

Guleslettene Vind AS

## ► **Guleslettene, Vestland fylke, Norge**

Risikovurdering for iskast fra vindturbiner

Oppdragsnr.: **5195845** Dokumentnr.: **KVT/2020/R084/JMG** Versjon: **J01** Dato: **2020-11-06**



**Oppdragsgiver:** Guleslettene Vind AS  
**Oppdragsgivers kontaktperson:** Siv Sannem Inderberg  
**Rådgiver:** Kjeller Vindteknikk, Tærudgata 16, NO-2004 Lillestrøm  
**Oppdragsleder:** John Magne Gitmark  
**Fagansvarlig:** Rolv Erlend Bredesen  
**Andre nøkkelpersoner:** Brian Riget Broe

|         |            |             |                    |                |                  |
|---------|------------|-------------|--------------------|----------------|------------------|
| J01     | 2020-11-06 | Final       | John Magne Gitmark | Ove Undheim    | Finn K. Nyhammer |
| 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).

Det er utført analyser av hyppigheten av atmosfærisk ising i vindparken Guleslettene i kommunene Kinn og Bremanger i Vestland fylke. Hensikten er å beregne sannsynligheten for iskast i området i og omkring vindparken. Vindparken består av 47 turbiner av typen Vestas V136 4,2 MW. Turbinene er lokalisert 445 - 694 m over havet. Med 90 m navhøyde og en rotordiameter på 136 m får turbinene en totalhøyde på 158 meter og turbinbladene til de høyest plasserte turbinene vil nå opp til 852 meter over havet.

Det er beregnet at det vil danne seg ismengder som kan gi farlig isnedfall i 6,6 % av tiden for en turbin plassert i gjennomsnittlig høyde i vindparken, og mellom 2,2 – 13,7 % for enkeltturbiner. Dette fordeler seg i gjennomsnitt på 21 episoder per vinter for gjennomsnittsturbinen i parken (4 - 30 for enkeltturbiner). Det vil være de høyest plasserte turbinene som vil oppleve mest ising, mens de som ligger lavest i terrenget opplever minst ising. Ifølge IEA sin isklassifisering er Guleslettene vindpark i klasse 2-5 (lett - mye ising).

De beregnede sannsynlighetene for at farlige isbiter<sup>1</sup> fra turbinene treffer ulike områder ved Guleslettene er vist i Tabell 1-1. 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 1-1 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 sektorer rundt den høyeste turbinen i parken (Vestas V136-4,2 MW) og for gjennomsnittsåret.

| Returperiode | Sannsynlighet | Avstand |
|--------------|---------------|---------|
| 100 år       | $10^{-2}$     | 130 m   |
| 1 000 år     | $10^{-3}$     | 230 m   |
| 10 000 år    | $10^{-4}$     | 280 m   |
| 100 000 år   | $10^{-5}$     | 330 m   |
| 1 000 000 år | $10^{-6}$     | 360 m   |

Det bør settes opp skilt ved alle naturlige adkomstveier og stier om at det er fare for isnedfall, og som informerer om en anbefalt sikkerhetsavstand på 250 m til turbiner. En bør vurdere muligheten for å legge om stier og etablere ytterligere bommer med skilting om fare. Det bør lages egne sikkerhetsrutiner for de som arbeider i vindparken slik at de reduserer sin egen risiko i forhold til isnedfall fra vindturbinene. Det bør også varsles for fare ved parkeringsplass/servicebygg, samt vurdere bruken av parkeringsplass for 3. personer.

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

## ► Innhold

|          |                                                                                 |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Innledning</b>                                                               | <b>6</b>  |
| <b>2</b> | <b>Beskrivelse av parken</b>                                                    | <b>7</b>  |
| <b>3</b> | <b>Isingsforhold for Guleslettene</b>                                           | <b>8</b>  |
| 3.1      | Metodikk                                                                        | 8         |
| 3.2      | Klassifisering av isingsforhold på Guleslettene                                 | 9         |
| 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        |
| <b>4</b> | <b>Beregning av iskast</b>                                                      | <b>14</b> |
| 4.1      | Sannsynlighet for iskast fra en gjennomsnittsturbin i parken med én vindretning | 14        |
| 4.2      | Sannsynlighetsfordeling for iskast i hele Guleslettene vindpark                 | 15        |
| <b>5</b> | <b>Risikovurdering i Guleslettene vindpark</b>                                  | <b>18</b> |
| 5.1      | Risikokart (LIRA)                                                               | 18        |
| 5.2      | Risikokategorier                                                                | 20        |
| 5.2.1    | <i>Interne veier</i>                                                            | 20        |
| 5.2.2    | <i>Nærliggende veier</i>                                                        | 20        |
| 5.2.3    | <i>Turløyper</i>                                                                | 20        |
| 5.2.4    | <i>Skiløyper</i>                                                                | 20        |
| 5.2.5    | <i>Parkering</i>                                                                | 20        |
| 5.2.6    | <i>Bebyggelse</i>                                                               | 20        |
| 5.2.7    | <i>Jakt- og fiskeområder</i>                                                    | 20        |
| 5.2.8    | <i>Driftsbygninger</i>                                                          | 20        |
| 5.2.9    | <i>Kraftlinjer</i>                                                              | 20        |
| 5.3      | Detaljert risikoberegning i Guleslettene vindpark                               | 23        |
| 5.3.1    | <i>Internveier</i>                                                              | 23        |
| 5.3.2    | <i>Turløyper</i>                                                                | 23        |
| 5.3.3    | <i>Parkering og servicebygg</i>                                                 | 23        |
| 5.3.4    | <i>Transformatorstasjon</i>                                                     | 24        |
| 5.3.5    | <i>Skiløype med varmestue</i>                                                   | 24        |
| <b>6</b> | <b>Tiltak for å redusere risikoen</b>                                           | <b>25</b> |
| 6.1      | Kunnskap                                                                        | 25        |
| 6.2      | Varsling                                                                        | 25        |
| 6.3      | Designløsninger                                                                 | 25        |
| 6.4      | Spesifikke tiltak                                                               | 26        |
| <b>7</b> | <b>Bibliografi</b>                                                              | <b>27</b> |

|                  |                                                                      |           |
|------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Vedlegg A</b> | <b>Meso-Scale Model WRF</b>                                          | <b>29</b> |
| A.1              | Meso-Scale Model WRF                                                 | 29        |
| A.2              | Input Data                                                           | 29        |
| A.3              | Model Setup                                                          | 30        |
| A.4              | Ice load calculations                                                | 30        |
| A.5              | Removal of ice                                                       | 31        |
| <b>Vedlegg B</b> | <b>Risk assessment</b>                                               | <b>33</b> |
| B.1              | Risk definition                                                      | 33        |
| B.2              | Definitions of LIRA, IRPA and PLL                                    | 33        |
| B.3              | LIRA methodology                                                     | 33        |
| B.4              | Exposure scenarios                                                   | 35        |
| B.5              | Are measures necessary?                                              | 37        |
| <b>Vedlegg C</b> | <b>Risikohåndteringsstrategier</b>                                   | <b>38</b> |
| C.1              | List of risk mitigation strategies related to ice-throw and ice fall | 38        |

## 1 Innledning

Kjeller Vindteknikk har utført en studie av isingsforholdene for Guleslettene i kommunene Kinn og Bremanger, Norge.

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 Finsk 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.

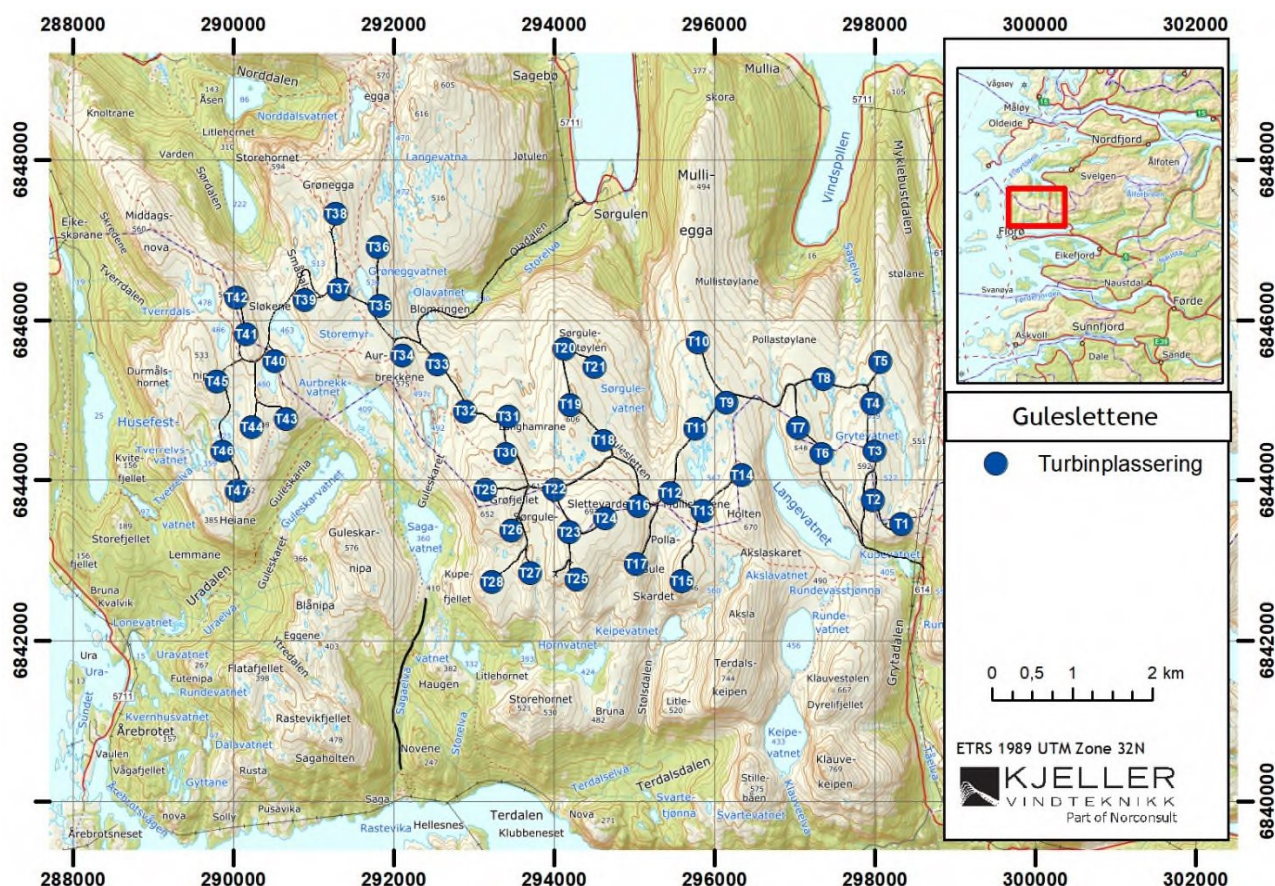
Is som har lagt seg på bladet vil normalt falle av i biter av ulik størrelse. Isen vil som oftest fragmenteres i mindre biter før den treffer bakken (Seifert, Westerhellweg, & Krönig, 2003).

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 i Guleslettene vindpark 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.

## 2 Beskrivelse av parken

Kart over området er vist i Figur 2-1 med 47 Vestas V136-4,2MW turbiner. Med 90 m navhøyde og en rotordiameter på 136 m har turbinene en totalhøyde på 158 meter og turbinbladene til de høyest plasserte turbinene vil nå opp til 852 m over havet. Terreng høyden til laveste og høyeste turbin er henholdsvis 445 m og 694 m over havet. Gjennomsnitts terrenghøyde for turbinene er 562 m over havet.

Beregningene er utført med antagelsen at turbinene kan produsere med is på bladene og at de ikke har bladvarme installert. Alle turbinene har bladvarme, men det er usikkert hvordan dette påvirker risikoen og det kan ikke tas med i beregningen på det nåværende tidspunkt.



Figur 2-1 Oversiktskart Guleslettene vindpark

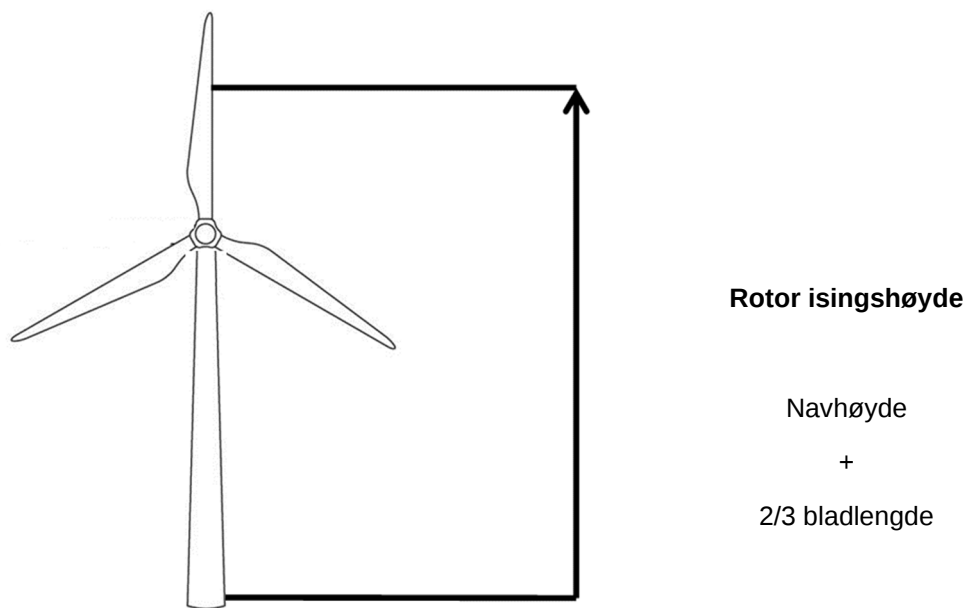
### 3 Isingsforhold for Guleslettene

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

#### 3.1 Metodikk

For å beregne isingsforholdene, ble 20 års tidsserier (4 km) med data fra værmodellen WRF (Vedlegg A) for parken benyttet. 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 kapitlet 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). Rotor isingshøyde for turbinene ved Guleslettene er ca 135 meter over bakken.



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 Guleslettene

IEA wind task 19 (IEA Wind, 2012) definerer perioder hvor is akkumuleres på et objekt som perioder med «meteorologisk ising». I navhøyde, 90 meter over bakken, er det forventet meteorologisk ising i 2,2-13,7 % av tiden (192-1203 timer per år) med cirka 6,6 % eller 581 timer per år for gjennomsnittsturbinen.

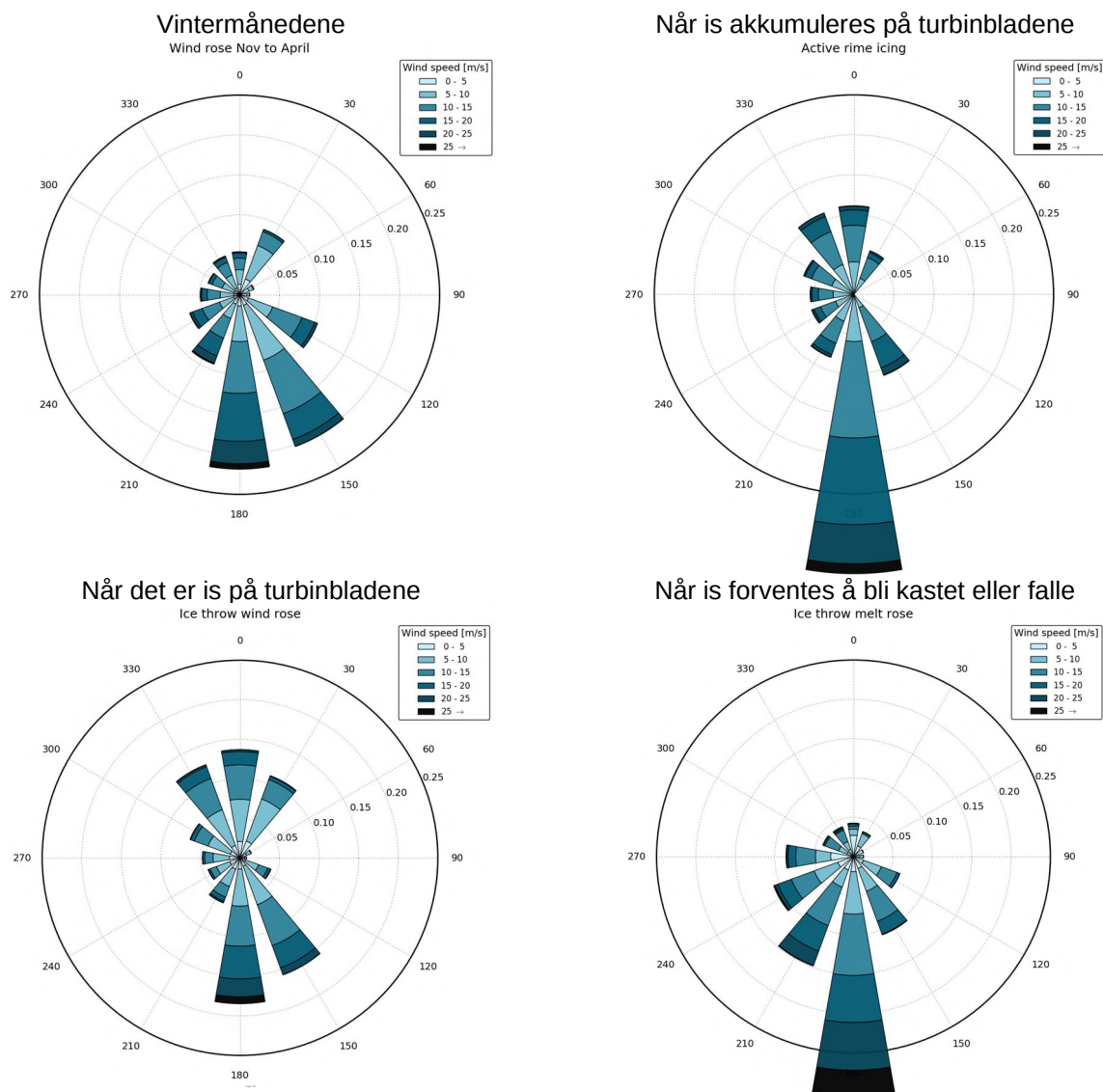
Benytter vi klassifiseringen fra IEA Wind (2012) for bruk i vindkraftsammenheng (vist i Tabell 3-1) får vi at Guleslettene klassifiseres som isklasse 2-5. Isingen varierer mye for turbinene i parken, fra lett til mye is. Generelt sett vil turbinene som har lavest høyde over havet ha minst ising, mens de som er plassert høyest har mest ising.

Tabell 3-1 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<br>[% av året] | Instrument ising<br>[% av året] | Produksjonstap<br>[% av årlig produksjon] |
|-------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|
| 5                 | >10                                | >20                             | >20                                       |
| 4                 | 5-10                               | 10-30                           | 10-25                                     |
| 3                 | 3-5                                | 6-15                            | 3-12                                      |
| 2                 | 0,5-3                              | 1-9                             | 0,5-5                                     |
| 1                 | 0-0,5                              | <1,5                            | 0-0,5                                     |

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

En vindrose for vintermånedene (november til april) for en gjennomsnittsturbin i Guleslettene vindpark er vist øverst til venstre i Figur 3-2. Hovedvindretningen for vinteren er fra sør, med en betydelig andel fra sørøst. Oppe til høyre vises vindrosa for de periodene hvor det vil bygges opp is på turbinbladene, dette er stort sett knyttet til vindretninger fra sør, men også litt fra nord. Nede til venstre vises vindrosa for tidspunkt hvor det er beregnet å være is på vindturbinbladene, noe vi ser at forekommer med vind fra både sør og nord. Nederst til høyre vises vindrosa for når is vil smelte og falle av et turbinblad. Under smelting er hovedvindretningen fra sør og sørvest.



Figur 3-2 Vindroser for ulike situasjoner. Vindrosene viser vindretning og vindstyrke for ulike deler av tiden.

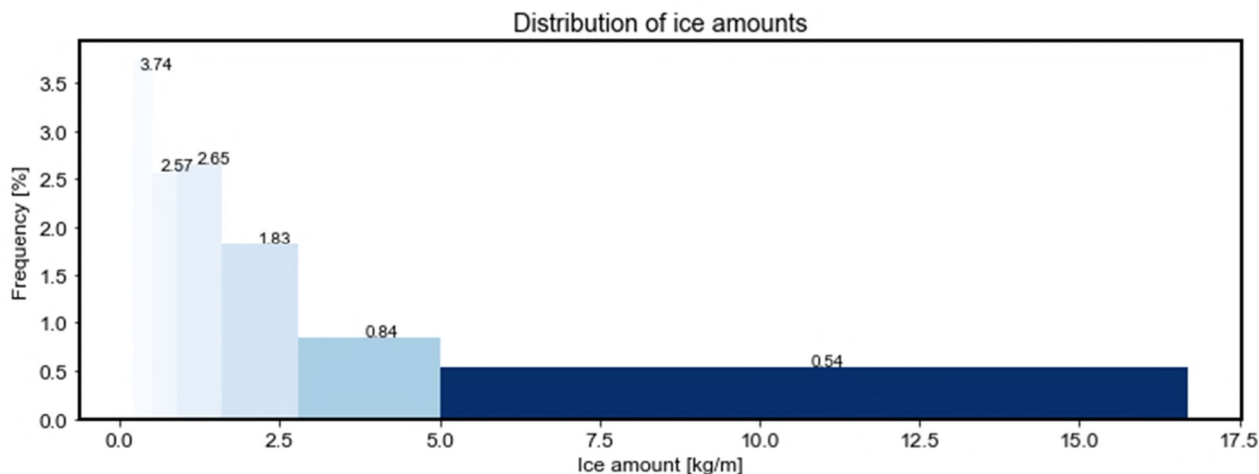
### 3.4 Størrelsesfordeling av isbiter

Figur 3-3 viser fordelingen av ismengder for middelhøydeturbinen i Guleslettene vindpark, og frekvensene i fordelingen er vist for den lavestliggende turbinen, middelhøydeturbinen og den høyestliggende turbinen i Tabell 3-2. Ismengdene er delt inn i kategorier, tilsvarende de fra TechnoCentre Eolien (nå Nergica) vist i Figur 3-4. For den lavestliggende turbinen er den største ismengden beregnet til 4,0 kg/m, som tilsvarer kategori 5 i Figur 3-4. Den største ismengden for gjennomsnittsturbinen er beregnet til ca. 17 kg/m og det svarer til høyere enn kategori 5. For den høyestliggende turbinen er den største ismengden

beregnet til 44 kg/m, som er betydelig høyere enn kategori 5, men det er lite sannsynlig at isbiter kan bygge seg opp til dette nivået før de faller av grunnet sin egen vekt.

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 3-4 (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 layouten beregnes at en terskelverdi på 0,5 kg/m er overskredet i 13,7 % av tiden og 30 episoder om året for den høyest plasserte turbinen (2,2 % av tiden og 4 episoder i året for den lavestliggende turbinen og 6,6 % av tiden og 21 episoder i året for middelhøydeturbinen). Det er variasjon i isingsforholdene mellom enkeltturbiner i parken basert på hvor høyt over havet de ligger.



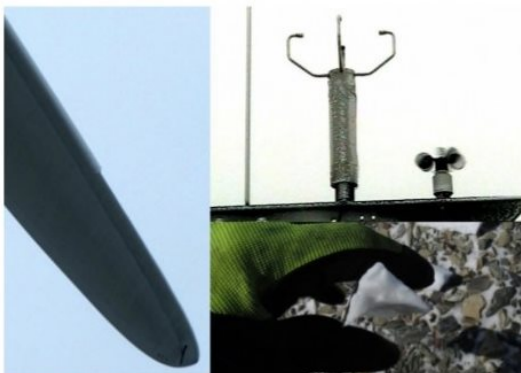
Figur 3-3 Fordeling av ismengde på over 0,5 kg/m på et standardlegeme for gjennomsnittsturbinen. Inndelingen tilsvarer kategoriene vist i Figur 3-4.

Tabell 3-2 Oversikt over frekvenser av ismengder for middelhøydeturbinen og den høyestliggende turbinen.

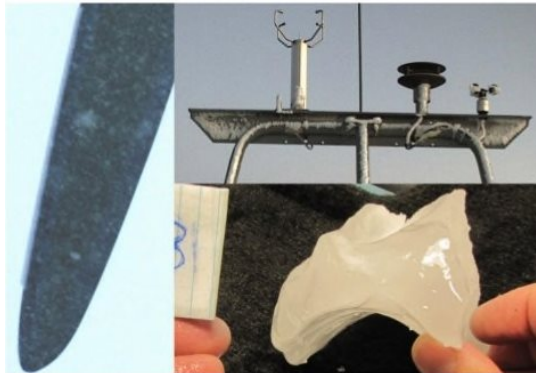
| ISO 12494 islast               | Kat. 1  | Kat. 2    | Kat. 3    | Kat 4.    | Kat. 5    | Over kat. 5 |
|--------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| Icemengde [kg/m]               | 0 – 0,5 | 0,5 – 0,9 | 0,9 – 1,6 | 1,6 – 2,8 | 2,8 – 5,0 | > 5,0       |
| Frekvens lavestliggende turbin | 1,0 %   | 0,5 %     | 0,2 %     | 0,1 %     | 0,0 %     | 0,0 %       |
| Frekvens middelhøydeturbinen   | 3,7 %   | 2,6 %     | 2,7 %     | 1,8 %     | 0,8 %     | 0,5 %       |
| Frekvens høyestliggende turbin | 2,7 %   | 3,2 %     | 3,5 %     | 3,8 %     | 3,8 %     | 7,2 %       |



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



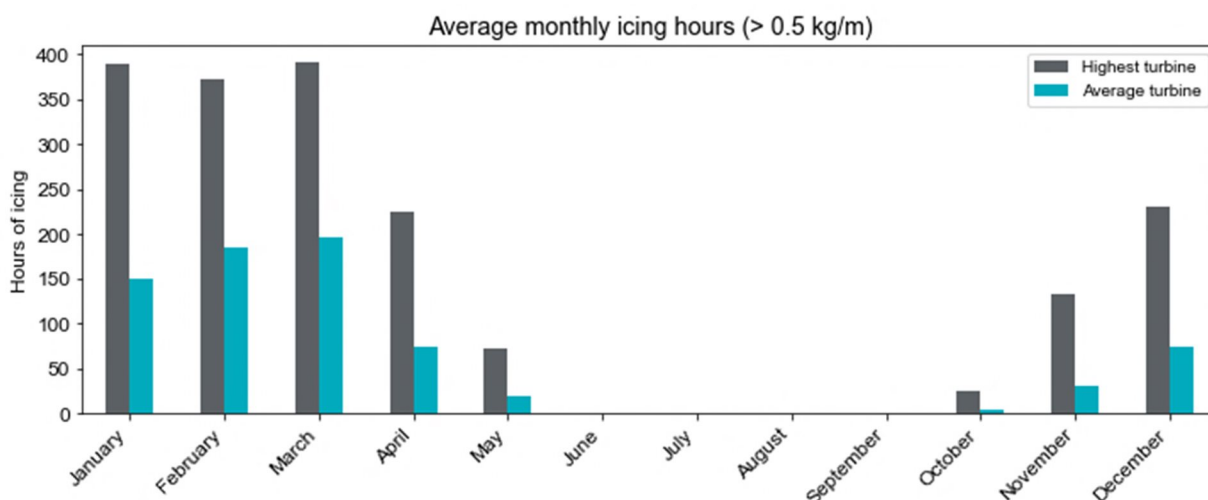
Figur 3-4 Sammenheng mellom islast på standardlegeme (ISO 12494) i navhøyde og akkumulert is på et turbinblad. Bildene er gjengitt med tillatelse av Wadham-Gagnon ved TechnoCentre éolien (nå Nergica). Klassifiseringen er hentet fra ISO-12494 som omhandler ising på konstruksjoner

### 3.5 Månedss- og årsfordelingen av is

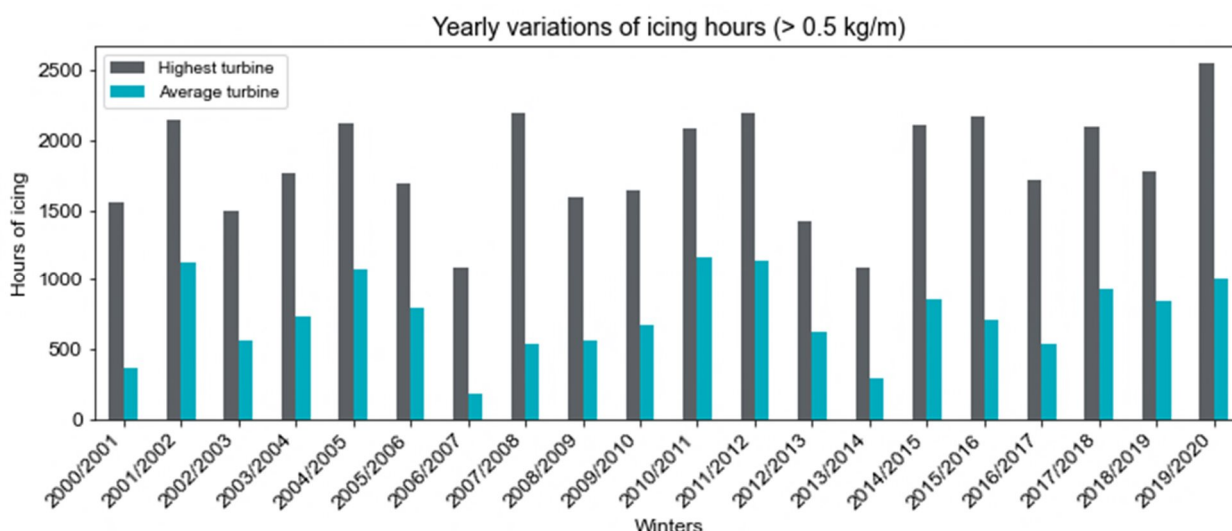
Ising har stor variasjon gjennom året, og også fra år til år. Dette er viktig å ta hensyn til for å bestemme passende tiltak for parken. Figur 3-5 og Figur 3-6 viser gjennomsnittlig antall istimer med over 0,5 kg/m i løpet av året og på de siste 20 vintrene for å illustrere denne variasjonen.

Isingen er fordelt på vinterhalvåret fra november til april. Mars er gjennomsnittlig den måneden med mest ising. For de høyeste turbinene, kan ising også forekomme i oktober og mai.

Som Figur 3-6 viser, var det mest ising vinteren 2019/2020, mens 2006/2007 var vinteren med lavest ising for den høyestliggende turbinen. Det er generelt store 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 ca. 1100 timer per år til ca. 2500 timer per år.



Figur 3-5 Månedlig variasjon av istimer på et standardlegeme.



Figur 3-6 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 Guleslettene. 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

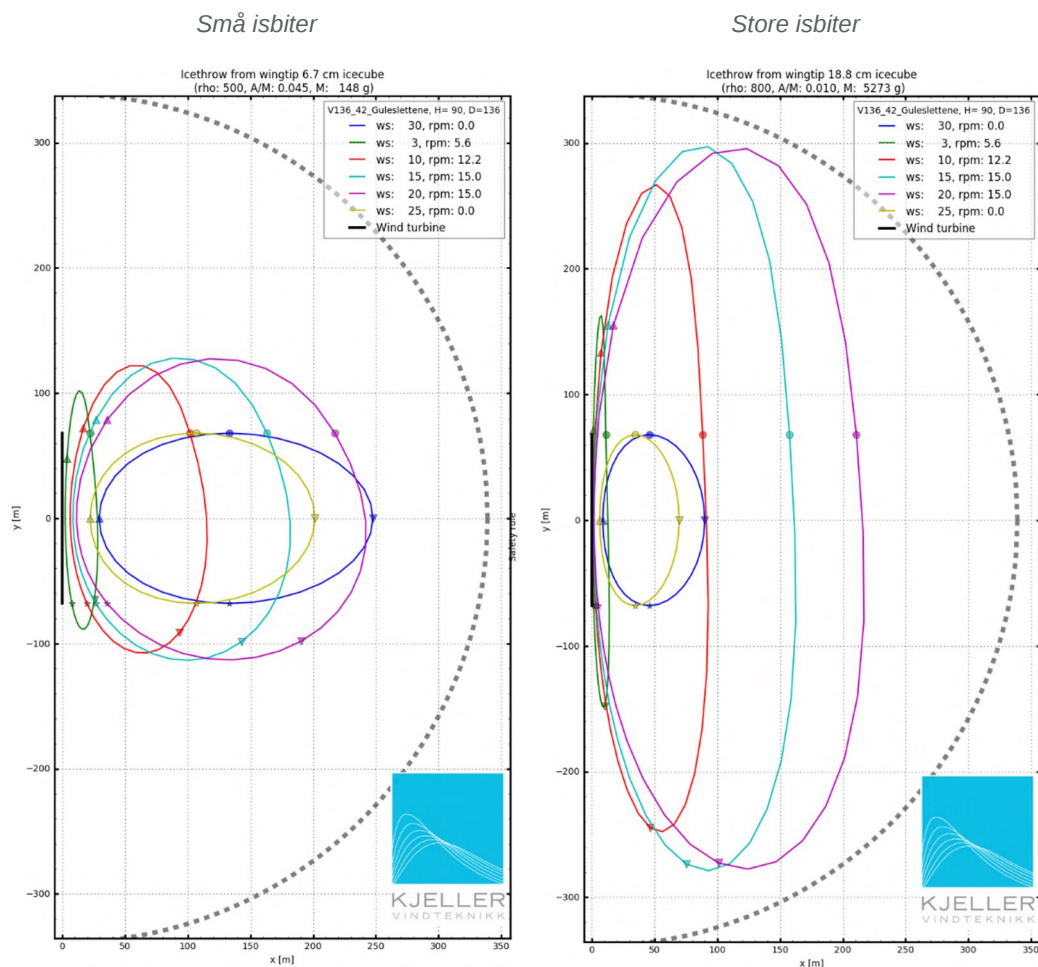
For vindturbiner på Guleslettene forventes ising i form av skyrim. Denne istypen dannes når skyvann fra lave skyer (tåke) fryser på et kaldt turbinblad. Skyrim (rime) har vanligvis en tetthet på 500 kg/m<sup>3</sup>. Dersom isingen skjer nær 0°C, eller store dråper av yr er med i prosessen, kan tettheten øke opp til 700 til 800 kg/m<sup>3</sup>. 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<sup>3</sup> er brukt i de videre beregningene.

Beregningene er gjort for en Vestas V136 4,2 MW turbin med navhøyde 90 m og rotordiameter 136 m. Høyeste rotasjonshastighet for turbinen er 15 omdreininger per minutt (rpm). 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 (5,2 kg) i figuren til høyre. Mens kastelengder for de mindre isbitene er vist til venstre (150 g). Mindre isbiter enn det som er vist anses som ufarlige mens større isbiter er mindre sannsynlige ved Guleslettene. Kastelengdene er vist i forhold til den forenklete sikkerhetsavstanden<sup>2</sup> som for denne turbinen vil være 335 m. Vi ser at det for de beregnede kombinasjoner av vind, isbitstørrelse, tetthet og form ikke forekommer isbiter som kastes lenger enn den forenklete sikkerhetsavstanden for turbinen.

Det bemerkes at største sikkerhetsavstand ved Guleslettene 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 CdAoM-faktorer<sup>3</sup>, med ulike kastposisjoner fra ulike steder på turbinbladet.

<sup>2</sup> Forenklet sikkerhetsavstand:  $(H+D) * 1.5$ , der H er navhøyde og D er rotor diameter.

<sup>3</sup> CdAoM beskriver forholdet mellom effektivt frontareal (A) og masse (M) for en isbit.  $CdAoM = C_d A / M$ , hvor  $C_d$  er dragkoeffisienten til isbiten.



Figur 4-1 Beregnede soner for iskast med store og små isbiter fra vingspiss av en Vestas V136-4,2 MW turbin. Denne turbinen har rotordiameter 136 m og navhøyde 90 m. Vinden blåser fra vestre mot høyre. De ulike fargene er ulike vindhastigheter. Blå og lys grønn linje viser stoppet turbin i henholdsvis 30 m/s og 25 m/s. For de øvrige linjene er turbinen i drift.

## 4.2 Sannsynlighetsfordeling for iskast i hele Guleslettene vindpark

I dette kapittelet presenteres hovedresultatet i denne rapporten. Sannsynlighetsfordeling for iskast fra en eksempelturbin i Guleslettene vindpark 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 farlig og ufarlig iskast/nedfall 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:

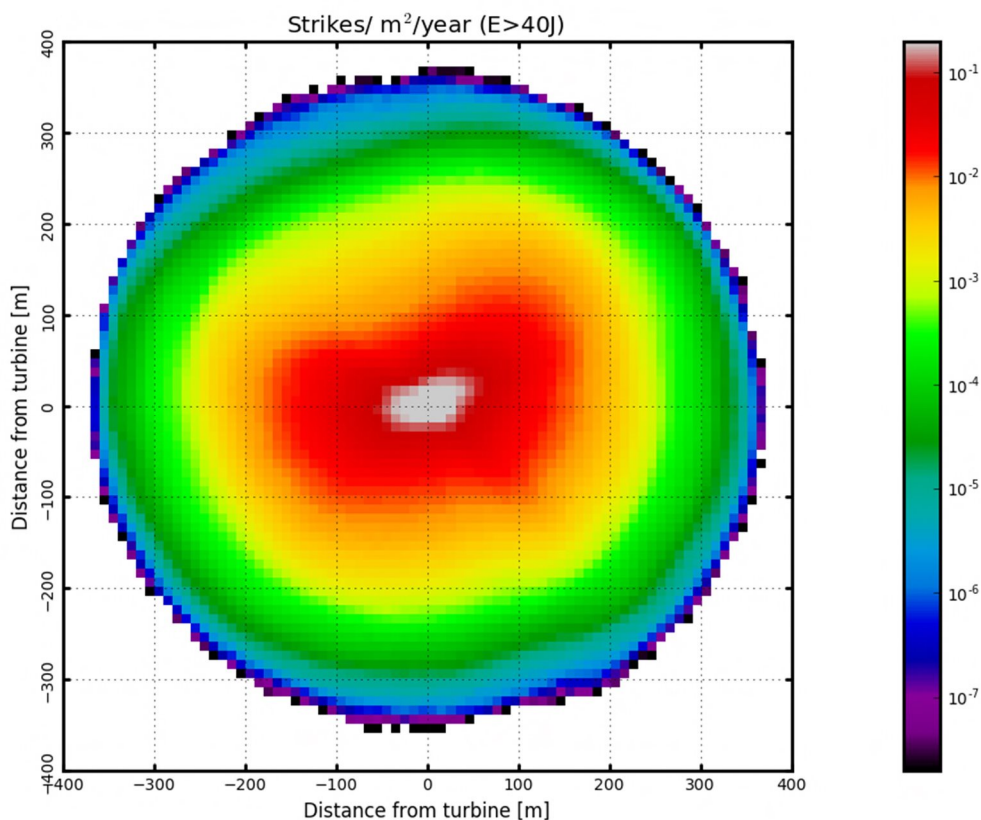
1. Is på bladet og turbinen roterer med full ytelse
2. Is på bladet og turbinen roterer med redusert RPM på grunn av isen
3. Is på bladet, smelteforhold og turbinen roterer med full ytelse
4. Is på bladet, smelteforhold og turbinen roterer med redusert RPM

Isbiter med anslagsenergi over 40 J kan ansees som farlige for personell, 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. Iskastroisikoen 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 en turbin i gjennomsnittshøyden ved Guleslettene. Nedenfor er sammenhengen mellom treff per kvadratmeter per år og returperiode oppsummert.

- Kast med returperiode på 100 år kan forekomme 130 m fra turbinen
- Kast med returperiode på 1 000 år kan forekomme 230 m fra turbinen
- Kast med returperiode på 10 000 år kan forekomme 280 m fra turbinen
- Kast med returperiode på 100 000 år kan forekomme 330 m fra turbinen
- Kast med returperiode på 1 000 000 år kan forekomme 360 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.



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

Det beregnede risikokartet for Guleslettene er vist i Figur 5-1. 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.

Det er utført en detaljert beregning for turbinene T1 og T2 grunnet overhøyde og nærhet til skiløype, parkeringsplass og servicebygg. Dette er gjort ved å kjøre en mer avansert simulering hvor det blant annet er mer detaljert terreng, og det er tatt hensyn til at enkelte isbiter kan drive lengre med vinden.

## 5 Risikovurdering i Guleslettene vindpark

Etter at isingsforholdene er beregnet og risikoen for iskast er tegnet opp i kartet, er det viktig å vite hvordan man skal tolke resultatene, 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, 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.

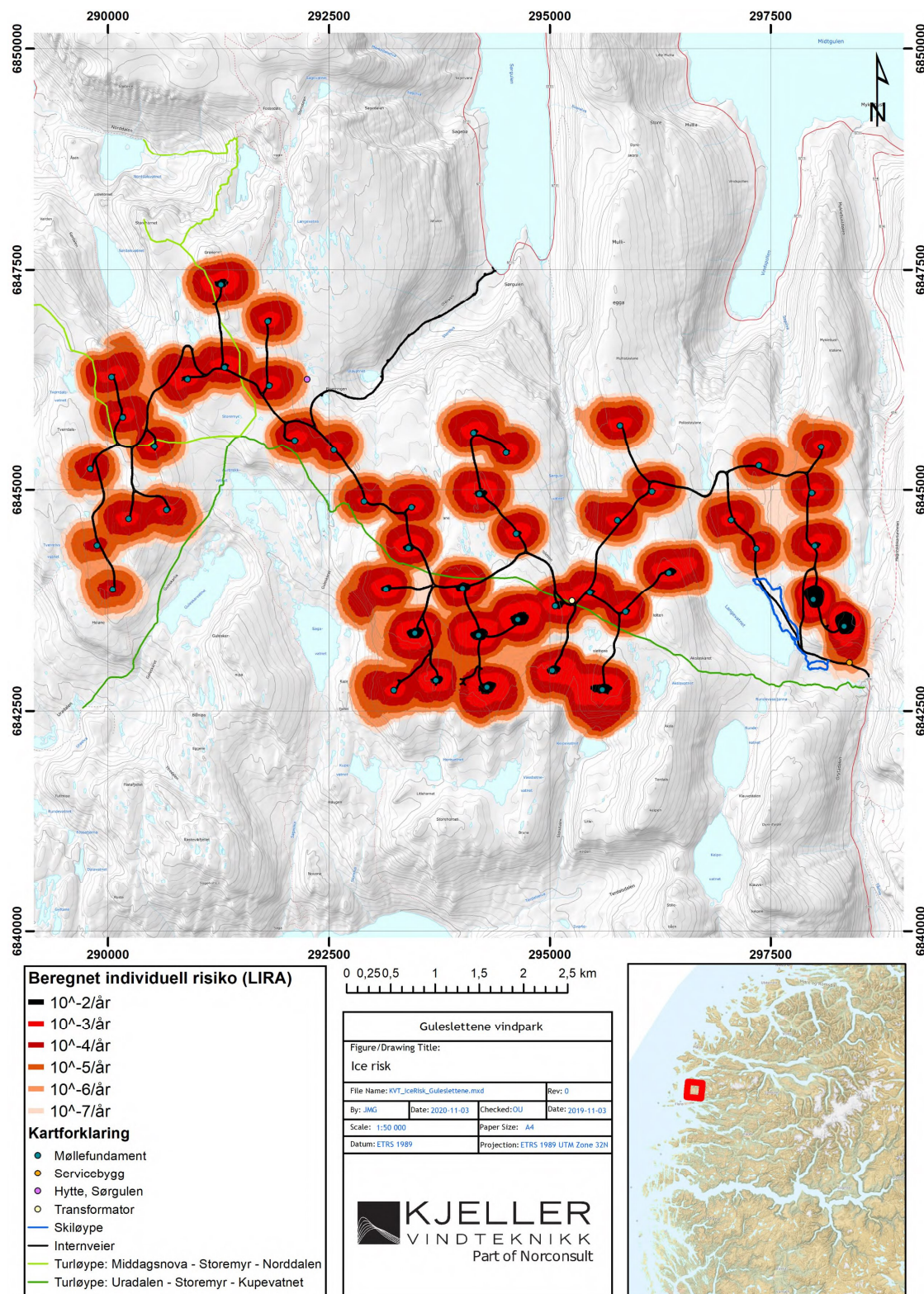
I dette kapittelet gjøres risikovurderingen for vindparken. I Kapittel 5.1 er risikokartet for Guleslettene vindpark vist. I kapittel 5.2 blir risikokategorier for Guleslettene presentert, som veier, turløyper og bebyggelse. Tiltak for å redusere risikoen er presentert i kapittel 6.

### 5.1 Risikokart (LIRA)

Figur 5-1 viser risikokonturene for LIRA i Guleslettene 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).

I parken er det lite ising for de lavtliggende turbinene og mye ising for de høyestliggende turbinene.

I tillegg viser Figur 5-2 tilsvarende risiko i området ved skiløype og servicebygg.



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

## 5.2 Risikokategorier

De følgende kapitlene beskriver risiko for menneskelig eller materiell skade knyttet til ulike objekter i Guleslettene vindpark. Informasjon om bruken i området som er benyttet i disse vurderingene er innhentet fra kunden.

### 5.2.1 Interne veier

Det er generelt risiko forbundet med ferdsel på internveier mellom turbinene i parken, og det er gjort en detaljert beregning av risikoen i kapittel 5.3. Det er forventet at disse veiene kan bli benyttet til turgåing. Oppdragsgiver opplyser om at det er etablert veibommer ved begge ankomstveiene, og internveiene vil kun bli brøytet ved behov.

### 5.2.2 Nærliggende veier

Det finnes ingen offentlige veier innenfor risikosonen i parken.

### 5.2.3 Turløyper

Ifølge ut.no finnes det turløyper i området, og det er tatt utgangspunkt i at disse benyttes hele året. Vi har tatt utgangspunkt i stiene Middagsnova – Storemyr – Norddalen og Uradalen – Storemyr – Kupevatnet. Begge stiene vises på kartet i Figur 5-1, og det er gjort beregninger av risiko i kapittel 5.3.

### 5.2.4 Skiløyper

Det er etablert skiløype med tilhørende varmetue. Området vises i kartet i Figur 5-2. Skiløypen har en maksimal LIRA-verdi på  $2,7 \times 10^{-6}$  og en IRPA-verdi på  $1,1 \times 10^{-11}$  (én person igjennom hele skiløypen med hastighet på 5 km/t), verdier som anses som akseptable.

### 5.2.5 Parkering

Det er etablert parkering for servicebygg og brukere av skiløype. Området vises i kartet i Figur 5-2, og det er gjort beregninger av risiko i kapittel 5.3.

### 5.2.6 Bebyggelse

Det finnes en privat hytte ved Sørgulen (vises i kartet i Figur 5-1). Denne har LIRA-verdi på  $9 \times 10^{-7}$ , en verdi som anses som akseptabel for slike objekter.

### 5.2.7 Jakt- og fiskeområder

Det har tidligere vært jakt i området. Det er opplyst om at det ikke har forekommet jakt de siste 3 årene. Jakt er derfor ikke tatt med i vurderingene. Det er bygd en brygge for fiske ved Kupevatnet, like sør for parkering. Dette er ikke inkludert i beregningen siden risikoen her er lavere enn ved parkeringsplassen.

### 5.2.8 Driftsbygninger

Det er etablert servicebygning og transformatorstasjon i forbindelse med vindparken. Servicebygget vises i kartet i Figur 5-2, og transformatorstasjonen i Figur 5-1. Det er gjort beregninger av risiko for begge objektene i kapittel 5.3.

### 5.2.9 Kraftlinjer

Det går to kraftlinjer forbi parken på østsiden. Disse er lagt til kartet i Figur 5-1. Linjen nærmest parken er 66 kV, linjen like øst for denne er 145 kV.

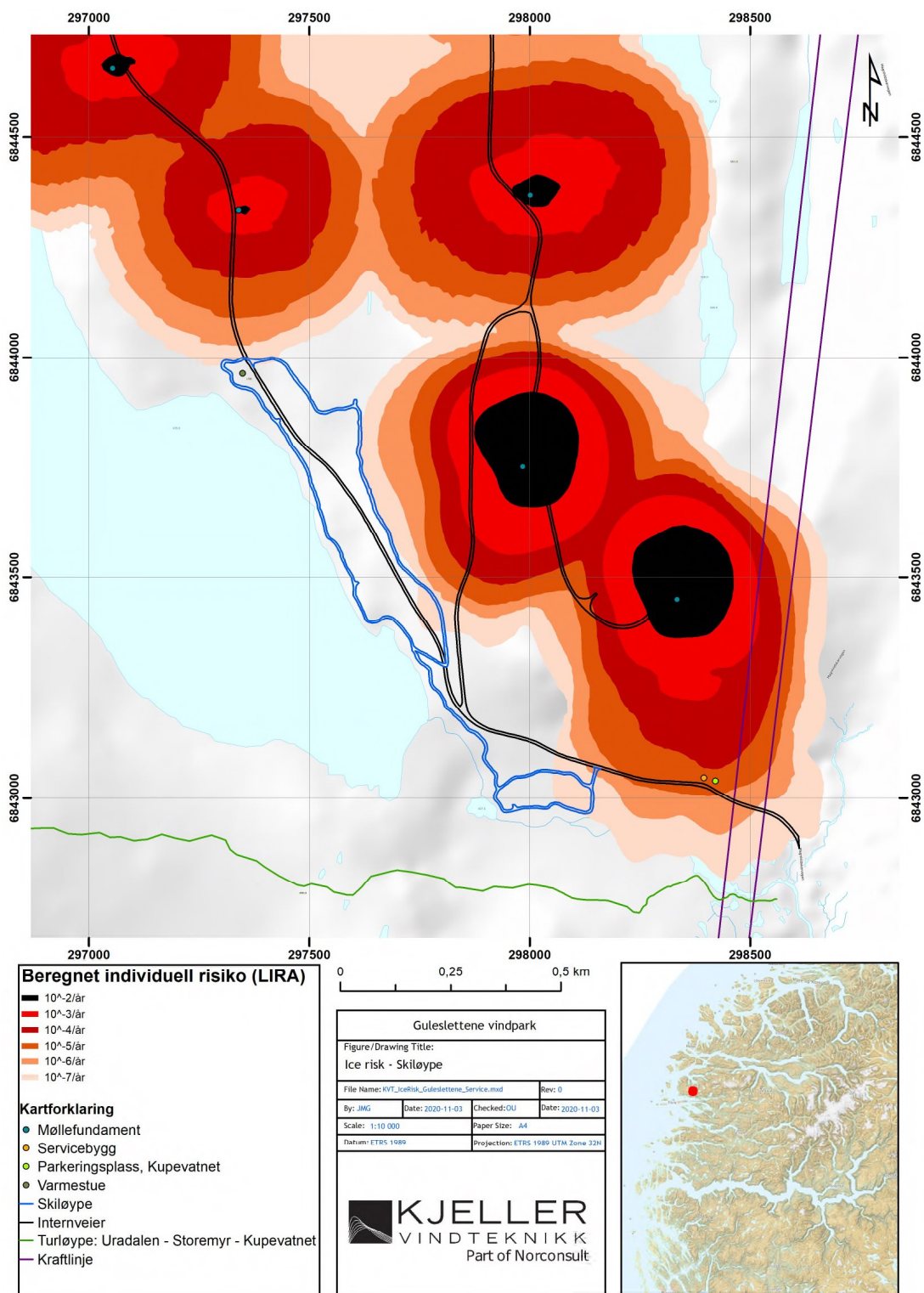
66 kV linjen går gjennom en risikosone på  $LIRA=10^{-3}$  (bakkenivå), og dette er en høy risiko ved opphold av personer.

145 kV linjen går gjennom en risikosone på  $LIRA=10^{-5}$  (bakkenivå), og det vil stort sett være små isbiter som kan komme ned til kraftlinjen. Dette er en akseptabel risiko.

Ved arbeid på linjene i isingsperioder bør det settes inn tiltak for å redusere risiko.

Den høyeste treffsannsynligheten per  $m^2$  per år for mastepunkt er funnet til å være  $4.6 \times 10^{-4}$ . Det kan oppstå problemer og nettutfall hvis isbitene treffer og ødelegger utstyr som er montert på masten.

Merk at risikoen gjelder på bakkenivå, og risikoen i toppen av mastene og ved linjene vil være noe lavere.



Figur 5-2 Risikokonturer for en ubeskyttet person som er permanent til stede, et utdrag fra risikokartet som inkluderer detaljer for kraftledningene, servicebygg, parkering, skiløype og varmastue.

### 5.3 Detaljert risikoberegning i Guleslettene vindpark

For å vite om man trenger tiltak, er det viktig å identifisere de kritiske punktene i parken, i tillegg til eksponeringen på disse stedene under forhold med høy sannsynlighet for iskast, dvs. tiden noen befinner seg på stedet og hvilken beskyttelse de har.

Vi har valgt ut de stedene og veiene vi anser som kritiske og gjort antagelser for eksponeringen. Disse antagelsene er utslagsgivende for resultatet, det er derfor viktig å kvalitetssikre verdiene og gi en tilbakemelding hvis de ikke skulle stemme.

I Tabell 5-1 vises de utvalgte risikopunktene; gjennomsnitt for opphold i én time per dag i parkens risikoområde, servicebygg, transformatorstasjon og parkeringsplass. For internveier og turløypene gjelder risikoen for én person som går hele løypen én gang hver dag. Grensene og fargene brukt i eksemplene under er fra Tabell B-3.

Tabell 5-1 Risikovurdering (IRPA) i henhold til anbefalingene i IEA Task 19 for kritiske punkter

| Sted                                                                                | Individuell Risiko (IRPA)          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Internveier (1 ubeskyttet person, 1 time per dag hele året)                         | $1,0 \times 10^{-4}$ (for høyt)    |
| Turløype Middagsnova – Storemyr – Norddalen (1 ubeskyttet person, 5 km/t, hver dag) | $6,1 \times 10^{-6}$ (høyt)        |
| Turløype Uradalen – Storemyr – Kupevatnet (1 ubeskyttet person, 5 km/t, hver dag)   | $2,9 \times 10^{-7}$ (akseptabelt) |
| Opphold ved parkeringsplass (1 ubeskyttet person, 1 time per dag hele året)         | $1,5 \times 10^{-6}$ (høyt)        |
| Opphold ved servicebygg (1 ubeskyttet person, 1 time per dag hele året)             | $2,2 \times 10^{-6}$ (høyt)        |
| Opphold ved transformatorstasjon (1 ubeskyttet person, 1 time per dag hele året)    | $7,3 \times 10^{-5}$ (for høyt)    |
| Skiløype ved Langvatnet (1 ubeskyttet person, 5 km/t, hver dag)                     | $1,1 \times 10^{-11}$ (lavt)       |

#### 5.3.1 Internveier

Ferdseil på de interne veiene i parken har risiko på IRPA =  $1,0 \times 10^{-4}$  som et gjennomsnitt ved en times opphold langs veiene hver dag. Denne risikoen er for høy for både servicepersonell og 3. person og risikoreduserende tiltak må gjennomføres. Til sammenligning er risikoen for å bli drept i trafikken i Norge på  $2,0 \times 10^{-5}$ .

#### 5.3.2 Turløyper

Det går turstier igjennom vindparken. Vi har sett på turstiene Middagsnova – Storemyr – Norddalen og Uradalen – Storemyr – Kupevatnet, som begge går gjennom risikozonen til flere turbiner. Den beregnede individuelle risikoen er for Middagsnova – Storemyr – Norddalen IRPA =  $6,1 \times 10^{-6}$ , og for Uradalen – Storemyr – Kupevatnet IRPA =  $2,9 \times 10^{-7}$ . Begge turstien går nærme turbiner og kommer innenfor LIRA konturen på  $10^{-3}$ . LIRA-verdien for turstier er høy og det bør vurderes om det er hensiktsmessig å legge om deler av disse stiene.

#### 5.3.3 Parkering og servicebygg

For parkeringsplassen og servicebygget er LIRA-verdiene henholdsvis  $3,5 \times 10^{-5}$  og  $5,4 \times 10^{-5}$ . IRPA-verdiene er henholdsvis  $1,5 \times 10^{-6}$  og  $2,2 \times 10^{-6}$ . For parkeringsplassen, som benyttes for 3. person, er

verdien ansett som for høy, og tiltak må iverksettes. For servicebyggert bør tiltak som blant annet opplæring iverksettes. Merk at disse områdene er utsatt ved vind fra nord, og at et godt varslingssystem derfor kan redusere risikoen.

#### **5.3.4      *Transformatorstasjon***

Det er etablert en transformatorstasjon i parken, i et område hvor det er risiko for ising; IRPA= $7,3 \times 10^{-5}$ . Dette er for høyt, også for personell i arbeid, og tiltak må iverksettes for å redusere risiko. Avhengig av utforming av trafostasjonen kan iskast også medføre risiko for skade på materiell ved stasjonen.

#### **5.3.5      *Skiløype med varmestue***

Skiløypen, slik den er tegnet inn i kartet i Figur 5-2, er i et område med lav eller ingen risiko for iskast. Tiltak er ikke påkrevd.

## 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 Guleslettene 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 standard<sup>4</sup>.

### 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.

---

<sup>4</sup> 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 Guleslettene 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 med en anbefalt sikkerhetsavstand på 250 m ved alle naturlige adkomstveier om at det er fare for isnedfall. Dette gjelder både kjøreveier og turstier.*

*En bør vurdere muligheten for å lage alternative stier i utsatte områder som kan benyttes i perioder hvor det er fare for isnedfall.*

*Det bør lages egne sikkerhetsrutiner for dem som arbeider i vindparken, og de ansatte i vindparken bør kurses i temaet iskast og risiko.*

*Det bør varsles ved risiko for iskast fra T1 mot parkeringsplass og servicebygg. Varsel bør være godt synlig for 3. person ved parkeringsplassen. Det bør også undersøkes om parkeringsplass kan flyttes eller stenges for 3. person. Turbin T1 kan også vurderes stanset i perioder med høy risiko.*

*Ved arbeid på nærliggende kraftlinjer bør fare for ising kartlegges. Stans av turbin T1 bør vurderes som en mulighet for å redusere risiko mens arbeidet pågår.*

*Ytterligere veibomer med tilhørende skilt bør settes opp i områder med høy risiko.*

*Det anbefales at oppdatert informasjon om fare for iskast finnes på nettsidene til vindparken, samt en detaljert varslingsjeneste for ulike områder i parken.*

## 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](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](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](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](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/](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/](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 <http://www.wrf-model.org/>. The model version used in this work is v3.2.1 described in Skamarock et al. (2008)<sup>5</sup>. Details about the modelling structure, numerical routines and physical packages available can be found in for example Klemp et al. (2000)<sup>6</sup> and Michalakes et al. (2001)<sup>7</sup>. 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 project<sup>8</sup>. For Norway, the model input uses the N50 land use data provided by the Norwegian Mapping Authority<sup>9</sup>.

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)<sup>10</sup> 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<sup>11,12</sup> is available with a spatial resolution of

<sup>5</sup> 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

<sup>6</sup> Klemp JB., Skamarock WC. and Dudhia J., 2000: Conservative split-explicit time integration methods for the compressible non-hydrostatic equations (<http://www.wrf-model.org/>)

<sup>7</sup> 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.

<sup>8</sup> <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>

<sup>9</sup> [http://www.kartverket.no/eng/Norwegian\\_Mapping\\_Authority/](http://www.kartverket.no/eng/Norwegian_Mapping_Authority/)

<sup>10</sup> <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/para/about.html>

<sup>11</sup> 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

<sup>12</sup> <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.

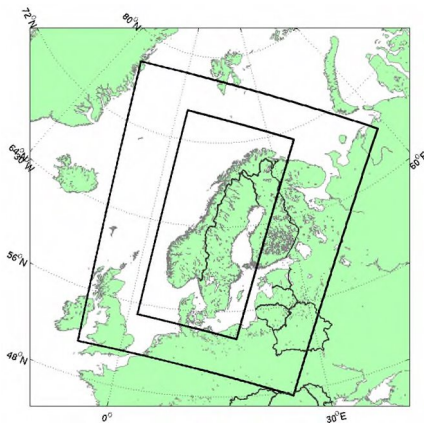


Figure A-1 Model set up for WRF simulations of Sweden and Norway

### A.4 Ice load calculations

According to the standard ISO 12494 (ISO/TC98/SC3/WG6 2000)<sup>13</sup> 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  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  and  $\alpha_3$  are the collision efficiency, sticking efficiency and accretion efficiency, respectively.

<sup>13</sup> 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.<sup>14</sup> This is the scheme that gives the most accurate calculations of liquid water content<sup>15</sup> 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).<sup>16</sup>

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

<sup>14</sup> Thompson G., P.R. Field, W.D. Hall and R Rasmussen, 2006: A new bulk Microphysical Parameterization Scheme for WRF (and MM5)

<sup>15</sup> 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.

<sup>16</sup> Harstveit K, Byrkjedal Ø. and E. Berge 2009: Validation of Regional In-Cloud Icing Maps in Norway, IWAIS, Andermatt 2009.

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 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 Risk assessment

### B.1 Risk definition

The risk is usually taken as the probability of an event multiplied with an associated consequence. Here the probability is given in Tabell B-1 and the potential consequence is a severe injury or fatal accident. 40 J is considered a kinetic energy limit than can cause a fatality for an unprotected person. When a person is protected by the wind shield of a car, we consider the energy limit as 180 J for the same consequence.

Table B-1 Relation between energy limit strike area, and consequence of an ice piece strike (Bredesen & Refsum, 2015) and (Bredesen, R. E., Kjeller Vindteknikk AS, 2019)

| Energy Limit | Strike area         | Consequence                                      |
|--------------|---------------------|--------------------------------------------------|
| 15 J         | 0.1 m <sup>2</sup>  | Casualty (serious injury protection limit)       |
| 40 J         | 0.1 m <sup>2</sup>  | Fatality (death) unprotected person              |
| 180 J        | 0.01 m <sup>2</sup> | Fatality person protected by windshield of a car |

### B.2 Definitions of LIRA, IRPA and PLL

LIRA (Localized Individual Risk per Annum) gives the risk at a given position for an unprotected person, who is continuously present (100 % unprotected exposure). The individual risk, LIRA-contours, is calculated by combining possible events of accidents with the respective risk of death. The risk contours show the geographical distribution of individual risk, by showing the expected frequency of incidents capable of causing casualties at a given position, independent of whether there are any persons present at the position. Suggested acceptance criteria are shown in Figure B-1.

IRPA (Individual Risk per annum)<sup>17</sup> describes the risk for a given pattern of movement for a person. There are separate suggested risk acceptance limits for IRPA. The risk should typically be negligible compared to the background risk in society. As an example, this could be done by comparing an average position in the park for 1 hour to the risk of death in traffic. If the risk is acceptable using the LIRA-value, it is not necessary to calculate IRPA.

PLL (Potential Loss of Life) describes the risk for a given pattern of movements for a group of persons, also called a group risk.

To better understand the definitions and the link between them, we use an example. At a given position in the park, the LIRA value is  $1 \times 10^{-4}$ . If an unprotected person spends 3 minutes every day at this position (0.2 % of the time), the IRPA for this person is  $2 \times 10^{-7}$ . If 500 persons spend 3 minutes every day at this position, the group risk (PLL) is  $1 \times 10^{-4}$ . For comparison, 143 people got killed in traffic in Norway in 2018, which corresponds to an IRPA of  $2.7 \times 10^{-5}$  (WHO, 2018).

### B.3 LIRA methodology

The chosen Individual Risk (IR) metric is LIRA. It is recommended to provide IR contours in a risk assessment (IEA Wind, 2018)

Risk is the product of probability and consequence. Here, the probability is the inverse of the average recurrence period for a possible fatal ice piece striking an area of 1 square meter. The impact kinetic energy

<sup>17</sup> IRPA=exposure\*LIRA. One hour exposure per day gives IRPA=LIRA/24.

limit for considering a possibly fatal ice piece is taken as 40 J corresponding to a 200 g ice piece falling at 20 m/s (72 km/h).

In this analysis every ice piece with an impact kinetic energy above 40 J is considered 100 % fatal for an area of a person occupying the area of 0.1 square meters (potential critical hit). Hence, the LIRA contour  $10^{-4}$ /year then corresponds to the millennium ice piece hitting a square meter with an impact kinetic energy above 40 J. More details describing the methodology is given in (Bredesen & Refsum, 2015) and (Bredesen R. E., 2017).

In order to understand the ice throw risk margins at the site, the modelled risk levels are compared against the average risk from dying in a traffic accident in Norway 2017 as well as typical risk acceptance criteria for societal risk (potential for loss of life per annum, PLL) and individual risk (Individual Risk Per Annum, IRPA) used in Norway. We observe that the risk may exceed the LIRA criteria while being tolerable and acceptable for the exposure scenarios.

Beware, that the responsibility of reducing the risk to a minimum should not be dependent on an opportunistic choice of the method yielding the lowest risk. High precision analyses can facilitate further cost-benefit analyses for the different risk mitigating measures (e.g. according to the ALARP (As Low As Reasonably Practicable) principle as used in the UK). Based on the given ALARP recommendation, it can clearly be communicated that the risks are managed properly by reducing the risk to a reasonably practicable minimum and an acceptable level.

We remark that a risk index such as individual risk (IRPA/LIRA) does not describe all aspects such as 1) Aspects of risk not covered within risk assessment scope. 2) Model errors and 3) Aspects of model predictions not conveyed by risk metrics. However, a risk analysis shall identify the relevant initiating events and develop the causal and consequence picture. How this is done depends on which method is used and how the results are to be used. However, the intent is always the same: to describe risk.

Figure B-1 is taken from the ice throw recommendation from IEA Task 19 (IEA Wind, 2018). It gives suggestions of which objects are accepted within which LIRA safety zone.

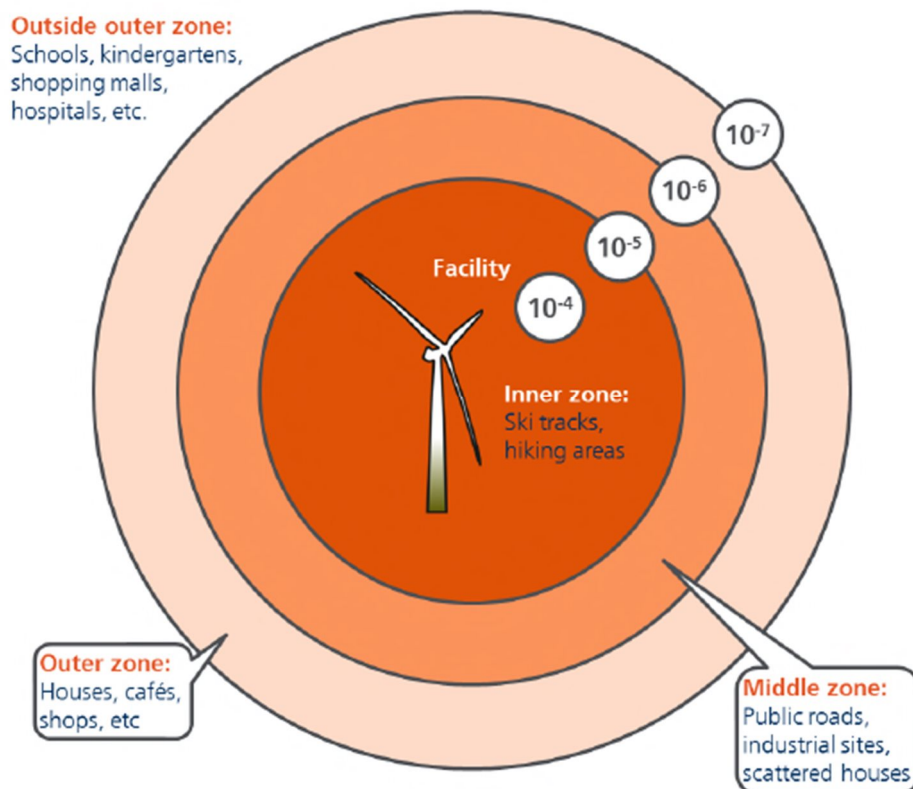


Figure B-1 Suggested safety zones around installation that may cause risk of ice throw or ice fall. The numbers indicate the iso-risk contours for localized individual risk (LIRA), the probability that an average unprotected person, permanently present at a specified location, is killed during one year due to ice fall or throw from the facility. (Source: courtesy of Lloyds Register / Kjeller Vindteknikk) (IEA Wind, 2018, s. 16)

## B.4 Exposure scenarios

Beyond using the LIRA risk metric for calculating consultation distances and hazard zones for the risk of iced throw, the risk estimates may also be assessed for specified persons or groups, accounting for exposure scenarios. Examples of individual risks for traffic accidents are shown in Table B-2. Table B-3 and B-4 show suggested acceptance criteria from two different sources. The suggested acceptance criteria shall motivate further risk mitigating efforts and ALARP is recommended independent on risk acceptance criteria.

Table B-2 Risk fatal road accident in different countries, according to the WHO status reports on road safety (WHO, 2015) and (WHO, 2018).

| Country | Individual Risk (IRPA) year 2015 | Individual Risk (IRPA) year 2018 |
|---------|----------------------------------|----------------------------------|
| Norway  | $3.8 \times 10^{-5}$             | $2.7 \times 10^{-5}$             |
| Sweden  | $2.8 \times 10^{-5}$             | $2.8 \times 10^{-5}$             |
| Finland | $4.8 \times 10^{-5}$             | $4.7 \times 10^{-5}$             |
| USA     | $1.1 \times 10^{-4}$             | $1.2 \times 10^{-4}$             |

Table B-3 Suggested acceptance criteria from the Norwegian Directorate for Civil Protection (*Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, 2013*).

| Suggested risk acceptance criteria Norway (DSB) | Group Risk (PLL) | Individual Risk (IRPA) |
|-------------------------------------------------|------------------|------------------------|
| 3. person (public)                              | $10^{-4}$        | $2 \times 10^{-7}$     |
| 2. person (guests)                              |                  | $3 \times 10^{-6}$     |
| 1. person (trained service personnel)           |                  | $4 \times 10^{-5}$     |

Table B-4 Example for individual and societal risk (without risk aversion) criteria (*IEA Wind, 2018*) and Norwegian Directorate for Civil Protection (*Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, 2013*) (bottom line).

| Societal risk (PPL)    | Individual risk (IRPA) | Evaluation                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $> 10^{-3}$            | $> 10^{-5}$            | The risk is unacceptable high. Risk reduction measures shall be initiated. Extensive risk reduction measures (e.g. relocation or change of turbine specifications, can be initiated to re-assess whether the risk can be sufficiently reduced. |
| $10^{-4}$ to $10^{-3}$ | $10^{-6}$ to $10^{-5}$ | The risk is high and it is located in the upper ALARP region. Well-known risk-reducing measures shall be implemented and it is advised to look for additional risk-reducing measures.                                                          |
| $10^{-5}$ to $10^{-4}$ | $10^{-7}$ to $10^{-6}$ | The risk is tolerable and in the lower ALARP region. If further common measures to reduce the risk are known, they should be examined under cost-benefit aspects. A recommendation to implement such measures is not pronounced.               |
| $< 10^{-5}$            | $< 1 \times 10^{-7}$   | Risks are lower than risks people are exposed to in normal life.                                                                                                                                                                               |
| $< 10^{-4}$            | $< 2 \times 10^{-7}$   | Typical risk acceptance criteria in Norway third person all sources ( <i>Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, 2013</i> ).                                                                                                          |

## B.5 Are measures necessary?

The following procedure can be used to decide if risk reducing measures are necessary for the park (a similar overview can also be found in (IEA Wind, 2018, s. 14):

1. Is the LIRA-value at exposed places in the park (roads, buildings, ski tracks etc.) above the threshold values in Table B-3?
  - If no: No further measures are an official demand, but some measures, such as ice measurements, signs and good information, are both useful and wise
  - If yes: Continue to part 2
2. What is the exposure in the park?
  - Some examples of questions to get this information:
    - Is there a public road nearby? How much traffic is there on this road?
    - Are there hiking trails nearby? How often are these used? How often are they used in the winter? How many people use the trails?
    - How often are the wind farm employees in the park during the winter?
3. Assumed exposure is used to calculate the IRPA- and PLL-values. Are these below the thresholds in Table B-3?
  - If no: No further measures are an official demand, but some measures, such as ice measurements, signs and good information, are both useful and wise
  - If yes: Continue to part 4
4. Now we know that measures in the wind farm are essential. each position where the threshold is crossed, an individual assessment of needed measures is necessary.

## 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.*