

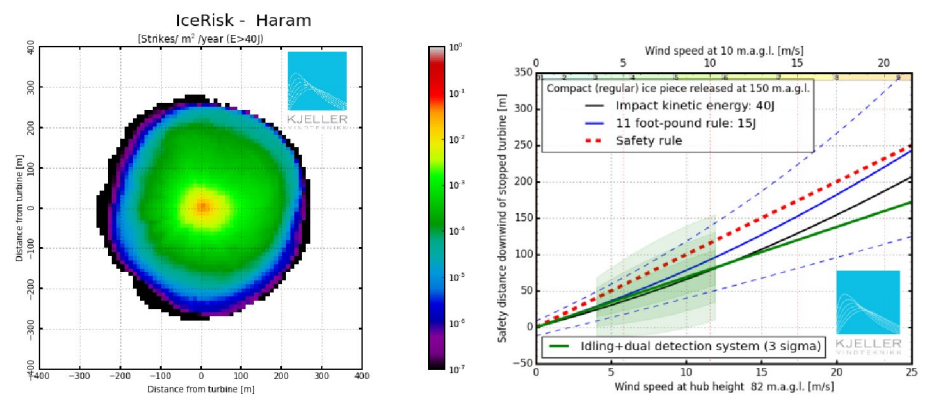


KJELLER
VINDTEKNIKK

Haram vindpark, Haram kommune, Møre og Romsdal

Risikovurdering for iskast fra vindturbiner

Rapport: KVT/REB/2019/R062



Rapportnummer	Dato
KVT/REB/2019/R062	09.08.2019
Haram vindpark, Haram kommune, Møre og Romsdal	Klassifisering
	Begrenset til kunde
Risikovurdering for iskast fra vindturbiner	Utgave nummer.
	1
Kunde	Antall sider
Haram Kraft AS	29
Kundens referanse	Status
Olav Rommetveit	Endelig

Formål

Denne rapporten presenterer IceRisk-beregninger for Haram vindpark i Haram kommune i Møre og Romsdal, Norge. Beregningene er gjort av Kjeller Vindteknikk på oppdrag for Haram Kraft AS.

Hensikten med analysen er å vurdere sannsynligheten for iskast i vindparken, vurdere risiko og komme med forslag til avbøtende tiltak. Et sammendrag er gitt i Kapittel 1 av rapporten. Sikkerhetsavstander for de aktuelle turbintypene er gitt i eget delkapittel.

Denne rapporten er kvalitetssikret og gjennomgått etter Kjeller Vindteknikk kvalitetsstyringssystem.

Forbehold

Denne rapporten er skrevet for kunden og med det formålet som går frem av tittelen. Kjeller Vindteknikk skal ikke holdes ansvarlig for 3dje parts bruk av denne rapporten, og en 3dje part skal derfor holde Kjeller Vindteknikk 100 % skadesløs ovenfor et hvert krav som måtte komme som en følge av bruk av denne rapporten.

Revisjonshistorie

Utgave	Dato	Antall eksemplar	Kommentar	Distribusjon
0	09.08.2019		Endelig	Elektronisk

	Navn	Dato	Signatur
Utført av	Rolv Erlend Bredesen		Rolv Erlend Bredesen 2019.08.09 10:36:53 +02'00'
Kontrollert av	Lars Tallhaug		Lars Tallhaug 2019.08.09 10:41:56 +02'00'
Godkjent av	Finn Nyhammer		Finn Kaare Nyhammer 2019.08.09 10:43:30 +02'00'

Innhold

1	SAMMENDRAG	3
2	INNLEDNING	5
3	BESKRIVELSE AV OMRÅDET	6
4	ISINGSFORHOLD FOR HARAM	7
4.1	KLASSIFISERING AV ISINGSFORHOLD PÅ HARAM	8
4.2	STØRRELSESFORDELING AV ISBITER	9
4.3	VINDFORDELING VED METEOROLOGISK ISING, INSTRUMENTELL ISING OG VED SMELTING	11
5	BEREGNING AV ISKAST	12
5.1	SANNSYNLIGHETSFORDELING FOR ISKAST I HARAM VINDPARK	13
6	KONSEKVENSER FOR OMGIVELSENE	15
6.1	DEFINISJONER	15
6.2	DRIFTSPERSONALE	15
6.3	NÆRLIGGENDE VEIER	15
6.4	BEBYGGELSE	16
6.5	KRAFTLINJER	16
6.6	RISIKOVURDERING	16
7	HÅNDTERING AV RISIKO, SIKKERHET	17
8	BIBLIOGRAFI	19
	APPENDIKS A - MESO-SCALE MODEL WRF	21
	APPENDIKS B - RISK ASSESSMENT	25
	B.1 RISK DEFINITION	25
	B.2 LIRA METHODOLOGY	25
	B.3 EXPOSURE SCENARIOS	26
	APPENDIKS C - RISIKOKART	27
	APPENDIKS D - RISIKOHÅNDTERINGSSTRATEGIER	29
	LIST OF RISK MITIGATION STRATEGIES RELATED TO ICE-THROW AND ICE FALL	29

1 Sammenheng

Kjeller Vindteknikk har utviklet modellverktøyet IceRisk for å kartlegge sannsynligheter for isnedfall og iskast fra turbiner, kraftledninger og master (Bredesen 2015, IWAIS). Dette verktøyet benyttes blant annet til å kartlegge sannsynlighet for farlig iskast og isnedfall for å deretter å kunne gjennomføre risikoanalyser.

Det er utført analyser av hyppigheten av atmosfærisk ising i vindparken Haram i Haram kommune i Møre og Romsdal fylke. Hensikten er å beregne sannsynligheten for iskast i området i og omkring vindparken. Vindparken består av 8 turbiner av typen Vestas V136. Turbinene er lokalisert 240 - 330 m over havet. Med 82 m navhøyde og en rotordiameter på 136 m vil turbinbladene til de høyest plasserte turbinene nå opp til 480 meter over havet.

Det er beregnet at det i vil danne seg ismengder som kan gi farlig isnedfall i 0.2 % av tiden for en turbin plassert i gjennomsnittlig høyde i vindparken, og mellom 0.04-0.6 % for enkeltturbiner. Dette fordeler seg i gjennomsnitt på 1.6 episoder per vinter for gjennomsnittsturbinen i parken (0.4-3.2 for enkeltturbiner). Det vil være de høyest plasserte turbinene som vil oppleve mest ising, mens de som ligger lavest i terrenget opplever minst ising. I følge IEA sin isklassifisering er Haram vindpark i klasse 2 (lett ising).

De beregnede sannsynlighetene for at farlige isbiter¹ fra turbinene treffer ulike områder ved Haram er vist i vedlegg C og i Tabell 1-1. En sannsynlighet på 10^{-4} [treff/kvadratmeter/år] betyr at det går 10 000 år mellom hver gang en isbit treffer et gitt område på størrelse 1 kvadratmeter. Rapporten viser at for en enkelt kvadratmeter vil kast med returperiode 100 år forekomme 10 m fra turbin, 1000 år 40 m fra turbin, 10 000 år 120 m fra turbin, 100 000 år 210 m fra turbin, og 1 000 000 år 250 m fra turbin.

Tabell 1-1 Sammenheng mellom returperiode for treff per kvadratmeter og sannsynlighet for treff per kvadratmeter per år for isbiter med en anslagsenergi over 40 J. Tredje kolonne angir ved hvilken avstand oppgitt sannsynlighet inntreffer som gjennomsnitt av alle sektorer rundt gjennomsnittsturbinen i parken (V136). For gjennomsnittsåret.

Returperiode	Sannsynlighet	Avstand
100 år	10^{-2}	10 m
1 000 år	10^{-3}	40 m
10 000 år	10^{-4}	120 m
100 000 år	10^{-5}	210 m
1 000 000 år	10^{-6}	250 m

Det bør settes opp et skilt ved alle naturlige adkomstveier om at det er fare for isnedfall. Dette gjelder både kjøreveier og eventuelle turstier. Det bør også lages egne sikkerhetsrutiner for de som arbeider i vindparken. Flere tiltak for å redusere risikoen kan også vurderes.

Dersom en antar at den mest eksponerte person oppholder seg ubeskyttet 1 time per dag hver dag igjennom året i vilkårlige posisjoner i risikoområdet (det fargelagte området i kartet i vedlegg C) så vurderes risikoen som lavere enn risikoen forbundet med å omkomme i trafikken i Norge (høy risiko). Legges dette scenariet til grunn vurderes risikoen som tolererbar for tredjeperson (publikum) langs Haramsfjellveien og høy for internveiene.

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

Det er størst fare for eget service personell og eventuelle fotgjengere tett på turbinene og langs internveiene. Risikoen langs Ullaveien (FV150) er ubetydelig, mens den er tolererbar langs Haramsfjellveien.

Det anbefales derfor å benytte kjente risikoreducerende tiltak. Siden risikoen er tolererbar er ikke ytterligere tiltak utover skilting og informasjon et tydelig krav for Haramsfjellveien. Kostnadseffektive tiltak bør vurderes.

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

Skiltingen må være av en slik art at bruken av Haramsfjellveien reduseres med en faktor på 10 i de periodene det er fare for iskast. Et skilt som bare varsler generell risiko for iskast er derfor ikke tilstrekkelig for Haramsfjellveien. Skiltet må være en slik art at bruken av veien virkelig reduseres når det er risiko for iskast. Dette oppnås når brukerne av veien forstår når det kan være risiko og tilpasser sin adferd og dermed reduserer risikoen.

2 Innledning

Kjeller Vindteknikk har utført en studie av isingsforholdene for Haram vindpark i Haram kommune i Møre og Romsdal, 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 2-1 Ising på vindturbinvinge 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 vingen som vist i Figur 2-1. Denne isen vil kunne redusere produksjonen til turbinen, eller i verste fall stoppe den helt.

Is som har lagt seg på vingen 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).

Hensikten med studien er å klarlegge hvor ofte det vil danne seg is på turbiner på Haram og hvor ofte og hvor langt denne isen kan bli kastet. En detaljert trajektoriemodell har blitt benyttet for å lage statistikk på hvor farlig iskast kan være for driftspersonell og 3dje person.

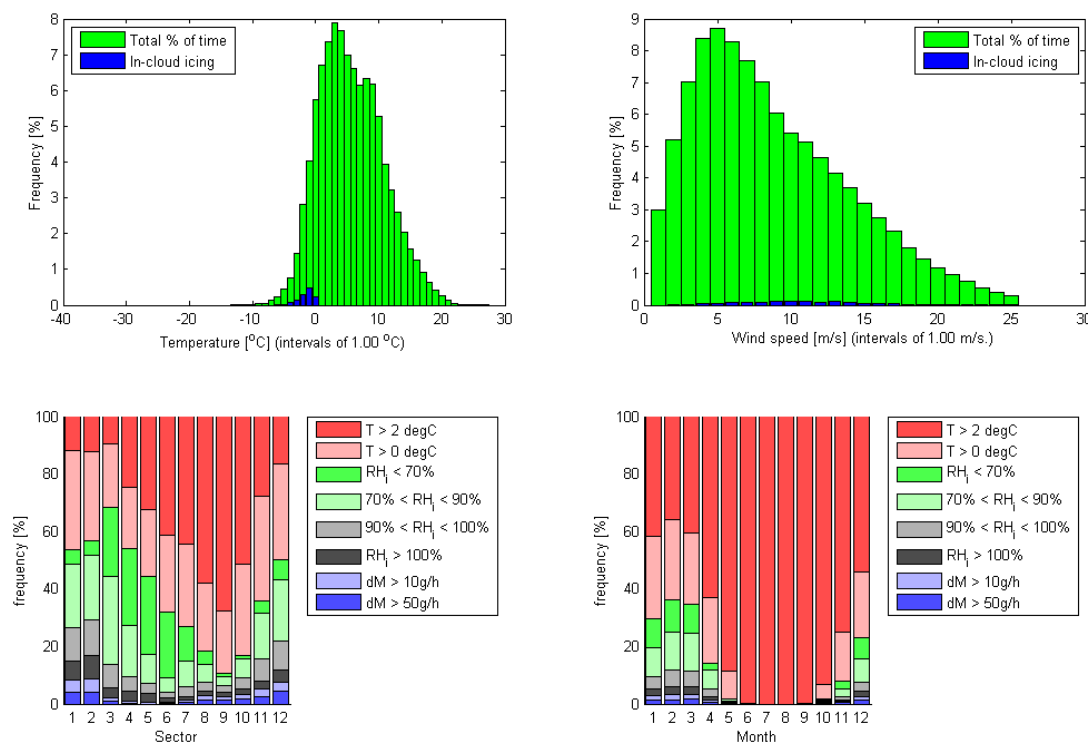
3 Beskrivelse av området

Kart over området er vist i vedlegg C med 8 Vestas V136 4 MW turbiner. Med 82 m navhøyde og en rotordiameter på 136 m vil turbinbladene til de høyest plasserte turbinene nå opp til 480 m over havet. Terreng høyden til laveste og høyeste turbin er henholdsvis 240 m og 330 m over havet. Gjennomsnitts terreng høyde for turbinene er 288 m over havet.

Vindparken er bygd i et område med offentlige veier i nærhet, og det er derfor undersøkt i hvilken grad iskast fra turbinene vil kunne påvirke ferdsel langs disse.

4 Isingsforhold for Haram

Det er periodevis fare for iskast i måneden fra og med desember til og med april. Figurene under illustrerer hvordan de meteorologiske forholdene som er viktig for ising varierer med temperaturen, vindhastigheten, vindretningen og til slutt kalendermåned.

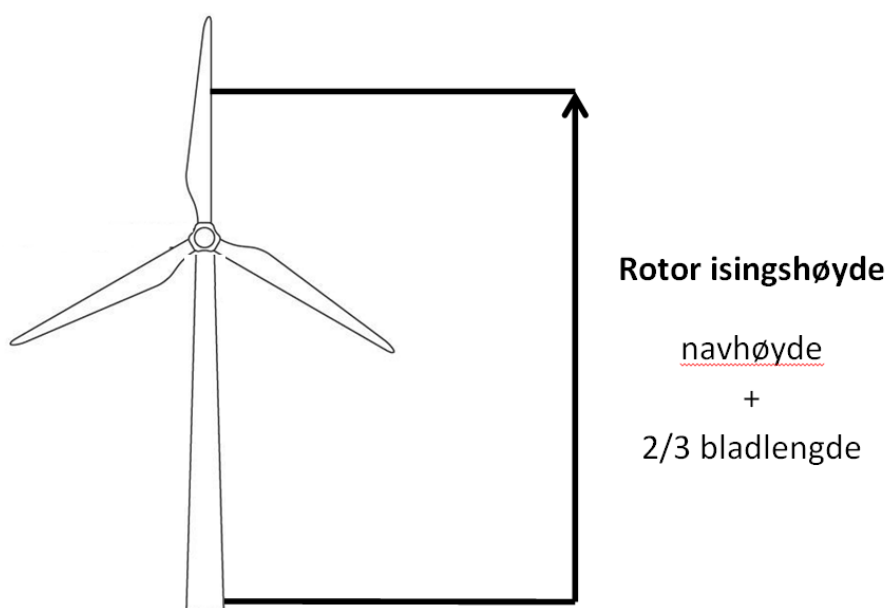


Figur 4-1 Andel av tiden med meteorologiske forhold som gir meteorologisk ising (aktiv isoppbygging). Øverst til venstre vises temperatur, øverst til høyre vindhastighet, nederst til venstre vindretning i vintermånedene desember, januar og februar (sektor 6 er fra sør), nederst til høyre fordelt på måned.

Fra Figur 4-1 ser vi at under forhold med meteorologisk ising (isvekst) i Haram vindpark er temperaturen mellom 0 og -5 °C mens vindstyrken ligger mellom 4 og 17 m/s. Vindretningen under forhold med ising (nedre venstre) med isvekstrate 10 g/time/m (lyseblå) og kraftigere isvekst 50 g/time/m (mørkeblå) er fordelt på vindretninger fra sør til nord-øst. Isingen er jevnt fordelt på vintermånedene desember til mars men kan forekomme sjeldne ganger også i april. Dette er vist som blå stolper ($dM > 10$ g/time og $dM > 50$ g/time) nede til høyre i Figur 4-1. Det er normalt ikke ising i perioden fra mai til november. Midt på vinteren forventes det at sublimering (fordampning) bidrar til å fjerne is fra vingene 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. Andelen av tiden hvor sublimering kan foregå er markert med grønne stolper i figuren (" $RH_i < 70\%$ " og " $70\% < RH_i < 90\%$ ") og vi ser at sublimering er hyppigst for sektorene 3 (øst) til 7 (sør-sør-vest). Andel av tiden hvor det er smelteforhold (" $T > 0$ degC" og " $T > 2$ degC") er markert med røde stolper i figuren. Det er altså ofte forhold for at isen smelter gjennom hele vintersesongen (30-50 % av tiden).

4.1 Klassifisering av isingsforhold på Haram

I navhøyde, 82 meter over bakken, er det forventet meteorologisk ising i 0.6-1.5 % av tiden tilsvarende 44-136 timer per år, med på ca 91 timer per år for gjennomsnittsturbinen. Siden isingen øker med høyden vil en turbin med lengre blad eller høyere navhøyde blir 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). For turbiner med større rotor diameter er det mer sannsynlig at rotorbladene kan nå opp til en skybase med underkjølte vanndråper når navhøyden og terreng høyden ved foten til turbinen er den samme. Rotor isingshøyde for turbinene ved Haram er 127 meter over bakken.



Figur 4-2 Definisjon av rotor isingshøyde (IEA Wind TCP).

Benytter vi klassifiseringen fra IEA Wind (2012) for bruk i vindkraftsammenheng (vist i Tabell 4-1) får vi at Haram klassifiseres i isklasse 2. Denne klassen tilsvarer lett ising for turbinene i parken. Hvis vi kun så på instrument ising (varighet) som er beregnet til mindre en 1.5 % av tiden på Haram får vi klassifisering i IEA Wind isklasse 1.

Tabell 4-1 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

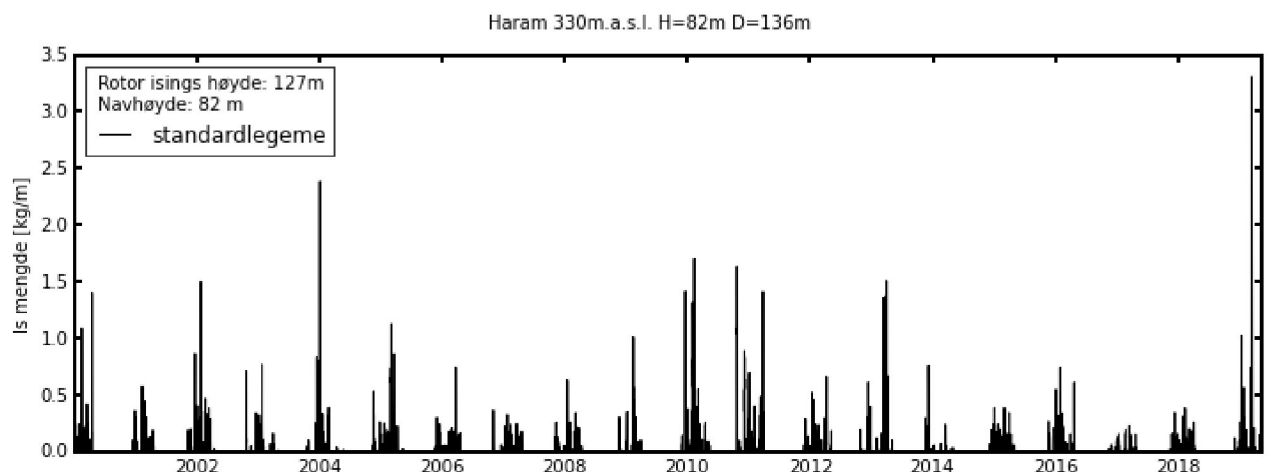
4.2 Størrelsesfordeling av isbiter

For vindturbiner på Haram forventes ising i form av "skyrim". Denne istypen dannes på framsiden av rotorblad når skyvann fra lave skyer (tåke) fryser på en kald turbinvinge om vinteren. "Skrim" (rime) har vanligvis en tetthet på 500 kg/m^3 . Dersom isingen skjer nær 0°C , eller det er store dråper av yr som er med i prosessen, kan tettheten øke og gå opp i 700 til 800 kg/m^3 . På Gütsch (Cattin 2007) viste en inspeksjon av de kastede isbitene en jevn fordeling mellom mer porøst rim med lav tetthet og klinkis med høy tetthet.

Det er utført beregninger av mengden is. Dette gjøres normalt på et "standardlegeme", et objekt som er minst 0.5 m langt og har en diameter på 0.03 m og som står vertikalt og roterer (ISO 12494). Vi har benyttet WRF modelldata for perioden 2000-2015 for beregningene. Modellen og metode for beregning av mengden av is er beskrevet i Appendix A. Vi har beregnet største ismengde på standardlegemet i dataserien til 3.3 kg/m for den høyestliggende turbinposisjonen (se Figur 4-3). Tilsvarende ismengder som bygges opp og kastes ved 75 % av lengden på en turbinblad kan være i størrelsesorden 10-20 ganger mer.

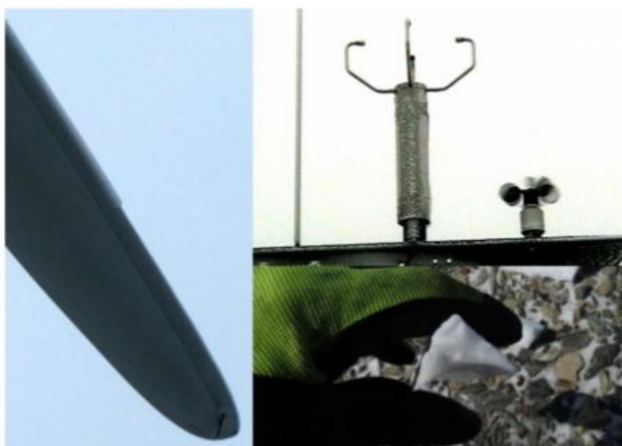
En ismengde på ca 0.5 kg/m på et standardlegeme kan gi en isbit med størrelse på ca 5 cm med en masse på ca 100 g på en turbinvinge (delt opp i isterninger). Et eksempel på en isbit av denne størrelsen vises øverst til venstre i Figur 4-4 (Wadham-Gagnon, 2013). Det må påpekes at figuren gjelder eksempel på situasjoner med en gitt ismengde i navhøyde og at det kan være andre relasjoner mellom isen på instrumentene og isklumper på turbinvingene under andre værforhold. Merk at klassene 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.

Sammenligner vi med Figur 4-4 så ser vi at det i parken kan forekomme isbiter på størrelse med de vist nederst til venstre (Ice Class Rime 5, $2.8\text{-}5.0 \text{ kg/m}$). Dersom vi bruker terskelverdien for ising på 500 g/m på et standardlegeme (ref Figur 4-4), kan vi si noe om hvor ofte det danner seg større isbiter på turbinene ved Haram. I effektiv isingshøyde for Vestas V136 layouten beregner vi at vi når denne terskelverdien opp mot 0.6 % av tiden for høyestliggende og 0.3 % av tiden for middel turbin og opp mot 1.6 ganger per år (0.4 ganger per år for laveste turbin og 3.2 ganger per år for høyestliggende turbin). Varigheten på en episode kortere enn 2 dager (0.5-2.5 dager).



Figur 4-3 Akkumulert ismengde på et standardlegeme for den høyestliggende turbinen.

Ice Class Rime 1 (ICR1) – 0 to 0.5 kg/m



Ice Class Rime 2 (ICR2) – 0.5 to 0.9 kg/m



Ice Class Rime 3 (ICR3) – 0.9 to 1.6 kg/m



Ice Class Rime 4 (ICR4) – 1.6 to 2.8 kg/m



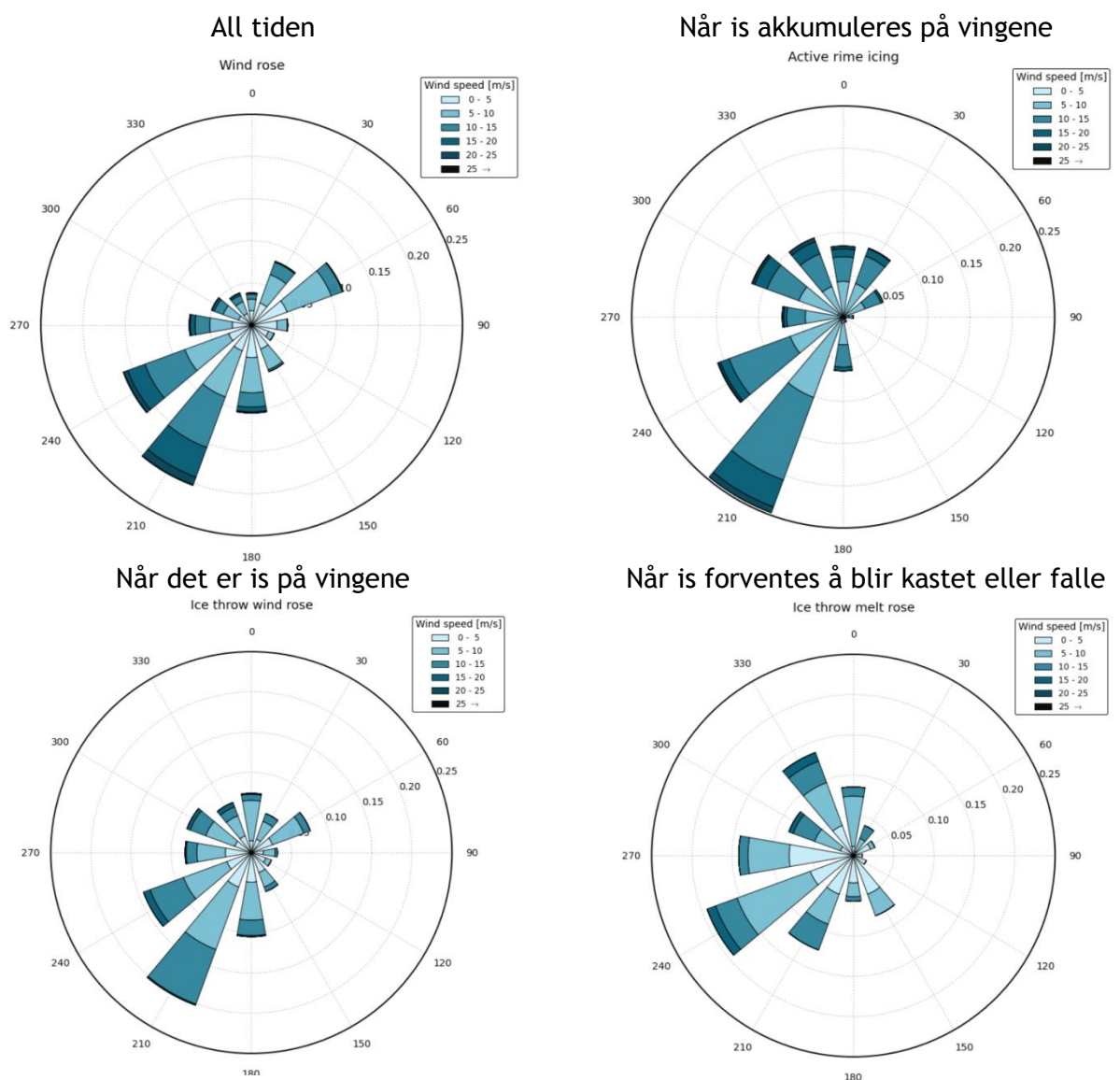
Ice Class Rime 5 (ICR5) – 2.8 to 5.0 kg/m



Figur 4-4 Sammenheng mellom islast på standardlegeme i navhøyde og akkumulert is på en turbinvinge. Bildene er gjengitt med tillatelse av Wadham-Gagnon ved TechnoCentre éolien. Isklassene er hentet fra ISO-12494 som omhandler ising på konstruksjoner.

4.3 Vindfordeling ved meteorologisk ising, instrumentell ising og ved smelting

En vindrose for en gjennomsnittsturbin i Haram vindpark er vist øverst til venstre i Figur 4-5. Dataene er beregnet fra 20 års tidsserier (4 km) med data fra værmodellen WRF (appendix A) for parken. Oppe til høyre vises vindrosa for de periodene hvor det vil bygges opp is på turbinbladene. Dette er typisk knyttet til vindretninger fra sør-vest, i tillegg til tilstøtende sektorer med klokken til nordnord-øst. Vi ser at isopbygging er hyppigst i hovedvindretningen fra sørvest. Det er sjeldent at det blåser fra sørøst, heller ikke når det iser. Nede til venstre i Figur 4-5 vises vindrosa for tidspunkt hvor det er beregnet å være is på vindturbinbladene (instrumentell ising). Vi ser at vind fra sørvest er mest vanlig når det er is på bladene. Nederst til høyre i Figur 4-5 vises vindrosa for når is vil smelte og falle av et turbinblad. Under smelting ser vi at vind fra østlige sektorer er minst vanlig mens vestlig med tilstøtende sektorer er mest vanlig.

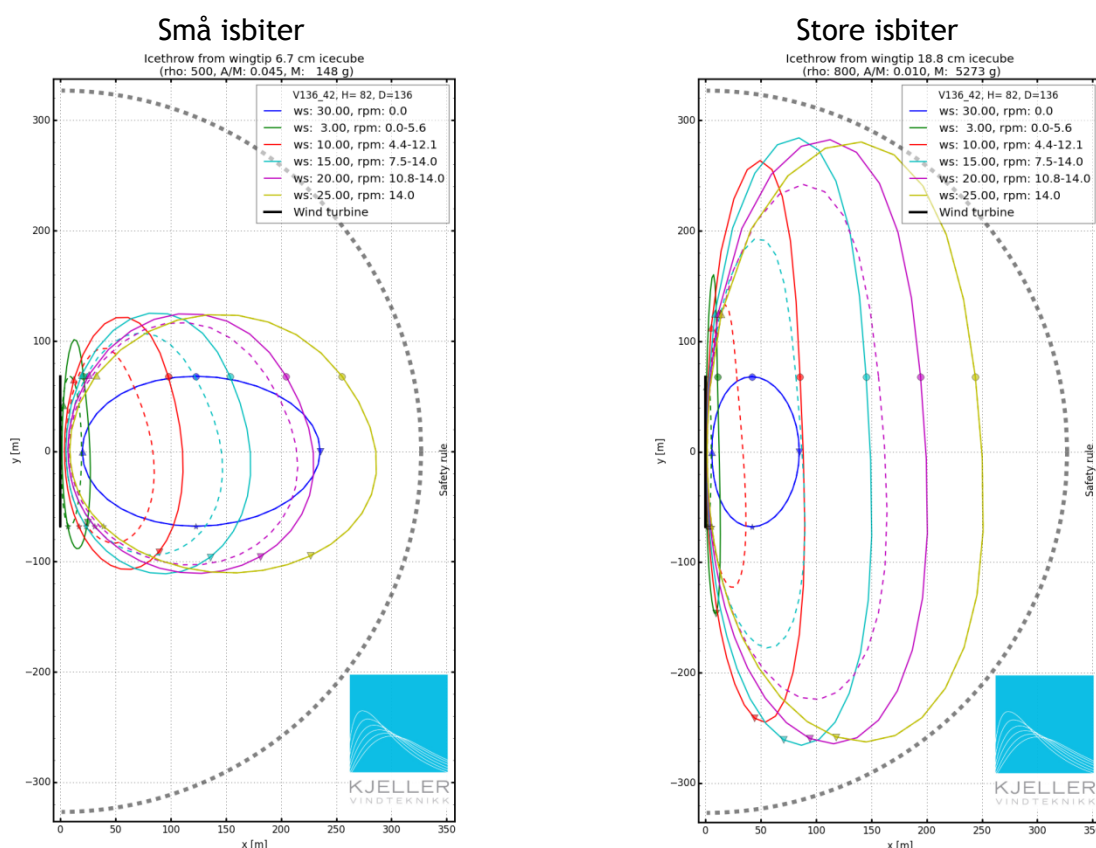


Figur 4-5 Vindrosener for ulike situasjoner. Vindrosene viser vindretning og vindstyrke for ulike deler av tiden.

5 Beregning av iskast

Beregninger gjort for en Vestas V136 4.2MW turbin med navhøyde 82 m og rotordiameter 136 m. Høyeste rotasjonshastighet for turbinen er 14 rpm. Beregninger med trajektoriemodell (Biswas 2012) viser forventede kastelengder for isbiter av ulik størrelse og under ulike vindforhold. Figur 5-1 viser kastelengder for de største isbitene vi kan forvente i figurene til høyre (13.5 kg). Mens kastelengder for de minste isbitene er vist til venstre (150 g). Mindre isbiter enn det som er vist anses som ufarlige mens større isbiter er mindre sannsynlige ved Haram. Kastelengdene er vist i forhold til den generelle sikkerhetsreglen² ("safety rule") som for denne turbinen vil være 327 m. Vi ser at det for de beregnede kombinasjoner av vind, isbitstørrelse, tetthet og form ikke forekommer isbiter som kastes lenger enn den generelle sikkerhetsregelen for turbinen.

Det bemerkes at største sikkerhetsavstand ved Haram 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-faktorer³, med ulike kastposisjoner fra ulike steder på turbinbladet.



Figur 5-1 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 82 m. Vinden blåser fra vestre mot høyre. De ulike fargene er ulike vindhastigheter. Blå linje viser stoppet turbin i 30 m/s. For de øvrige linjene er turbinen i drift.

Safety rule: $(H+D)^{3/2}$, der H er navhøyde og D er rotor diameter.

³ 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.

5.1 Sannsynlighetsfordeling for iskast i Haram vindpark

I dette kapitlet presenteres sannsynlighetskartet (illustrasjon for en turbin i Figur 5-2 for iskast i Haram vindpark. Kartet er beregnet ved å kombinere den underliggende vindstatistikken og størrelsesfordelingen presentert i forrige kapittel sammen med detaljerte beregninger med en trajektorie-modell. Dette gir kart som viser variasjon for forskjellige sektorer rundt turbinene i parken. I tillegg er trajektoriemodellen benyttet for å skille mellom farlig og ufarlig is-kast/nedfall basert på den beregnede anslagsenergien (se Bredesen 2015/2016).

Vi antar at sannsynligheten for iskast fra en roterende turbinvinge øker lineært med radial 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 (2005). Kort oppsummert vil kombinasjon av tyngdekraft og sentripetalakselerasjon av en isbit festet til en vinge gi størst sannsynlighet for slipp av isbit når vingen peker ned og minst sannsynlighet når vingen peker opp.

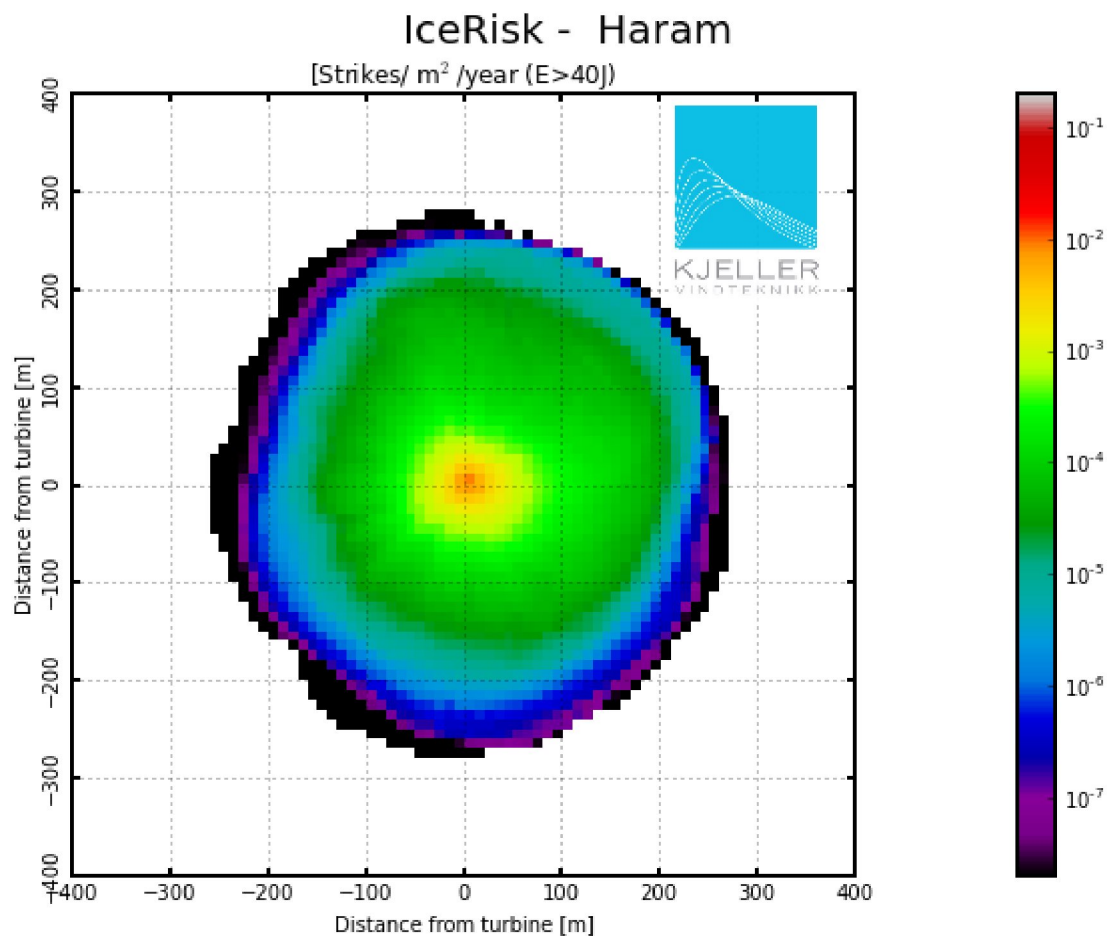
Beregninger av iskast er gjort for 4 ulike scenarier hvor det kan forventes at iskast kan forekomme.

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 (ref Bredesen (2015, IWAIS), Bredesen (2014), Refsum (2015), og TNO Greenbook). Det er kun isbiter med anslagsenergi større enn denne grensa som er tatt med i beregningene. Iskastrisikoen er beregnet ved hjelp av 10 millioner forskjellige landingsposisjoner for farlige isbiter avhengig av vindforhold, turbin ytelse, størrelse på isbit og slipp posisjon på det roterende turbinbladet.

Vindstatistikken under forhold med minst 1 kg/m is på vingen har 2801 timesverdier over 20 år. For alle 4 scenariene er det svært usannsynlig at farlige isbiter kan kastes over en avstand på 250 m.

Den kombinerte statistikken fra de 4 scenariene vises i Figur 5-2 for en turbin i gjennomsnittshøyden ved Haram. Sannsynligheten for farlig iskast/isnedfall er tilnærmet jevnt fordelt på retning. For en enkelt kvadratmeter rute vil kast med returperiode 100 år forekomme 10 m fra turbin, 1000 år 40 m fra turbin, 10 000 år 120 m fra turbin, 100 000 år 210 m fra turbin, og 1 000 000 år 250 m fra turbin. For Figur 5-2 er det antatt helt flatt terreng. Dersom det er nedoverbakke i noen retninger vil isen kastes lenger i de retningene. Dersom det er oppoverbakke i noen retninger vil isen kastes kortere.



Figur 5-2 Antall nedslag pr år av farlige isbiter. Alle driftssituasjoner er kombinert slik det er forventet å bli når vindparken er i drift.

Det endelige kartet med sannsynlighet for isnedfall er vist i Figur C-1 i vedlegg C. Her er de 4 driftssituasjonene (scenarie 1- 4 på forrige side) vektet likt. Det er også tatt hensyn til at det kastes flere isbiter for de høystliggende turbinene og færre for de lavestliggende.

Overhøyden mellom turbinposisjonene og omgivelsene er blitt tatt med i beregningene ved å bruke sannsynlighetsverdi for avstanden til punkt trukket fra overhøyde (skrått kast). En sannsynlighet på 10^{-4} [treff/kvadratmeter/år] betyr at det går 10 000 år mellom hver gang en isbit treffer et gitt område på størrelse 1 kvadratmeter.

6 Konsekvenser for omgivelsene

6.1 Definisjoner

LIRA (Localized Individual Risk per Annum) angir risikoen på et sted for en ubeskyttet person som er tilstede hele tiden. Dvs 100 % ubeskyttet eksponering på et sted. Forslag til risikoakseptkriterier og metode er gitt i appendiks B. Den individuelle risikoen LIRA-konturer beregnes ved at man kombinerer mulige ulykkeshendelser med tilhørende sannsynlighet for å omkomme. Risikokonturene viser således den geografiske distribusjon av individuell risiko, ved å vise den forventede frekvens til hendelser som er i stand til å forårsake fatalitet (død) på et gitt sted, uavhengig av om det faktisk befinner seg personer på det aktuelle stedet. For ferdsel langs offentlig vei er det foreslått risiko akseptkrav $LIRA < 1 \times 10^{-5}$.

IRPA (Individual Risk per annum) beskriver risikoen for et gitt bevegelsesmønster for en person eller gruppe av personer. Det følger egne forslag til risikoakseptkriterier i vedlegg B. Typisk skal risikoen være neglisjerbar i forhold til bakgrunnsrisikoen i samfunnet. For eksempel sammenligning med gjennomsnittsposisjon i park 1 time mot dødsrisiko i trafikken. Hvis risikoen er akseptabel med LIRA trenger man ikke beregne IRPA. Vi har allikevel gjort det for å illustrere hva risikoen betyr.

For å sammenligne risiko indeksene bemerker vi at ubeskyttet eksponering for en person 0.2 % av tiden (nesten 3 minutter per dag hver dag) ved LIRA verdi 1×10^{-4} tilsvarer et individuelt risikonivå på 2×10^{-7} for denne personen. Hvis 500 personer eksponeres 0.2 % av tiden ved LIRA verdi 1×10^{-4} så er grupperisikoen 1×10^{-4} . Ved mer detaljert risikoberegning er dette typiske risikoakseptkrav i Norge. Til sammenligning var det 109 drepte i trafikken i Norge for 2017 hvilket tilsvarer en gjennomsnittlig individuell risiko på 2.1×10^{-5} .

For hver gruppe eller individ i en gruppe gjør vi denne vurderingen

- Hva er eksponeringen for denne gruppen
- Hva er risikoen for denne gruppen
 - Hva er LIRA verdi
 - Hva er IRPA
 - Hva er PLL (Potential for Loss of Life, dvs grupperisiko), hvis relevant.

Kartverdier av LIRA beregnes som funksjon av treffsannsynlighet i kart. IRPA beregnes fra LIRA ved et gitt eksponeringsscenarie.

6.2 Driftspersonale

Det er risiko forbundet med ferdsel på internveier i parken.

6.3 Nærliggende veier

Fylkesvei 150 (Ullavegen) nordøst for parken ligger lavere i terrenget og kan teoretisk nås av mindre isbiter under forhold med sterk vind. En mulig konsekvens er da at mindre isbiter kan forstyrre bilfører slik at de mister kontroll over kjøretøyet.

Haramfjellveien går igjennom parken i kort avstand sørvest for turbin 8 og noe lengre nordøst for turbin 3. Det forventes at større isbiter kan treffe denne veien. Fartsgrensen på veien oppgis til 30 km/t. Ganghastighet uten stans kan forventes til 5 km/t.

6.4 Bebyggelse

Bebyggelsen nordøst for parken befinner seg i tilstrekkelig avstand til nærmeste turbin.

6.5 Kraftlinjer

En kraftlinje befinner seg innenfor teoretisk kasteavstand nordøst for parken (turbin 4). Risikoen for at treff av sårbare komponenter kan lede til driftsavbrudd er vanskelig å vurdere men antas å være tilstrekkelig lav. Ingen tiltak er nødvendige nå men det anbefales å overvåke risikoen for iskast samt å gjøre en revurdering i løpet av driftsperioden.

6.6 Risikovurdering

I dette kapittelet er det vist risiko ved noen bevegelsesmønstre (Tabell 6-1) og for noen punkter i og ved vindparken (Tabell 6-2).

Tabell 6-1 Risikovurdering i henhold til anbefalingene i IEA Task 19 for noen eksempler. Verdiene gjelder før eventuelle tiltak.

	Individuell Risiko (IRPA)
Et gjennomsnittlig sted i vindparken (1 ubeskyttet person 1 time pr dag, hver dag)	5.4×10^{-7} (tolererbart)
Internvei (1 person, 1 time per dag, ubeskyttet hver dag)	1.1×10^{-6} (høyt)
Internvei (1 person 1 tur, 5 km/time, en retning, ubeskyttet hver dag.	6.9×10^{-8} (akseptabelt)
Haramsfjellveien (1 person, 1 tur, 5 km/t, en retning ubeskyttet hver dag)	7.3×10^{-9} (akseptabelt)
Haramsfjellveien (1 person, 1 tur, 30 km/time, en retning ubeskyttet hver dag.	1.2×10^{-9} (akseptabelt)

Tabell 6-2 Risikovurdering for noen utvalgte punkter for individuell risiko.

Sted	Treffsannsynlighet av farlig iskast per kvadratmeter og år	Individuell Risiko (LIRA) (24 timer per dag)	Individuell Risiko (IRPA) (1 time per dag, hver dag)
35 m sørvest for turbin 8	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}	4.2×10^{-6} (høyt)
45 m nordøst for turbin 3	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}	4.2×10^{-6} (høyt)

For å se på sensitiviteten til modell antagelsene er det gjennomført en mer detaljert beregning for den nordøstre turbinen som er nærmest Fylkesvei 150 (Ullaveien). Den individuelle risikoen for en tenkt ubeskyttet fotgjenger som bruker veinettet (som gangsti) hver dag er beregnet til 3.3×10^{-9} per år (ikke vist). Dette er bortimot 10 000 ganger lavere enn risikoen forbundet å ferdes i trafikken i Norge, og kan derfor tolkes som en ubetydelig risiko. Den samlede grupperisikoen for 610 billister som oppgis å kjøre på veinettet (FV150) forbi denne turbinen er beregnet til 3×10^{-8} per år (se PLL i Figur C-2, vedlegg C). Dette tilsvarer mer enn 33 millioner år mellom hver dødsulykke og tolkes som en ubetydelig risiko.

7 Håndtering av Risiko, Sikkerhet

For å kunne håndtere risikoen i egen vindpark er kunnskap en forutsetning: Egnede tiltak kan være profesjonell kommunikasjon, skilting, rutiner for ansatte, opplæring, og varslingsystemer.

For varsling av fare kan omverdenen varsles med lyd og/eller lys eller annen informasjon. Typisk kan et varslingsystem drives av en kombinasjon av: sensorer, værvarsel, og inspeksjon. For ansatte kan rutiner bistå med å håndtere all rest-risiko som ikke er håndtert gjennom design: sensorer, webkameraer, kommunikasjonsprosedyrer, varsling av is og angivelse av spesifikke risikosoner, sikre kjøretøyer, og overbygninger. For en utvidet liste med forslag til tiltak viser vi til foreningen Svensk Vindenergi sitt syn presentert av Göransson og Haaheim på Winterwind (2016) (se appendiks D) og til NVE sin temarapport om iskast (2018). For en mer detaljert risikoanalyse henviser vi til norsk standard⁴. En vurdering av risikoen for tredjeperson i parken vil avhenge av eksponeringen (tid/sted/varighet/beskyttelse) i de perioder det er fare for iskast. En slik vurdering er ikke beskrevet i denne utgaven av rapporten men risikoen er størst i perioder med kraftigere ising når det ikke er godt turvær. Det anbefales at risikoen for iskast monitoreres.

Det følgende scenariet viser hvordan eksponeringen i perioder med fare for iskast spiller inn i risikovurderingen. Hvilket scenarie som bør legges til grunn vil avhenge av styringstall på faktisk eksponering i parken og effekten av tiltak. Hvis en person oppholder seg ubeskyttet en time per dag hver dag hele året er risiko⁵ for å omkomme som følge av iskast beregnet til henholdsvis 5.4×10^{-7} som et gjennomsnitt over parkens risikosone på 3 kvadratkilometer (fargelagt område i kartet i vedlegg C) og 1.1×10^{-6} som et gjennomsnitt langs anleggsveiene i parken. Disse tallene er lavere enn risikoen for å omkomme i trafikken i Norge. Til sammenligning vurderes den individuelle risikoen for en tredjeperson i Norge som ubetydelig hvis den er lavere enn 2×10^{-7} per år. For førsteperson (kurset servicepersonell) er typisk risikoakseptkrav 4×10^{-5} mens den er 3×10^{-6} for andreperson (for eksempel kurset reindriftspersonell, ikke aktuelt her). I følge den internasjonale veilederen på risikovurdering av iskast vurderes en individuell risiko for tredjeperson (publikum) høyere enn 1×10^{-5} per år som ikke akseptabel og risikoreduserende tiltak er da påkrevd (ifølge veilederen). Så lenge risikoen er høyere enn 1×10^{-6} er den høy og da skal velkjente tiltak benyttes samtidig som det anbefales å se etter ytterligere risikoreduserende tiltak (ifølge veilederen). Er den individuelle risikoen for tredjeperson høyere enn 1×10^{-7} er den tolererbar og kjente tiltak bør vurderes i et kost-nytte perspektiv. Dette betyr at risikoreduserende tiltak utover enkel skilting bør vurderes for 3. person for ferdsel langs Haramsfjellveien i et kost-nytte perspektiv. Siden risikoen er såpass lav er ikke ytterligere tiltak utover skilting og informasjon et tydelig krav ved Haramsfjellveien. For ferdsel langs internveien anbefales kjente tiltak. Anbefalte tabeller for vurdering av tallfestet risiko er gitt i appendiks B.

⁴ Norsk standard NS 5814:2008, Krav til risikovurderinger.

⁵ IRPA (Individual risk per annum)=eksponering*LIRA. En time eksponering per dag gir IRPA=LIRA/24.

Forslag til avbøtende tiltak:

Det bør settes opp et skilt ved alle naturlige adkomstveier om at det er fare for isnedfall. Dette gjelder både kjøreveier og eventuelle turstier. Skiltingen må være av en slik art at bruken av Haramsfjellveien reduseres med en faktor 10 i de periodene det er fare for iskast. Et skilt som bare varsler generell risiko for iskast er derfor ikke tilstrekkelig for Haramsfjellveien. Skiltet må være en slik art at bruken av veien virkelig reduseres når det er risiko for iskast. Dette oppnås når brukerne av veien forstår når det kan være risiko og tilpasser sin adferd og dermed reduserer risikoen.

Det anbefales at oppdatert informasjon om fare for iskast finnes på nettsidene til Haram Kraft.

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

Ansatte i vindparken bør kurses i temaet iskast og risiko.

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

8 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. and Salmon, J.: Wind Energy nr 15. 2012. A modell of ice throw trajectories from wind turbines.

Bredesen, R.E, Farid, H, Pedersen, M., Haaheim, D., Sondell, N., Rissanoen, S., Lehtomäki, V., Gruben, G. Sandve, A. 2016. IceRisk: Assessment of risks associated with ice throw from wind turbine blades. WindEurope Summit2016. 27-29 September 2016. Hamburg.

windeurope.org/summit2016. PO.339.

<https://windeurope.org/summit2016/conference/allposters/PO339.pdf><https://windeurope.org/summit2016/conference/allposters/PO339.pdf>

Bredesen, R.E., Refsum, H.A., 2015. Methods for evaluating risk caused by ice throw and ice fall from wind turbines and other tall structures. Kjeller Vindteknikk, NO (38). IWAIS 2015. 16th International workshop on atmospheric icing of structures. ISBN 978-91-637-8552-8. Uppsala, Sweden, June 28 - July 3 2015. www.iwais.org.

Bredesen, R.E., Refsum, H.A. (2014). IceRisk: Assessment of risks associated with ice throw and ice fall. Kjeller Vindteknikk AS. Winterwind 2014.

Byrkjedal, Ø., & Åkervik, E. (2009). *Vindkart for Norge, Isingskart i 80m høyde*. NVE, 2009. Kjeller: Kjeller Vindteknikk AS.

Cattin, R. (2012). Ice throw studies, Gütch and St.Brais. *Winterwind 2012*.

Harstveit, K.: Validation of an in-cloud icing model based on cloud water gradient calculated from metar airport data. Proc. 13th Int. Workshop on Atmos. Icing of Structures, Andermatt, Switzerland, 2009.

B. Göransson. & D. Haaheim, "Swedish Wind Energy Associations' view on wind energy in cold climates," in Winterwind, 2016.

Hutton, G. (2014) Validating an ice throw model: A collaborative approach. RES. Winterwind 2014.

IEA Wind (International Energy Agency) (2012) Recommended practice 13: Wind energy in cold climate (1. Edition 2011)

ISO/TC98/SC3/WG6: Atmospheric icing of structures, International Standard, ISO 12494, 2000

Morgan, C. (1997). Assesment of safety risks arising from wind turbine icing. *EWEC*. Dublin.

Morgan, C., Bossanyi, E., & Seifert, H. (1998). Assesment of safety risks arising from wind turbine icing. *Boreas IV* (ss. 113-121). Hetta: VTT.

Refsum, H.A., Bredesen, R.E., (2015), Methods for evaluating risk caused by ice throw from wind turbines, Lloyd's Register Consulting, NO. Winterwind 2015.

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

Swart, D., et al. 2019. Application of risk management and barrier management for structures in cold climate. IWAIS 2019. <https://iwais2019.is/papers>

TNO Greenbook, 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, first edition 1992.

Wadham-Gagnon, M., (2013). Ice profile Classification Based on ISO 12494. TechnoCentre éolien (Wind Energy TechnoCentre). Winterwind 2013.

NVE (2018) Nasjonal ramme for vindkraft. Temarapport om iskast.
<https://www.nve.no/Media/6951/iskast.pdf>

Bredesen, R.E., Flage, R., Butt, B. National Norwegian Guidelines: Ice Throw Hazard
http://windren.se/WW2018/03_2_24_Bredesen_Norwegian_guidelines_regarding_the_risk_of_ice_throw_for_the_public_Pub_v2_draft.pdf

R. E. Bredesen et al 2017. Understanding and acknowledging the ice throw hazard - consequences for regulatory frameworks, risk perception and risk communication. J. Phys.: Conf. Ser. 926 012001
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/926/1/012001/pdf>

Appendiks A - Meso-Scale Model WRF

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.wrfmodel.org/>. The model version used in this work is v3.2.1 described in Skamarock et al. (2008)⁷. Details about the modelling structure, numerical routines and physical packages available can be found in for example Klemp et al. (2000)⁸ and Michalakes et al. (2001)⁹. 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.

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 project¹⁰. For Norway, the model input uses the N50 land use data provided by the Norwegian Mapping Authority¹¹.

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)¹² 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^{13,14} is available with a spatial resolution of 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.

⁷ 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

⁸ 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/>)

⁹ 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.

¹⁰ <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>

¹¹ http://www.kartverket.no/eng/Norwegian_Mapping_Authority/

¹² <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/para/parabout.html>

¹³ 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

¹⁴ <http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/era-interim>

Model Setup

The model setups used in these analyses are shown in Figure A-1. The simulations of the northern European region have been performed for 20 and 12 years covering the periods of 1992-2011 and 2000-2011, respectively. The model has in each case been set up with 2 nested domains. The horizontal resolutions are 16 km x 16 km and 4 km x 4 km for the shorter period, and 18 km x 18 km and 6 km x 6 km for the longer period. To describe Sweden in greater detail the model has also been set up with several 1 km x 1 km simulations that cover the period 01.10.2009 - 30.09.2011.

The ERA Interim dataset is used as lateral boundary conditions for the 6 km simulation, while the NCEP-FNL dataset is used as input for the 4 km and 1 km simulations.

Each of the simulations has 32 layers in the vertical with four layers in the lower 200 m. We have used the Thompson microphysics scheme 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-cell for a time step from 5 to 108 seconds in the different domains with increasing time step for lower horizontal resolution. In this way a realistic temporal development of the meteorological variables is achieved. Data is stored to disk every 1 hours of simulation.

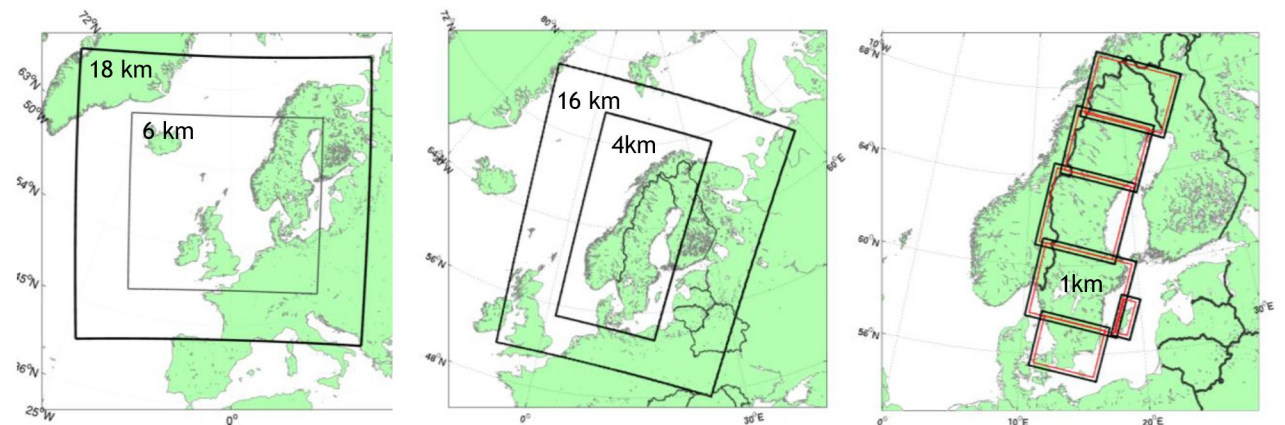


Figure A-1: Model set up for WRF simulations. Left: 6 km (and 18 km), middle: 4 km (and 16 km), right: several 1 km domains covering Sweden.

Ice load calculations

According to the standard ISO 12494 (ISO/TC98/SC3/WG6 2000)¹⁵ 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.

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.¹⁶ This is the scheme that gives the most accurate calculations of liquid water content¹⁷ 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.

¹⁵ ISO 12494 2000: Atmospheric Icing of structures, International Standard, ISO/TC98/SC3/WG6.

¹⁶ Thompson G., P.R. Field, W.D. Hall and R Rasmussen, 2006: A new bulk Microphysical Parameterization Scheme for WRF (and MM5)

¹⁷ 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.

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).¹⁸

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

¹⁸ Harstveit K, Byrkjedal Ø. and E. Berge 2009: Validation of Regional In-Cloud Icing Maps in Norway, IWALS, Andermatt 2009.

Appendiks 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 Table 2-2 and the potential consequence is a severe injury or fatal accident. 40 J is considered an 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, 2015,2019)

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 LIRA methodology

The chosen Individual Risk (IR) metric is LIRA. It is recommended to provide IR contours in a risk assessment (IEA Wind Task 19 - Recommended practices, 2011).

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 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).

The final risk map showing contours for the different LIRA contours is shown in Figure C-1. 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 (2015, 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 exceeding 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 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 reasonable 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.

B.3 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. The following tables show standard interpretation of a more detailed risk assessment accounting for exposure scenarios. Note that the suggested acceptance criteria shall motivate further risk mitigating efforts and ALARP is recommended (As Low As Reasonably Practicable) independent on risk acceptance criteria, see Table B-2

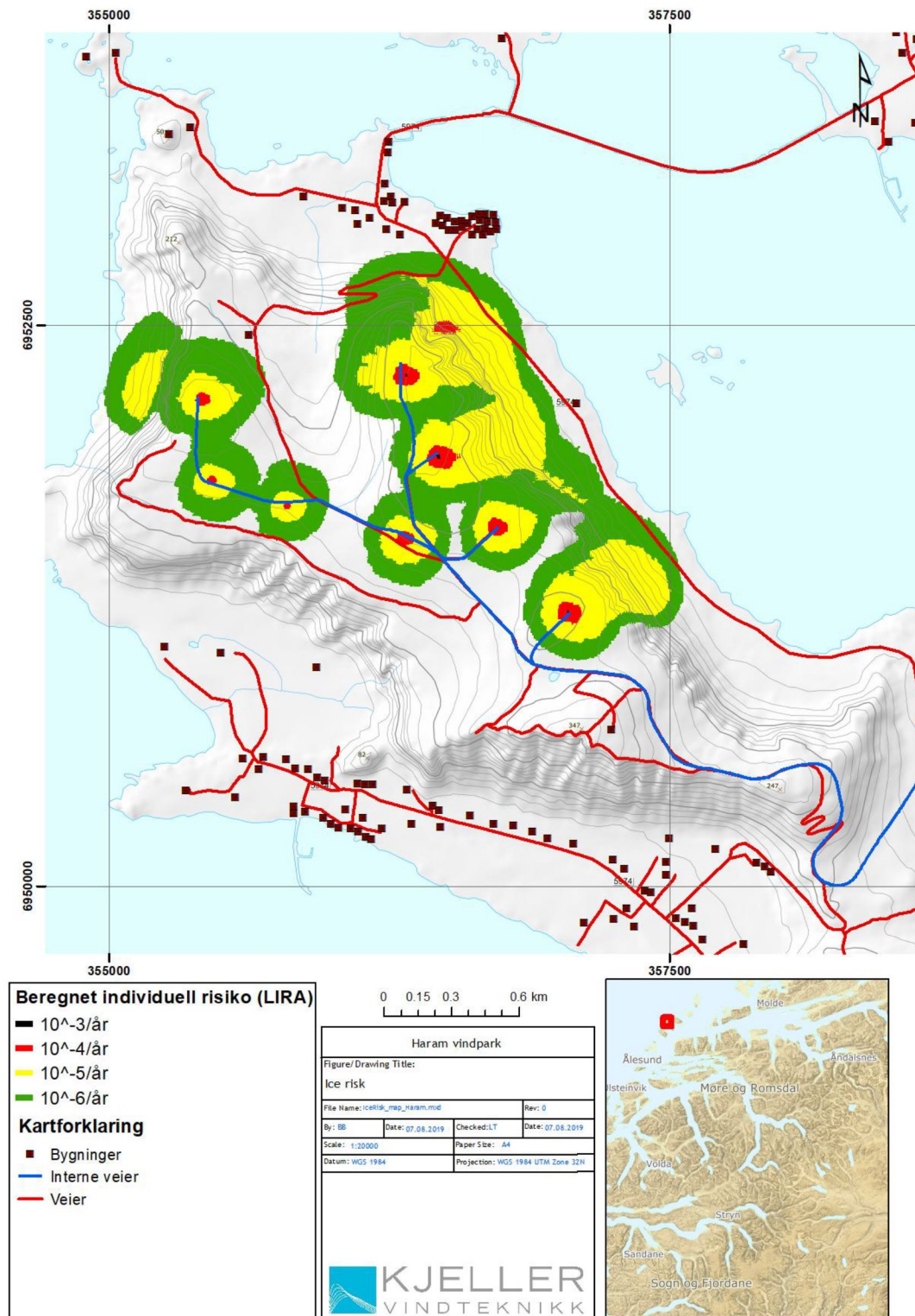
Table B-2 Comparable risk for driving a car in Norway and suggested acceptance criteria from the Norwegian Directorate for Civil Protection (DSB) combined from all sources at facility. PLL is the probability for loss of life per annum and IRPA is the individual risk for fatality per annum.

	Group Risk (PLL)	Individual Risk (IRPA)
Risk fatal road accident (Norway 2017)		2×10^{-5}
Suggested risk acceptance criteria Norway (DSB)		
3. person (public)	1×10^{-4}	2×10^{-7}
2. person (guests)		3×10^{-6}
1. person (trained service personnel)		4×10^{-5}

Table B-3 Example for individual and societal risk criteria (International guideline, 2018) and Norwegian Directorate for Civil Protection (DSB) (bottom line).

Risk value [1/a]		Evaluation
Societal risk (without risk aversion)	Individual risk	
$> 10^{-3}$	$> 10^{-5}$	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.
$< 1 \times 10^{-5}$	$< 1 \times 10^{-7}$	Risks are lower than risks people are exposed to in normal life.
$< 1 \times 10^{-4}$	$< 2 \times 10^{-7}$	Typical risk acceptance criteria in Norway third person all sources (Norwegian Directorate for Civil Protection, DSB).

Appendiks C - Risikokart



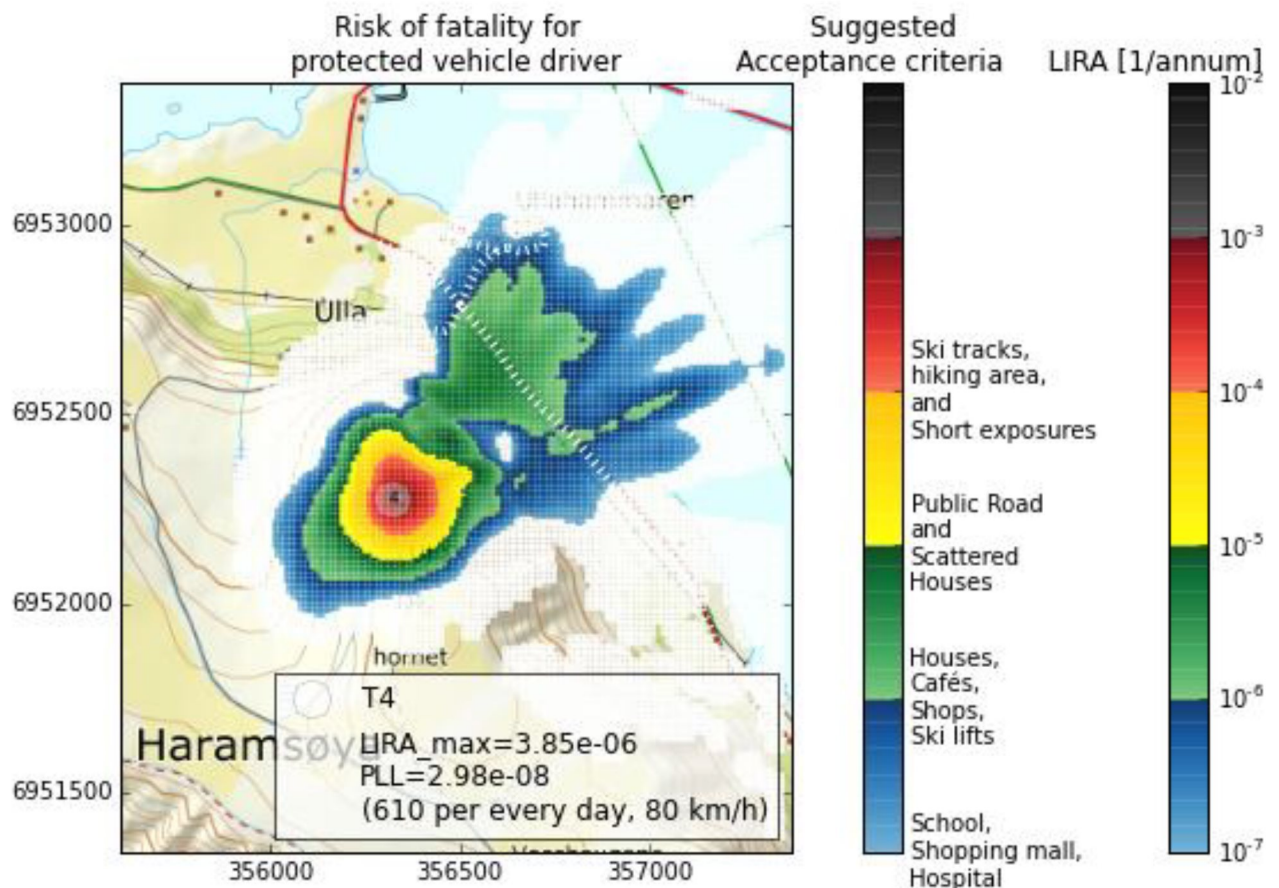
Figur C-1 Risikokonturer for en ubeskyttet person som er permanent til stede.

Biltrafikk Fylkesvei 150

Det er utført en detaljert beregning for Fylkesvei 150 der den passerer vindparken i nord. Dette er gjort ved og blant annet å ta hensyn til terrenget på en mer detaljert måte. I tillegg har vi beregnet og inkludert risikoen for at mindre isbiter som normalt ikke er farlige, kan forstyrre trafikken.

Grupperisikoen forbundet med trafikkulykke som kan forårsake død blant de 610 bilene (Statens Vegvesen) som passerer per døgn på Fylkesvei 150 (Ullavegen) er konservativt beregnet til 3×10^{-8} . I dette tallet er det tatt hensyn at mindre isbiter som i utgangspunktet ikke kan skade en fører direkte allikevel indirekte kan forstyrre bilføreren i så stor grad at de mister kontroll over kjøretøyet ved treff i frontruten. Det antas at en dødsulykke kan forekomme i en andel av de tilfeller der fører således kan miste kontroll av kjøretøyet. Det presenterte risikotallet er en kombinasjon av denne indirekte effekten og den direkte effekten av at en stor nok isbit kan gå gjennom frontruten på en bil og skade bilfører.

Den beregnede risikoen for trafikkulykke i forbindelse med iskast på vei er betydelig lavere enn risikoakseptkriteriet $PLL = 1 \times 10^{-5}$ for mest eksponerte gruppe (se Appendix B).



Figur C-2 Detaljert beregning av risikotall og risikokonturer for biltrafikken på Fylkesvei 150 (Ullaveien) fra turbin 4.

Appendiks D - Risikohåndteringsstrategier

Foreningen Svensk Vindenergi presenterte følgende liste med tiltak på Winterwind (2016)

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 includes 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 effect 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 necessary 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*