EKSTERN RAPPORT

Nr. 4/2022

Vurdering av kunnskapsgrunnlag for skyggekast

Norconsult AS

NVE Ekstern rapport nr. 4/2022
Oppdatert kunnskapsgrunnlag om skyggekast fra vindturbiner

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Redaktør: Thomas Mo Willig

Forfatter: Norconsult AS

Forsidefotograf: ARSEA og Norconsult AS

ISBN: 978-82-410-2189-3

ISSN: 2535-8235

Saksnummer: 202117162

Trykk: NVEs hustrykkeri

Opplag: 5

Sammendrag: Beregning av skyggekast blir brukt som et viktig verktøy i behandling av vindkraftverk for å vurdere virkningene av skyggekast. Målet med beregningene er å gi NVE og berørte parter et best mulig grunnlag for å kunne vurdere omfanget av skyggekast fra planlagte vindkraftverk.

Høsten 2021 fikk NVE utarbeidet en rapport med en gjennomgang av ulike lands retningslinjer rundt skyggekast og en eksempelstudie som undersøker virkningen av skyggekast ved ulike turbinstørrelser. På grunnlag av denne studien gis det anbefalinger om beregningsavstander.

Emneord: Skyggekast, vindkraft, vindturbiner

Norges vassdragas- og energidirektorat
Middelthuns gate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 22 95 95 95
E-post: nve@nve.no
Internett: www.nve.no

mars, 2022

Forord

I prosessen med å søke konsesjon, og å lage detaljplaner for konsesjonsgitte vindkraftverk brukes beregning av skyggekast som et verktøy for å vurdere omfanget av skyggekast. Beregningen skal bidra til å gi et best mulig beslutningsgrunnlag for å vurdere hvordan vindkraftverket påvirker mottakere av skyggekast.

NVE fikk i mars 2021 en bestilling av Olje- og energidepartementet om å oppdatere kunnskapsgrunnlaget om virkninger av vindkraft på land. Som et ledd i dette arbeidet fikk Norconsult AS i oppdrag å gjøre en vurdering av kunnskapsgrunnlaget for skyggekast fra vindturbiner.

Formålet med vurderingen var å undersøke om det har vært endringer i andre lands regelverk for skyggekast fra vindturbiner, og å undersøke hvordan større vindturbiner påvirker omfanget av skyggekast. Resultatene viser at andre lands regelverk er tilnærmet uendret, og at større rotorblader gjør at skygge kan kastes noe lengre enn tidligere antatt.

Oslo, mars 2022

Inga Nordberg
Direktør
Energi- og konsesjonsavdelingen

Erlend Bjerkestrand
Fungerende seksjonssjef
Energi- og konsesjonsavdelingen

Dokumentet sendes uten underskrift. Det er godkjent i henhold til interne rutiner.

NVE

Vurdering av kunnskapsgrunnlag for skyggekast

Oppdragsnr.: **52108597** Dokumentnr.: **001** Versjon: **J01** Dato: **2021-12-02**

Foto: AERSEA/Norconsult AS

Norconsult

Oppdragsgiver: NVE
Oppdragsgivers kontaktperson: Thomas Mo Willig
Rådgiver: Norconsult AS, Tærudgata 16, NO-2004 Lillestrøm
Oppdragsleder: Maria Enger Hoem
Fagansvarlig: Einar Berg
Andre nøkkelpersoner:

Versjon	Dato	Beskrivelse	Utarbeidet	Fagkontrollert	Godkjent
J01	2021-12-02	Fagkontrollert rapport.	Maria Enger Hoem	Einar Berg	Lars Tallhaug
A01	2021-11-29	Intern gjennomlesing	Maria Enger Hoem	Einar Berg	

Dette dokumentet er utarbeidet av Norconsult AS som del av det oppdraget som dokumentet omhandler. Opphavsretten tilhører Norconsult AS. Dokumentet må bare benyttes til det formål som oppdragsavtalen beskriver, og må ikke kopieres eller gjøres tilgjengelig på annen måte eller i større utstrekning enn formålet tilsier.

Sammendrag

I forbindelse med at kunnskapsgrunnlaget for virkninger av vindkraftverk på land skal oppdateres er det undersøkt om det er grunnlag for å oppdatere kunnskapsgrunnlaget også for skyggekast. Særlig anbefalingen om en beregningsavstand på 1500 m mellom turbin og skyggemottaker er lagt vekt på i denne vurderingen med tanke på at turbinstørrelsen har økt mye de senere årene.

Med hjelp fra NORWEA er det undersøkt ulike lands retningslinjer rundt skyggekast. Det kommer frem at mange land baserer seg på de tyske retningslinjene hvor det settes grenseverdier for "worst case"-beregninger på 30 timer per år og 30 min per dag. For beregninger hvor det inkluderes lokale forhold for blant annet vind og sol, "real case"-beregninger, er grensen satt til 8 timer per dag som kontrolleres med en skyggekastteller. De strengeste retningslinjene forekommer i Nederland med antall dager og minutter per dag, tilsvarende 5 timer og 40 minutter med skyggekast per år for faktisk skyggekast, mens Danmark er mindre strenge med grense på 10 timer per år.

Det er utført en case studie med tre forskjellige turbinstørrelser for å undersøke effekten av turbinstørrelse på skyggekast. Dersom det benyttes en beregningsavstand hvor minst 20 % av solen dekkes av turbinbladet blir avstanden lengre enn 1500 m som er gitt i veilederen for skyggekast. Bredden på turbinbladene blir da avgjørende for beregningsavstanden, og jo større turbiner jo bredere blader, vanligvis. I case studiet får en turbin med rotordiameter på 150 m og bladbredde på 4,20 m en beregningsavstand på 1905 m. Dersom beregningsavstanden begrenses til 1500 m vil skyggekastene fra flere av turbinene i dette tilfellet ikke tas med hos flere av mottakerne.

For beregning av sannsynlig skyggekast er faktorene solskinnsannsynlighet, driftstimer, vindretninger og rotasjonshastighet diskutert med tanke på økt størrelse på turbiner. Det er ikke funnet grunnlag for å endre bruken av solskinnssannsynlighet på 50 %, eller bruken av lokale vindretninger. Driftstimer for turbinene vil variere fra lokasjon til lokasjon etter vindforholdene og kan estimeres ut fra tid med vindhastigheter under cut-in og over cut-out vindhastigheter og 3 % utilgjengelighet. Dette vil i flere tilfeller avvike fra de satte 7000 timene fra veilederen. Det er ikke oppgitt beskrivelse av rotasjonshastighet og dens påvirkning på skyggekast i underlaget fra NORWEA med oppsummering av andre lands retningslinjer. Rotasjonshastigheten på moderne turbiner er langt under hastigheter som anses å kunne gi risiko for epilepsianfall gjennom skyggekast.

På bakgrunn av at dagens turbiner er betydelig større enn turbinene som var vanlig å benytte i 2012 når anbefalingen om beregningsavstand på 1500 m ble satt, og at de tyske retningslinjene er godt utbredt i andre lands retningslinjer, anbefales det å benytte en beregningsavstand med krav om at minst 20 % av solskiven skal være dekket av turbinbladene for å tas med i skyggekastberegningene. Dermed blir beregningsavstanden spesifikk til turbinene som benyttes. Det skal likevel bemerkes at diffusjonseffekten på avstander som 1500 meter og mer er betydelig, slik at skyggekast i slike tilfelle neppe representerer stor visuell påvirkning. Vår anbefaling om å endre beregningsgrunnlaget er derfor først og fremst basert på en «føre-var» betraktning.

Innhold

1 Innledning 5

1.1 Bakgrunn 5

1.2 Nasjonal ramme for vindkraftverk nr. 72/2018. Temarapport om nabovirkninger 5

2 Lover og regler for skyggekast i andre land 6

3 Case studie: Stokkfjellet vindkraftverk 9

4 Diskusjon rundt faktorer i dagens retningslinjer for beregning av skyggekast 12

4.1 Solskinnsannsynlighet 12

4.2 Driftstimer 12

4.3 Vindretninger 12

4.4 Beregningsavstand 13

4.5 Rotasjonshastighet 13

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I 2012 ble det gjort et grundig arbeid for å øke kunnskapsgrunnlaget rundt skyggekast fra vindkraftverk av Norconsult (Hytteborn, Smith, & Berg, 2012). På bakgrunn av blant annet denne rapporten ble det skrevet en veileder for beregning av skyggekast og NVEs forvaltningspraksis (NVE, 2014), der er det definert grenseverdier for maksimal og faktisk skyggekast. Grenseverdiene NVE anbefaler i veilederen tilsvarer de tyske grenseverdiene fra samme periode: 8 timer per år for faktisk skyggekast, eller 30 timer per år eller 30 minutter per dag for teoretisk skyggekast. Det er også definert metode for å beregne tid med skyggekast på skyggemottakere.

I forbindelse med at kunnskapsgrunnlaget for virkninger av vindkraftverk på land skal oppdateres, er det undersøkt om det er grunnlag for å oppdatere kunnskapsgrunnlaget også for skyggekast.

1.2 Nasjonal ramme for vindkraftverk nr. 72/2018. Temarapport om nabovirkninger

Det er i mange europeiske land satt belastningsgrenser for skyggekasteksponering. Flertallet av grenseverdiene har tatt utgangspunkt i tyske retningslinjer. Grenseverdiene i de tyske retningslinjene er utredet i to forskningsprosjekter:

Ved Institut für Psychologie der Christian-Albrechts-Universität i Kiel ble det gjennomført to forskningsprosjekt. Det sentrale spørsmålet i den ene rapporten “Belästigung durch periodischen Schattenwurf von Windenergianlagen” (Pohl & et.al., Belästigung durch periodischen Schattenwurf von Windenergianlagen, 1999), var å finne ut om grensene 30 minutter per dag eller 30 timer per år (worst case) er et bra grunnlag for når man skal kreve avbøtende tiltak. Dette for å unngå betydelig og uønsket belastning fra skyggekast. Studien viste at de som utsattes for mer skyggekast enn 15 timer per år følte seg sterkt belastet og vurderte sin livskvalitet som merkbart forringet.

Den andre forskningrapporten er “Belästigung durch periodischen Schattenwurf von Windenergianlagen, Laborpilotstudie” (Pohl, Faul, & Mausfeld, Belästigung durch periodischen Schattenwurf von Windenergieanlagen Laborpilotstudie, 2000). Her er det sentrale spørsmålet om skyggekast overskridende 30 minutter gir stresseffekter. Rapporten dro ikke noen enhetlige konklusjoner på dette. Samlet sett ga ikke studien grunnlag for at belastningen blir for stor, men at den kumulative effekten på lengre sikt kan gi betydelig belastning. I rapporten gir man forslag til oppfølgende eksperimentelle undersøkelser der man tar med flere parametere rundt skyggekast (tilfeldig, diskontinuerlig og uforutsigbart skyggekast). Man mente også at man burde ta med støy i kombinasjon med skyggekast som en parameter.

Påvirkningen av skyggekast avtar med avstand mellom turbin og betrakter. Det er to typer forstyrrende effekter av skyggekast: «flikker» over solskiven, og projisert roterende skygge. Man har vurdert det slik at flikkereffekten ikke er merkbar når mindre enn 3% av solskiven er dekket. Tilsvarende viskes kontrasten og konturene av skygge på omgivelsene ut med økt avstand. Det er derfor i den norske retningslinjen fastsatt en maksimal grense for skyggekastpåvirkning på 1500 meter mellom turbin og skyggemottaker (NVE, 2014).

2 Lover og regler for skyggekast i andre land

Med hjelp fra NORWEA er det undersøkt retningslinjer eller forskrifter for skyggekast i andre land, både i Europa og noen land ellers i verden, se tabell 2-1. Her kommer det frem at det er mange land som baserer seg på den tyske retningslinjen for skyggekast hvor grensene settes til 30 timer per år og 30 min per dag for en «worst case»-beregning, og til 8 timer per dag for «real case»-beregning hvor det benyttes lokal vindstatistikk og solstatisitkk, og som kontrolleres med en skyggekastteller (Länderausschuss für Immissionsschutz, 2002). De tyske retningslinjene baserer seg fortsatt på de samme studiene i dag. Det er allikevel forskjeller i implementeringen av disse grenseverdiene for forskjellige land. Det er forskjeller i definisjonen av sensitive mottakere og relevant påvirkningssone for skyggekast. I noen land kan et kontorbygg være definert som sensitiv mottaker, mens i andre land er det ikke det, noe som vil kunne føre til store forskjeller i produksjonstap ved bruk av en skyggekastteller. NORWEA bemerker også at det ikke alltid er klart om landene som benytter grenseverdien på 30 timer per år refererer til «worst case» eller ikke.

Distriktet South Australia i Australia har oppdatert retningslinjene sine siden rapporten om forvaltningspraksis for skyggekast fra 2012 (Jakobsen, Bølling, & Bjerkestrand, 2018) ble skrevet. De henviser nå til nasjonale retningslinjer for Australia. Fra å benytte en avstand på minst 500 m gir retningslinjene nå en avstand på 265 x maksimal bredde på turbinblad. Ved maksimal bredde på eksempelvis 4 m blir avstanden 1060 m.

Irland har også oppdatert retningslinjene sine noe etter rapporten fra 2012. Da anbefaltes det at bygg som er nærmere enn 500 m fra en turbin ikke skal ha mer enn 30 timer per år og 30 timer per dag med skyggekast. Det antas også at ved en avstand på 10 x rotordiameter forventes effekten av skyggekast å være liten. Ved en rotordiameter på 150 m blir dette en avstand på 1500 m. I dag er det ikke lengre spesifisert en avstand på 500 m hvor det er definert grenseverdier, og anbefalingen om 30 timer per dag er ikke lengre tatt med.

Sverige, Frankrike, Nederland, Storbritannia, USA og Canada var også nevnt i rapporten fra 2012, men det ser ikke ut til at retningslinjene er oppdatert siden den gang. De baserer seg fortsatt på de tyske retningslinjene med 30 timer per år. Danmark har heller ikke oppdatert sine retningslinjer.

De strengeste retningslinjene som er undersøkt her forekommer i Nederland. Her er det satt grense på 20 minutter per dag og 17 dager per år, noe som tilsvarer 5 timer og 40 minutter skyggekast per år. Til sammenligning er de tyske retningslinjene for faktisk skyggekast på 8 timer per år. Mens Danmark og deler av Australia som har egne retningslinjer, har 10 timer faktisk skyggekast per år som grense.

Tabell 2-1: Mottatt tabell fra NORWEA med oversikt over ulike lands lover og regler rundt skyggekast.

Land	Skyggekastgrenser	Berørte / avstand	Lov / veileder
Australia – nasjonalt nivå	- Worst case: 30 timer/år - Ingen daglig grense - Virkelig tilfelle: 10 timer/år (kun nødvendig dersom «worst case» overstiger 30 timer/år)	50 m radius rundt alle hus innenfor en avstand på 265 x maksimal bredde på turbinblad	Retningslinje. Ingen nasjonal lovgivning
Australia – Queensland	- Worst case: 30 timer/år og 30 min./dag - Virkelig tilfelle: 10 timer/år (kun nødvendig i verste fall overskrider	Hver bolig 50 m fra sentrum innenfor avstand på 265 x maksimal bredde på turbinblad	Retningslinje.

	30 timer/år)		
Australia – Tasmania	Viser til nasjonal retningslinje	Viser til nasjonal retningslinje	Retningslinje.
Australia – New South Wales	30 Timer/år	Boliger innenfor 2 km avstand	Retningslinje.
Australia – Western Australia	1 km avstandsgrense	Støyfølsomme bygninger ikke knyttet til vindpark.	Retningslinje.
Australia – Victoria	30 Timer/år	Boliger	Retningslinje.
Australia – South Australia	Viser til nasjonal retningslinje	Viser til nasjonal retningslinje	Retningslinje.
Østerrike	Worst case: 30 timer/år og 30 min/dag	Følsomme bygninger, influenssone ca. 2000 m – 2500 m	Ingen lovgivning
Belgia - Flandern Region	Virkelig tilfelle: - 8 timer/år og 30 min./dag - På industritomter, med unntak av boliger, 30 timer/år og 30 min./dag	Boliger, sykehus, sykehjem, skole bygninger, kontor bygninger etc.	Lovgivning
Belgia - Vallonsk Region	Worst case: 30 timer/år og 30 min./dag	Boliger, sykehus, sykehjem, skolebygninger etc.	Lovgivning
Brasil	Worst case (anbefalt): 30 timer/år og 30 min./dag	Sensitive bygninger	Ingen lovverk, HMS retningslinje for vind energi (World Bank Group)
Canada	Worst case: 30 timer/år og 30 min./dag	Sensitive bygninger	Ingen lovverk eller retningslinje, men vanlig praksis
Danmark	Real case: 10 timer / år	Boliger	Retningslinje
Tyskland	- Worst case: 30 timer/år og 30 min./dag - Real case: 8 timer/år (kun nødvendig hvis skygge flimmerkontrollsystem er brukt)	Stuer, salonger, soverom, klasserom i skolebygg, kontorer, laboratorier og arbeidsplasser innenfor en avstand der rotorblad dekker minst 20 % av solskiven	Retningslinje vedtatt av mange delstater
India	Worst case: 30 timer/år og 30 min./dag	Boliger	Ingen lovverk eller retningslinje, men vanlig praksis
Irland	Maks 30 timer/år anbefales	Boliger innenfor 10 rotordiameter avstand	Retningslinje
Japan	30 timer/år	Boliger	Ingen lovgivning, kun for EIA-formål
Nederland	Maks 17 dager pr	Boliger, skole	Lovgivning

	år mer enn 20 minutters ekte skyggekast	bygninger, sykehus, sykehjem, barnehager etc. Innenfor en avstand fra 12 ganger rotor diameter	
Polen	30 Timer/år	Boliger	Ingen lovgivning, men vanlig praksis
Serbia	30 Timer/år og 30 min./dag	Boliger og kontorer innen 500 m avstand	Retningslinje
Sverige	- Worst case: 30 timer/år og 30 min./dag - Real case: 8 timer/år	Følsomme bygninger	Retningslinje
Storbritannia – England, Wales	Ingen fastsatt grenseverdi, men vanlig praksis er maksimalt 30 timer/år, og 30 minutter/dag	Boliger innenfor sone med 10 rotordiametere fra hver turbin og mellom 130 grader hver side av nord (i forhold til hver turbin)	Retningslinje og vanlig praksis
Storbritannia – Skottland	Ingen fastsatt grenseverdi, men som en generell regel på avstand 10 x rotordiameter forventes ikke skyggeflimmer å være et problem	Bolig	Retningslinje
USA – nasjonal Nivå	30 timer/år og 30 min./dag	Bygninger i bruk	Retningslinje
USA – Connecticut	30 Timer/år	Bygninger i bruk	Lovgivning
USA - Wisconsin	30 timer/år - skyggekast demping når man opplever 20 timer eller mer per år med skyggekast	Boliger og samfunnsbygg	Lovgivning

3 Case studie: Stokkfjellet vindkraftverk

Det er utført en case studie på Stokkfjellet Vindkraftverk hvor det her er benyttet 3 forskjellige turbintyper med ulike størrelser for å se på effekten dette har på skyggekast. Ytterligere informasjon om Stokkfjellet Vindkraftverk finnes på konsesjonssidene (NVE, 2021).

Her er det undersøkt tre ulike turbintyper: Nordex N90, Vestas 136 og V150. Disse turbintypene er valgt for å undersøke effekten på skyggekast med turbiner med ulik rotordiameter, bladbredde og rotasjonshastighet. Navhøyden er beholdt lik for alle tre alternativene, men totalhøyde varierer da bladlengden varierer mellom de ulike typene. Den minste av turbinalternativene, N90, har en maksimal bladbredde på 3,22 m, men den største turbintypen, V150, har tilsvarende 4,20 m. Rotasjonshastigheten til N90 er på 16,9 rpm, mens den er på 10,4 for både V136 og V150. Se oversikt i tabell 3-1.

I de tyske retningslinjene for skyggekast er det definert en avstand fra turbinene hvor skyggekast anses å forekomme før skyggekastene anses å være så diffuse at de blir neglisjerbare. Avstandsberegningen tar høyde for bredden på turbinbladet, w, og avstanden fra solen, d, i formelen nedenfor. Bladene må dekke minst 20 % av solskiven for at skyggene skal tas med i beregningene. Tallet 1 097 780 er i de tyske retningslinjene utledet fra diameteren på solen med en reduksjon ettersom solskiven er en sirkel og ikke en firkant. Denne avstandsbegrensningen kan aktiveres i beregningsprogrammet WindPRO (EMD, 2020).

$$\text{maksimal beregningsavstand} = \frac{(5 \cdot w \cdot d)}{1097780}$$

Tabell 3-1: Oversikt over de tre turbintypene som er undersøkt i casestudiet.

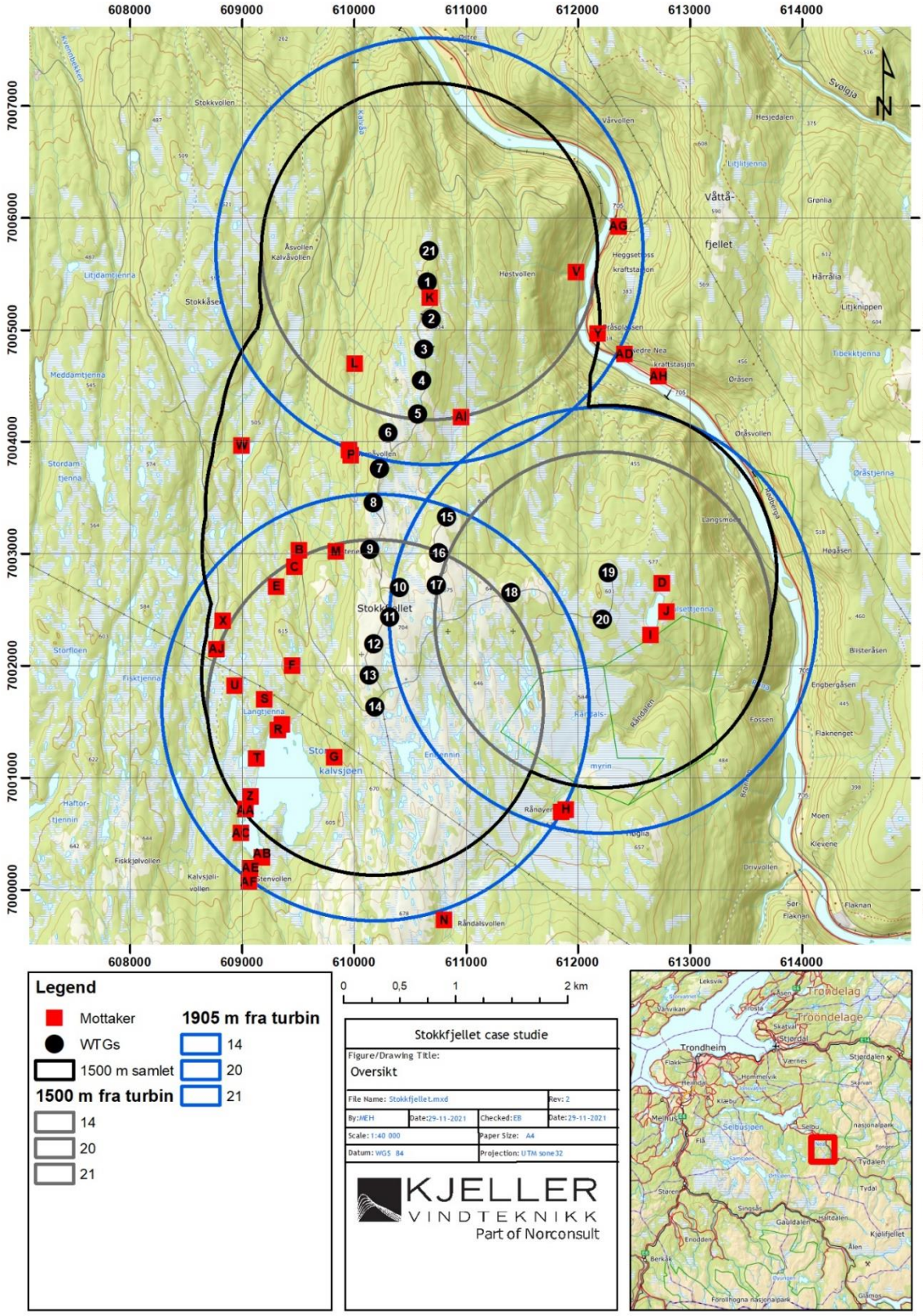
	N90	V136	V150
Navhøyde [m]	112	112	112
Diameter [m]	90	136	150
Totalhøyde [m]	157	180	187
Bladbredde, max [m]	3,22	4,10	4,20
Bladbredde, R*90 % [m]	1,27	1,20	1,40
Rotasjonshastighet [rpm]	16,9	10,4	10,4
Beregningsavstand [m]*	1526	1802	1905
Cut-in vindhastighet [m/s]	3	3	3

* Avhenger av maksimal bladbredde og bredden ved 90 % av lengden på bladet.

Beregningsresultatene for de aktuelle skyggemottakerne i Stokkfjelletprosjektet er vist i tabell 3-2. Beregningsavstanden for de tre turbinene, når det tas med informasjon om bladbredde og krav om 20 % dekning av solskiven fra bladene, overstiger alle 1500 m. Det er utført skyggekastberegninger for hver av de tre alternativene for avstand opp til 1500 m og for avstand opp til respektive avstander beregnet fra bladbredden. Beregningene hvor skyggekast utenfor 1500 m fra turbinene ikke vurderes gir mindre tid med skyggekast ved mottakerne enn når avstanden øker. En mottaker, AJ, blir ikke markert som over grenseverdien 30 timer per år for de to større turbinstørrelsene når 1500 m settes som beregningsavstand, mens ved lengre beregningsavstand bidrar flere turbiner til totalt skyggekast og fører til at grensen overskrides. For eksempel, ved 1500 m avgrensning er det kun skyggekast fra turbin 12 og 13 som tas med i beregningen av tid med skyggekast for mottaker AJ, mens ved økt beregningsavstand til 1905 for V150 er det turbin 9, 10, 11, 12, 13 og 14 som tas med. Her er avstandene fra mottaker AJ til de nevnte turbinene litt over og litt under 1500 m, dermed blir konsekvensen av å kutte ved 1500 m størst for denne mottakeren da tid med skyggekast ligger over grensen når alle de nevnte turbinene tas med, men under dersom ikke alle inkluderes.

Tabell 3-2: Tid med skyggekast for tre ulike turbiner. Beregnet både med avstandsbegrensning avhengig av bladbredde og krav om 20 % dekning av solskiven, og med avstand på 1500 m. Tid over grensen på 30 timer per år er parkert i rødt, og tilfeller hvor beregnet tid med skyggekast er ulik ved ulik beregningsavstand er markert i grått.

Mottaker	N90 1526 m	N90 1500 m	V136 1802 m	V136 1500 m	V150 1905 m	V150 1500 m	Avstand til nærmeste turbin
	Worst case [hh:mm/y]	Worst case [hh:mm/y]	Worst case [hh:mm/y]	Worst case [hh:mm/y]	Worst case [hh:mm/y]	Worst case [hh:mm/y]	[m]
A	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	1756
B	46:30	46:30	107:02	104:04	129:55	126:47	638
C	70:18	70:18	167:19	167:19	200:38	199:31	695
D	86:09	86:09	168:19	168:19	196:17	196:17	489
E	61:32	61:32	150:35	145:19	180:56	175:39	900
F	91:39	91:39	196:50	194:03	232:24	229:58	698
G	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	577
H	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	1726
I	48:35	48:35	101:22	101:22	117:27	117:27	447
J	40:29	40:29	103:50	103:50	127:26	127:26	574
K	191:08	191:08	409:51	409:22	486:19	485:33	137
L	68:51	68:51	145:08	141:20	168:40	164:52	619
M	113:18	113:18	244:17	244:17	292:10	292:10	308
N	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	2000
O	111:23	111:23	264:48	256:51	337:29	329:58	321
P	151:35	151:35	339:41	337:37	400:19	398:14	287
Q	20:52	20:52	54:59	54:59	67:51	67:51	849
R	19:08	19:08	51:18	51:18	63:33	63:33	895
S	51:50	51:50	122:51	103:43	145:42	121:39	963
T	16:11	16:11	39:09	39:09	47:52	47:52	1157
U	16:11	16:11	68:52	36:18	83:00	44:05	1211
V	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	1325
W	17:11	17:11	53:41	38:28	74:51	46:39	1254
X	16:22	16:22	65:00	36:41	79:49	44:46	1372
Y	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	1488
Z	13:47	13:47	24:17	24:17	27:46	27:46	1370
AA	10:56	10:56	19:44	19:44	22:49	22:49	1475
AB	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	1679
AC	00:00	00:00	10:45	00:00	13:06	00:00	1648
AD	00:00	00:00	00:00	00:00	12:47	00:00	1750
AE	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	1826
AF	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	1928
AG	00:00	00:00	00:00	00:00	01:25	00:00	1705
AH	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	1814
AI	93:45	93:45	226:33	204:53	269:00	243:19	387
AJ	11:02	07:51	52:06	17:23	63:26	21:13	1387



Figur 3-1: Oversiktskart over turbiner og mottakere på Stokkfjellet. Det er vist eksempler på avstandssirkler på 1500 m og største beregningsavstand på 1905 m for de tre ytterste turbinene 14, 20 og 21 i området.

4 Diskusjon rundt faktorer i dagens retningslinjer for beregning av skyggekast

Dagens veileder for skyggekast (NVE, 2014) definerer beregningsmetodikken med følgende punkter. Teoretisk skyggekast skal beregnes hvor det antas at solen alltid skinner, turbinene står aldri stille og at alle turbinene alltid står vendt mot skyggekastmottakerne. Dersom det skal beregnes sannsynlig skyggekast, som er et estimat på faktisk skyggekast, benyttes solskinnssannsynlighet for hver av årets måneder, årlig driftstid for turbinene og deres fordeling på vindretninger.

Sannsynlig skyggekast eller «real case» (R) beregnes fra «worst case»-beregningene (W) med ulike reduksjonsfaktorer: solskinnssannsynlighet (S), driftstimer (D) og vindretningsreduksjon (V) etter følgende formel.

$$R = W \cdot S \cdot D \cdot V$$

I tillegg skal det tas hensyn til eventuelle skjermingseffekter av mellomliggende terreng.

4.1 Solskinnsannsynlighet

Reduksjonsfaktoren for tid med skyggekast grunnet solskinnssannsynlighet ligger gjerne mellom 0,2 og 0,4 (Hytteborn, Smith, & Berg, 2012), og er en spesielt usikker faktor. Det er tidligere vurdert til at man gjør skyggekastberegninger i Norge med en fastsatt solskinnsannsynlighet på 0,5 for ikke å overdrive reduksjonen. Det er ikke funnet grunnlag for å endre denne praksisen i dette arbeidet.

4.2 Driftstimer

I veilederen for skyggekast er det beskrevet at man skal legge til grunn en årlig driftstid på 7000 timer i beregningene. Faktisk driftstimer for en vindpark varierer blant annet med vindforholdene og med vedlikehold eller nedetid for turbinene. Turbinene opererer i et vindhastighetsintervall mellom nedre vindhastighet (cut-in) og øvre vindhastighet (cut-out). Disse vindhastighetene varierer noe med turbintype og størrelse, men typiske verdier er 3 m/s for cut-in og 25 m/s for cut-out. Turbinene vil noen ganger stoppe av andre grunner enn at det er for lite eller for mye vind, som når det trengs vedlikehold eller lignende. Etter erfaringer med flere analyser på vindparker i drift utgjør slike stans typisk rundt 3 % av tiden.

For Stokkfjellet tilsvarer dette estimerte driftstimer på 7054 av de 8760 timene det er i et år. Da er det vindhastigheter under cut-in eller over cut-out 16,5 % av tiden, og det er lagt til at turbinene er utilgjengelige 3 % av tiden. Ved å gjøre samme øvelse på måledata ved tre andre områder spredt rundt i Norge får vi antall driftstimer mellom 5693 og 7747 til sammenligning. Variasjonen i antall driftstimer kan altså variere en god del fra lokasjon til lokasjon med tanke på vindforholdene.

Et alternativ til å ha fastsatt 7000 timer med drift i året er å legge til grunn driftstimer spesifikt for beregnede verdier i vindstatistikken for området, og turbinene som er planlagt/benyttet i vindparken.

4.3 Vindretninger

Lokal vindstatistikk fra meteorologiske målinger eller modellerte data kan gi fordelingen i ulike vindsektorer som kan benyttes i beregningene. Det bør da gjøres en vurdering av fordelingen på vindretninger og se at de samsvarer med vindretningene som er forventet med området. Særlig for måledata som kan være lokalisert langt unna området som skal vurderes, og der dette påvirkes av lokale effekter, kan vindretningene skifte betydelig.

4.4 Beregningsavstand

NORWEAs undersøkelser i andre langs retningslinjer for skyggekast viser at mange land ikke har en spesifikk avstand fra turbiner til mottakere hvor det skal utføres skyggekastberegninger. De landene som har slike definisjoner varierer mellom satte avstander og avstander som avhenger av turbinstørrelsen, enten rotordiameter eller også bladbredde. Mange land benytter de tyske retningslinjene hvor det beregnes en avstand avhengig av bladbredden og krav om 20 % dekning av solskiven fra bladet som avstand. Avhengig av turbinstørrelsen vil denne avstanden avvike fra de 1500 m som er anbefalt i den norske veilederen. For større og nyere turbiner vil denne avstanden fort bli lengre enn 1500 m.

Da influenssonen, eller beregningsavstanden, på 1500 m ble foreslått i 2012 (Hytteborn, Smith, & Berg, 2012) refererte det til skyggekastrapporter gjort i flere ulike land med den tidens turbiner. Da viste det seg at skyggekasteffektene var små ved avstander på 1000 til 1200 m, og man valgte en beregningsavstand på 1500 m for å ikke sette en for snau grense. Siden det i konsekvensutredningene er blitt beregnet med et eksempel på turbinalternativ har det vært vanskelig å sette turbinspesifikke avstandsgrenser. Dagens turbiner er typisk større enn de var i tiden frem til 2012 og dersom det i tiden fremover ønskes at det søkes om konsesjon med det turbinalternativet som faktisk skal bygges, kan skyggekastberegningene gjøres med de faktiske turbinstørrelsene. Dermed kan kravet fra de tyske retningslinjene, om at minst 20 % av solen må være dekket av vingebladet sett fra mottakerne, benyttes til å finne beregningsavstanden. Formelen er gitt i kapittel 3.

Det anbefales å benytte en beregningsavstand som er spesifikk for de turbinene som faktisk skal bygges hvor det kreves at minst 20 % av solen dekkes av vingebladet. Det skal likevel bemerkes at diffusjonseffekten på avstander som 1500 meter og mer er betydelig, slik at skyggekast i slike tilfelle neppe representerer stor visuell påvirkning. Vår anbefaling om å endre beregningsgrunnlaget er derfor først og fremst basert på en «føre-var» betraktning.

4.5 Rotasjonshastighet

Vindturbiner har hovedsakelig 3 blader og dermed vil det kastes 3 skygger på et område ved hver rotasjon. Ved hurtigere rotasjonshastighet vil pausene mellom skyggene bli kortere, altså man vil få hurtigere skifte mellom lys og skygge. Større turbiner har som regel lavere rotasjonshastighet som fører til lengre pause mellom skyggekastene. Samtidig har større turbiner ofte bredere blader, noe som fører til at tiden med skygge på et punkt kan tenkes å bli marginalt lengre igjen. Med utgangspunkt i casestudiet i kapittel 3 har vi gjort et regneeksempel der vi beregnet hvor lang tid bladet ved 90% radius ville bruke på å gå gjennom et punkt for henholdsvis N90 og V150. Forskjellen i tid er 0,001 sekunder. Dette er så lite at forskjellen neppe er merkbar, og den vil overskygges av andre usikkerhetsfaktorer i skyggekastberegninger.

Det er ikke oppgitt beskrivelser rundt rotasjonshastighet og skyggekast i sammendraget fra NORWEA fra andre lands retningslinjer. Beregningsprogrammet forutsettes å inkludere utslaget av disse beregningsfaktorene, og variasjonen i rotasjonshastighet mellom ulike typer nye turbiner vil være så liten at det neppe gir merkbare utslag i beregningene uansett.

Rotasjonshastighetene til moderne turbiner av størrelser beskrevet i denne rapporten er alle langt under hastigheter som anses å kunne gi risiko for epilepsianfall. Denne grensen er på 3 blink i sekundet (Knopper, et al., 2014), tilsvarende rotasjonshastighet på 60 rpm for en trebladet turbin.

NVE

Norges vassdrags- og energidirektorat

MIDDELTHUNS GATE 29
POSTBOKS 5091 MAJORSTUEN
0301 OSLO
TELEFON: 22 95 95 95
E-POST: nve@nve.no

www.nve.no