

Weatherlands

► Risiko for iskast mot industriområde ved Høg-Jæren vindpark i Rogaland fylke

Oppdragsnr.: 52100765 Dokumentnr.: KVT/2021/R013/JMG Versjon: J01 Dato: 2021-01-29



Oppdragsgiver: Weatherlands
Oppdragsgivers kontaktperson: Pål Undheim
Rådgiver: Norconsult AS, Tærudgata 16, NO-2004 Lillestrøm
Oppdragsleder: Øyvind Byrkjedal
Fagansvarlig: Rolv Bredesen, Karl Ove Ingebrigtsen
Andre nøkkelpersoner: John Magne Gitmark

J01	2021-01-29	Endelig versjon	John Magne Gitmark	Øyvind Byrkjedal	Lars Tallhaug
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.

► Sammen drag

I forbindelse med en reguleringsprosess for et kommende industriområde i nærheten av Høg-Jæren vindpark er det behov for vurdering av risiko for iskast fra vindparken. Denne rapporten vurderer i hvilken grad den nærmeste vindturbin, plassert om lag 60 meter sør for planområdet, kan utgjøre en risiko for iskast.

Det er antatt to mulige årsaker til fare for iskast: meteorologisk ising (skyrim) og våt snø. Analyser for våt snø og meteorologisk ising er beskrevet i henholdsvis kapittel 2 og 3.

Det er lav sannsynlighet for meteorologiske forhold som kan gi is på turbinblader, i tillegg er isingsforholdene slik at det er svært lite is som dannes i disse perioder. Basert på 20 år med meteorologiske data er det forventet kun 5 timer med isingsforhold per år. Vindparkoperatør opplyser at isingsforhold i form av våt snø ikke er registrert mer enn to ganger de siste 10 årene.

Risiko for å gi alvorlig skade eller død på personer eller skade på andre objekter er vurdert til å være svært lavt og har et akseptabelt nivå.

Under forhold hvor ising på turbiner er varslet eller observeres anbefales det å iverksette tiltak for å redusere sannsynlighet for materielle skader eller personska der, disse er beskrevet i kapittel 4.3.

Det anbefales at de risikoreduserende tiltak som er beskrevet vurderes videre i planprosessen.

► Innhold

1	Bakgrunn	5
1.1	Området	5
1.2	Risiko	7
1.3	Meteorologisk ising og våt snø	7
1.4	Observasjoner	7
2	Våt snø	8
2.1	Metode	8
2.2	Resultater	8
3	Meteorologisk ising	9
3.1	Metodikk	9
3.2	Klassifisering av isingsforhold på Høg-Jæren	10
3.3	Vindfordeling ved meteorologisk ising, rotor ising og ved smelting	10
3.4	Sannsynlighet for iskast	11
3.5	Risikokart (LIRA) grunnet meteorologisk ising	11
4	Vurdering av risiko i forbindelse med snø eller isingsforhold ved vindturbin	13
4.1	Fareidentifikasjon	13
4.2	Risikovurdering	14
4.2.1	Årlig risiko	14
4.2.2	Risiko ved is på turbinblad	14
4.3	Risikoreduserende tiltak	15
4.4	Vurdering av usikkerhet i risikovurderingen	15
Vedlegg A	Meso-Scale Model WRF	16
A.1	Meso-Scale Model WRF	16
A.2	Input Data	16
A.3	Model Setup	17
A.4	Ice load calculations	17
A.5	Removal of ice	18
Vedlegg B	Risk assessment	20
B.1	Risk definition	20
B.2	Definitions of LIRA, IRPA and PLL	20
B.3	LIRA methodology	20
B.4	Exposure scenarios	22
B.5	Are measures necessary?	24

1 Bakgrunn

1.1 Området

I forbindelse med en reguleringsprosess for et kommende industriområde i nærheten av Høg-Jæren vindpark er det behov for vurdering av risiko for iskast fra vindparken. Det er planlagt at industriområdet enten skal bestå av et datasenter (Figur 1-2) eller batterifabrikk (Figur 1-3).

Det er antatt at den nærmeste vindturbin, plassert om lag 60 meter sør for planområdet, potensielt kan utgjøre en risiko for iskast. Se for øvrig Figur 1-1 for detaljer. For resterende turbiner er avstanden for høy til at iskast mot industriområdet forventes.



Figur 1-1 Planområdet med avstander og lokasjon av vindturbin (Asplan Viak AS)

Høg-Jæren vindpark består av turbiner av typen Siemens SWT-2.3-93 og har navhøyde på 80 m og rotordiameter på 93 m. Foten til den nærmeste turbinen er plassert 238,5 moh.



Figur 1-2 Mulig utforming av bygg for Datasenter (Asplan Viak AS)



Figur 1-3 Mulig utforming av bygg for Batterifabrikk (Asplan Viak AS)

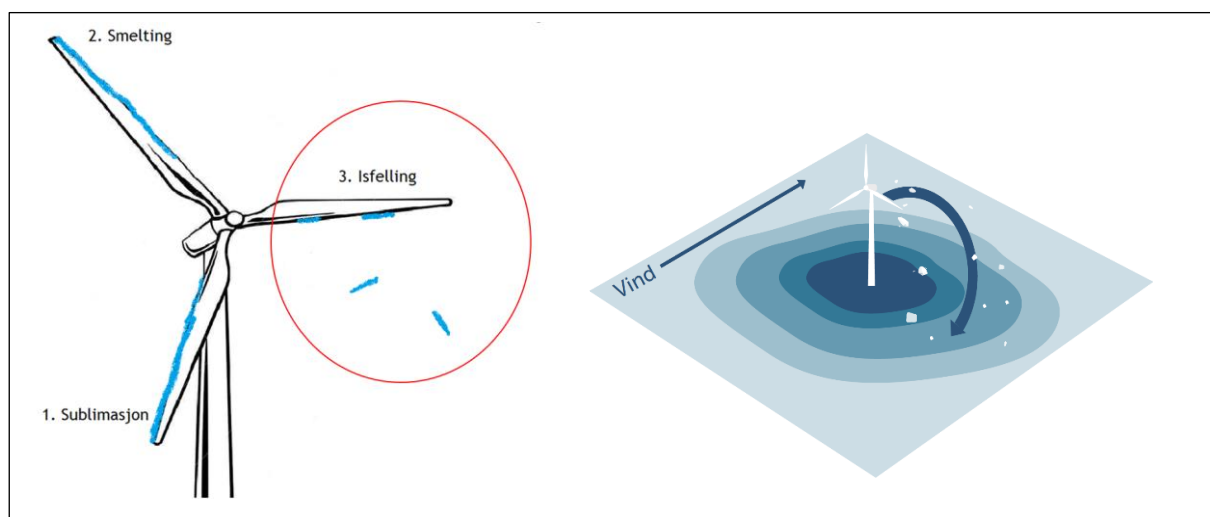
1.2 Risiko

Risiko defineres vanligvis som sannsynligheten for en hendelse multiplisert med en tilknyttet konsekvens. Potensielle konsekvenser er en alvorlig skade eller dødsulykke på personer eller alvorlig skade på bygg eller kritisk infrastruktur.

Is / snø fra en vindturbin som løsner fra blad (isfelling) kan medføre en fare.

Figur 1-4 viser hvordan is kan løsne fra et blad.

Is eller snø som løsner fra tårn eller nacelle (turbinhus) vil falle rett ned og lande i nærhet av tårnfot og vil derfor ikke medføre en signifikant risiko for planområdet. Is eller snø som kastes fra vindturbin blad kan i enkelte situasjoner treffe planområde og utsette personer, kjøretøy, bygg eller trafostasjon for is eller snø.



Figur 1-4 Is på turbinblad og iskast

I tidligere utførte analyse for Høg-Jæren vindpark (KVT/LT/2010/R009) er forslag til tiltak beskrevet, blant annet oppsett av varselsskilt. Slike skilt er satt opp i en avstand på 30 meter fra vindturbinene. Analysen konkluderer med at det er svært lave sannsynligheter for ising og for skader på personer eller dyr som følge av ising. Analysen er generisk for hele vindparken og ser ikke spesifikt på den aktuelle vindturbinen.

1.3 Meteorologisk ising og våt snø

Det er antatt to mulige årsaker til fare for iskast: våt snø og meteorologisk ising (skyrim). Analyser for våt snø og meteorologisk ising er beskrevet i henholdsvis kapittel 2 og 3.

1.4 Observasjoner

Det opplyses om at det er rapportert om to tilfeller i løpet av de siste 10 år hvor våt snø har bygd seg opp på turbinene i vindparken. Videre er følgende erfaringer i forhold til snø observert:

- Har opplevd at snøen/isen har bygd seg opp på tårnstammen, mye større omfang/blokker enn når det bygges is på vingene, men is fra tårnstammen detter rett ned.
- Går vindmøllene med god hastighet, kan ikke isen sette seg på møllene.
- oppbygging skjer helst ved nesten ingen vind, temp rundt 0 grader, og høy luftfuktighet.
- Dersom en turbin starter opp igjen etter periode med snø, vil snøen løsne fra turbinbladene.

2 Våt snø

20 års tidsserier (4 km) med data fra værmodellen WRF (Vedlegg A) er benyttet for å undersøke sannsynlighet for kast som følge av våt snø. Våt snø er snø som inneholder en viss andel av flytende vann og kan kjennetegnes som kram snø. Tidsserier bestående av timesverdier er gjennomgått for å kartlegge hvor ofte våt snø over en gitt mengde oppstår.

2.1 Metode

Det er antatt at våt snø kan utgjøre en risiko dersom den fester seg til turbinbladene, og deretter fryser fast. For våt snø som *ikke* fryser forventes det at snøen kastes av umiddelbart og vil gå i oppløsning og lande i nærheten av turbinen. Det forventes videre at våt snø ikke utgjør noen risiko så lenge turbinen er i drift, da det antas at snøen umiddelbart vil falle av på grunn av bevegelsene i turbinen. Derfor er det satt en terskelverdi på 4 m/s, som tilsvarer vindhastigheten hvor turbinen starter.

Følgende kriterier er satt for å detektere risiko som følge av våt snø:

- Nedbør over 0,5 mm per time
- Nedbør kommer som våt snø
- Temperaturen er høyere enn 0 °C
- Vindhastigheten er lavere enn 4 m/s
- Temperaturen går under -0,5 °C i løpet de neste 5 timene

2.2 Resultater

I løpet av en periode på 20 år oppstår det muligheter for våt snø i til sammen 305 timer. For 24 av disse timene er vindhastigheten lavere enn 4 m/s. I 2 tilfeller i løpet av 20 år er det anslått at temperaturen synker til under -0,5 °C innen de 5 påfølgende timene.

Videre undersøkelser viser at sannsynligheten for at våt snø fryser fast er høyest ved vind fra nord, men det kan også forekomme med vind fra sør.

Basert på disse resultatene anslås risikoen som følge av våt snø til å være neglisjerbar.

3 Meteorologisk ising

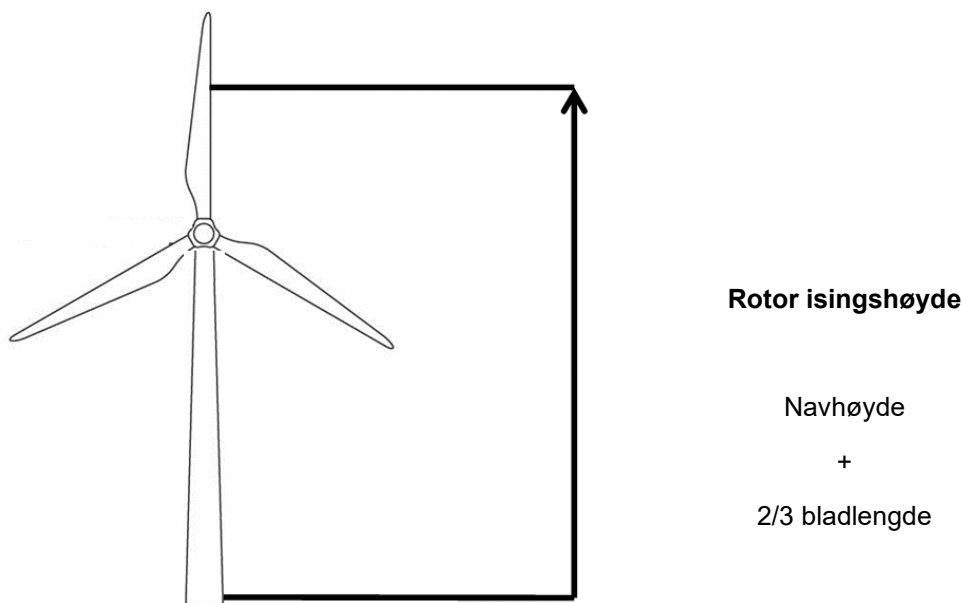
For å beregne risikoen for iskast forårsaket av meteorologisk ising, er det viktig å vite hvor raskt isen akkumulerer på turbinen, og hvor ofte denne isingen forekommer. Dette kapittelet viser isingsforholdene og isklassen(e) i vindparken.

3.1 Metodikk

Med meteorologisk ising menes 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.

For å beregne isingsforholdene ble 20 års tidsserier (4 km) med data fra værmodellen WRF (Vedlegg A) for lokasjonen 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 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). Rotor isingshøyde for turbinen er ca. 111 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 Høg-Jæren

IEA wind task 19 (IEA Wind, 2012) definerer perioder hvor is akkumuleres på et objekt som perioder med «meteorologisk ising». For gitt turbin er det, 80 meter over bakken (i navhøyde), forventet meteorologisk ising i 0,06 % av tiden (ca. 5,5 timer per år).

Benytter vi klassifiseringen fra IEA Wind (2012) for bruk i vindkraftsammenheng (vist i Tabell 1) får vi at Høg-Jæren klassifiseres som isklasse 1. I følge IEA Wind task 19 vil isklasse 1 tilsi iskast på omtrent 200 isbiter per år.

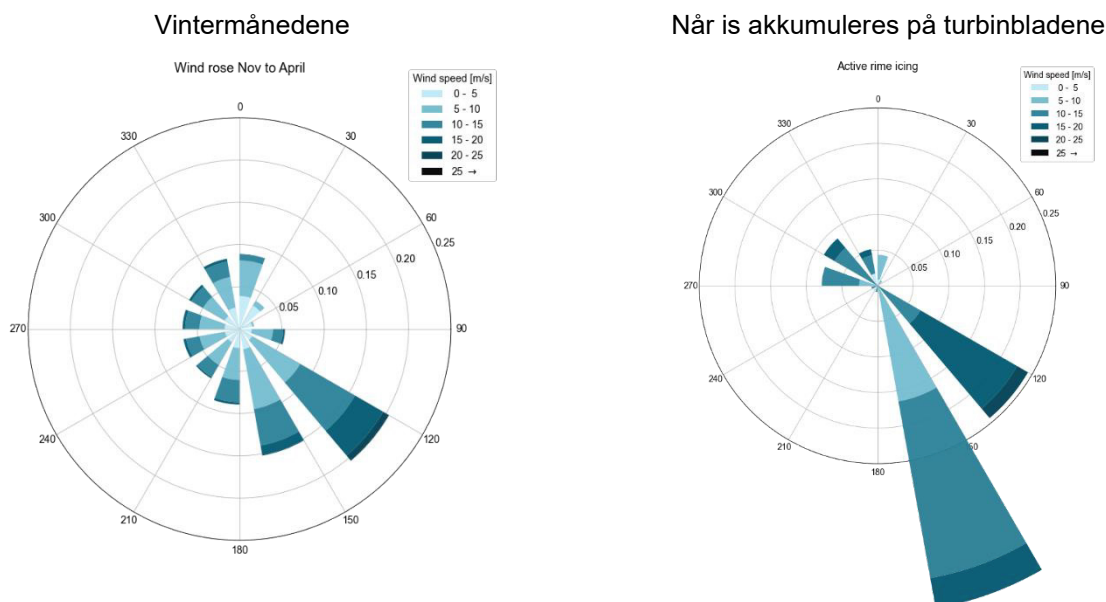
Tabell 1 IEA Winds isingsklassifisering (2012). Ved ulik klassifisering ut fra de forskjellige kriteriene så anbefales det å bruke den høyest rangerte klassen.

IEA Wind isklasse	Meteorologisk ising [% av året]	Instrument ising [% av året]	Produksjonstap [% 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 turbinen er vist til venstre i Figur 3-2.

Hovedvindretningen for vinteren er fra sørøst. Til høyre vises vindrosa for de periodene hvor det vil bygges opp is på turbinbladene, dette er stort sett knyttet til vindretninger fra sørøst. Merk at iskast kan forekomme både under akkumulering, når det er is på turbinbladene samt når det forventes at is smelter.



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

3.4 Sannsynlighet for iskast

Beregningene er gjort for en Siemens SWT-23-93 turbin med navhøyde 80 m og rotordiameter 93 m. Høyeste rotasjonshastighet for turbinen er 16 omdreininger per minutt (rpm).

I det videre arbeidet antar vi at det for turbiner som er plassert i isingsklasse 1 forventes kast av i gjennomsnitt 200 isbiter i året (som anbefalt fra IEA wind task 19, se Kapittel 2.2)

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. Iskastroiseringen 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.

Det forventes at flate isbiter driver mer med vinden, og resterende isbiter blir kastet mer til siden. Det er anslått at ca. 1 % av flate isbiter er skadelige. For uniforme isbiter er isbiter med energi under 40 J filtrert bort.

Det er benyttet en modell som beregner kastbanen for 200 flate isbiter og 200 større isbiter i mer uniform fasong. Ifølge beregningene kan det forventes i overkant av 20 skadelige isbiter per år.

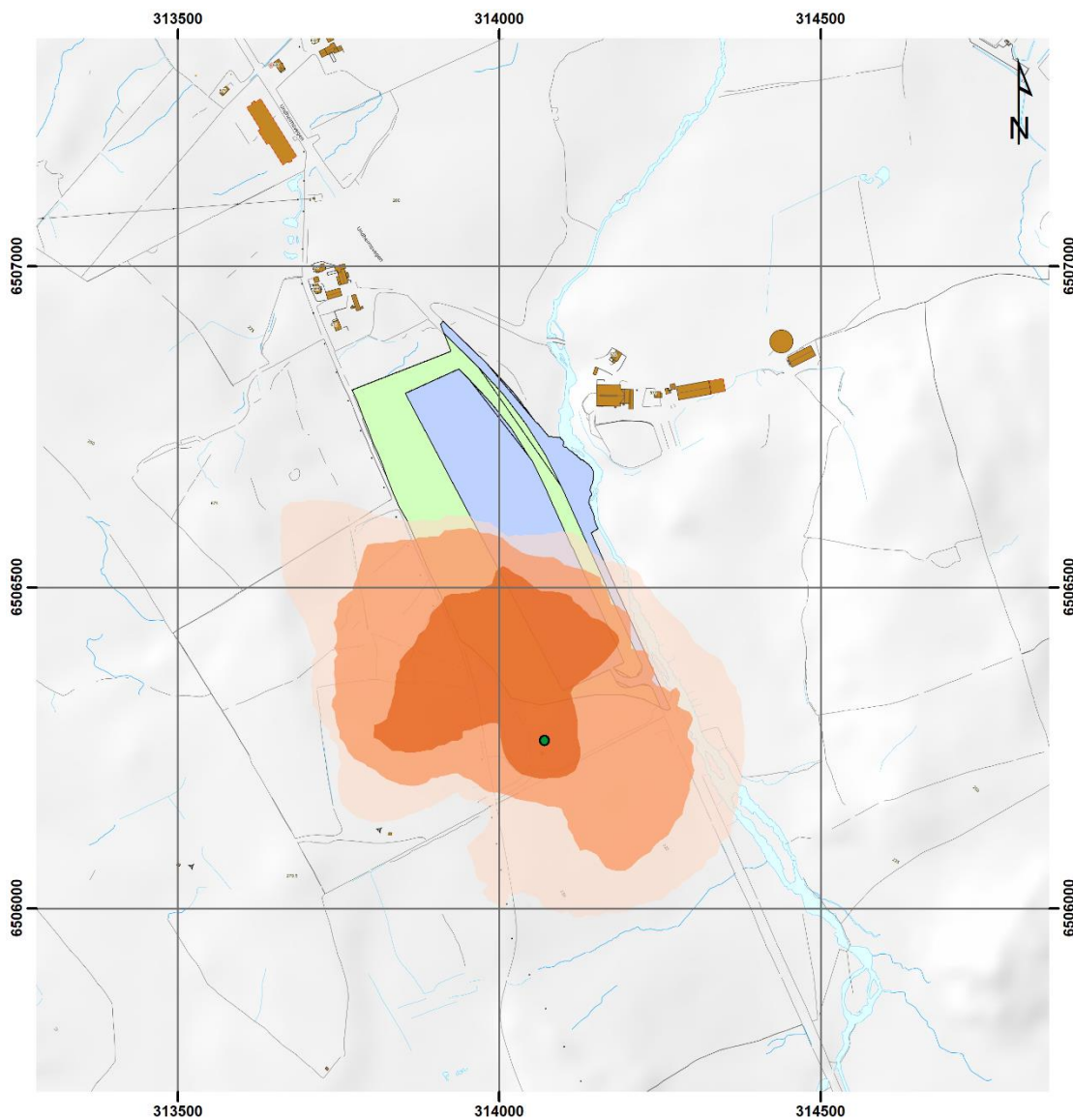
I henhold til klassifiseringen av parken i isingsklasse i 1 (Kapittel i 2.2) forventes det ca. 200 isbiter i året. Tatt dette i betraktning, i tillegg til at vi ved ising i 0,06 % av tiden ligger i den nedre delen av isingsklasse 1, er resultatene konservative.

3.5 Risikokart (LIRA) grunnet meteorologisk ising

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 iskastroiseringen eventuelt er for høy i forhold til akseptkriterier. Definisjonene for risiko (LIRA) er beskrevet i Vedlegg B.2.

Figur 3-3 viser risikokonturene for LIRA i rundt turbinen. Overhøyden mellom turbineposisjonen og omgivelsene er blitt tatt med i beregningene.

Den høyeste LIRA-verdien i kartet er beregnet til $6,5 \times 10^{-5}$, og befinner seg innenfor den mørkeste konturen.



Figur 3-3 Forventet fordeling av iskast som treffer bakken for perioder det er forventet ising. Mørke områder har større sannsynlighet for iskast enn lyse områder.

4 Vurdering av risiko i forbindelse med snø eller isingsforhold ved vindturbin

4.1 Fareidentifikasjon

Treff av et menneske med en kinetisk energi på mer enn 40 J benyttes som den energimengde som kan føre til dødsfall for en ubeskyttet person. 40 J tilsvarer en 200 g isbit som faller med 20 m/s (72 km/t). Når en person sitter i et kjøretøy, benyttes en energigrense på 180 J for dødsfall i kjøretøy (*Bredesen & Refsum, 2015 og Bredesen, R. E., Kjeller Vindteknikk AS, 2019*). Det er antatt at isbiter med energi over 180 J også kan gi skader by bygninger og knuse vinduer.

Det er i Kapittel 2 vurdert situasjoner med våt snø, konklusjonen er at våt snø ikke medfører en fare for planområdet.

Følgende faresituasjoner er vurdert i denne analysen:

- Is kastes til fylkesvei.
 - Fv 505 Undheimsvegen går langs planområdet, avstand til fylkesvei er ca 190 meter. Årsdøgntrafikken på er 1600 (www.vegkart.no), dvs en relativt lite trafikkert vei.
- Is kastes i område hvor brannkum plasseres og hindrer tilkobling til brannvann.
 - Sørvestre hjørne av foreslått planområde kan være aktuelt for plassering av kum for slokkevann for planområdet. Det må sikres at tilgang på slukkevann ikke påvirkes av is-kast eller snø fra vindturbin.
- Is kastes til interne veier
 - Internvei fra fylkesveg til bygg ligger i en avstand fra 190 meter til 145 meter. Personer i kjøretøy vil være relativt godt beskyttet mot is/snø, mens gående, syklende eller andre som ikke er beskyttet i et kjøretøy kan eksponeres for direkte treff av is/snø.
- Is kastes til område foran bygninger (side mot fylkesvei)
 - Det er to mulige utforminger av bygg i planområde, begge vil ha en høyde på 15-25 meter. Området mot fylkesvei er antatt å være hovedområde for interntransport og areal for gående. Hovedområdet foran bygget vil ligge i "skyggen" av eventuelle kastbaner for is, dette vil redusere muligheten for is på bakken nærmest bygget. Dette gjelder spesielt byggets sørlige ende.
- Is kastes mot trafo
 - Det er satt av plass til trafostasjon om lag 235 meter fra turbinen, denne kan ved sjeldne tilfeller treffes av is/snø.
- Is kastes mot bygg
 - Nærmeste bygg vil plasseres ca. 90 meter fra vindturbinen. Vinduer kan knuses ved treff av større isbiter.

4.2 Risikovurdering

4.2.1 Årlig risiko

Vurderingen av is på bakken har vist at statistisk sett er det en meget lav sannsynlighet for is som treffer bakken med en energimengde tilstrekkelig for å gi alvorlige skader eller død for ubeskyttede personer.

Det er valgt å se på individuell risiko for en tenkt person som oppholder seg utendørs og ubeskyttet kontinuerlig i ett år. Tabell 2 presenterer verdier hentet fra kapittel 2.

Tabell 2

Forventet tid av året med meteorologisk ising	0,06 % av året
Hyppighet å bli truffet av is om en person er til stede når iskast inntreffer	1 gang per 15.000 år ($6.5 \cdot 10^{-5}$ per år)

Individrisiko beregnes ut fra hyppighet av en hendelse og hvor hyppig du utsettes for en slik hendelse. I dette tilfellet vil den som er mest utsatt være en som jobber der og passerer området morgen og kveld. Antar en konservativt at dette er ca. 1 time per arbeidsdag tilsvarer det en eksponering på 200/8750 timer per år.

Individ risiko for mest eksponerte person vil derfor være svært lavt sammenlignet med normalt aksepterte risikonivå.

Det er forventet at iskast vil oppdages eller er varslet slik at personer ikke vil eksponeres kontinuerlig i en isingssituasjon. Risiko vil derfor være vesentlig lavere som følge av at en vil forlate området snarest i en slik situasjon.

4.2.2 Risiko ved is på turbinblad

Gitt at ising pågår kan is kastes inn i planområdet, se Figur 3-3. Bygg, trafostasjon, internvei inn til bygg fra fylkesvei og brannkum vil kunne eksponeres for is ved en isingssituasjon. Det er ikke forventet is ned til fylkesveien.

Størst hyppighet av is er forventet i de mørke områdene i Figur 3-3 og det bør vurderes tiltak for å sikre at det ikke oppstår skader som følge av iskast i disse områder.

Personer i kjøretøy er forventet å være tilstrekkelig beskyttet da det er forventet at isbiter vil ha en anslagsenergi lavere en 180 J.

Vinduer som ligger vendt mot vindturbin bør kunne motstå 180 J for å hindre knusing. Det er antatt at byggets konstruksjon ikke vil bli skadet av iskast.

Brannkum som er planlagt plassert i sør-vestlige hjørne av planområdet kan bli utsatt for is eller snø fra vindturbin. Brannvesen er normalt godt beskyttet med hjelm og klær som vil redusere muligheten for at personskader oppstår.

4.3 Risikoreduserende tiltak

Det anbefales tiltak for å redusere risiko relatert til iskast. Tradisjonelt så er sannsynlighets-reduserende tiltak å foretrekke foran konsekvensreduserende tiltak. Is eller snø på vindturbin er et naturlig fenomen som en vanskelig kan gjøre tiltak mot. Tiltak som er beskrevet vil redusere konsekvenser av is kast og/eller redusere muligheten for å bli utsatt for iskast ved å varsle om at iskast kan inntreffe. Listede tiltak er å anse som et forslag til anbefalte tiltak.

Konsekvensreduserende tiltak som hindrer at is eller snø treffer et utsatt objekter som bør vurderes i videre planarbeid er:

Statistiske tiltak:

- Bygningstekniske tiltak for å sikre at is eller snø stoppes av tak og at bygningskonstruksjon hindrer at is/snø skader personer eller kritisk utstyr.
- Vinduer som vender mot vindturbin, bør kunne motstå en typisk is-bit med anslagsenergi på 180 J.
- Varslingsskilt som beskriver hvordan personer skal opptre når det er identifisert fare for is/snø fra vindturbin
- Tak over brannkum for å sikre tilkomst selv under situasjoner med iskast.

Organisatoriske tiltak

- Beredskapsplaner som beskriver hvordan personer bør oppholde seg eller gå i perioder med fare for is/snø fra vindturbin, for eks. bruk av hjem.
- Varsling av meteorologiske forhold som medfører fare for isdannelse eller snø på turbinblader
- I våtsnøperioder bør turbiner rotere for å redusere mengde av snø som fester seg på turbinblader, dersom det er tilstrekkelig vind.
- Ved situasjoner med våt snø på stansede turbiner bør vindparken informere industriområdet om at oppstart med snø/is kommer til å bli gjennomført, slik at slik at industriområdet kan redusere tilgang til farlig område fram til turbinen er i normal drift.
- Avstenging av utsatte områder når is er identifisert.
- stanse turbin ved en eventuell brann, slik at sannsynlighet for iskast mot brannkum reduseres.

4.4 Vurdering av usikkerhet i risikovurderingen

Denne analysen har lagt til grunn eksisterende dokumenter og kunnskap om planområdet. Dersom forutsetningene for analysen endres kan det medføre at de vurderinger som er gjort i analysen ikke lenger er gyldige, og en revisjon av analysen bør da vurderes. Mangelfulle historiske data og usikre klimaframskrivninger er eksempler på at det kan være usikkerhet knyttet til vurderinger som gjøres i denne typer av analyser. Dette tilsier at det ikke er mulig å beregne eller vurdere eksakt sannsynlighet for at en hendelse inntreffer, og konsekvensen av den dersom den inntreffer. Vurderingene er derfor basert på eksisterende kunnskap, erfaring og faglig skjønn, og vil derfor medføre en viss grad av usikkerhet.

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)¹. Details about the modelling structure, numerical routines and physical packages available can be found in for example Klemp et al. (2000)² and Michalakes et al. (2001)³. 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 project⁴. For Norway, the model input uses the N50 land use data provided by the Norwegian Mapping Authority⁵.

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)⁶ 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^{7,8} is available with a spatial resolution of

¹ 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

² 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/>)

³ 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.

⁴ <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>

⁵ http://www.kartverket.no/eng/Norwegian_Mapping_Authority/

⁶ <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/para/parabout.html>

⁷ 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

⁸ <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.

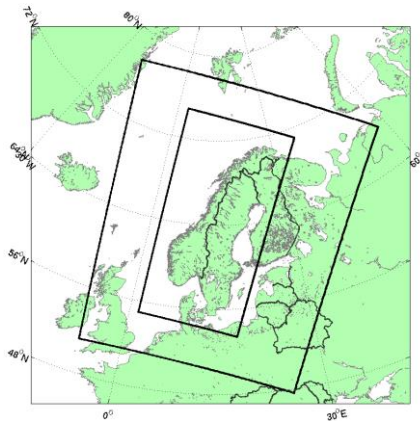


Figure A-1 Model set up for WRF simulations of Sweden and Norway

A.4 Ice load calculations

According to the standard ISO 12494 (ISO/TC98/SC3/WG6 2000)⁹ 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.

⁹ 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.¹⁰ This is the scheme that gives the most accurate calculations of liquid water content¹¹ 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).¹²

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

¹⁰ Thompson G., P.R. Field, W.D. Hall and R Rasmussen, 2006: A new bulk Microphysical Parameterization Scheme for WRF (and MM5)

¹¹ 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.

¹² 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 ²	Casualty (serious injury protection limit)
40 J	0.1 m ²	Fatality (death) unprotected person
180 J	0.01 m ²	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)¹³ 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 1×10^{-4} . If an unprotected person spends 3 minutes every day at this position (0.2 % of the time), the IRPA for this person is 2×10^{-7} . If 500 persons spend 3 minutes every day at this position, the group risk (PLL) is 1×10^{-4} . For comparison, 143 people got killed in traffic in Norway in 2018, which corresponds to an IRPA of 2.7×10^{-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

¹³ 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.

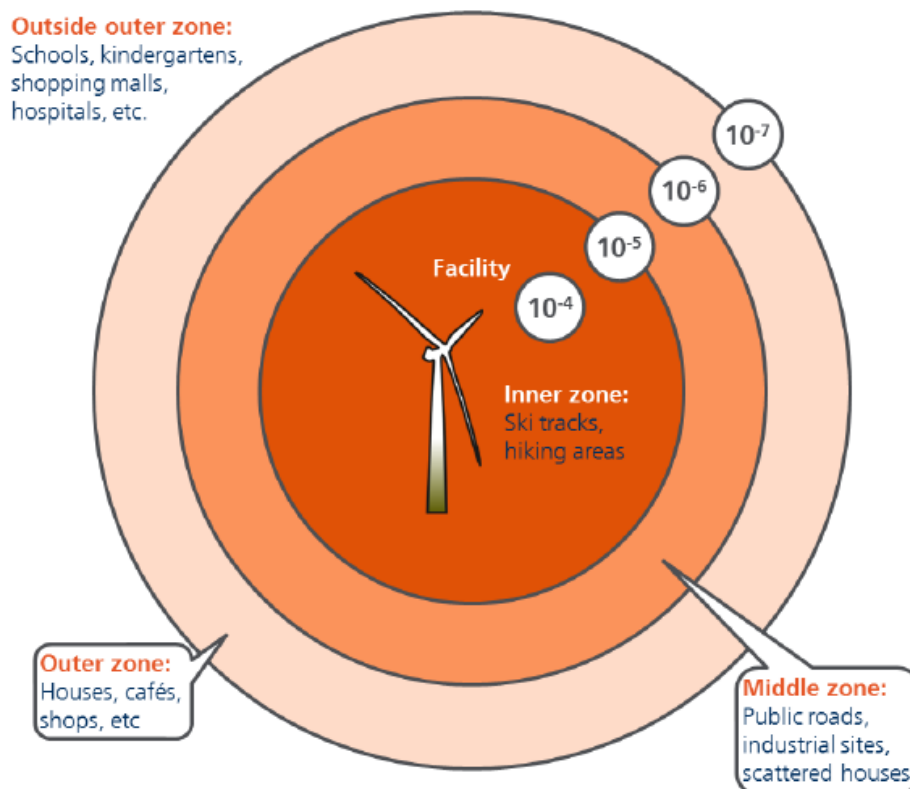


Figure B-1 Suggested safety zones around installation that may cause risk of ice throw or ice fall. The numbers indicate the iso-risk contours for localized individual risk (LIRA), the probability that an average unprotected person, permanently present at a specified location, is killed during one year 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	3.8×10^{-5}	2.7×10^{-5}
Sweden	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 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}	2×10^{-7}
2. person (guests)		3×10^{-6}
1. person (trained service personnel)		4×10^{-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.