

Västervik II vindkraftsprojekt, Kristinestad

BILAGA 7: RAPPORT ÖVER SKUGGMODELLERING

(AFRY 2025)



Ilmatar Kristiinankaupunki Kaksi Oy

Västervik II vindkraftsprojekt

Skuggeffektsutredning för vindkraftspark

26.9.2025

Copyright © AFRY Finland Oy

Alla rättigheter förbehålls. Detta dokument eller delar av det får inte kopieras eller reproduceras i någon form utan skriftligt tillstånd från AFRY Finland Oy.

AFRY Finland Oy projektnummer är 101021368-036.

Omslagsbild: © AFRY

Vid utredningen användes öppna material från Lantmäteriverket, Finlands miljöcentral och Meteorologiska institutet som kräver användningstillstånd. Materialen är licensierade enligt licensen Creative Commons Erkännande 4.0 Internationell: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fi>

KONTAKTINFORMATION

Ansvarig för projektet:

Ilmatar Kristiinankaupunki Kaksi Oy

Helena Arola

helena.arola@ilmatar.com

Författare:

AFRY Finland Oy

Helmi Uusitalo

helmi.uusitalo@afry.com

Wind & Solar Development and Engineering

www.afry.com

Rapportinformation:

Projektnummer: 101021368-036

Rapportversion: 001

Rapportens status: KLAR

Rapportshistorik:

Version	Datum/ Skriven av	Datum/ Kontrollerad av	Anteckningar/Ändringar
000	19.6.2025/ Helmi Uusitalo, Technical consultant	19.6.2025/ Erkki Heikkola, Senior consultant	
001	26.9.2025/ Helmi Uusitalo, Technical consultant	26.9.2025/ Erkki Heikkola, Senior consultant	Ny plan för 15 vindkraftverk

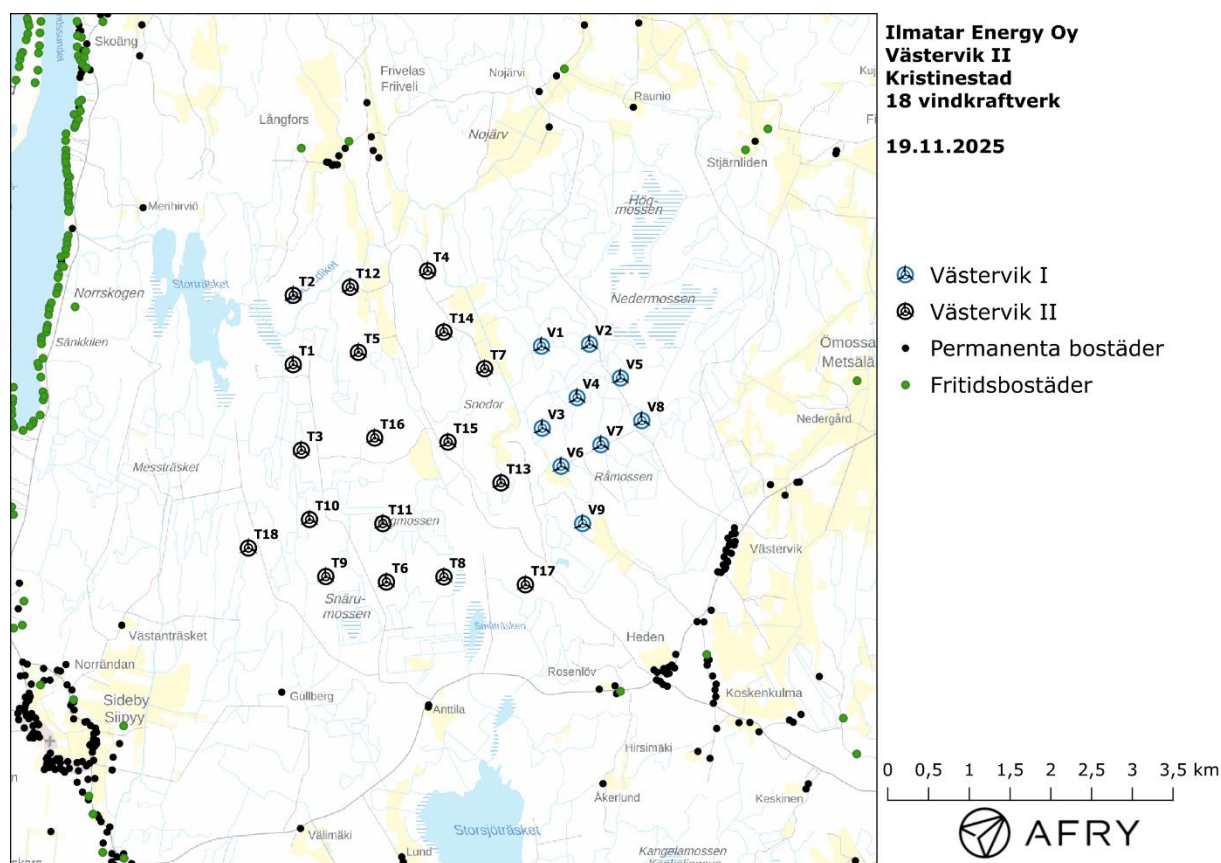
INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	5
2	RÖRLIGA SKUGGOR FRÅN VINDKRAFTVERK	7
2.1	Effekt av rörliga skuggor	7
2.2	Begränsning av rörliga skuggor	7
2.3	Bedömningens osäkerhetsfaktorer	7
2.4	Riktvärden	8
3	SKUGGEFFEKTSMODELLERING FÖR VINDKRAFTSPROJEKT	9
3.1	Modelleringsmetod och utgångsdata	9
3.2	Sannolik effekt av rörliga skuggor	12
4	SAMMANFATTNING	15
5	BERÄKNINGSMODELL FÖR EFFEKTEN AV RÖRLIGA SKUGGOR	16
6	REFERENSER	18

1 INLEDNING

I utredningen bedöms de effekter av rörliga skuggor som orsakas av Västervik II vindkraftspark i Kristinestad med hjälp av kalkylmässiga modeller. Bedömningen har gjorts för två genomförandealternativ med 18 och 15 vindkraftverk (VE1 och VE2). Platserna för vindkraftverken framgår av figuren (Figur 1-1) och koordinaterna anges i tabellen (Tabell 1-1). I planen med 15 kraftverk har kraftverken T2, T4 och T12 utelämnats.

I modelleringarna har man använt en navhöjd på 225 m och en rotordiameter på 230 m för vindkraftverken. Så stora rotorverk finns ännu inte tillgängliga för landbaserade vindkraftsparker, och modelleringarna bedömer skuggeffekterna från framtida, större verk. Rotordiameterens storlek är en viktigare faktor för skuggtiden än bladens form, men även bladbredden för den aktuella verkstypen påverkar skuggans omfattning. Eftersom det ännu inte finns exakt information om framtida bladbredder, har bladprofilen i skuggmodelleringen definierats utifrån den profil som tillverkaren av verkstypen V162 har uppgett, men längden har ökat till 115 meter. Profilen har samtidigt breddats så att bladets bredaste delen är 4,8 m (den bredaste delen av V162-profilen är 4,3 m). V162-bladet är brett till formen, vilket ger en säkerhetsmarginal som inte underskattar framtida skuggeffekter. Utredningen har också beaktat effekterna från vindkraftsparken Västervik I öster om projektområdet i modelleringarna.



Figur 1-1: Läget för vindkraftverken i Västervik II projektområde.

Tabell 1-1: Lägeskoordinaterna för vindkraftverken (18 eller 15 st.) i ETRS-TM35FIN-koordinatsystemet och terrängens höjd vid vindkraftverksplatsen.

Vindkraftverk	E	N	Terrängens höjd [m]
T1	206616	6895168	9
T2 (endast i plan 1)	206616	6896018	13
T3	206716	6894118	13
T4 (endast i plan 1)	208266	6896318	17
T5	207416	6895318	17
T6	207760	6892501	19
T7	208966	6895118	19
T8	208466	6892564	18
T9	207016	6892568	18
T10	206816	6893268	17
T11	207716	6893218	21
T12 (endast i plan 1)	207316	6896118	14
T13	209166	6893718	21
T14	208466	6895568	21
T15	208516	6894218	19
T16	207616	6894268	18
T17	209466	6892468	23
T18	206066	6892918	16

2 RÖRLIGA SKUGGOR FRÅN VINDKRAFTVERK

2.1 Effekt av rörliga skuggor

Med effekten av rörliga skuggor avses en situation där bladen på ett vindkraftverk som står mellan solens strålar och iakttagelsepunkt orsakar en blinkande skugga. De rörliga skuggorna kan som längst sträcka sig till 1–3 kilometers avstånd från ett vindkraftverk. De rörliga skuggornas avstånd och varaktighet påverkas av vindkraftverkets höjd och rotordiameter, tid på året och dagen, terrängens former och faktorer som begränsar sikten, såsom vegetation och molntäcke.

På grund av Finlands läge koncentreras effekterna av rörliga skuggor från ett enskilt vindkraftverk för det mesta till vindkraftverkets norra sida (dagtid) och till de sydvästra och sydöstra sidorna (morgon och kväll). I Finland orsakar ett vindkraftverk effekter av rörliga skuggor på turbinens södra sida endast norr om polcirkeln.

Beräkningen av effekterna av rörliga skuggor kan baseras antingen på modellering av den teoretiska maximala skuggningen eller den sannolika situationen:

- Vid beräkningen av den teoretiska maximala effekten av rörliga skuggor antas att solen skiner hela tiden under dagen, att vindkraftverkets rotor roterar kontinuerligt och att rotorn alltid står vinkelrätt mot solen.
- I modelleringen av den sannolika situationen beaktas lokala statistiska data om mängden solsken och solskenstiderna samt fördelningen av vindens riktningar och hastigheter.

I den här utredningen har beräkningen av rörliga skuggor gjorts genom modellering av den sannolika skuggningstiden.

2.2 Begränsning av rörliga skuggor

Effekterna av rörliga skuggor kan minskas genom ett vindkraftverksspecifikt kontrollverktyg för rörliga skuggor (shadow flicker protection system) som består av en ljussensor och en applikation för kontroll av rörliga skuggor. Genom verktyget kan enskilda vindkraftverket stoppas baserat på det observerade solskenet och/eller under önskade tider på året och dygnet. Ett stillastående vindkraftverk orsakar inga rörliga skuggor.

2.3 Bedömningens osäkerhetsfaktorer

Den modellerade effekten av rörliga skuggor representerar den sannolika situationen baserat på statistiskt material för solsken och vindförhållanden. Väderförhållandena under ett enskilt år kan avvika märkbart från genomsnittliga förhållanden, vilket innebär att de årliga effekterna av rörliga skuggor kan avvika från det modellerade värdet. Materialet för solskenet har erhållits från Pelma väderstation, som ligger cirka 110 km från projektområdet.

I modelleringen har det lokala trädbeståndets inverkan på vindkraftverkens synlighet och uppkomsten av rörliga skuggor inte beaktats. Trädbeståndet kan begränsa sikten betydligt mot turbinerna och minska den årliga förekomsten av rörliga skuggor. Trädbeståndets skymmande effekt varierar emellertid beroende på år och årstid, varvid det inte går att exakt bedöma trädbeståndets minskande inverkan på de rörliga skuggorna.

Vid beräkningen av effekterna av rörliga skuggor som riktas till byggnader används ett så kallat växthusantagande, vilket innebär att de rörliga skuggor som riktas till byggnader

beaktas oberoende av riktning. Den kalkylmässiga uppskattningen av effekterna av rörliga skuggor beskriver alltså skuggeffekterna utomhus. I byggnaders inomhusmiljöer är effekterna av rörliga skuggor i allmänhet mindre, eftersom de riktas mot byggnadens inomhusmiljö endast från fönsterriktningen.

2.4 Riktvärden

I Finland finns inga fastslagna riktvärden för effekter av rörliga skuggor från vindkraftverk. I miljöministeriets anvisningar för planering av vindkraftsparker rekommenderas att övriga länders rekommendationer ska användas i fråga om mängderna rörliga skuggor [4]. I Danmark har man fastställt det rekommenderade värdet för skuggtimmar till tio timmar. I Sverige är det motsvarande rekommenderade värdet åtta timmar per år och högst 30 minuter per dag [2]. Användningen av dessa riktvärden förutsätter en beräkning av de sannolika skuggeffektssituationen. Om det kalkylerade maximala timantalet används vid bedömningen av antalet timmar rörliga skuggor kan det tyska gränsvärdet på 30 timmar användas som riktvärde för de årliga effekterna av rörliga skuggor. Vid bedömningen av de modellerade skuggeffektsnivåerna i denna rapport används de riktvärden som fastställts för sannolika skuggeffekter i planeringsanvisningarna i Sverige. Vid bedömningen av den teoretiska maximala skuggeffekten används Tysklands gränsvärde på 30 timmar per år och 30 minuter per dag.

3 SKUGGEFFEKTSMODELLERING FÖR VINDKRAFTSPROJEKT

3.1 Modelleringsmetod och utgångsdata

De effekter av rörliga skuggor (shadow flicker) som orsakas av vindkraftverken uppskattades med hjälp av AFRY Numerolas modelleringsprogram, som beaktar solens position vid olika tider på året, terrängformerna i vindkraftsområdet och dess omgivning samt vindkraftverkens dimensioner. Resultatet av beräkningen visar hur många timmar per år olika platser på området utsätts för rörliga skuggor. Resultatet illustreras av en jämviktskurva som gör det möjligt att bedöma effekten av rörliga skuggor i undersökningsområdet.

Höjdskillnaderna i terrängen i de undersökta områdena hämtades från Lantmäteriverkets material Höjdmodell 10 m. Den horisontella upplösningen för höjddata är tio meter och den vertikala noggrannheten är 1,4 meter. Vid beräkningen beaktades höjdskillnaderna så att ingen skuggning uppstår om linjen över solen, vindkraftverket och undersökningspunkten skär marken. Effekten av rörliga skuggor beräknades på en höjd på två meter. Solens infallsvinkel från horisonten begränsades till tre grader, och den solstrålning som låg under den vinkeln beaktades inte.

Den skugga som vindkraftverkets turbinblad orsakar minskar gradvis när man rör sig längre bort från vindkraftverket, och efter ett visst avstånd är den rörliga skuggan inte längre synlig för det mänskliga ögat. Detta avstånd beror på vindkraftverkets bladbredd, och till exempel i de svenska riktlinjerna för vindkraftsbyggande fastställs att effekterna av rörliga skuggor beaktas om bladet täcker minst 20 procent av solen. I praktiken innebär detta att det maximala avståndet för rörliga skuggor för ett enskilt vindkraftverk beror på bladbredden och att det inte förekommer några rörliga skuggor utanför detta avstånd.

I allmänhet baseras beräkningen av det maximala avståndet på bladens genomsnittliga bredd, vilket bestämmer det maximala avståndet. I praktiken har vindkraftverkets blad ingen standardbredd: Den bredaste punkten ligger nära vindkraftverkets nav och bladet smalnar av betydligt mot spetsen. På basis av detta sträcker sig de rörliga skuggorna från bladets bas betydligt längre än den från bladets spets, om solens täckningsgrad används som beräkningsgrund. Vid beräkningen av rörliga skuggor i den här utredningen har man inte använt det konventionella maximala avståndet utan beaktat vindkraftverkets varierande bladprofil.

Vid beräkningen av rörliga skuggor användes navhöjden 225 meter och rotordiameter 230 m. Vindkraftverkens bladprofil uppskattades baserat på profilinformation av tillverkaren Vestas V162, där bladprofilen är skalbar i förhållande till bladets längd och bredd och motsvarar en rotordiameter på 230 meter. Detaljerna för beräkningsmetoden beskrivs i kapitel 5.

Den verkliga effekten av rörliga skuggor påverkas av vindkraftverkens driftgrad, trädbeståndet och det lokala vädret (molnighet och vindförhållanden). Om till exempel vindens riktning är vertikal mot linjen mellan solen och iakttagelsepunkten uppstår inga rörliga skuggor. Vid beräkning av skuggbildningen kan vindkraftverkets riktning definieras, varvid rotorn antas utgöra ett cirkulärt plan i en viss riktning. Beräkningen av den sannolika effekten av rörliga skuggor har gjorts med sex olika vindkraftverksriktningar. Detta motsvarar skuggningsresultaten för sektorer med tolv vindriktningar, eftersom motsatta vindriktningar resulterar i samma rotorriktning när det gäller rörliga skuggor. Antalet timmar med rörliga skuggor som beräknats för varje vindriktning har skalats med frekvensen av

förekomsten av riktningsspektorn från Finlands vindatlas [1] och den tidsmässiga fraktionen av vindkraftverkets hastigheter som bestämts från den riktningsspecifika hastighetsfördelningen. Vid vindar som är svagare än starthastigheten eller starkare än stopphastigheten är vindkraftverken stillastående och det förekommer inga rörliga skuggor på grund av rotorns rotation. Vindestimatet enligt Finlands vindatlas har tagits mitt på vindkraftsområdet på 200 meters höjd, och de beräknade andelarna per riktningssektor för vindar som ligger mellan vindkraftverkets hastighetsgränser anges i tabellen nedan (Tabell 3-1).

Den lokala molnigheten har beaktats genom att skala skuggningstider, som beräknats med olika rotorriktningar, med den relativa andelen solskenstimmar som uppmätts vid Pelma väderstation av den teoretiska maximala mängden solskenstimmar [3]. De månatliga sannolikheterna för solsken som beräknats från väderstationens mätningar sammanfattas i tabellen nedan (Tabell 3-2). Genom att addera det riktningsspecifika skalade antalet timmar med rörliga skuggor fås en uppskattning av de faktiska väderrelaterade timmarna för förekomsten av rörliga skuggor i undersökningsområdet.

Tabell 3-1: Riktningbundna sektorsspecifika andelar med vindhastigheter över 3 m/s baserat på Finlands vindatlas.

Riktningssektor	0/180	30/210	60/240	90/270	120/300	150/330
Andel över 3 m/s	0,225	0,204	0,118	0,098	0,120	0,148

Tabell 3-2: Sannolikheten för solsken per månad vid Pelma väderstation.

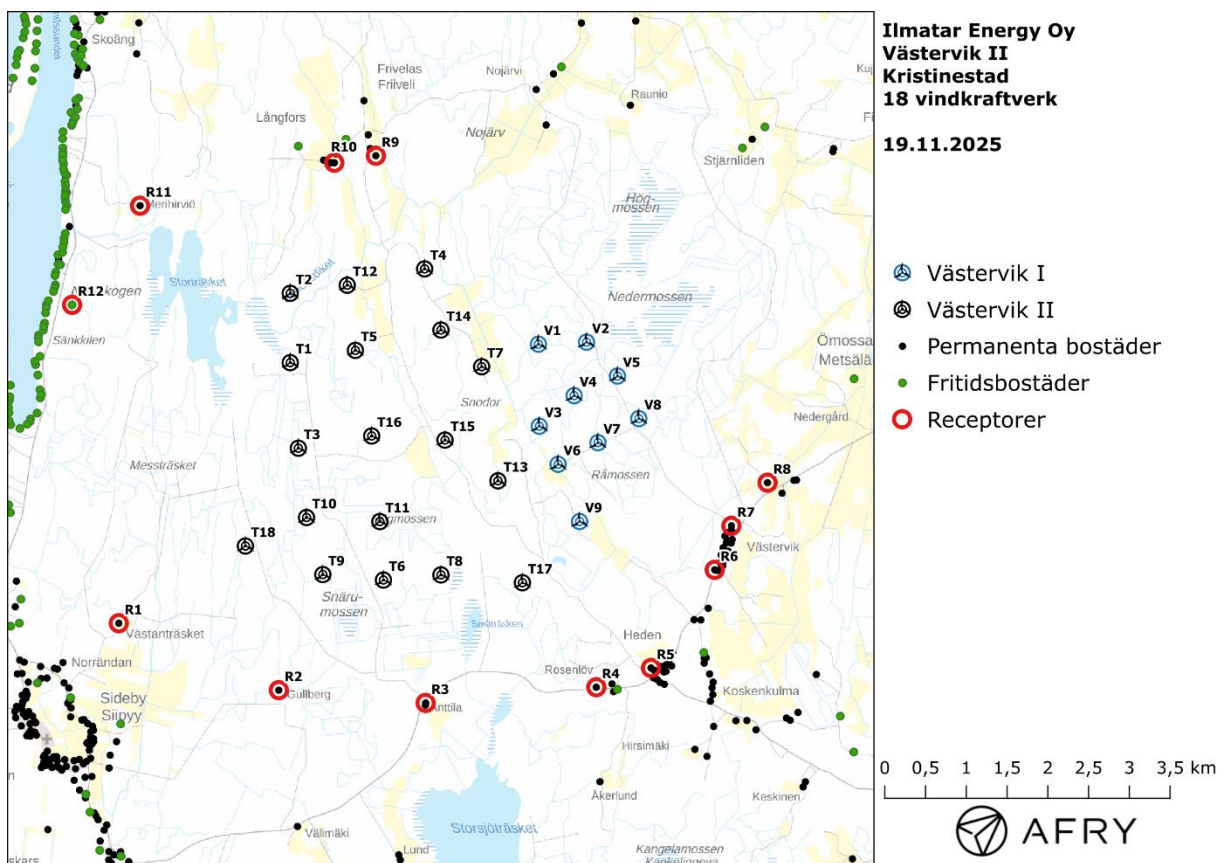
Månad	Sannolikhet för solsken
Januari	0,162
Februari	0,291
Mars	0,398
April	0,423
Maj	0,479
Juni	0,459
Juli	0,454
Augusti	0,414
September	0,358
Oktober	0,260
November	0,150
December	0,110

I tabellen (Tabell 3-3) anges 12 referensbyggnader i närheten av vindkraftverken där effekten av rörliga skuggor undersöks närmare. Platserna kallas receptorpunkter och deras positioner i förhållande till vindkraftverken visas på en baskarta (Figur 3-1). Byggnaderna ligger cirka 1,5–3,2 km från vindkraftverken.

Inom projektområdet eller i dess närhet finns även byggnader som enligt byggnads- och lägenhetsregistret är avsedda för annat än bostads- eller fritidsbruk. Byggnader som inte är avsedda för bostads- eller fritidsbruk har inte beaktats i bedömningen av effekterna av skuggning.

Tabell 3-3: Koordinater för receptorerna i ETRS-TM35FIN-koordinatsystemet.

Receptor	E	N	Terrängens höjd [m]	Byggnadsklassificering
R1	204513	6891969	9	permanent bostadshus
R2	206477	6891148	14	permanent bostadshus
R3	208279	6890991	18	permanent bostadshus
R4	210374	6891184	25	permanent bostadshus
R5	211046	6891420	41	permanent bostadshus
R6	211828	6892624	29	permanent bostadshus
R7	212033	6893164	29	permanent bostadshus
R8	212476	6893693	24	permanent bostadshus
R9	207668	6897704	17	permanent bostadshus
R10	207158	6897618	14	permanent bostadshus
R11	204774	6897091	11	permanent bostadshus
R12	203940	6895875	8	fritidshus

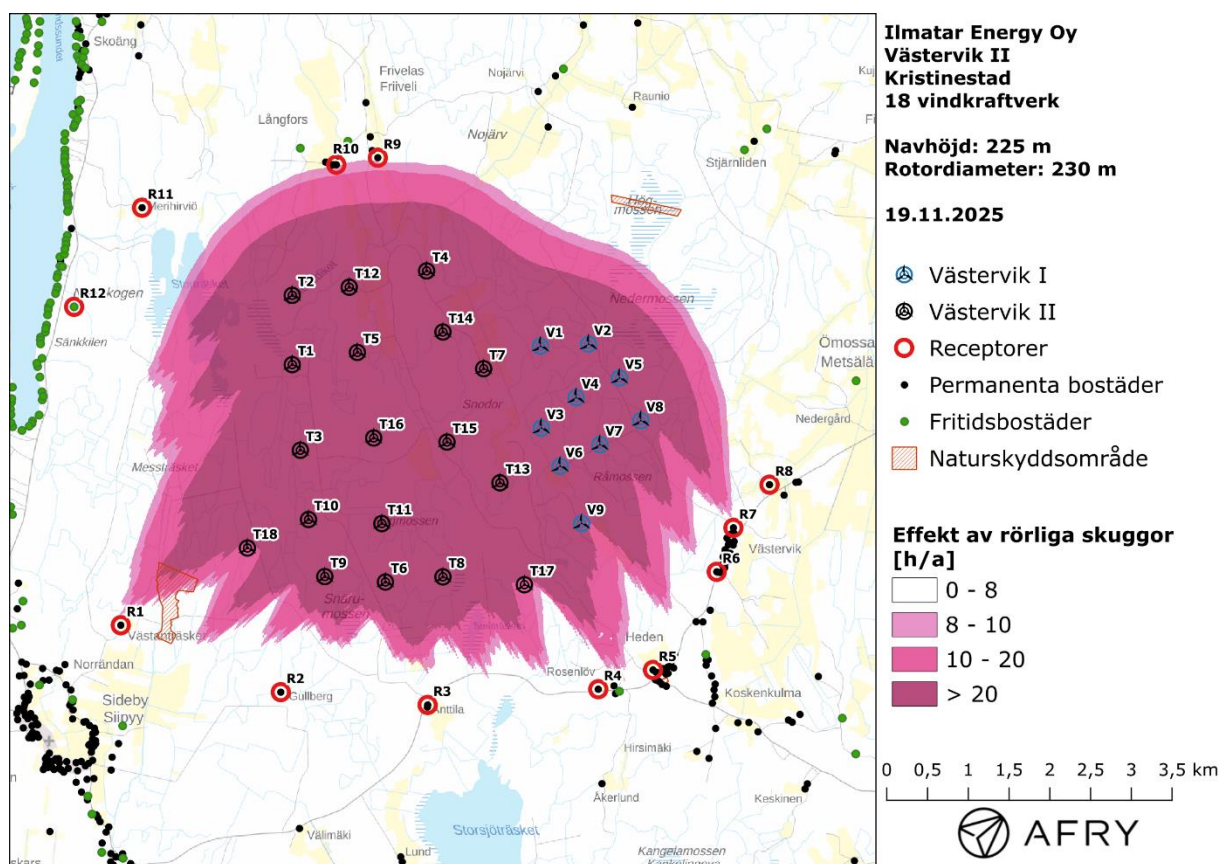

Figur 3-1: Receptorernas lägen i närheten av Västervik II projektområde.

3.2 Sannolik effekt av rörliga skuggor

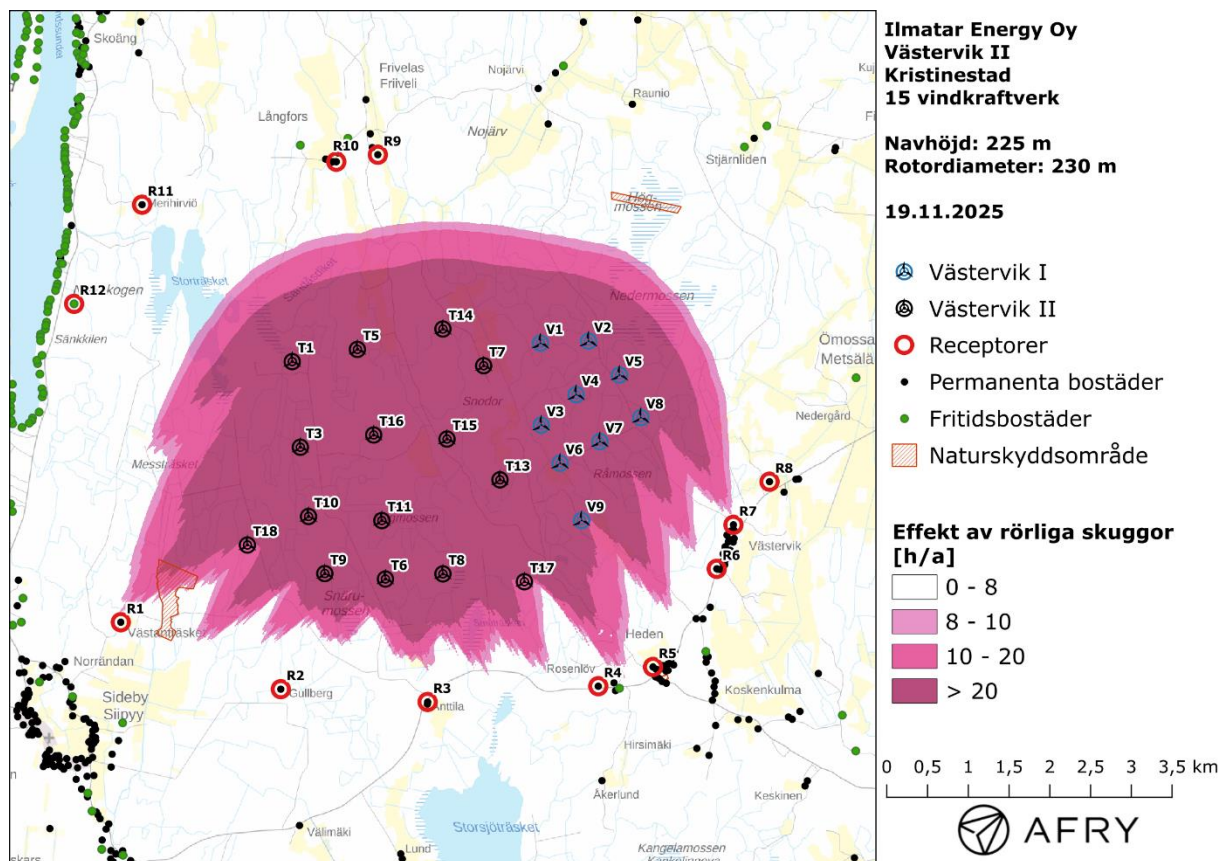
De modellerade uppskattningarna av det sannolika antalet timmar förekomst av rörliga skuggor per år visas på kartan (Figur 3-2) för planen med 18 vindkraftverk och på kartan (Figur 3-3) för planen med 15 vindkraftverk. I modelleringen beaktas inte effekten av det lokala trädbeståndet på synligheten av vindkraftverken och effekten av rörliga skuggor. På kartorna har de fritids- och bostadshus som finns i omgivningen märkts ut utifrån uppgifterna i Lantmäteriverkets terrängdatabas.

På basis av modelleringarna stannar den årliga sannolika effekten av rörliga skuggor under riktvärdet på åtta timmar vid alla bostads- och fritidshus i närområdet. Även den dagliga sannolika förekomsten av rörliga skuggor underskrider riktvärdet 30 minuter vid alla bostäder i området. Tiderna för den årliga sannolika förekomsten av rörliga skuggor och de största dagliga rörliga skuggorna vid receptorerna anges i tabellen (Tabell 3-4).

Noggrannare tidpunkter för den sannolika förekomsten av rörliga skuggor vid receptorn R10 enligt planen med 18 vindkraftverk framgår av tabellen (Tabell 3-5). Noggrannare tidpunkter för den sannolika förekomsten av rörliga skuggor vid receptorn R7 enligt planen med 15 vindkraftverk framgår av tabellen (Tabell 3-6). Tiderna som anges i tabellerna är enligt tidszonen UTC+2 (finländsk vintertid).



Figur 3-2: Mängden sannolika rörliga skuggor som vindkraftverken orsakar utan trädbeståndets inverkan enligt planen med 18 vindkraftverk.



Figur 3-3: Mängden sannolika rörliga skuggor som vindkraftverken orsakar utan trädbeståndets inverkan enligt planen med 15 vindkraftverk.

Tabell 3-4: Sannolik effekt av rörliga skuggor per dag i timmar och minuter [h:min] vid receptorerna för planer med 18 och 15 vindkraftverk.

Receptor	Sannolik årlig förekomst av rörliga skuggor (18 vindkraftverk)	Sannolik maximal daglig förekomst av rörliga skuggor (18 vindkraftverk)	Sannolik årlig förekomst av rörliga skuggor (15 vindkraftverk)	Sannolik maximal daglig förekomst av rörliga skuggor (15 vindkraftverk)
R1	4:40	0:07	4:40	0:07
R2	1:22	0:04	1:22	0:04
R3	1:08	0:04	1:08	0:04
R4	0:52	0:03	0:52	0:03
R5	2:13	0:07	2:13	0:06
R6	2:45	0:03	2:45	0:03
R7	6:02	0:08	6:02	0:08
R8	1:48	0:04	1:48	0:04
R9	7:07	0:11	1:10	0:02
R10	7:55	0:08	1:36	0:02
R11	0:51	0:03	1:36	0:02
R12	0:15	0:02	0:13	0:01

Tabell 3-5: Tidpunkt och varaktighet av den sannolika årliga effekten av rörliga skuggor i timmar och minuter [h:min] vid receptor R10 enligt planen med 18 vindkraftverk.

Tidpunkt	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Januari	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:18	1:17	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:35
Februari	0:00	0:00	0:00	0:00	0:55	0:39	0:07	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:41
Mars	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
April	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
Maj	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
Juni	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
Juli	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
Augusti	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
September	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
Oktober	0:00	0:00	0:00	0:00	0:47	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:47
November	0:00	0:00	0:00	0:00	0:07	1:22	0:50	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:18
December	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:08	0:26	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:34
Totalt	0:00	0:00	0:00	0:00	1:48	3:27	2:40	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	7:55

Tabell 3-6: Tidpunkt och varaktighet av den sannolika årliga effekten av rörliga skuggor i timmar och minuter [h:min] vid receptor R7 enligt planen med 15 vindkraftverk.

Tidpunkt	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
Januari	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
Februari	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
Mars	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:08	0:16	0:00	0:00	0:24
April	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:13	0:00	0:00	0:13
Maj	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:19	0:20	0:00	0:38
Juni	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	2:30	0:00	2:30
Juli	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	1:22	0:00	1:22
Augusti	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:25	0:11	0:00	0:35
September	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:11	0:03	0:00	0:00	0:14
Oktober	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:05	0:00	0:00	0:00	0:05
November	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
December	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
Totalt	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:24	1:15	4:23	0:00	6:02

4 SAMMANFATTNING

I rapporten presenteras kalkylerade uppskattningar av hur den planerade vindkraftsparken Västervik II i Kristinestad påverkar omgivningen genom effekterna av rörliga skuggor. Konsekvensbedömningen har gjorts för placeringsplanerna med 18 och 15 vindkraftverk, med rotordiameter på 230 meter och navhöjd på 225 meter. Utredningen har också beaktat effekterna från vindkraftsparken Västervik I öster om projektområdet i modelleringarna.

På basis av modelleringen för rörliga skuggor stannar den årliga sannolika effekten av skuggorna under riktvärdet på åtta timmar vid alla bostads- och fritidshus med båda placeringsplanerna. Även den sannolika tiden per dag underskrider riktvärdet på 30 minuter vid alla fritids- och bostadshus.

5 BERÄKNINGSMODELL FÖR EFFEKTEN AV RÖRLIGA SKUGGOR

Vid beräkning av effekten av rörliga skuggor används begreppet himmelssfär, som är ett fiktivt skal som motsvarar jordens geografiska koordinater sett från jordklotet mot himlen. På samma sätt som positionen för en plats på jorden kan uttryckas i termer av longitud och latitud, kan himlakropparnas positioner på himmelssfären anges genom två koordinater (rektascension och deklination). Under året rör sig solen längs ett band på himmelssfären mellan vändkretsarna, och solens frekvens på detta band kan presenteras som täthetsfunktion.

När man räknar ut förekomsten av rörliga skuggor per år i en viss punkt granskar man den del av himlen som syns genom vindkraftverkets rotorcirkel från den aktuella punkten. I beräkningen av synligheten beaktas höjddata för den lokala terrängen. Om bandet mellan vändkretsarna inte syns genom rotorcirkelarna förekommer inga rörliga skuggor vid betraktelsepunkten. I annat fall fås antalet timmar med rörliga skuggor från ett enskilt vindkraftverk genom att man integrerar täthetsfunktionen med den andel av himmelssfären som syns genom vindkraftverkets rotorcirkel. Vindkraftverkens sammantagna effekt får man genom att summera det vindkraftverksspecifika antalet timmar med rörliga skuggor, dock med beaktande av eventuella överlappningar i de områden som täcks av rotorcirkelarna. Beräkningen utförs separat för vindkraftverkens olika riktningar som sedan skalas med de riktningsspecifika vindandelarna.

Vid beaktande av månatliga (eller andra kortvariga) variationer i sannolikheten för solsken delas himmelssfärens band in i motsvarande delar enligt solens deklination. Täthetsfunktionen definieras separat för dessa delar, och integrationsresultaten skalas med de månatliga sannolikheterna.

Skuggan av vindkraftverkets turbinblad minskar gradvis när man rör sig längre bort från vindkraftverket, och efter ett visst avstånd är den rörliga skuggan inte längre synlig för det mänskliga ögat. Detta avstånd beror på vindkraftverkets bladbredd, och till exempel i de svenska och tyska riktlinjerna för utbyggnad av vindkraft anges att effekterna av rörliga skuggor beaktas om bladet täcker minst 20 procent av solen. I praktiken innebär detta att det maximala avståndet för rörliga skuggor för ett enskilt vindkraftverk beror på bladbredden och att det inte förekommer några rörliga skuggor utanför detta avstånd.

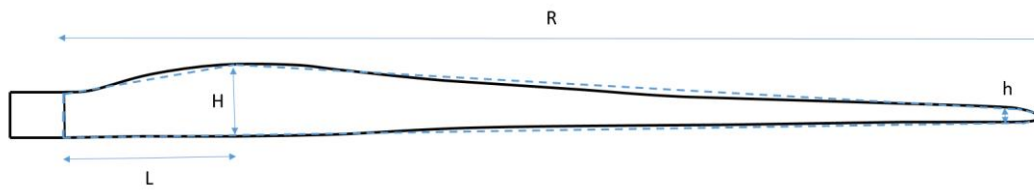
När bladets bredd är w meter kan man använda följande formel för att beräkna maximalt avståndet för uppkomst av rörliga skuggor utgående från att solen ska täckas till 20 procent:

$$\text{maximialavstånd} = (5 * d * w) / 1'097'780,$$

där d är avståndet till solen (150'000'000 km). I allmänhet baseras beräkningen av det maximala avståndet på bladens genomsnittliga bredd, vilket bestämmer det maximala avståndet. I praktiken har vindkraftverkets blad ingen standardbredd: Den bredaste punkten ligger nära vindkraftverkets nav och bladet smalnar av betydligt mot spetsen. På basis av detta sträcker sig de rörliga skuggorna från bladets bas betydligt längre än den från bladets spets, om solens täckningsgrad används som beräkningsgrund.

Följande diagram (Figur 5-1) visar en modell av en typisk profil med en maximal bladbredd H på ett avstånd L från bladets bas. Bladets totala längd är R och bladets bredd vid 90 procents avstånd från basen är h . Bladet antas avsmalna lineärt från värdet H till värdet h från den maximala bredden ut mot spetsen. I konventionella beräkningar för rörliga

skuggor bestäms vindkraftverkets genomsnittliga bredd som genomsnittet av parametrarna H och h .



Figur 5-1: Modellprofil för vindkraftverkets blad.

Beräkningen av rörliga skuggor i denna rapport baserar sig på de profiluppgifter för bladet som meddelats av vindkraftverkets tillverkare. Rotorradien att beakta i beräkningen varierar mellan $[0, R]$ beroende på avståndet från observationspunkten till turbinerna, bladbredden och motsvarande soltäckningsgrad. På detta sätt tar beräkningen av rörliga skuggor hänsyn till vindkraftverkets varierande bladprofil och ger mer realistiska resultat än om man utgår från en given genomsnittlig bladbredd och motsvarande fast maximalt avstånd.

6 REFERENSER

- [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, Meteorologiska institutet, Rapporter 2021:8.
- [4] Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Datum 2016. Miljöförvaltningens anvisningar 5|2016.