

Tysvær Vindpark AS

► **Tysvær, Rogaland fylke, Norge**

Risikovurdering for iskast fra vindturbiner

Oppdragsnr.: **52107201** Dokumentnr.: **KVT/2021/R109/JMG** Versjon: **J01** Dato: **2021-09-21**



Oppdragsgiver: Tysvær Vindpark AS
Oppdragsgivers kontaktperson: Leon Eliassen Notkevich
Rådgiver: Kjeller Vindteknikk, Tærudgata 16, NO-2004 Lillestrøm
Oppdragsleder: John Magne Gitmark
Fagansvarlig: Rolv Erlend Bredesen
Andre nøkkelpersoner:

J01	2021-09-21	Endelig versjon	John Magne Gitmark	Rolv Erlend Bredesen	Øyvind Byrkjedal
Versjon	Dato	Beskrivelse	Utarbeidet	Fagkontrollert	Godkjent

Dette dokumentet er utarbeidet av Norconsult AS som del av det oppdraget som dokumentet omhandler. Norconsult har ikke noe ansvar overfor tredjepart som eventuelt måtte benytte dette dokumentet.

► Sammendrag

Kjeller Vindteknikk har utviklet modellverktøyet IceRisk for å kartlegge sannsynligheter for isnedfall og iskast fra turbiner, kraftledninger og master (Bredesen & Refsum, 2015). Dette verktøyet benyttes blant annet til å kartlegge sannsynlighet for farlig iskast og isnedfall for deretter å kunne gjennomføre risikoanalyser. Dette blir gjort i henhold til internasjonale retningslinjer (IEA Wind, 2018) og norske retningslinjer (NVE, 2018) som beskrevet av (Bredesen, Butt, & Flage, 2018). Risiko knyttet til våt snø er ikke evaluert.

Det er utført analyser av hyppigheten av atmosfærisk ising i vindparken Tysvær i Tysvær kommunene i Rogaland fylke. Hensikten er å beregne sannsynligheten for iskast i området i og omkring vindparken. Vindparken består av 11 turbiner av typen Siemens Gamesa SWT-DD-130. Turbinene er lokalisert 189 m – 261 m over havet. Med 85 m navhøyde og en rotordiameter på 130 m får turbinene en totalhøyde på 150 meter og turbinbladene til de høyest plasserte turbinene vil nå opp til 411 meter over havet.

Det er beregnet at det vil danne seg ismengder som kan gi farlig isnedfall i 0,04 % av tiden for en turbin plassert i gjennomsnittlig høyde i vindparken, og mellom 0,01 – 0,2 % for enkeltturbiner. Dette fordeler seg i gjennomsnitt på 0,5 episoder per vinter for gjennomsnittsturbinen i parken (0,1 – 1,1 for enkeltturbiner). Det vil være de høyest plasserte turbinene som vil oppleve mest ising, mens de som ligger lavest i terrenget opplever minst ising. I følge IEA sin isklassifisering er Tysvær Vindpark i klasse 1 (lite ising).

De beregnede sannsynlighetene for at farlige isbiter¹ fra turbinene treffer ulike områder ved Tysvær er vist i Tabell 1. En sannsynlighet på 10^{-4} [treff/kvadratmeter/år] betyr at det går 10 000 år mellom hver gang en farlig isbit treffer et gitt område på størrelse 1 kvadratmeter.

Tabell 1 Sammenheng mellom returperiode for treff per kvadratmeter og sannsynlighet for treff per kvadratmeter per år for farlige isbiter. Tredje kolonne angir ved hvilken avstand oppgitt sannsynlighet inntreffer som gjennomsnitt av alle vindretninger rundt den høyeste turbinen i parken (Siemens Gamesa SWT-DD-130) og for gjennomsnittsåret.

Returperiode	Sannsynlighet	Avstand
10 000 år	10^{-4}	30 m
100 000 år	10^{-5}	80 m
1 000 000 år	10^{-6}	160 m

Det er størst fare for eget servicepersonell og eventuelle fotgjengere tett på turbinene og langs internveiene.

Det anbefales å benytte kjente risikoreduserende tiltak. Siden sannsynligheten for iskast er lav vurderes det for Tysvær Vindpark å ikke være nødvendig med ytterligere tiltak utover skilting og informasjon.

Det bør settes opp et skilt ved alle naturlige adkomstveier om at det er fare for isnedfall i nærheten av turbinene. Dette gjelder både veier og eventuelle turstier. Det bør også lages egne sikkerhetsrutiner for de som arbeider i vindparken. I tillegg anbefales det å implementere et erfaringsinnhentingsprogram slik at det sikres at de iverksatte tiltakene er tilstrekkelige.

¹ Beregnet som fritt roterende isterninger med anslagsenergi over 40 J etter metodikk beskrevet i (Bredesen & Refsum, 2015).

► Innhold

1	Innledning	5
2	Beskrivelse av parken	6
3	Isingsforhold for vindparken	7
3.1	Metodikk	7
3.2	Klassifisering av isingsforhold på Tysvær	8
3.3	Vindfordeling ved meteorologisk ising, rotor-ising og ved smelting	9
3.4	Størrelsesfordeling av isbiter	10
3.5	Måned- og årsfordelingen av is	13
4	Beregning av iskast	14
4.1	Sannsynlighet for iskast fra en gjennomsnittsturbin i parken med én vindretning	14
4.2	Sannsynlighetsfordeling for iskast i hele vindparken	15
5	Risikovurdering i Tysvær Vindpark	18
5.1	Risikokart (LIRA)	18
6	Tiltak for å redusere risikoen	20
6.1	Kunnskap	20
6.2	Varsling	20
6.3	Designløsninger	20
6.4	Spesifikke tiltak	21
7	Bibliografi	22
Vedlegg A	Meso-Scale Model WRF	24
A.1	Meso-Scale Model WRF	24
A.2	Input Data	24
A.3	Model Setup	25
A.4	Ice load calculations	25
A.5	Removal of ice	26
Vedlegg B	Risikovurdering	28
B.1	Risikodefinitjon	28
B.2	Definisjon på LIRA, IRPA og PLL	28
B.3	LIRA, metode	28
B.4	Eksponeringsscenarier	30
B.5	Er tiltak nødvendige?	32
Vedlegg C	Risikohåndteringsstrategier	33
C.1	List of risk mitigation strategies related to ice-throw and ice fall	33

1 Innledning

Kjeller Vindteknikk har utført en studie av isingsforholdene for Tysvær i Tysvær kommune.

Gitte kombinasjoner av temperatur, fuktighet og vindhastighet vil kunne medføre isdannelse på vindturbiner. Ved temperaturer under null og samtidig tåke er det muligheter for ising. Den mest vanlige form for ising er underkjølte skydråper som fryser på kalde overflater de kommer i kontakt med. I tillegg kan underkjølt regn og kraftig snøfall ved temperaturer nær 0 til 1 °C medføre ising.



Figur 1-1 Ising på vindturbinblad i Finland. Bildet er gjengitt med tillatelse fra Fins Meteorologisk Institutt.

Hyppigheten og mengden ising er svært avhengig av høyden over havet. En høy fjelltopp vil ofte befinne seg inne i skyene. Dersom temperaturen samtidig er under 0 °C, vil det kunne akkumuleres is på konstruksjoner.

På en vindturbin vil det også legge seg is under slike værforhold. Dersom turbinen roterer samtidig som isen akkumuleres, vil normalt isen legge seg på fremkanten av bladet som vist i Figur 1-1. Denne isen vil kunne redusere produksjonen til turbinen, eller i verste fall stoppe den helt.

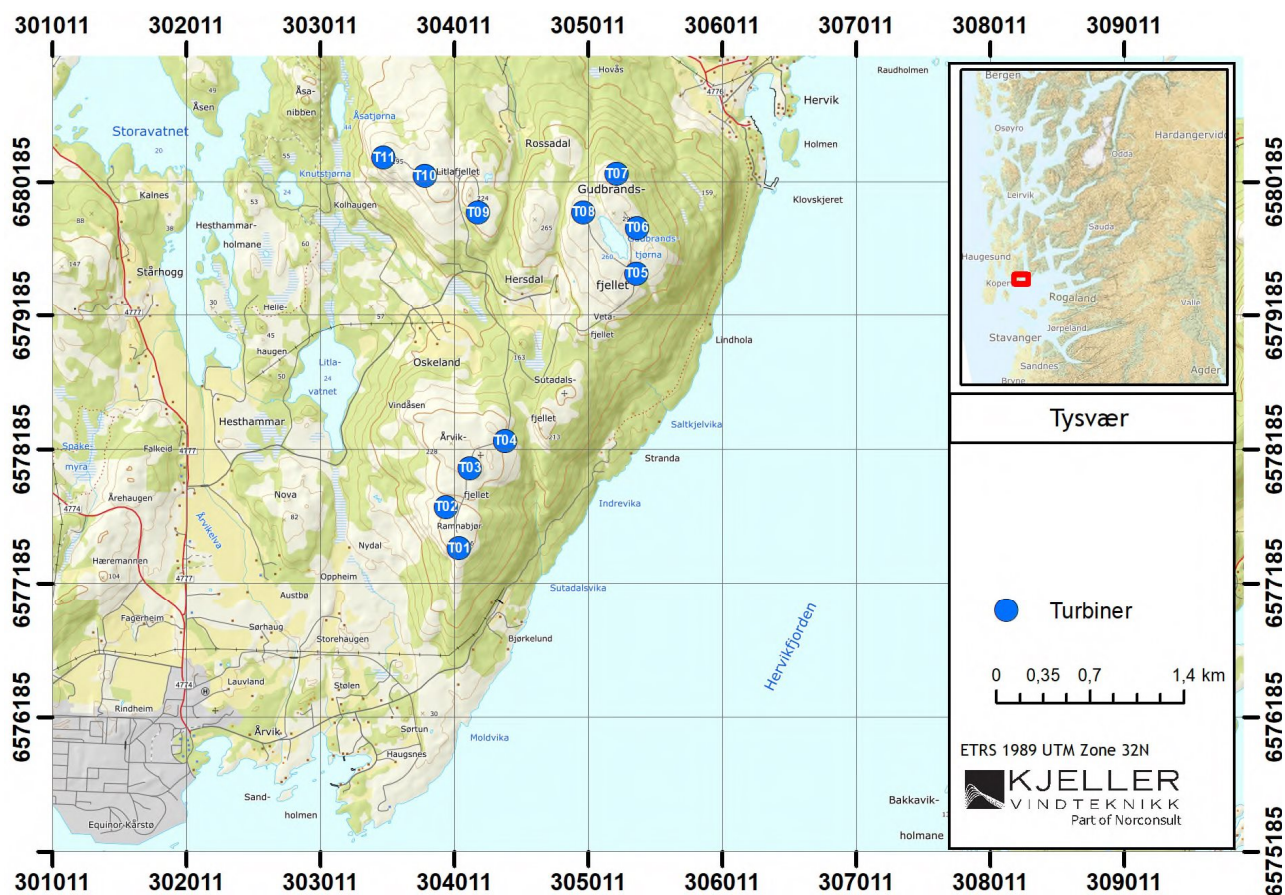
Is som har lagt seg på bladet vil normalt falle av i biter av ulik størrelse. Isen vil som oftest fragmenteres i mindre biter før den treffer bakken (Seifert, Westerhellweg, & Krönig, 2003).

En detaljert trajektoriemodell har blitt benyttet for å lage statistikk på hvor farlig iskast kan være for driftspersonell og tredjeperson. Hensikten med studien er å oppfylle myndighetenes krav for håndtering av risiko for iskast fra (NVE, 2018). Dette inkluderer å klarlegge hvor ofte det vil danne seg is på turbiner og hvor ofte og hvor langt denne isen kan bli kastet, en kartlegging av bruken av området, en identifikasjon av uønskete hendelser, en sammenligning av risikoen med akseptanskriterier og forslag til eventuelle tiltak for å oppnå akseptabel risiko i parken.

Under bestemte forhold kan våt snø legge seg på vindturbinene. Eventuelle tilfeller med våt snø er ikke omfattet av denne rapporten.

2 Beskrivelse av parken

Kart over området er vist i Figur 2-1 med 11 Siemens Gamesa SWT-DD-130 turbiner. Med 85 m navhøyde og en rotordiameter på 130 m har turbinene en totalhøyde på 150 meter og turbinbladene til den høyest plasserte turbinen vil nå opp til 411 m over havet. Terrenghøyden til laveste og høyeste turbin er henholdsvis 189 m og 261 m over havet. Gjennomsnitts terrenghøyde for turbinene er 222 m over havet.



Figur 2-1 Oversiktskart Tysvær Vindpark

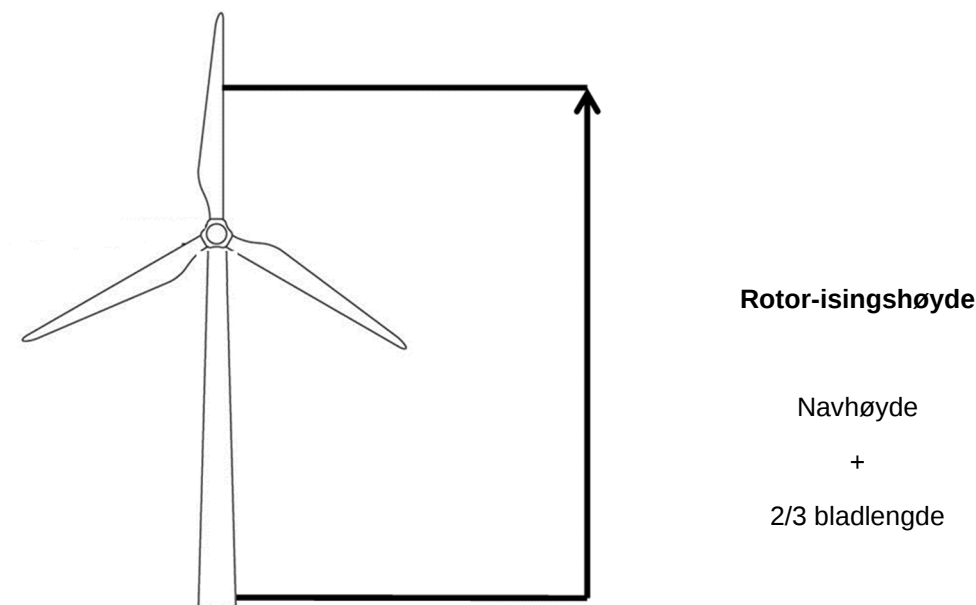
3 Isingsforhold for vindparken

For å beregne risikoen for iskast i vindparken, er det viktig å vite hvor raskt og hvordan isen akkumulerer på hver turbin, og hvor ofte denne isingen forekommer. Dette kapittelet viser isingsforholdene, vindforholdene og isklassen(e) i vindparken.

3.1 Metodikk

For å beregne isingsforholdene, ble 21 års tidsserier (gridpunkter på 4 km x 4 km) med lokale data fra værmodellen WRF (Weather Research and Forecast) for parken benyttet. Kort forklart er WRF en internasjonalt anerkjent modell som baserer seg på et stort antall observasjoner over hele verden. Ved hjelp av modellen gjennomføres avanserte simuleringer av samtlige værparametere for å beskrive lokale forhold tilpasset til topografi. Simuleringene er nøye validert mot observasjoner og ansett som treffsikre. Se Vedlegg A for ytterligere detaljer om WRF. Som beskrevet i Vedlegg A beregnes isforholdene ved å bruke en standard sylinder som gitt av ISO 12494. Tilsvarende ismengder som bygges opp og kastes ved rotor-isingshøyde fra et turbinblad kan være i størrelsesorden 10 - 20 ganger større enn på en standard sylinder.

Isforholdene vist i dette kapittelet er i rotor-isingshøyde. Siden isingen øker med høyden, vil en turbin med lengre blad eller høyere navhøyde bli mer utsatt for ising. For å ta høyde for hvordan ising påvirker turbinen er det vanlig å gjøre beregning i en representativ høyde som vi kaller rotor-isingshøyde (vist under).

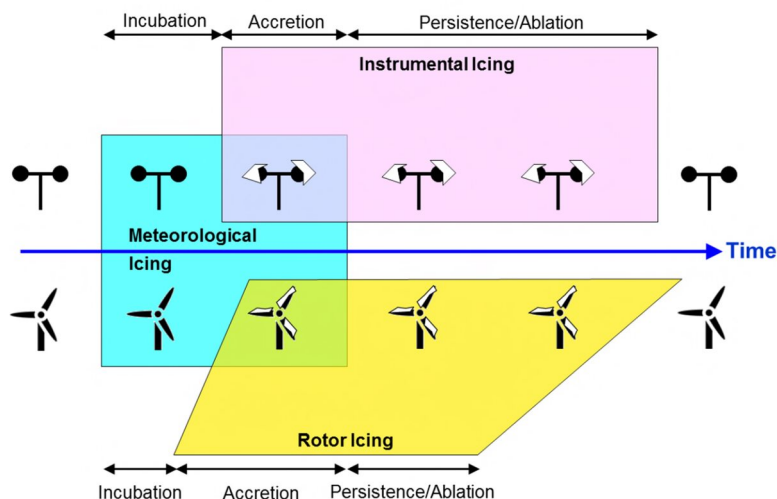


Figur 3-1 Definisjon av rotor-isingshøyde (IEA Wind TCP).

Det er flere faktorer som er viktige for ising og iskast, dette inkluderer temperatur, vindhastighet og luftfuktighet. Én effekt er at midt på vinteren forventes det at sublimering (fordampning) bidrar til å fjerne is fra bladene under kalde og tørre vinterforhold. Dette kan være effektivt for å redusere isen på bladene da vi får stor ventilering ved at bladene beveger seg med stor hastighet. Dette er tatt med i beregningene.

3.2 Klassifisering av isingsforhold på Tysvær

IEA wind task 19 (IEA Wind, 2012) definerer perioder hvor is akkumuleres på et objekt som perioder med «meteorologisk ising», mens perioder når det er is til stede på turbinbladene defineres som «rotor-ising» (Se Figur 3-2).



Figur 3-2 Definisjon av meteorologisk ising, instrumentell ising, rotor-ising (IEA Wind, 2018).

I navnhøyde, 85 meter over bakken, er det forventet meteorologisk ising i 0,3-0,7 % av tiden (25-61 timer per år) med cirka 0,4 % eller 38 timer per år for middelhøydeturbinen.

I henhold til klassifiseringen fra IEA Wind (2012) for bruk i vindkraftsammenheng (vist i Tabell 2) får vi at Tysvær klassifiseres som isklasse 1 til isklasse 2 (lite ising til lett ising) når kun meteorologisk ising er tatt i betraktning. Isingen varierer noe for turbinene i parken, og både laveste og middelhøydeturbinen er i isingsklasse 1, mens høyeste turbin er innenfor isingsklasse 2. Generelt sett vil turbinene som har lavest høyde over havet ha minst ising, mens de som er plassert høyest har mest ising.

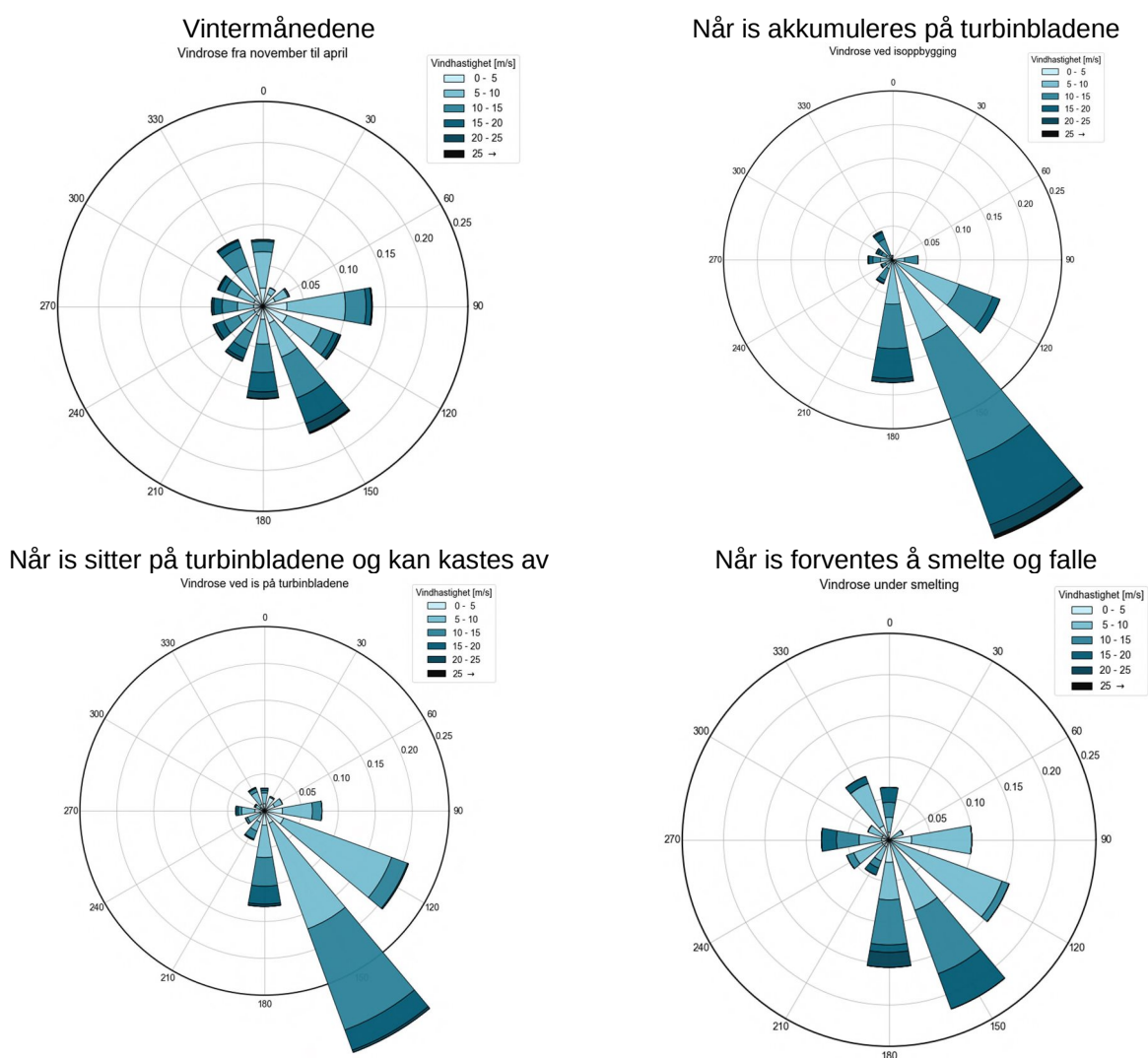
Tabell 2 IEA Winds isingsklassifisering (2012). Ved ulik klassifisering ut fra de forskjellige kriteriene så anbefales det å bruke den høyest rangerte klassen.

IEA Wind isklasse	Meteorologisk ising [% av året]	Instrument ising [% av året]	Produksjonstap [% av årlig produksjon]
5 (ekstrem ising)	>10	>20	>20
4 (mye ising)	5-10	10-30	10-25
3 (moderat ising)	3-5	6-15	3-12
2 (lett ising)	0,5-3	1-9	0,5-5
1 (lite ising)	0-0,5	<1,5	0-0,5

Tas derimot kun instrumentell ising i betraktning (presenteres nærmere i Kapittel 3.4), vil Tysvær Vindpark havne godt innenfor isklasse 1 (lite ising) for samtlige turbinhøyder. Dette er også den laveste isingsklassen. Samlet sett kan Tysvær Vindpark betraktes som isklasse 1 (lite ising).

3.3 Vindfordeling ved meteorologisk ising, rotor-ising og ved smelting

En vindrose for vintermånedene (november til april) for en gjennomsnittsturbin i Tysvær Vindpark er vist øverst til venstre i Figur 3-3. Hovedvindretningen for vinteren er fra sørvest. Oppe til høyre vises vindrosa for de periodene hvor det vil bygges opp is på turbinbladene. Dette er typisk knyttet til vindretninger fra sørøst. Nede til venstre vises vindrosa for tidspunkt hvor det er beregnet å sitte is på vindturbinbladene, og under slike forhold er det stort sett vind fra sørøst. Nederst til høyre vises vindrosa for når is vil smelte og falle av et turbinblad. Under smelting er vind fra sør og sørøstlige sektorer mest vanlig, mens smelting også kan forekomme med vind fra de andre himmelretningene.



Figur 3-2 Vindroser for ulike situasjoner og årstider. Vindrosene viser vindretning og vindstyrke for ulike situasjoner og årstider.

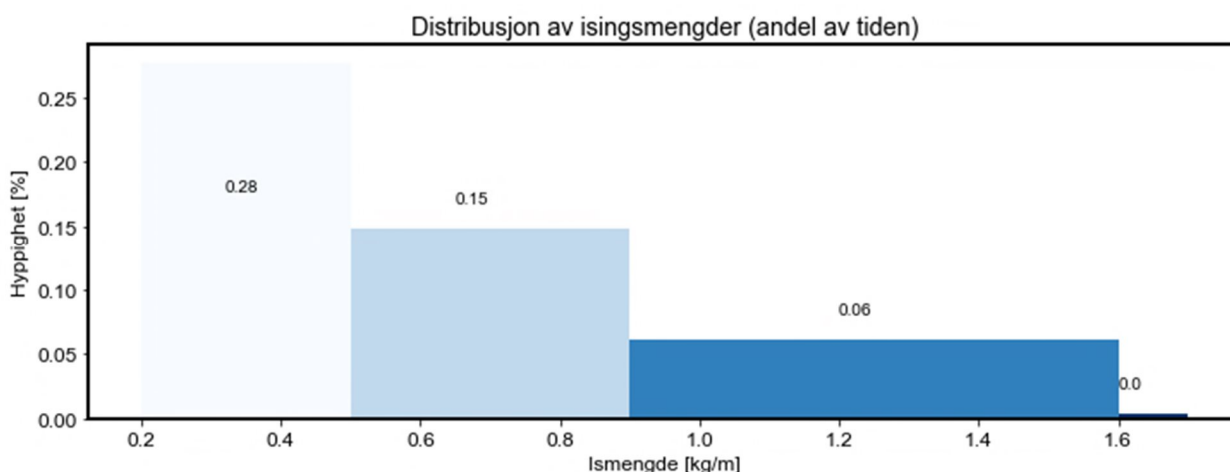
3.4 Størrelsesfordeling av isbiter

Til nå i rapporten er det vist hvor ofte ising kan forekomme og hvilken retning vinden komme fra når det iser. Dette kapitlet inneholder informasjon om hvor mye is det kan være på vingen på det meste. I dette kapitlet refereres det til et standardlegeme. Det er en loddrett sylinder med lengde på minst 50 cm og diameter på 3 cm. Dette standardlegemet er definert i internasjonale standarder og benyttes for å måle, beregne og beskrive ising.

Figur 3-4 viser fordelingen av ismengder for den høyeste turbinen i Tysvær Vindpark, og Tabell 3 viser hyppigheten av de ulike mengdene for den lavestliggende turbinen, middelhøydeturbinen og den høyestliggende turbinen. Ismengdene er delt inn i kategorier (Kat), tilsvarende de fra TechnoCentre Eolien (nå Nergica) vist i Figur 3-5. For den lavestliggende turbinen er den største ismengden beregnet til 0,6 kg/m, som tilsvarer kategori 2 i Figur 3-5. Den største ismengden for middelhøydeturbinen er beregnet til ca. 1,1 kg/m og det svarer til kategori 3. For den høyestliggende turbinen er den største ismengden beregnet til 1,7 kg/m, som er i kategori 4.

En ismengde på cirka 0,5 kg/m på et standardlegeme kan gi en isbit med størrelse på cirka 5 cm med en masse på cirka 100 g på et turbinblad (delt opp i isterninger). Et eksempel på en isbit av denne størrelsen vises øverst til høyre i Figur 3-5 (Wadham-Gagnon, 2013). Det må påpekes at figuren gjelder eksempel på situasjoner med en gitt ismengde i navhøyde og at det kan være andre relasjoner mellom isen på instrumentene og isklumper på turbinbladene under andre værforhold. Inndelingen som vises i figuren, er hentet fra standarden ISO-12494 som omhandler ising på faste konstruksjoner med klassifisering etter høyeste 50 års ismengde i 10 meters høyde.

I effektiv isingshøyde for gitt turbinplassering beregnes at en terskelverdi på 0,5 kg/m er overskredet i 0,2 % av tiden og 1,1 episoder om året for den høyest plasserte turbinen (0,01 % av tiden og 0,1 episoder i året for den lavestliggende turbinen og 0,04 % av tiden og 0,5 episoder i året for middelhøydeturbinen). Det er variasjon i isingsforholdene mellom enkeltturbiner i parken basert på hvor høyt over havet de ligger. I henhold til klassifiseringen fra IEA Wind (2012) presentert i Tabell 2 tidligere i rapporten, er mengden for instrumentell ising godt innenfor isklasse 1 (lite ising) for samtlige turbinhøyder. Dette er også den laveste isingsklassen.



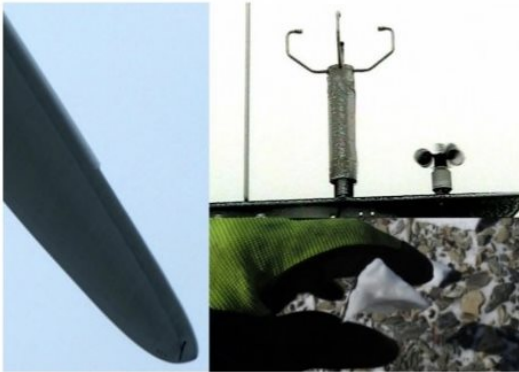
Figur 3-4 Fordeling av ismengde på et standardlegeme for den høyeste turbinen. Inndelingen tilsvarer kategoriene vist i Figur 3-5.

Tabell 3 Oversikt over hyppighet av ismengder for den laveste, den gjennomsnittlige og den høyestliggende turbinen.

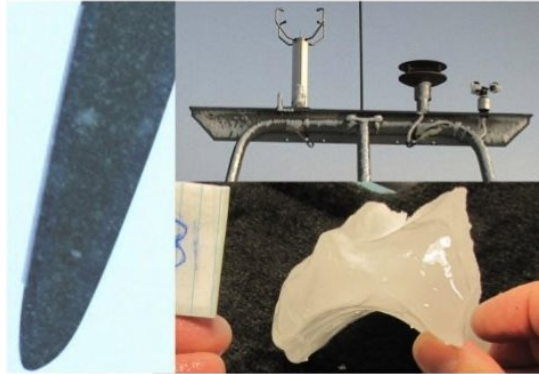
ISO 12494 islast	Kat. 1	Kat. 2	Kat. 3	Kat 4.	Kat. 5	Over kat. 5
Ismengder [kg/m]	0 – 0,5	0,5 – 0,9	0,9 – 1,6	1,6 – 2,8	2,8 – 5,0	> 5,0
Hyppighet lavestliggende turbin	0,06 %	0,01 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Hyppighet middelhøydeturbinen	0,2 %	0,03 %	0,01 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Hyppighet høyestliggende turbin	0,3 %	0,2 %	0,06 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %



Kat. 1: ISO 129494 islast opp til 0,5 kg/m



Kat. 2: ISO 129494 islast mellom 0,5 og 0,9 kg/m



Kat. 3: ISO 129494 islast mellom 0,9 og 1,6 kg/m



Kat. 4: ISO 129494 islast mellom 1,6 og 2,8 kg/m



Kat. 5: ISO 129494 islast mellom 2,8 og 5,0 kg/m



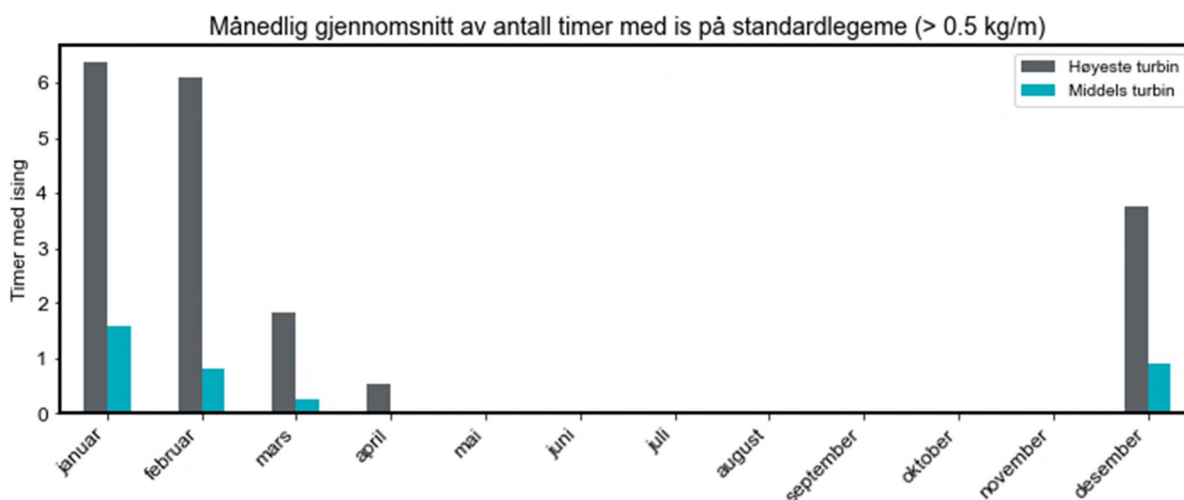
Figur 3-5 Sammenheng mellom islast på standardlegeme (ISO 12494) i navhøyde og akkumulert is på et turbinblad. Bildene er gjengitt med tillatelse av Wadham-Gagnon ved TechnoCentre éolien (nå Nergica). Klassifiseringen er hentet fra ISO-12494 som omhandler ising på konstruksjoner

3.5 Månedss- og årsfordelingen av is

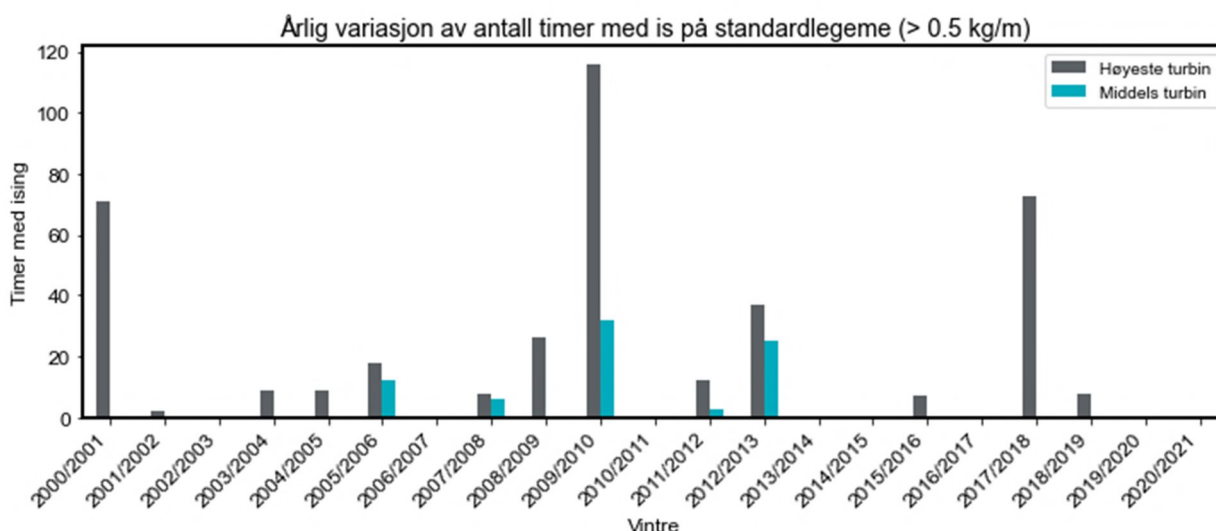
Ising har stor variasjon gjennom året, og også fra år til år. Dette er viktig å ta hensyn til for å bestemme passende tiltak for parken. For å illustrere denne variasjonen viser henholdsvis Figur 3-6 og Figur 3-7 gjennomsnittlig antall timer med ising over 0,5 kg/m per måned og per år for de siste 21 vintrene.

Isingen er fordelt på vinterhalvåret fra desember til april. Januar og februar er gjennomsnittlig de månedene med mest ising.

Som Figur 3-7 viser, var det mest ising vinteren 2009/2010, mens det i flere vintre ikke er funnet ising i det hele tatt. Det er generelt små mengder med ising, og middelhøydeturbinen har betydelig lavere isingsmengder enn den høyeste turbinen. Det er også stor variasjon fra år til år, for den høyestliggende turbinen varierer det mellom 0 timer per år til ca. 115 timer per år.



Figur 3-6 Månedlig variasjon av istimer på et standardlegeme.



Figur 3-7 Årlig variasjon av istimer på et standardlegeme.

4 Beregning av iskast

I forrige kapittel ble isingsforholdene for vindparken presentert. I dette kapittelet brukes denne informasjonen til å beregne risikoen for iskast rundt hver turbin. Kapittel 4.1 beskriver beregningene av en iskastdatabase for den turbintypen som er bygget på Tysvær. En romlig sannsynlighetsfordeling av iskast for en turbin i parken er beregnet ut fra 4 forskjellige situasjoner hvor iskast forventes å kunne forekomme.

4.1 Sannsynlighet for iskast fra en gjennomsnittsturbin i parken med én vindretning

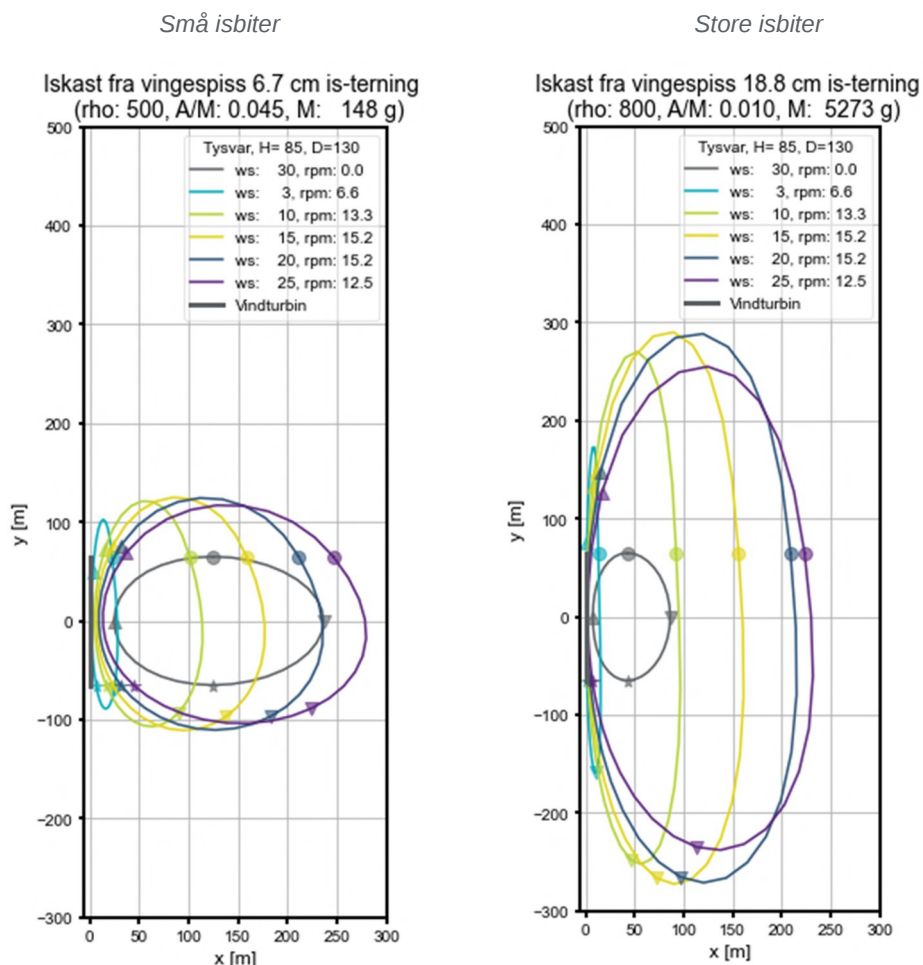
For vindturbiner forventes ising i form av skyrim. Denne istypen dannes når skyvann fra lave skyer (tåke) fryser på et kaldt turbinblad. Skyrim (rime) har vanligvis en tetthet på 500 kg/m^3 . Dersom isingen skjer nær 0°C , eller store dråper av yr er med i prosessen, kan tettheten øke opp til 700 til 800 kg/m^3 . På Gütch i Sveits (Cattin & al, 2007) viste en inspeksjon av kastede isbiter en jevn fordeling mellom mer porøst rim med lav tetthet og klinkis med høy tetthet. Istettheter på både 500 , 800 og 850 kg/m^3 er brukt i de videre beregningene.

Beregningene er gjort for en Siemens Gamesa SWT-DD-130 turbin med navhøyde 85 m og rotordiameter 130 m . Høyeste nominert rotasjonshastighet for turbinen er $12,5$ omdreininger per minutt (rpm), og turbinleverandøren opplyser at det i perioder kan oppstå rotasjonshastighet på maksimalt $15,25$ omdreininger per minutt. Maksimal rotasjonshastighet på $15,25$ omdreininger per minutt er benyttet i disse beregningene, noe som anses som konservativt. Beregninger med trajektoriemodell (Biswas, Tayler, & Salmon, 2012) viser forventede kastelengder for isbiter av ulik størrelse og under ulike vindforhold. Figur 4-1 viser kastelengder for store isbiter ($5,3 \text{ kg}$) i figuren til høyre. Mens kastelengder for de mindre isbitene er vist til venstre ($0,15 \text{ kg}$). Mindre isbiter enn det som er vist anses som ufarlige mens større isbiter er mindre sannsynlige ved Tysvær.

Det bemerkes at største sikkerhetsavstand ved Tysvær avgjøres av hvor langt farlige isbiter kan kastes fra bladet under drift. Form og størrelse og tetthet på de kastede isbitene er viktig for dette. I beregningene som er gjennomført er det gjort antakelse på et utvalg av isbitformer basert på ulike $C_d A_o M$ -faktorer², med ulike kasteposisjoner fra ulike steder på turbinbladet.

Under bestemte forhold kan også våt snø legge seg på vindturbinene, både på blad, tårn og turbinhuset. Situasjoner med våt snø (også kjent som kram snø) kan inntreffe ved temperaturer rundt null grader. Dersom det i tiden etterpå blir kaldere kan den våte snøen fryse til og kan dermed falle av i større biter. Snø kan legge seg på taket av turbinhuset og istapper kan dannes på turbinhuset. Snø eller is kan falle ned og dermed utgjøre en fare i den umiddelbare nærhet av turbintårnet. Snø og is som bygger seg opp på turbintårnet kan også falle ned i den umiddelbare nærhet av turbintårnet. Våt snø som setter seg på turbinbladene kan en noen ganger observere innerst mot navet på rotoren. Her er hastigheten på bladet forholdsvis lav slik at is som faller kun kan kastes kortere avstander. Eventuelle tilfeller med våt snø er ikke omfattet av denne rapporten.

² $C_d A_o M$ beskriver forholdet mellom effektivt frontareal (A) og masse (M) for en isbit. $C_d A_o M = C_d A / M$, hvor C_d er dragkoeffisienten til isbiten.



Figur 4-1 Beregnede soner for iskast med store og små isbiter fra vingespiss av en Siemens Gamesa SWT-DD-130 turbin. Denne turbinen har rotordiameter 130 m og navhøyde 85 m. Vinden blåser fra vestre mot høyre. De ulike fargene er ulike vindhastigheter. Grå linje viser stoppet turbin i 30 m/s. For de øvrige linjene er turbinen i drift.

4.2 Sannsynlighetsfordeling for iskast i hele vindparken

I dette kapittelet presenteres grunnlaget for risikoberegningene i denne rapporten. Sannsynlighetsfordeling for iskast fra en eksempelturbin i vindparken er gitt i Figur 4-2. Fordelingen er beregnet ved å kombinere den underliggende vindstatistikken og størrelsesfordelingen presentert i forrige kapittel sammen med detaljerte beregninger med en trajektorie-modell. Dette gir en fordeling som viser variasjon for forskjellige sektorer rundt turbinene i parken. I tillegg er trajektoriemodellen benyttet for å skille mellom is-kast/nedfall som kan føre til død og is-kast/nedfall som kan føre skade på personer, basert på den beregnede anslagsenergien, se (Bredesen & Refsum, 2015).

Vi antar at sannsynligheten for iskast fra bladet til en roterende turbin øker lineært med radiell posisjon på turbinbladet. Dette kan forklares av at isoppbyggingen øker utover bladet på grunn av større sveipt areal. I tillegg har vi antatt samme slippvinkelfordeling for turbinblad som gitt av (Battisti, Fedrizzi, Dell'Anna, & Rialti, 2005). Kort oppsummert vil kombinasjon av tyngdekraft og sentripetalakselerasjon av en isbit festet til et blad gi størst sannsynlighet for slipp av isbit når bladet peker ned og minst sannsynlighet når bladet peker opp.

Beregninger av iskast er gjort for fire ulike scenarier hvor det kan forventes at iskast kan forekomme:

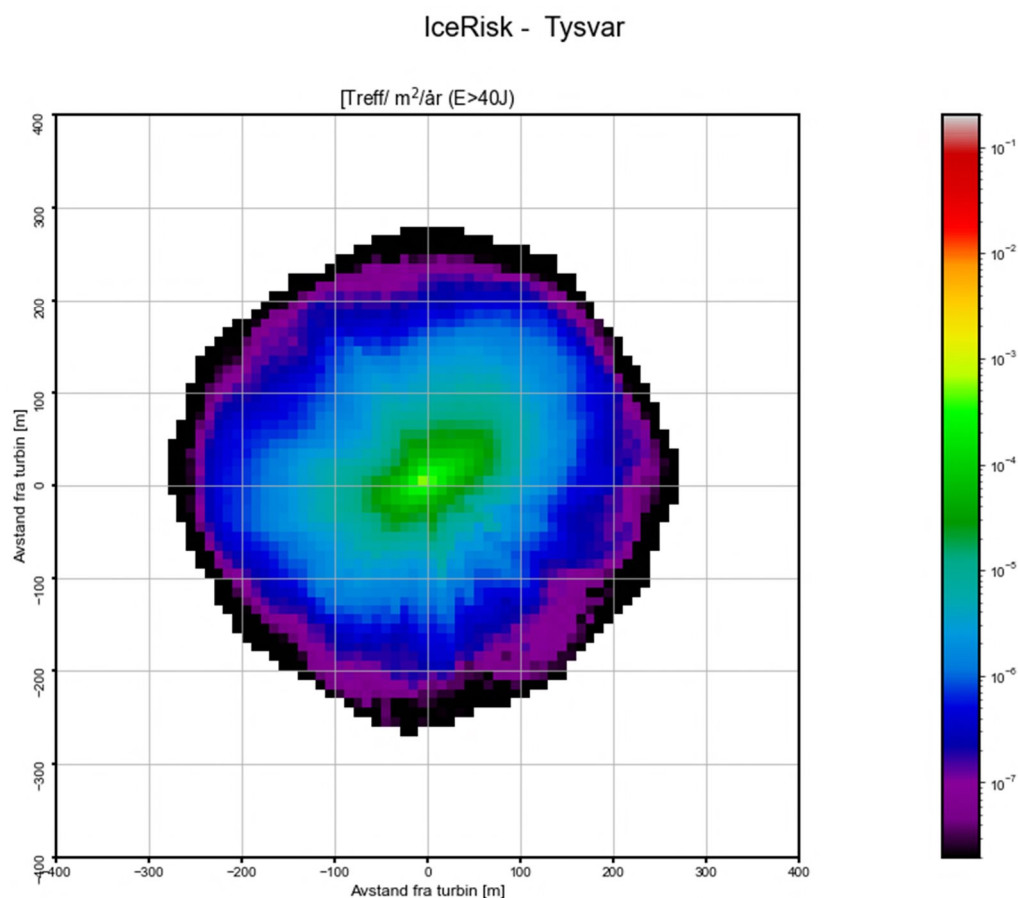
1. Is på bladet og turbinen roterer med full ytelse
2. Is på bladet og turbinen roterer med redusert RPM på grunn av isen
3. Is på bladet, smelteforhold og turbinen roterer med full ytelse
4. Is på bladet, smelteforhold og turbinen roterer med redusert RPM

Isbiter med anslagsenergi over 40 J kan ansees som dødelige for personer, se (Bredesen & Refsum, 2014), (Refsum & Bredesen, 2015) og (TNO Greenbook, 1992). Det er kun isbiter med anslagsenergi større enn denne grensa som er tatt med i beregningene. Iskastrisikoen er beregnet ved hjelp av 10 millioner forskjellige landingsposisjoner for farlige isbiter avhengig av vindforhold, turbinytelse, størrelse på isbit og slipp-posisjon på det roterende turbinbladet.

Den kombinerte statistikken fra de fire scenariene vises i Figur 4-2 for høyeste turbin ved Tysvær. Sannsynligheten for farlig iskast/isnedfall er tilnærmet jevnt fordelt på de ulike vindretningene, med noe lavere sannsynlighet for treff sørøst for turbinen. Nedenfor er sammenhengen mellom treff per kvadratmeter per år og returperiode oppsummert. En på 10 000 år betyr at det går 10 000 år mellom hver gang en farlig isbit treffer et gitt område på størrelse 1 kvadratmeter. Dette tilsvarer igjen en sannsynlighet på 10^{-4} [treff/kvadratmeter/år].

- Kast med returperiode på 1 000 år forekommer ikke
- Kast med returperiode på 10 000 år kan forekomme 30 m fra turbinen
- Kast med returperiode på 100 000 år kan forekomme 80 m fra turbinen
- Kast med returperiode på 1 000 000 år kan forekomme 160 m fra turbinen

For Figur 4-2 er det antatt helt flatt terreng. Dersom det er nedoverbakke i noen retninger, vil isen kastes lenger i de retningene, og dersom det er oppoverbakke i noen retninger, vil isen kastes kortere. Denne forskjellen i terreng kalles overhøyde/underhøyde.



Figur 4-2 Antall nedslag pr år av dødelige isbiter. Alle driftssituasjoner er kombinert slik det er forventet å bli når vindparken er i drift.

Det beregnede risikokartet er vist i Figur 5-1 i neste kapittel. I kartet er de fire driftssituasjonene (scenarie 1-4 på forrige side) vektet likt. Det er tatt hensyn til at det kastes flere isbiter for de høyestliggende turbinene og færre for de lavestliggende. Det er også tatt hensyn til terrenget i form av overhøyde.

5 Risikovurdering i Tysvær Vindpark

Etter at isingsforholdene er beregnet og risikoen for iskast er tegnet opp i kartet, er det viktig å vite hvordan resultatene skal tolkes, hvilke grenseverdier som må følges og hvor iskastrisikoen eventuelt er for høy i forhold til akseptkriterier. Definisjonene for risiko (LIRA, IRPA, PLL) er beskrevet i appendiks B.2. Dette er definisjoner som blir brukt videre i rapporten, så det er viktig å forstå forskjellen mellom dem. For å bestemme om tiltak er nødvendig, brukes to ulike kilder for å se på grenseverdiene til risikoen. Den ene er aksepterte risikonivåer i Norge (DSB), og den andre er fra internasjonale retningslinjer. Begge er vist i Vedlegg B, i henholdsvis Tabell B-2 og Tabell B-3. En fremgangsmåte for å bestemme om tiltak er nødvendig er vist i Appendiks B.5.

I dette kapitlet gjøres risikovurderingen for vindparken. I Kapittel 5.1 er risikokartet for Tysvær Vindpark vist. Tiltak for å redusere risikoen er presentert i kapittel 6.

5.1 Risikokart (LIRA)

Figur 5-1 viser risikosonene for LIRA i Tysvær Vindpark. Overhøyden mellom turbinposisjonene og omgivelsene er blitt tatt med i beregningene ved å bruke sannsynlighetsverdi for avstanden til punkt trukket fra overhøyde (skrått kast).

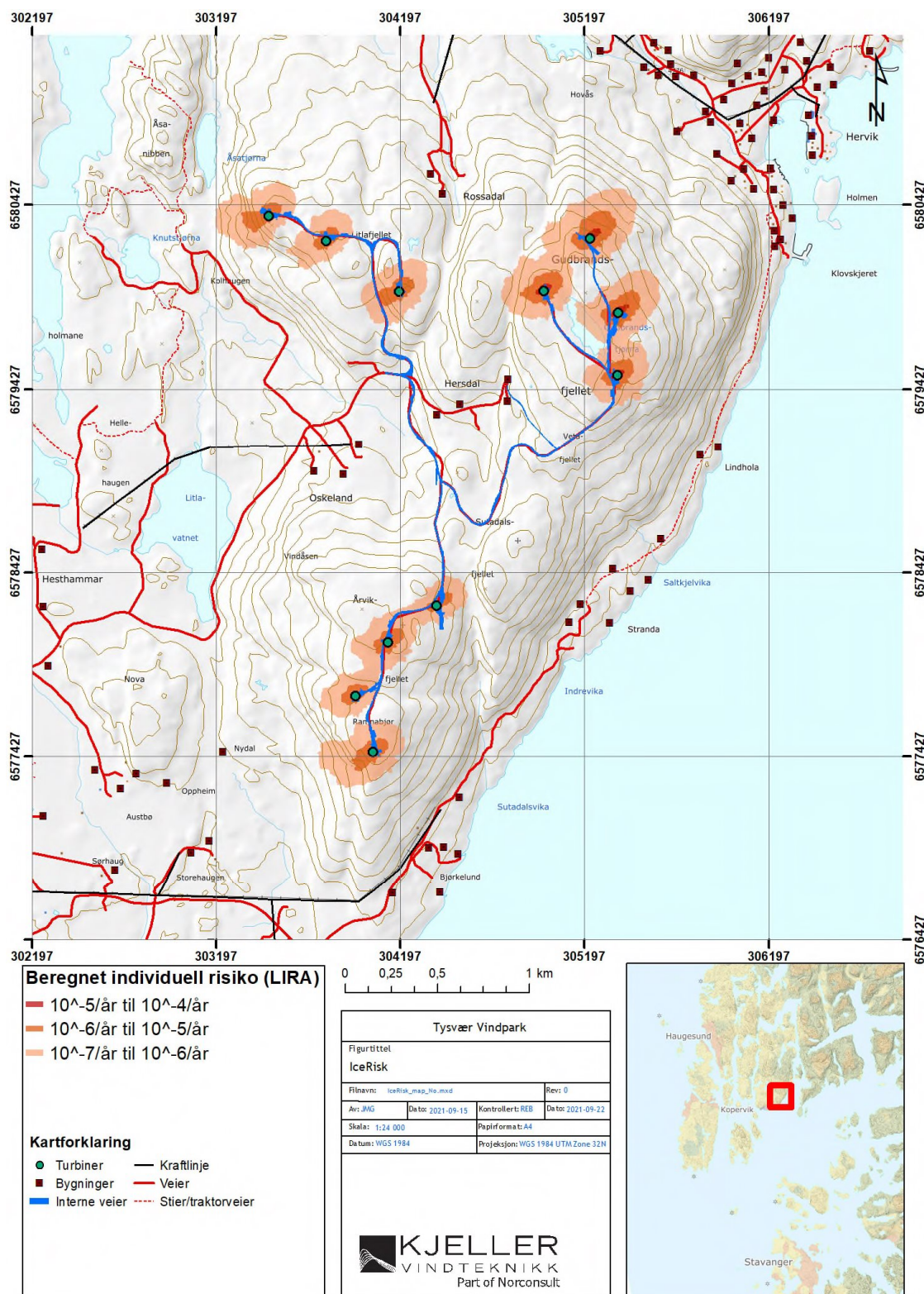
Området er forventet å kunne bli benyttet til turformål. Foruten interne veier og eventuelle turstier som ikke er anvist på kartet, er ikke Kjeller Vindteknikk kjent med noen andre objekter som blir berørt av risikosonene for iskast.

Generelt sett er det liten sannsynlighet for iskast fra turbinene på Tysværsfjellet, hvor den høyeste beregnede LIRA-verdien er lavere enn 10^{-4} . Til sammenligning settes sikkerhetssonen vanligvis iht. konturen for 10^{-4} , en verdi som altså ikke oppnås i Tysvær Vindpark. I tillegg er risikokonturenes areal lite sett i forhold til turbinenes størrelse, noe som skyldes lav sannsynlighet for isingsepisoder. Det bør derfor nevnes at selv om området generelt sett har lav risiko for dødelig iskast, vil det være knyttet en viss risiko for enkeltepisoder når ising oppstår. Sannsynligheten for treff på bakken er for øvrig lav og ansett som akseptabel for området.

Selv om sannsynligheten for dødelig ising er lav, kan driftspersonale som oppholder seg i nærheten av turbinen være utsatt for risiko når ising oppstår. Personale som arbeider i parken bør derfor være kjent med at ising kan oppstå, samt være kjent med hvordan unødig risiko kan unngås.

Det bør bemerkes at sannsynligheten for treff vil øke dersom isbiter med lavere anslagsenergi enn 40 J, som er terskelverdi for potensielt dødelige isbiter, også inkluderes i beregningene.

I kartet er kun skyising inkludert i de bakenforliggende beregningene. Nedfall forårsaket av våt snø og isdannelse på nacelle kan i tillegg forekomme og øke risikoen i nærhet av tårnene.



Figur 5-1 Risikosoner for en ubeskyttet person som er permanent til stede.

6 Tiltak for å redusere risikoen

Når man har kartlagt risikoen i parken og problemområdene er blitt definert, kan man finne egnede tiltak for å redusere risikoen. I kapittel 6.1 til 6.3 er det listet opp ulike tiltak for reduksjon av risiko for vindparker med ising. I kapittel 6.4 er det laget et forslag til risikoreduserende tiltak for Tysvær Vindpark.

For en utvidet liste med forslag til tiltak viser vi til foreningen Svensk Vindenergi sitt syn presentert på WinterWind av (Göransson & Haaheim, 2016) (se også appendiks C) og til NVE sin veileder for iskast (NVE, 2018). For en mer detaljert risikoanalyse henviser vi til norsk standard³.

6.1 Kunnskap

En viktig forutsetning for å kunne håndtere risikoen i en vindpark er kunnskap. For å forbedre kunnskapen kan egnede tiltak være profesjonell kommunikasjon (både for ansatte og for offentligheten), skilting, rutiner for ansatte, opplæring, og varslingssystemer. Det er forventet at skilting kan redusere risikoen med en faktor 1-10 (IEA Wind, 2018).

6.2 Varsling

Ved ising eller forventet ising, kan ulike varslingstyper settes opp, dette kan være ved lyd og/eller lys, varslingssystemer basert på værprognoser og/eller SCADA data, eller annen informasjon. Typisk drives et varslingssystem av en kombinasjon av sensorer på turbinen, værvarsler, og inspeksjon av turbinen. Det forventes at risikoen reduseres med en faktor 10-100 ved bruk av aktivt varslingssystem med lys eller lydsignaler (IEA Wind, 2018). Et robust varsel basert på værprognoser og/eller SCADA data som angir når det er trygt å bruke området og når det er fare for iskast, forventes å redusere risikoen for ferdsel. Dette fordrer at brukerne benytter og har tillit til informasjonen som gis.

6.3 Designløsninger

I og rundt turbinen er det mange muligheter for å redusere risikoen; sensorer som kan måle is, webkameraer på navet, angivelse av spesifikke risikosoner, kommunikasjonsprosedyrer, sikre kjøretøy, og overbygninger. I tillegg kan ismålinger sende signal til turbinen for å; enten stanse, starte bladvarme, eller redusere rotasjonshastighet. Det er også mulighet for å gjøre individuelle innstillinger på hver turbin i parken. Fysiske sikringstiltak som for eksempel sperring av internveier med bom, er også en mulighet.

For ansatte kan rutiner bistå med å håndtere all rest-risiko som ikke er håndtert gjennom design.

³ Norsk standard NS 5814:2008, Krav til risikovurderinger.

6.4 Spesifikke tiltak

Basert på resultatene fra kapittel 5 er det utarbeidet en liste med forslag til risikoreduserende tiltak som kan være aktuelle for Tysvær Vindpark. Disse forslagene er utarbeidet av Kjeller Vindteknikk og de skal ikke anses som krav. Tiltakene er laget for å sikre at de som går inn i parken ikke skal utsettes for en uakseptabel fare, dette gjelder både de som arbeider i parken og 3. personer.

Forslag til avbøtende tiltak:

Det bør settes opp et skilt ved alle naturlige adkomstveier om at det er fare for isnedfall ved turbinene. Dette gjelder både veier og eventuelle turstier.

Det anbefales at oppdatert informasjon om fare for iskast finnes på nettsidene til Tysvær Vindpark.

Det bør lages egne sikkerhetsrutiner for dem som arbeider i vindparken.

I tillegg anbefales det å implementere et erfaringsinnhentingsprogram slik at det sikres at de iverksatte tiltakene er tilstrekkelige.

7 Bibliografi

- Battisti, L., Fedrizzi, R., Dell'Anna, S., & Rialti, M. (2005). Ice Risk Assessment for Wind Turbine Rotors Equipped with De-Icing Systems. *BOREAS VII. FMI*. Saariselkä, Finland.
- Biswas, S., Tayler, P., & Salmon, J. (2012). A modell of ice throw trajectories from wind turbines. *Wind Energy nr. 15*.
- Bredesen, R. E. (2017). Understanding and acknowledging the ice throw hazard - consequences for regulatory frameworks, risk perception and risk communication. *Journal of Physics: Conference series, 2017(926)*, 1742-6596 WindEurope Conference & Exhibition 2017.
- Bredesen, R. E., Kjeller Vindteknikk AS. (2019). An ongoing cross comparison of the Icethrower database with 10 years of SCADA and meteorological forecast data. *Winterwind 2019*.
- Bredesen, R., & Refsum, H. (2014). IceRisk: Assessment of risks associated with ice throw and ice fall. *WinterWind*. Kjeller Vindteknikk.
- Bredesen, R., & Refsum, H. (2015). Methods for evaluating risk caused by ice throw and ice fall from wind turbines and other tall structures. *IWAIS 2015. 16th International Workshop on Atmospheric icing of Structures*.
http://windren.se/IWAIS_p/IWAIS2015/IWAIS2015_pa/38_13_03_Paper_Bredesen_Methods_for_evaluating_risk_caused_by_ice_throw_and_ice_fall_from_wind_turbines_and_other_tall_structures.pdf.
- Bredesen, R., Butt, B., & Flage, R. (2018). National Norwegian Guidelines: Ice throw hazard. *Winterwind 2018*.
http://windren.se/WW2018/03_2_24_Bredesen_Norwegian_guidelines_regarding_the_risk_of_icethrow_for_the_public_Pub_v2_draft.pdf.
- Cattin, R., & al, e. (2007). Wind Turbine Ice Trough Studies in the Swiss Alps. *EWEC*. Brussels.
- Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap. (2013). *Sikkerheten rundt anlegg som håndterer brannfarlige, reaksjonsfarlige, trykksatte og eksplosjonsfarlige stoffer, Kriterier for akseptabel risiko*. Hentet fra
<https://www.dsbinform.no/DSBno/2013/Tema/Sikkerhetenrundtanleggsomhndtererbrannfarligereaksjonsfarligetrykksatteogeksplosjonsfarligestoffer/>
- Göransson, B., & Haaheim, D. (2016). Swedish Wind Energy Associations's view on wind energy in cold climates. *Winterwind conference 2016*. http://winterwind.se/wp-content/uploads/2016/02/5_2_1_Goransson_Haaheim_Swedish_Wind_Energy_Associations_view_on_wind_energy_in_cold_climates.pdf.
- IEA Wind. (2012). *Recommended practice 13: Wind energy in cold climate (1. Edition 2011)*.
- IEA Wind. (2018). *International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments*.
- NVE. (2018). *Iskast fra vindturbiner, VEILEDER FOR HÅNDTERING AV RISIKO FOR SKADE VED ISKAST I NORSKE VINDKRAFTVERK*. Hentet fra
http://publikasjoner.nve.no/veileder/2018/veileder2018_05.pdf
- Refsum, H., & Bredesen, R. (2015). Methods for evaluating risk caused by ice throw from wind turbines. *WinterWind*. Lloyd's Register Consulting, NO.

Seifert, H., Westerhellweg, A., & Krönig, J. (2003). Risk Analysis of Ice throw from wind turbines. *Boreas IV*. Pyhänturi: VTT.

TNO Greenbook. (1992). Methods for the determination of possible damage, to people and objects resulting from release of hazardous materials. *CPR 16E, TNO – The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research*.

Wadham-Gagnon, M. (2013). Ice profile Classification Based on ISO 12494. *WinterWind*. TechnoCentre éolien (now Nergica).

WHO. (2015). *Global status report on road safety 2015*. Hentet fra https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/en/

WHO. (2018). *Global status report on road safety 2018*. Hentet fra https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2018/en/

Vedlegg A Meso-Scale Model WRF

A.1 Meso-Scale Model WRF

The Weather Research and Forecast (WRF) model is a state-of-the-art meso-scale numerical weather prediction system, aiming at both operational forecasting and atmospheric research needs. A description of the modelling system can be found at the home page <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>. The model version used in this work is v3.2.1 described in Skamarock et al. (2008)⁴. Details about the modelling structure, numerical routines and physical packages available can be found in for example Klemp et al. (2000)⁵ and Michalakes et al. (2001)⁶. The development of the WRF-model is supported by a strong scientific and administrative community in U.S.A. The number of users is large, and it is growing rapidly. In addition, the code is accessible for the public.

The meso-scale model WRF solves coupled equations for all important physical processes (such as winds, temperatures, stability, clouds, radiation etc.) in the atmosphere based on the initial fields and the lateral boundary values derived from the global data.

A.2 Input Data

The most important input data are geographical data and meteorological data. The geographical data is from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). The data includes topography, surface data, albedo and vegetation. These parameters have high influence for the wind speed in the layers close to the ground. For the entire domain except for Sweden and Norway, the model uses land use data input from NOAA. The land use data for Sweden is retrieved from the Geografiska Sverigedata (GSD)-Land Cover which is classified in accordance with the European Union's CORINE Land Cover mapping project⁷. For Norway, the model input uses the N50 land use data provided by the Norwegian Mapping Authority⁸.

For the solving of the model equations it requires boundary conditions of the area considered. Such lateral boundary data is available from the National Centers for Environmental Protection (NCEP). The data originates from the Final Global Data Assimilation System (FNL)⁹ and is available as global data with 1 degree resolution every 6 hours. FNL is an operational assimilation model that incorporates all available observation data globally and uses this data to create a global analysis dataset, or a snapshot of the atmosphere, four times every day. The assimilation model incorporates data from several thousand ground-based observation stations, vertical profiles from radiosondes, aircrafts, and satellites.

Similar lateral boundary data is also available from the European Center for Medium range Weather Forecasting (ECMWF). The reanalysis data ERA Interim^{10,11} is available with a spatial resolution of

⁴ Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Duda MG, Huang X-Y, Wang W. and Powers JG, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, Boulder, June 2008

⁵ Klemp JB., Skamarock WC. and Dudhia J., 2000: Conservative split-explicit time integration methods for the compressible non-hydrostatic equations (<https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model/>)

⁶ Michalakes J., Chen S., Dudhia J., Hart L., Klemp J., Middlecoff J., and Skamarock W., 2001: Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model. Developments in Teracomputing: Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology. Eds. Walter Zwiefelhofer and Norbert Kreitz. World Scientific, Singapore.

⁷ <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>

⁸ http://www.kartverket.no/eng/Norwegian_Mapping_Authority/

⁹ <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/para/about.html>

¹⁰ Dee, D. P., et al. (2011), The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Q.J.R. Meteorol. Soc., 137: 553–597. doi: 10.1002/qj.828

¹¹ <http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/era-interim>

approximately 0.7 degrees globally. Data is available every 6 hours. The ERA interim dataset does also assimilate observational data. For weather forecasting the datasets from ECMWF is usually accepted to have higher quality compared to NCEP datasets, in particular for the European region.

A.3 Model Setup

The model setup used for this analysis is shown in Figure A-1 . The simulation of Norway has been performed for 20 years covering the period 2000-2019. The model is set up with 2 nested domains with horizontal resolutions of 16 km x 16 km and 4 km x 4 km for the outer and inner nest, respectively.

The simulation has 32 layers in the vertical with four layers in the lower 200 m and the Thompson scheme is used for the microphysics and the YSU scheme for boundary layer mixing. With the current setup, the WRF-model calculates the change in the meteorological fields for each grid point each 20 and 96 second in the inner and outer nest, respectively. In this way a realistic temporal development of the meteorological variables is achieved. Data is stored to disk every 1 hours of simulation.

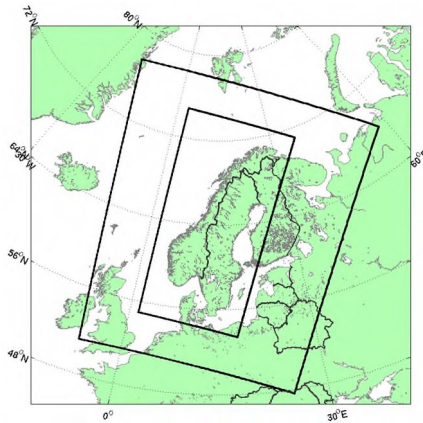


Figure A-1 Model set up for WRF simulations of Sweden and Norway

A.4 Ice load calculations

According to the standard ISO 12494 (ISO/TC98/SC3/WG6 2000)¹² icing has been calculated from

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \cdot w \cdot A \cdot V \quad (1)$$

Here dM/dt is the icing rate on a standard cylindrical icing collector (defined by ISO 12494 as a cylinder of 1 m length and 30 mm diameter), w is the liquid water content, and A is the collision area of the exposed object. V is the wind speed and α_1 , α_2 and α_3 are the collision efficiency, sticking efficiency and accretion efficiency, respectively.

¹² ISO 12494 2000: Atmospheric Icing of structures, International Standard, ISO/TC98/SC3/WG6.

Periods of active meteorological icing is identified from the model data when the icing rate (dM/dt) exceeds 10 g/hour. The number of hours where active icing is identified is reported as "icing hours". 10 g of ice on the standard cylindrical icing collector is equivalent to a 0.5 mm layer of ice on the cylinder.

Accumulated over time (1) gives M as the mass of ice on a standard cylindrical icing collector. Icing is calculated at a specific height equivalent to the elevation of the turbine hub. The ice will often prevail some time after the period with active icing, until it is removed by melting, sublimation or mechanically as ice shedding. The time periods when ice is present on the cylinder, are defined as periods with instrumental icing. Wind speed measurements are typically influenced by icing during these periods. In these periods there will also typically be ice on the blades of the wind turbines resulting in a reduced power production. We have defined the periods with instrumental icing as the periods when the ice mass, M , exceeds 10 g/m.

There are several sources of uncertainty in the model data. The cloud processes are simplified and calculated by using parameterizations. Uncertainties therefore exist in the total amounts of cloud water available in the air masses, and in the distribution of cloud water vs. cloud ice in the air masses. The model setup is using a sophisticated microphysics scheme.¹³ This is the scheme that gives the most accurate calculations of liquid water content¹⁴ and is thus recommended for icing calculations. Uncertainties are also related to the vertical distribution of the moist air and choice of parameterization scheme for the boundary layer mixing processes.

In the simulations also the topography is represented by a grid and does not reflect the real height of the mountain peaks. This means that the mountain tops in the model are lower than in the real world. This discrepancy can lead to an underestimation of the icing amounts particularly for coarse model grids. We correct for the discrepancy in height between the model grid and the actual elevation of the sites. This correction is done by lifting the air in the model to the correct terrain height. This lifting will contribute to lower the pressure and temperature in the air, allowing for an increased amount of cloud water, or it will lead to condensation in the cases when the air will reach the water vapor saturation pressure. The lifting is performed according to the vertical profile of temperature and moisture locally in the model.

A.5 Removal of ice

Ice melting is calculated by evaluating the energy balance model, given by

$$Q = Q_h + Q_e + Q_n, \quad (2)$$

where Q_h and Q_e are the sensible and latent heat fluxes. Q_n is the net radiation term. There are also other terms which will come into the total energy balance model; however, they are assumed to be of negligible size in this context. A detailed description of the melting terms is given in Harstveit (2009).¹⁵

When Q becomes positive, melting will start. Often during melting episodes, the ice does not melt gradually away such as described by the energy balance model. When the melting is initialized the ice will often be removed more quickly by shedding, particularly from a rotating blade. This ice shedding is a stochastic process which makes it difficult to estimate the time when all ice is removed. In this work no ice shedding is assumed in relation to melting of the ice. This implies that the ice load can be overestimated at some periods

¹³ Thompson G., P.R. Field, W.D. Hall and R Rasmussen, 2006: A new bulk Microphysical Parameterization Scheme for WRF (and MM5)

¹⁴ Nygaard B.E.K., J.E. Kristjansson and L. Makkonen, 2011: Simulations vs. observations of supercooled cloud liquid water at ground level; sensitivity to model resolution and cloud microphysics parameterizations. Winterwind 2011, Umeå, 9-10. February 2011.

¹⁵ Harstveit K, Byrkjedal Ø. and E. Berge 2009: Validation of Regional In-Cloud Icing Maps in Norway, IWAIS, Andermatt 2009.

during melting. The melting process does however happen quite fast, so only shorter periods of time will be affected.

Sublimation is a process for ice removal that is found to be important, in particular for dry inland sites where the temperature can stay below freezing for several months continuously during the winter. At such sites the accumulated ice will not melt. Sublimation is defined as the transfer of ice from solid state directly to water vapor. This will happen in situations with dry air. The sublimation rate increases with wind speed when the ventilation of the iced object is high. This can allow for faster ice removal of a rotating turbine blade compared to a fixed object. The sublimation rate is calculated by evaluating the energy balance between outgoing long wave radiation and latent heat release from the sublimation process. Sublimation has been included in the icing calculations. During the process of sublimation, we have observed that the ice becomes brittle and that small pieces of ice continuously fall off the cylinder. This shedding is included by multiplying the sublimation rate with a factor of 2.5.

Vedlegg B Risikovurdering

B.1 Risikodefinsjon

Risikoen er vanligvis ansett som sannsynligheten for en hendelse multiplisert med en tilhørende konsekvens. I dette tilfellet er sannsynligheten gitt i Tabell B-1, og den mulige konsekvensen er alvorlig skade eller dødsulykke. 40 J regnes som en nedre grense for kinetisk energi som kan føre til dødsfall for en ubeskyttet person. Når en person er beskyttet av frontruten til en bil, betrakter vi energigrensen som 180 J for samme konsekvens.

Table B-1 Sammenheng mellom energigrense, treffareal og konsekvens for ett treff av isbit (Bredesen & Refsum, 2015) and (Bredesen, R. E., Kjeller Vindteknikk AS, 2019)

Energigrense	Treffareal	Konsekvens
15 J	0.1 m ²	Skade (grense for alvorlig personskade)
40 J	0.1 m ²	dødsulykke for ubeskyttet person
180 J	0.01 m ²	dødsulykke for person i bil, beskyttet av frontrute

B.2 Definisjon på LIRA, IRPA og PLL

LIRA (Localized Individual Risk per Annum) angir risikoen ved en gitt posisjon for en tenkt, ubeskyttet person som kontinuerlig er til stede (100% ubeskyttet eksponering). Den individuelle risikoen, LIRA-konturene, beregnes ved å kombinere mulige ulykkeshendelser med den respektive dødsrisikoen. Risikokonturene viser den geografiske fordelingen av individuell risiko ved å angi forventet hyppighet av hendelser som kan forårsake død på en gitt lokasjon, uavhengig av om det er noen personer til stede på lokasjonen. Foreslåtte akseptkriterier er vist i Figure B-1.

IRPA (Individual Risk per annum)¹⁶ beskriver risikoen for et gitt bevegelsesmønster for én person, for eksempel den mest eksponerte. For IRPA er egne akseptkriterier for risiko foreslått. Risikoen bør vanligvis være ubetydelig sammenlignet med bakgrunnsrisikoen i samfunnet. Som et eksempel kan dette gjøres ved å sammenligne en gjennomsnittlig posisjon i parken i 1 time med faren for å omkomme i trafikken. Hvis risikoen er akseptabel ved bruk av LIRA-verdien, er det ikke nødvendig å beregne IRPA.

PLL (Potential for Loss of Life) beskriver risikoen for et gitt mønster av bevegelser for en gruppe personer, også kalt en grupperisiko.

For å bedre forstå definisjonene og koblingen mellom dem benyttes et eksempel. På en gitt posisjon i parken er LIRA-verdien 1×10^{-4} . Hvis en ubeskyttet person bruker 3 minutter hver dag på denne lokasjonen (0,2% av tiden), er IRPA for denne personen 2×10^{-7} . Hvis 500 personer bruker 3 minutter hver dag på denne lokasjonen, er grupperisikoen (PLL) 1×10^{-4} . Til sammenligning ble 143 mennesker drept i trafikken i Norge i 2018, noe som tilsvarer IRPA på $2,7 \times 10^{-5}$ (WHO, 2018).

B.3 LIRA, metode

Den valgte beregningen for individuell risiko (IR) er LIRA. Det anbefales å gi IR-konturer i en risikovurdering (IEA Wind, 2018).

Risiko er et produkt av sannsynlighet og konsekvens. I dette tilfellet er sannsynligheten 1 delt på den gjennomsnittlige gjentakelsesperioden for et mulig dødelig isstykke som treffer et område på 1 kvadratmeter.

¹⁶ IRPA=tid(utsatt)*LIRA. En time utsatt per dag gir IRPA=LIRA/24.

Grensen for kinetisk energi vurdert en mulig dødelig isbit er satt som 40 J, tilsvarende en 200 g isbit som faller med hastighet på 20 m/s (72 km/t).

I denne analysen anses hver isbit med en kinetisk energi på over 40 J å være 100% dødelig, for et område av en person som okkuperer areal på 0,1 kvadratmeter (potensielt kritisk treff). LIRA-konturen 10^{-4} / år tilsvarer altså tusenårsisbiten (isbit som treffer en kvadratmeter hvert 1000. år) som treffer en kvadratmeter med en kinetisk energi over 40 J. Flere detaljer som beskriver metoden er gitt i (Bredesen & Refsum, 2015) and (Bredesen R. E., 2017).

For å forstå risikomarginene for iskast sammenlignes de modellerte risikonivåene mot den gjennomsnittlige risikoen for å omkomme i en trafikkulykke i Norge 2018, samt typiske kriterier benyttet for aksept av grupperisiko (potential for loss of life per annum, PLL) og individuell risiko (Individual Risk Per Annum, IRPA). Det kan observeres at risikoen for eksponeringsscenariene kan være tolererbare og akseptable, til tross for at den overstige LIRA-kriteriene.

Ansvarer med å redusere risikoen til et minimum bør ikke avhenge av opportunistiske valg av metode som gir laveste styringstall på konsekvens. I våre beregninger har vi gjort robuste betraktninger til grunn. Analyser med høy presisjon kan legge til rette for ytterligere kostnad-nytte-analyser for de forskjellige risikoreduserende tiltakene (f.eks. i henhold til ALARP-prinsippet (As Low As Reasonably Practicable) som er benyttet i Storbritannia). Basert på ALARP-anbefalingen kan det tydelig kommuniseres at risikoen behandles riktig ved å redusere risikoen til et rimelig praktisk minimum og et akseptabelt nivå.

Merk at risikotall, blant annet individuell risiko (IRPA / LIRA), ikke beskriver alle aspekter, som for eksempel: 1) risiko som ikke dekkes av analysen, 2) feil i modell og 3) aspekter av risiko som ikke egner til tallfesting. Imidlertid skal en risikoanalyse identifisere relevante hendelsesforløp og beskrive årsaks- og konsekvensbildet. Hvordan dette gjøres avhenger av hvilken metode som benyttes og hvordan resultatene skal brukes. Imidlertid er intensjonen alltid den samme: å beskrive risiko.

Figur B-1 er hentet fra anbefalingen fra IEA Task 19 (IEA Wind, 2018). Denne viser en oversikt over LIRA-sikkerhetssoner og forslår soner som ulike objekter kan aksepteres innenfor.

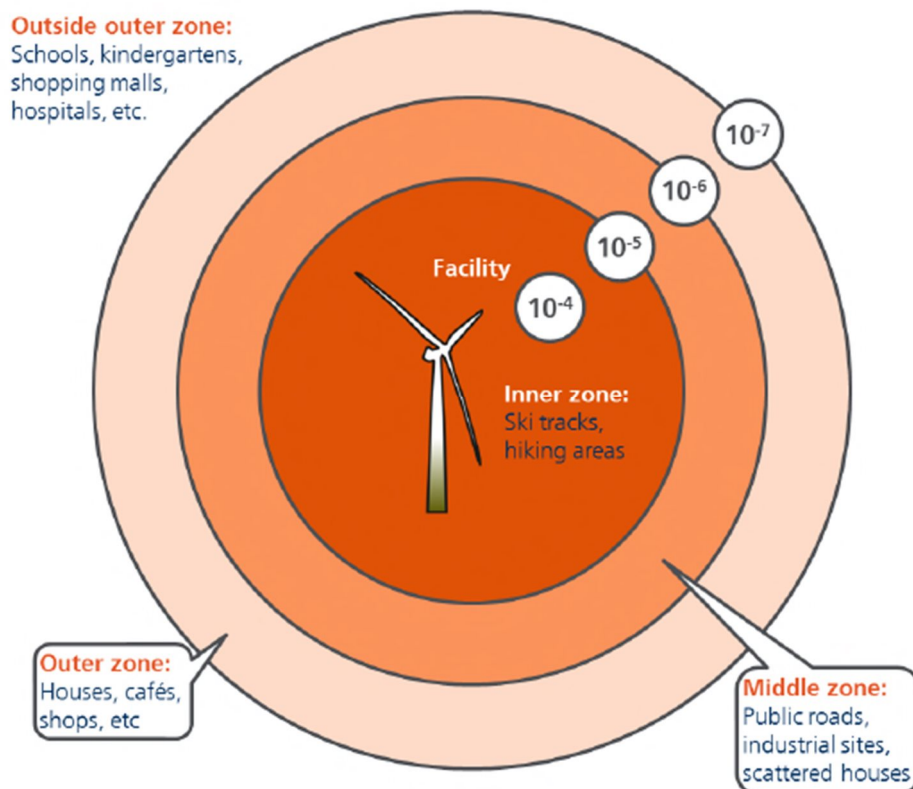


Figure B-1 Foreslåtte sikkerhetssoner rundt installasjon som kan forårsake risiko for iskast eller isfall. Tallene indikerer iso-risikokonturene for LIRA (localized individual risk), sannsynligheten for at en gjennomsnittlig ubeskyttet person som permanent befinner seg på en gitt lokasjon, blir drept i løpet av ett år på grunn av isfall eller kast fra anlegget. (Kilde: courtesy of Lloyds Register / Kjeller Vindteknikk) (IEA Wind, 2018, s. 16)

B.4 Eksponeringsscenarier

I tillegg til å benytte LIRA-risikotall for å beregne avstander og faresoner for iskast, kan risikoen også beregnes for enkelte personer eller grupper hvor eksponeringsscenarier er hensyntatt. Eksempler på individuelle risikoer for trafikkulykker er vist i tabell B-2. Tabell B-3 og B-4 viser foreslåtte akseptkriterier. De foreslåtte akseptkriteriene skal motivere til ytterligere risikoreduserende tiltak. Forøvrig anbefales ALARP uavhengig av kriteriene for risikoaksept.

Table B-2 Risiko for dødsfall i forbindelse med trafikkulykke i forskjellige land, ifølge WHO status reports on road safety (WHO, 2015) and (WHO, 2018).

Land	Individuell Risiko (IRPA) år 2015	Individuell Risiko (IRPA) år 2018
Norge	3.8×10^{-5}	2.7×10^{-5}
Sverige	2.8×10^{-5}	2.8×10^{-5}
Finland	4.8×10^{-5}	4.7×10^{-5}
USA	1.1×10^{-4}	1.2×10^{-4}

Table B-3 Foreslåtte akseptkriterier fra Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, 2013).

Foreslåtte akseptkriterier for risiko i Norge (DSB)	Grupperisiko (PLL)	Individuell risiko (IRPA)
3. person (offentlig)	10^{-4}	2×10^{-7}
2. person (gjester)		3×10^{-6}
1. person (opplært personell)		4×10^{-5}

Table B-4 Eksempel på kriterier for individuell og grupperisiko (uten tiltak) (IEA Wind, 2018) og (Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, 2013) (siste linje).

Grupperisiko (PLL)	individuell risiko (IRPA)	Evaluerings
$> 10^{-3}$	$> 10^{-5}$	Risikoen er uakseptabel høy. Tiltak for å redusere risiko må gjennomføres. Omfattende risikoreduserende tiltak (f.eks. ved flytting av turbin eller endring av turbin spesifikasjoner) kan iverksettes, før det foretas ny vurdering om risikoen er tilstrekkelig redusert.
10^{-4} to 10^{-3}	10^{-6} to 10^{-5}	Risikoen er høy og ligger i den øvre ALARP-regionen. Kjente risikoreduserende tiltak skal iverksettes, og det anbefales å se etter ytterligere risikoreduserende tiltak.
10^{-5} to 10^{-4}	10^{-7} to 10^{-6}	Risikoen er tolererbar og i nedre ALARP-regionen. Kjente risikoreduserende tiltak bør vurderes iht. kost/nytte. Iverksettelse av slike tiltak kan anses som en anbefaling og ikke som et strengt krav.
$< 10^{-5}$	$< 1 \times 10^{-7}$	Risikoen er lavere enn risikoen folk utsettes for i et normalt liv.
$< 10^{-4}$	$< 2 \times 10^{-7}$	Typisk akseptkriterie for risiko for 3. person i Norge (Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, 2013).

B.5 Er tiltak nødvendige?

Følgende prosedyre kan brukes til å avgjøre om risikoreduserende tiltak er nødvendige for parken (en lignende oversikt finnes også i (IEA Wind, 2018, s. 14):

1. Er LIRA-verdien på utsatte steder i parken (veier, bygninger, skispor osv.) over terskelverdiene i tabell B-3?
 - Hvis nei: Ingen ytterligere tiltak kreves offisielt, men noen tiltak, som isingsmålinger, skilt og god informasjon, er både nyttige og lurt.
 - Hvis ja: Fortsett til punkt 2
2. Hva er eksponeringen i parken?
 - Noen eksempler på spørsmål for å fremskaffe denne informasjonen:
 - Er det en offentlig vei i nærheten? Hvor mye trafikk er det på denne veien?
 - Er det turstier i nærheten? Hvor ofte brukes disse? Hvor ofte brukes de om vinteren? Hvor mange bruker stiene?
 - Hvor ofte oppholder vindparkansatte seg i parken om vinteren?
3. Antatt eksponering brukes til å beregne IRPA- og PLL-verdiene. Er disse under grenseverdiene i tabell B-3?
 - Hvis nei: Ingen ytterligere tiltak er et offisielt krav, men noen tiltak, som ismålinger, tegn og god informasjon, er både nyttige og lurt.
 - Hvis ja: Fortsett til del 4
4. Vi vet nå at tiltak i vindparken er avgjørende. For hver situasjon der terskelen krysses er det nødvendig med en individuell vurdering av nødvendige tiltak.

Vedlegg C Risikohåndteringsstrategier

Foreningen Svensk Vindenergi presenterte følgende liste med tiltak på Winterwind (Göransson & Haaheim, 2016)

C.1 List of risk mitigation strategies related to ice-throw and ice fall

The following lists of possible risk mitigating strategies originates from Statkraft and the Swedish Wind Energy Association. The presented guidelines for cold climate work include risk mitigating strategies on internal & external communication, turbine specific ice-mapping, turbine technical measures, and operational strategies:

Communication:

- **Ice Statement:** *Safety is one of our core values and in our H&S policy we state our commitment to prevent all incidents and control safety risk arising from our activities; Under certain cold climate weather conditions, ice can form on wind turbine structures and rotor blades in a variety of ways. This ice can affect production and also be a safety hazard; The purpose of this statement is to state the management's commitment to ensure safe and sound cold climate operations on our plants.*
- **Belief:** *Ice build-up on turbines is inevitable during cold climate conditions; Any unsafe condition due to ice formation on turbines must be controlled. Concessions to this will not be made in favour of business result; At the design stage of developments projects in cold climate areas, risk from falling ice must be assessed and mitigated. This might be means of, but not necessarily limited to, state of the art ice prevention or de-icing technology; For all operational sites, residual risk must be identified, assessed and controlled by site-specific procedures supported by local management approval. Rules stipulated by legislation or enforcement bodies must always be followed.*

Turbine specific ice-mapping: *Mapping of the likelihood of ice or snow build up for the area; Mapping of ice-trajectory; Critical mass based on an impact energy > 40J; Move away from risk area based on $(H+D) \times 1.5$; New risk area based on the prevailing wind direction during ice build-up and melting; Risk analysis and acceptance criteria.*

Turbine technical measures: *Ice detection instruments; Vibration detection; Power curve deviation; De-icing systems; Anti-icing systems; Barriers at entrance; Ice camera.*

Operational strategy: *Warning signs; Warning lights & horn; Road gates & barriers; Meteorological forecasts; Understanding the location-specific weather phenomena; Register ice-throws; Demand of weather-specific routines; Visual observation of ice on blades; Procedures for manual or remote stop of turbines; Safe start-up after ice events; visual check that the blades are free of ice; Minimize staff exposure inside and during transport through the risk area; Safe transport vehicles; Yaw turbine to minimize risk for icethrow/ falling ice hitting sensitive areas; Larger risk acceptance for employees than third parties where knowledge and routines are in place to manage the risk; Ad-hoc information to local stakeholders such as reindeer herders, local tourist associations, snowmobile organizations, snow clearance companies, skiers, hunters, etc.; Stop turbines before ice-event which is expected to be followed by a longer period of high air pressure and low temperatures; De-icing with helicopter or MEWP; Technical upgrading: De-icing, Deflect heat to the blades, Hydrophobic coating, Protective sleeve during periods of active icing.*