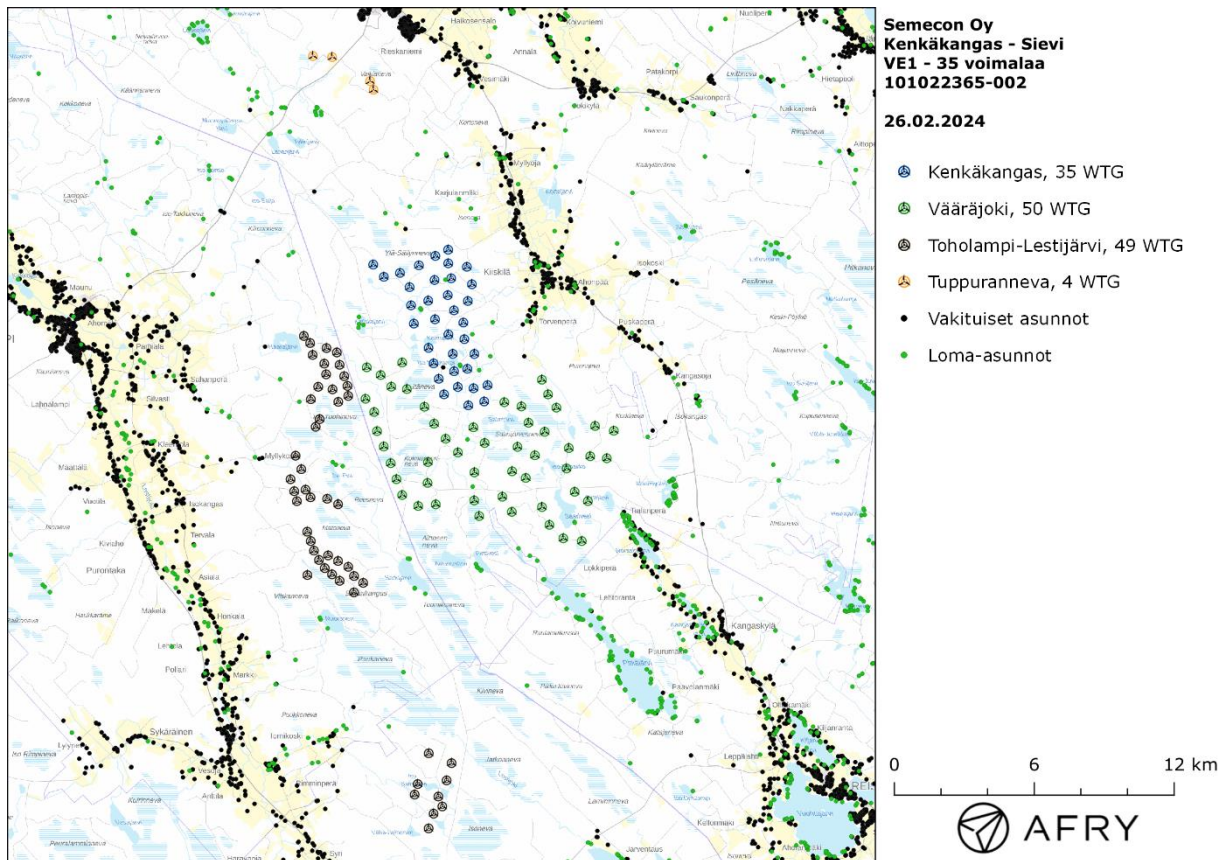
1 Johdanto

Selvityksessä arvioidaan Sievin kunnan alueelle suunnitellun Kenkäkankaan tuulivoimapuiston sekä läheisten suunnitteilla olevien tuulivoimapuistojen väkkeen yhteisvaikutuksia laskennallisten mallien avulla. Tuulivoimapuistojen väkkeen yhteisvaikutukset ovat suurimmat Kenkäkankaan toteutusvaihtoehdolla VE1, joten riittää tarkastella yhteisvaikutuksia pelkästään Kenkäkankaan 35 voimalan suunnitelmalla VE1. Suunnitelma VE2 on muuten sama, mutta siitä on poistettu kymmenen voimalaa.

Kenkäkankaan välittömässä läheisyydessä on suunnitteilla kaksi tuulivoimapuistoa sekä hieman kauempana pohjoisessa suunnitteilla yksi tuulivoimapuisto, ja nämä huomioidaan yhteisvaikutusten mallinnuksessa:

- Vääräjoki, 50 voimalaa (suunnitteilla)
- Toholampi-Lestijärvi, 49 voimalaa (suunnitteilla)
- Tuppuranneva, 4 voimalaa (suunnitteilla)

Vääräjoen lähimmät voimalat sijaitsevat noin 900 metrin etäisyydellä, Toholampi-Lestijärven lähimmät voimalat noin 3,8 km etäisyydellä ja Tuppurannevan lähimmät voimalat noin 7,5 km etäisyydellä Kenkäkankaan voimaloista. Voimaloiden sijainnit on esitetty kuvassa (Kuva 1) ja koordinaatit annettu taulukoissa 1-4.



Kuva 1: Kenkäkan sekä läheisten tuulivoimapuistojen voimaloiden sijainnit.

Taulukko 1: Kenkäkankaan tuulivoimaloiden (VE1- 35 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla. Kenkäkankaan VE2 suunnitelmasta on poistettu yhteensä kymmenen voimalaa (voimalat T6, T11, T16, T20, T28-T29, T31-32 sekä T34-T35).

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]	Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
T1	381588	7071318	124	T19	380972	7075391	117
T2	382270	7071484	124	T20	379132	7075607	126
T3	380547	7071791	128	T21	381568	7075793	113
T4	381813	7072051	126	T22	379867	7075809	121
T5	381140	7072106	124	T23	380709	7076044	117
T6	382413	7072186	123	T24	379070	7076388	123
T7	380321	7072455	125	T25	381742	7076512	111
T8	381545	7072885	124	T26	380139	7076694	119
T9	380978	7072780	123	T27	380853	7076766	118
T10	380098	7073119	126	T28	377966	7076830	130
T11	381848	7073522	121	T29	378656	7076998	122
T12	380923	7073526	123	T30	381528	7077259	112
T13	379882	7073784	127	T31	379470	7077323	120
T14	381418	7074157	118	T32	377508	7077355	138
T15	380733	7074362	124	T33	380728	7077409	117
T16	379252	7074825	126	T34	380175	7077727	118
T17	381376	7074869	118	T35	380724	7077994	114
T18	380160	7075008	123				

Taulukko 2: Vääräjoen tuulivoimaloiden (50 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus turbiinipaikalla.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]	Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
VJ01	384744	7072418	120	VJ26	381849	7068443	130
VJ02	385010	7071788	124	VJ27	381842	7067238	132
VJ03	385366	7071221	126	VJ28	382053	7066570	132
VJ04	383864	7071272	125	VJ29	381142	7069298	131
VJ05	383133	7071453	126	VJ30	380615	7069885	133
VJ06	382289	7069703	126	VJ31	380122	7070536	131
VJ07	381804	7070375	127	VJ32	378283	7072119	129
VJ08	384169	7070572	126	VJ33	378953	7072016	128
VJ09	384865	7070184	126	VJ34	379706	7071258	128
VJ10	383465	7068490	133	VJ35	379841	7067992	130
VJ11	384053	7068206	133	VJ36	379856	7068888	136
VJ12	387025	7070433	126	VJ37	379439	7067001	131
VJ13	387829	7070230	127	VJ38	380191	7067070	135
VJ14	385899	7069487	128	VJ39	378751	7067472	128

VJ15	386817	7069134	129	VJ40	378503	7068151	133
VJ16	387530	7069048	130	VJ41	378260	7068838	129
VJ17	385804	7068611	135	VJ42	377961	7069552	129
VJ18	386149	7067611	131	VJ43	377673	7070213	125
VJ19	386717	7067212	135	VJ44	377551	7071033	125
VJ20	386454	7065498	131	VJ45	377177	7071600	131
VJ21	385661	7065614	133	VJ46	377828	7072618	125
VJ22	385064	7066193	131	VJ47	378752	7073157	127
VJ23	384747	7066956	135	VJ48	377233	7072949	127
VJ24	383454	7066753	134	VJ49	383697	7069537	132
VJ25	383047	7067399	131	VJ50	384446	7069175	128

Taulukko 3: Toholampi-Lestijärven tuulivoimaloiden (49 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatissa ja maaston korkeus turbiinipaikalla. 40 voimalaa sijoittuu Toholammin kunnan puolelle ja yhdeksän voimalaa Lestijärven kunnan puolelle.

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]	Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
TL01	374534	7074294	115	TL29	376002	7067076	128
TL02	374803	7073990	119	TL30	374678	7065899	134
TL03	375504	7073774	119	TL31	374830	7065499	136
TL04	375949	7073586	117	TL32	374968	7065086	141
TL05	374910	7073480	118	TL33	375574	7064883	136
TL06	375411	7073107	120	TL34	375183	7064687	140
TL07	376068	7073056	121	TL35	376001	7064643	134
TL08	375489	7072649	128	TL36	375430	7064338	140
TL09	376265	7072570	125	TL37	376438	7064393	133
TL10	376405	7072152	129	TL38	375743	7064070	140
TL11	375763	7072004	127	TL39	376686	7064000	135
TL12	375151	7072115	124	TL40	374687	7064039	139
TL13	376436	7071723	128	TL41	377078	7063705	134
TL14	376012	7071469	129	TL47	376067	7063792	141
TL15	374835	7071581	129	TL48	376682	7063296	142
TL17	375210	7070728	128	LJ49	379891	7056396	144
TL18	375041	7070400	126	LJ50	380870	7055975	143
TL20	374180	7069159	123	LJ51	380658	7055234	146
TL21	374425	7068580	128	LJ52	379417	7055076	146
TL22	373962	7068150	123	LJ53	380302	7054541	145
TL23	374607	7067703	124	LJ54	379287	7054626	145
TL24	374820	7067372	125	LJ55	380472	7054117	148
TL25	374121	7067637	131	LJ56	380099	7053807	146
TL26	375535	7067313	127	LJ57	379887	7053174	146
TL27	374235	7067210	127				

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

Turbiinit	E	N	Maaston korkeus [m]
TU1	377374	7085225	117
TU2	374922	7086300	110
TU3	375744	7086256	112
TU4	377522	7084850	120

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 hankealueeseen on noin 135 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 Tuulivoimakohteen 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 Kenkäkankaan ja Vääräjoen voimaloilla on käytetty napakorkeutta 219 m ja Toholampi-Lestijärven voimaloille napakorkeutta 189 m. Kenkäkankaan, Vääräjoen ja Toholampi-Lestijärven voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 162 m. Voimaloiden lapaprofiilina on käytetty voimalatyyppin Vestas V162 valmistajan ilmoittamaa tarkkaa lavan profiilitietoa, jonka levein kohta on 4,3 m. Tuppurannevan voimaloille on käytetty napakorkeutta 137 m, roottorin halkaisijaa 126 m ja lapaprofiilia, jonka levein kohta on 3,5 m. Taulukossa (Taulukko 5) on esitetty mallinnuksessa käytetyt voimalatiedot. Laskentamenetelmän yksityiskohdat on kuvattu luvussa 5.

Taulukko 5: Mallinuksissa tuulivoimapuistoille käytetyt voimalamitat.

Tuulivoimapuisto	Voimaloiden lukumäärä	Napakorkeus	Roottorin halkaisija	Kokonaiskorkeus
Kenkäkangas	35 kpl	219 m	162 m	300 m
Vääräjoki	50 kpl	219 m	162 m	300 m
Toholampi-Lestijärvi	49 kpl	189 m	162 m	270 m
Tuppuranneva	4 kpl	137 m	126 m	200 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 Seinäjoen 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	0,158	0,188	0,186	0,126	0,116	0,155

Taulukko 7: Auringonpaisteen kuukausittaiset todennäköisyydet Pelmaan sääasemalla.

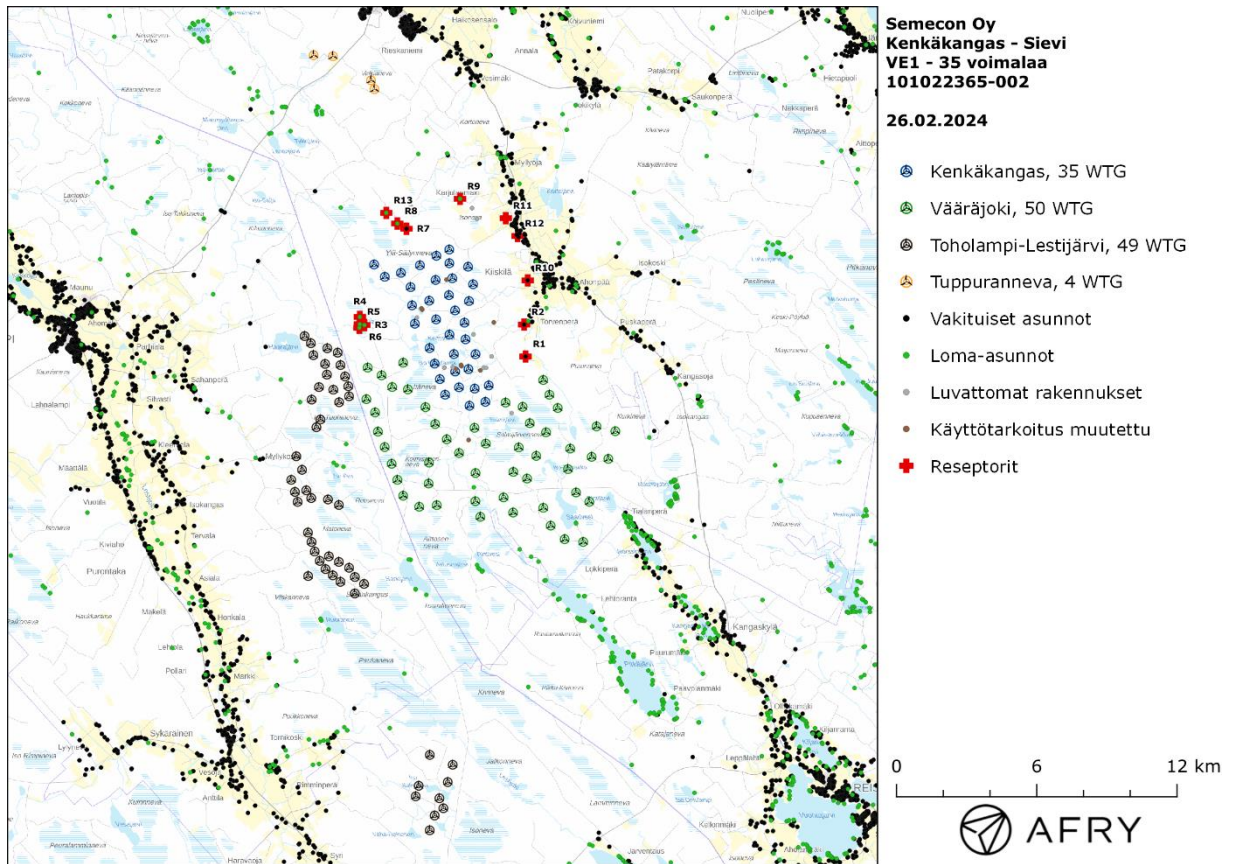
Kuukausi	Auringonpaisteen todennäköisyys
Tammikuu	0,162
Helmikuu	0,291
Maaliskuu	0,398
Huhtikuu	0,423
Toukokuu	0,479
Kesäkuu	0,459
Heinäkuu	0,454
Elokuu	0,414
Syyskuu	0,358
Lokakuu	0,260
Marraskuu	0,150
Joulukuu	0,110

Taulukossa (Taulukko 8) on määritelty tuulivoimaloiden ympäristöstä 13 vertailurakennusta, joiden kohdilla välkevaikutusta tarkastellaan tarkemmin. Sijaintipisteitä kutsutaan reseptoripisteiksi, ja niiden paikat suhteessa tuulivoimaloihin on esitetty karttapohjalla (Kuva 2). Rakennukset sijaitsevat noin 1,6-2,6 km etäisyydellä voimaloista. Reseptorit on valittu erityisesti Kenkäkankaan ympäristöstä.

Maanmittauslaitoksen maastotietokannan mukaan Kenkäkankaan hankealueella on useita loma- ja asuinrakennuksiksi merkittyjä rakennuksia. Asiakkaalta saadun tiedon mukaan näistä asunnoista osa on luvattomia rakennuksia ja osassa käyttötarkoitus on muutettu muuksi rakennukseksi. Välkkeen ohjearovot koskevat pelkästään asuin- ja lomarakennuksia. Luvattomat rakennukset on merkitty karttakuviin harmaalla ja asunnot, joissa käyttötarkoitus on muutettu, on merkitty karttoihin ruskealla.

Taulukko 8: Reseptorien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa.

Reseptori	E	N	Maaston korkeus [m]	Rakennusluokitus
R1	383992	7073419	120	vakituinen asuinrakennus
R2	383929	7074785	110	vakituinen asuinrakennus
R3	377096	7074764	135	lomarakennus
R4	376900	7075110	133	lomarakennus
R5	376899	7074798	135	lomarakennus
R6	376880	7074646	133	lomarakennus
R7	378897	7078879	123	vakituinen asuinrakennus
R8	378503	7079104	129	lomarakennus
R9	381188	7080158	106	lomarakennus
R10	384082	7076671	102	vakituinen asuinrakennus
R11	383144	7079332	105	muu rakennus
R12	383651	7078570	101	vakituinen asuinrakennus
R13	378033	7079556	127	lomarakennus



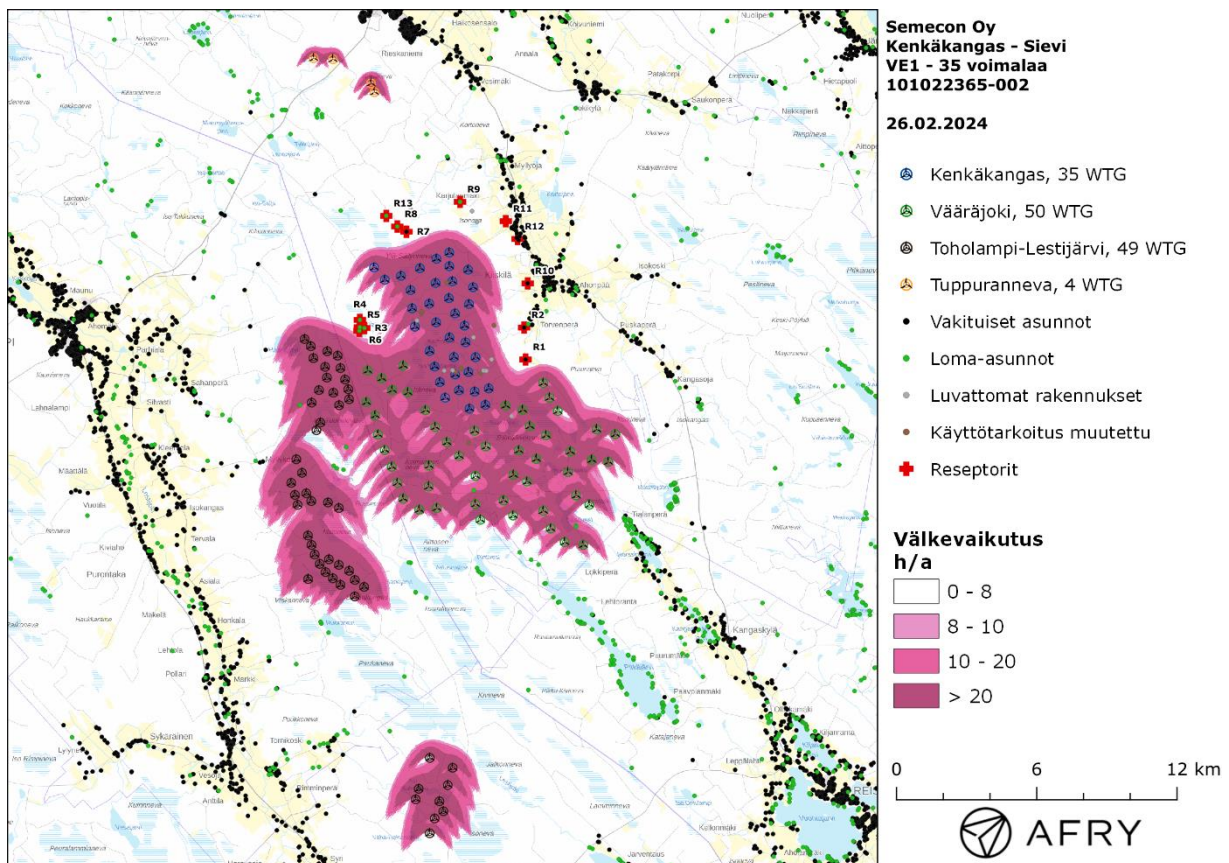
Kuva 2: Reseptoreiden paikat suhteessa tuulivoimapaistoihin. Reseptorit on valittu erityisesti Kenkäkankaan ympäristöstä.

3.2 Kenkäkankaan ja naapuripuistojen todennäköinen välkevaikutus

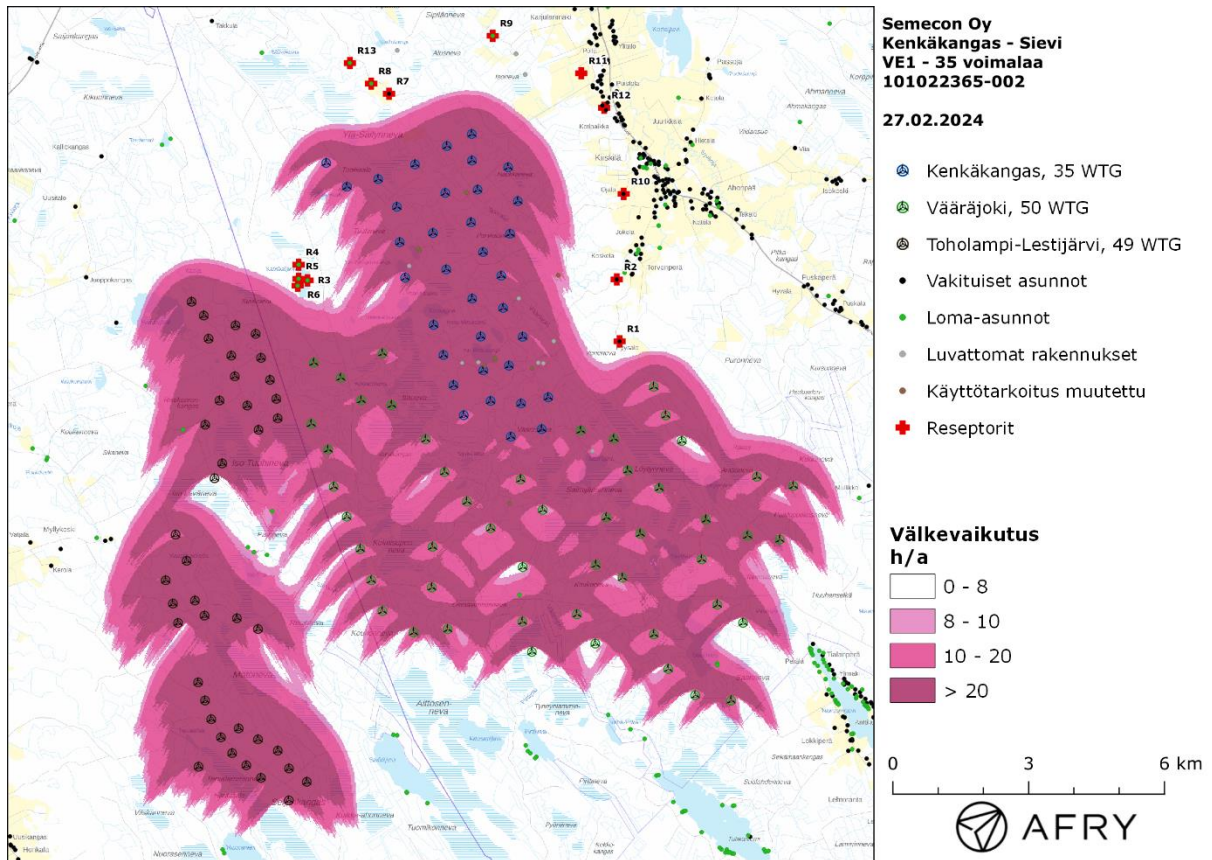
Mallinnetut arviot todennäköisten välketuntien vuotuisesta määrästä on esitetty karttakuvana (Kuva 3). Mallinnuksessa ei ole huomioitu paikallisen puuston vaikutusta turbiinien näkyvyyteen ja välkevaikutukseen. Karttoihin on merkitty ympäristössä sijaitsevat loma- ja asuinrakennukset käyttäen lähtötietona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

Mallinnusten perusteella vuotuiset todennäköiset välkkeen yhteisvaikutukset jäävät alle 8 tunnin ohjearvon kaikkein tarkasteltujen reseptorien kohdalla. Myös päiväkohtainen todennäköinen välke aika alittaa 30 minuutin ohjearvon alueen loma- ja asuinrakennusten kohdalla. Kenkäkankaan voimaloilla on välkkeen yhteisvaikutuksia Vääräjoen sekä Toholampi-Lestijärven voimaloiden kanssa, mutta mallinnusten perusteella niistä ei aiheudu ohjearvon ylityksiä. Tuppurannevan voimaloiden kanssa välkkeen yhteisvaikutuksia ei ole, sillä puistot sijaitsevat lähes 8 km etäisyydellä toisistaan. Vuotuiset todennäköiset välkevaikutusajat ja suurimmat päiväkohtaiset maksimivälkkeet reseptorien kohdalla on lueteltu taulukossa (Taulukko 9).

Todennäköisen välkkeen tarkempi ajoittuminen reseptorin R6 kohdalla on esitetty taulukossa (Taulukko 10). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talvi-aika).



Kuva 3: Todennäköinen välkevaikutus, kun mallinuksissa huomioidaan Kenkäkankaan vaihtoehto VE1, Vääräjoki, Toholampi-Lestijärvi sekä Tuppuranneva.



Kuva 4: Todennäköinen välkevaikutus läheltä, kun mallinuksissa huomioidaan Kenkäkankaan vaihtoehto VE1, Vääräjoki, Toholampi-Lestijärvi sekä Tuppuranneva. Karttakuvassa ei näy Tuppurannevan voimaloita eikä Toholampi-Lestijärven Lestijärven puoleisia voimaloita.

Taulukko 9: Todennäköinen vuotuinen välkevaikutus tunteina ja minutteina ([h:min]) reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	Todennäköinen vuotuinen välke aika	Todennäköisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälke aika
R1	3:29	0:06
R2	0:09	0:01
R3	4:07	0:04
R4	2:27	0:04
R5	4:33	0:05
R6	5:51	0:07
R7	3:09	0:04
R8	1:38	0:04
R9	0:15	0:01
R10	0:12	0:02
R11	0:00	0:00
R12	0:08	0:01
R13	0:14	0:01

Taulukko 10: Todennäköisen välkevaikutuksen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R6 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	0:18	0:10	0:16	0:00	0:00	0:00	0:00	0:44
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:05	0:10	0:00	1:09	0:25	0:00	0:00	0:00	1:49
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:25	0:00	0:00	0:00	0:25
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:07
Toukokuu	0:00	0:00	0:09	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:09
Kesäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Heinäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Elokuu	0:00	0:00	0:08	0:01	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:09
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:05	0:00	0:00	0:00	0:00	0:06	0:00	0:00	0:00	0:11
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:04	0:00	0:00	1:07	0:07	0:00	0:00	0:00	1:18
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:22	0:25	0:12	0:00	0:00	0:00	0:00	0:59
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	0:00	0:17	0:13	0:09	0:50	0:36	2:44	1:03	0:00	0:00	0:00	5:51

3.3 Kenkäkankaan ja naapuripuistojen teoreettinen välkevaikutus

Teoreettisen maksimivälkkeen vuotuiset ja suurimmat päiväkohtaiset välkevaikutusajat reseptoreiden kohdilla on lueteltu taulukossa (Taulukko 11). Mallinnusten perusteella teoreettinen vuotuinen maksimivälke ylittää Saksan 30 tunnin raja-arvon kahden reseptorin kohdalla. Myös Saksan 30 minuutin raja-arvo teoreettiselle päiväkohtaiselle maksimivälkkeelle ylittyy neljän reseptorin kohdalla.

Asuntojen kohdalla, joissa Saksan raja-arvot ylittyvät, välkevaikutus ajoittuu pääosin syksyyn ja talveen, jolloin auringonpaisteen todennäköisyys on alhainen. Tämä nähdään myös teoreettisen välkkeen ajoittumistaulukosta reseptorin R6 kohdalla (Taulukko 12). Taulukossa esitetyt kellonajat ovat aikavyöhykkeen UTC+2 mukaisia (Suomen talviaika).

Taulukko 11: Vuotuinen teoreettinen välkevaikutus tunteina ja minuutteina ([h:min]) reseptoreiden kohdilla.

Reseptori	Teoreettinen vuotuinen välkeaika	Teoreettisen välkkeen päiväkohtainen maksimivälkeaika
R1	23:55	0:39
R2	0:52	0:07
R3	28:30	0:32
R4	17:48	0:22
R5	32:16	0:35
R6	40:17	0:46
R7	24:18	0:25
R8	13:39	0:24
R9	2:36	0:10
R10	0:56	0:07
R11	0:00	0:00
R12	0:48	0:07
R13	2:18	0:10

Taulukko 12: Teoreettisen maksimivälkkeen ajoittuminen ja kesto tunteina ja minuutteina [h:min] reseptorin R6 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	3:06	1:39	2:37	0:00	0:00	0:00	0:00	7:22
Helmikuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:29	0:58	0:00	6:10	2:24	0:00	0:00	0:00	10:00
Maaliskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:47	0:00	0:00	0:00	1:47
Huhtikuu	0:00	0:00	0:00	0:28	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:28
Toukokuu	0:00	0:00	0:32	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:32
Kesäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Heinäkuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Elokuu	0:00	0:00	0:32	0:05	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:37
Syyskuu	0:00	0:00	0:00	0:23	0:00	0:00	0:00	0:00	0:28	0:00	0:00	0:00	0:51
Lokakuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:29	0:00	0:00	6:51	0:46	0:00	0:00	0:00	8:05
Marraskuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	4:03	4:25	2:07	0:00	0:00	0:00	0:00	10:36
Joulukuu	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Yhteensä	0:00	0:00	1:04	0:55	0:57	8:07	6:04	17:45	5:24	0:00	0:00	0:00	40:17

4 Yhteenveto

Raportissa on esitetty Sievin kunnan alueelle suunnitellun Kenkäkankaan tuulivoimapuiston sekä läheisten naapuripuistojen ympäristölleen aiheuttaman välkevaikutuksen laskennallinen arvio. Mallinuksissa huomioitiin Kenkäkankaan suunnitelman VE1 lisäksi Vääräjoen, Toholampi-Lesti-järven sekä Tuppurannevan voimalat.

Yhteisvaikutusten välkevarjostusmallinnuksen mukaan vuotuinen todennäköinen välkevaikutus jää alle Ruotsin 8 tunnin ohjearvon kaikkien reseptorien kohdalla. Myös päiväkohtainen välkeaika alittaa 30 minuutin ohjearvon kaikkien tarkastelussa olleiden reseptorien kohdalla. Vuotuinen teoreettinen maksimivälke puolestaan ylittää Saksan 30 tunnin raja-arvon kahden reseptorin kohdalla. Myös teoreettinen päiväkohtainen maksimivälke ylittää Saksan 30 minuutin raja-arvon neljän rakennuksen kohdalla.

5 Välkevaikutuksen laskentamenetelmä

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

Tiettyyn pisteeseen kohdistuvaa vuotuista välkevaikutusta laskettaessa tarkastellaan sitä osaa taivaanpallosta, joka näkyy pisteeseen tuulivoimaloiden roottorikehien läpi. Näkyvyyden arvioinnissa otetaan huomioon paikallinen maaston korkeusaineisto. Mikäli kääntöpiirien väliin asettuva nauha ei näy roottorikehien läpi, tarkastelupisteeseen ei kohdistu välkevaikutusta. Muussa tapauksessa yksittäisen 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 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.

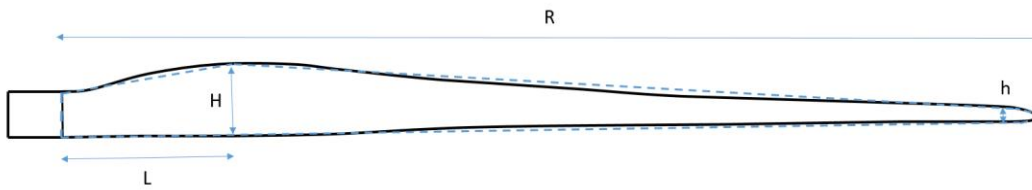
Turbiinin lapojen aiheuttama varjo heikkenee asteittain liikuttaessa etäämmälle turbiinista, eikä tietyn etäisyyden jälkeen varjo ole enää ihmissilmin havaittavissa. Tämä etäisyys riippuu turbiinin lavan leveydestä, ja esimerkiksi Ruotsin ja Saksan tuulivoimarakentamisen suunnitteluohjeistuksessa määritellään,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



Kuva 5: Turbiinin lavan malliprofiili.

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

6 Viitteet

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