

Rapportnummer KVT/REB/2017/R069 - Rev1	Dato 24.08.2018
Buheii, Kvinesdal kommune, Vest-Agder IceRisk: Sannsynlighet for iskast fra turbiner	Klassifisering Begrenset til kunde
	Utgave nummer. 1
Kunde Buheii Vindkraft AS	Antall sider 27
Kundens referanse Dag Arild Hansen	Status Endelig
<p>Formål</p> <p>Denne rapporten presenterer IceRisk-beregninger for Buheii vindpark i Kvinesdal i Vest-Agder, Norge. Beregningene er gjort av Kjeller Vindteknikk på oppdrag for Buheii Vindpark AS.</p> <p>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 og sikkerhetsavstander for de aktuelle turbintypene er gitt i eget delkapittel.</p> <p>Denne rapporten er kvalitetssikret og gjennomgått etter Kjeller Vindteknikk kvalitetsstyringssystem.</p>	
<p>Forbehold</p> <p>Selv om det i arbeidet med denne rapporten, så langt vi kjenner til, er benyttet oppdaterte analysemetoder, og vi i vårt arbeid forsøker å gi et så godt resultat som mulig, kan Kjeller vindteknikk AS ikke holdes ansvarlig for resultatene i rapporten eller for framtidig bruk av denne, og heller ikke for eventuelle direkte eller indirekte tap som skyldes eventuelle feil i rapporten.</p>	

Revisjonshistorie				
Utgave	Dato	Antall eksemplar	Kommentar	Distribusjon
0	28.10.2016		Draft	Elektronisk
1	24.08.2018		Endelig med revidert layout	Elektronisk

	Navn	Dato	Signatur
Utført av	Rolv Erlend Bredesen		 Rolv Erlend Bredesen 2018.08.24 15:14:26 +02'00'
Kontrollert av	Øyvind Byrkjedal		 Øyvind Byrkjedal 2018.08.24 15:19:14 +02'00'
Godkjent av	Knut Harstveit		 Knut Harstveit 2018.08.24 15:36:59 +02'00'

Innhold

1	SAMMENDRAG	3
2	INNLEDNING	5
3	BESKRIVELSE AV OMRÅDET	6
4	ISINGSFORHOLD FOR BUHEII.....	7
	4.1 KLASSIFISERING AV ISINGSFORHOLD PÅ BUHEII	8
	4.2 STØRRELSSEFORDELING AV ISBITER	8
	4.3 VINDFORDELING VED METEOROLOGISK ISING, INSTRUMENTELL ISING OG VED SMELTING	11
5	SANNSYNLIGHETSKART FOR ISKAST	12
	5.1 BEREGNING AV ISKAST FRA EN VESTAS V150 4.2MW TURBIN	12
	5.2 SANNSYNLIGHETSFORDELING FOR ISKAST I BUHEII VINDPARK	15
	5.3 HÅNTERING AV RISIKO, SIKKERHET	17
	5.4 SIKKERHETSAVSTAND FRA EN STANSET TURBIN	19
	5.5 SANNSYNLIGHET FOR ISNEFALL FRA STOPPET TURBIN	20
	5.6 SANNSYNLIGHETSNIVÅ FOR ISKAST VED BRUK AV ET AVISINGSSYSTEM	20
6	BIBLIOGRAFI.....	22
	APPENDIKS A - MESO-SCALE MODEL WRF.....	24

1 Sammendrag

Kjeller Vindteknikk har utviklet modellverktøyet IceRisk for å kartlegge sannsynligheter for isnedfall og iskast fra turbiner, kraftledninger og master (Bredesen 2015, IWAIS). Dette verktøyet har tidligere blitt benyttet til blant annet å kartlegge sannsynlighet for farlig iskast og isnedfall for videre risikoanalyser utført av tredjepart. Analysen presentert her gir blant annet grunnlag for videre bruk av verktøyet IceRisk for å kunne gi døgnprognoser av risikosoner rundt turbinene i Buheii Vindpark.

Det er utført analyser av hyppigheten av atmosfærisk ising i vindparken Buheii i Kvinesdal kommune i Vest-Agder. Hensikten er å beregne sannsynligheten for iskast i området i og omkring vindparken. Vindparken vil når den er ferdig utbygd bestå av 19 turbiner av typen Vestas V150 4.2 MW. Turbinene er lokalisert 721-785 m over havet. Med 105 m navhøyde og en rotordiameter på 150 m vil turbinbladene til de høyest plasserte turbinene nå opp til 965 m. Effektiv isingshøyde (navhøyde + 1/3 rotor diameter) for turbinene er mellom 876 og 940 over havet.

Basert på andel av tiden med beregnede ismengder over 500 g/m på et standardlegeme i tidligere effektiv isingshøyde (129 m) av antas det at det i gjennomsnitt danner seg farlige isbiter i 20 % av tiden for turbinene i parken. Dette fordeler seg i gjennomsnitt på 23 episoder per vinter for turbinene i parken.

Basert på en forenklet sikkerhetsregel¹ for vindturbiner forventes det ikke iskast utenfor en sone på 382 m fra hver turbin ved Buheii (ved flatt terreng). Mer detaljerte beregninger for Buheii viser imidlertid at lengste kasteavstand kan komme opp mot 350 m (ved flatt terreng) for de største isklumpene hvis turbinene opererer med full effekt (14 rotasjoner i minuttet). Det aller meste av isen forventes å lande rett ved turbinene med avtakende sannsynlighet mot ytterkant av sonen. Foreløpige resultater tyder imidlertid på at en sikkerhetsavstand på 270 m bør anbefales ved Buheii for gjennomsnittsturbinen i parken. Ved denne avstanden (270 m fra turbinen) forventes det en gjennomsnittelig returperiode på 1000 år mellom hver gang et iskast med anslagsenergi over 40 J treffer et område på størrelse 1 kvadratmeter (se Bredesen, 2016). For Buheii er det beregnet en sikkerhetsavstand som funksjon av vindhastighet i navhøyde for en stanset turbin. Analysen har vist at sikkerhetsavstanden kan reduseres hvis for eksempel turbinen stanses når det er isingsforhold. Ved bruk av et avisingsssystem anslås det grovt at sikkerhetsavstanden for den farlige 1000 års isbiten kan reduseres fra 270 m til 220 m.

De beregnede sannsynlighetene for at farlige isbiter² fra turbinene treffer ulike områder ved Buheii er vist i Figur 1 og oppsummert i Tabell 1. En sannsynlighet på 10^{-4} [treff/kvadratmeter/år] betyr at det går 10 000 år mellom hver gang en isbit treffer et gitt på område på størrelse 1 kvadratmeter.

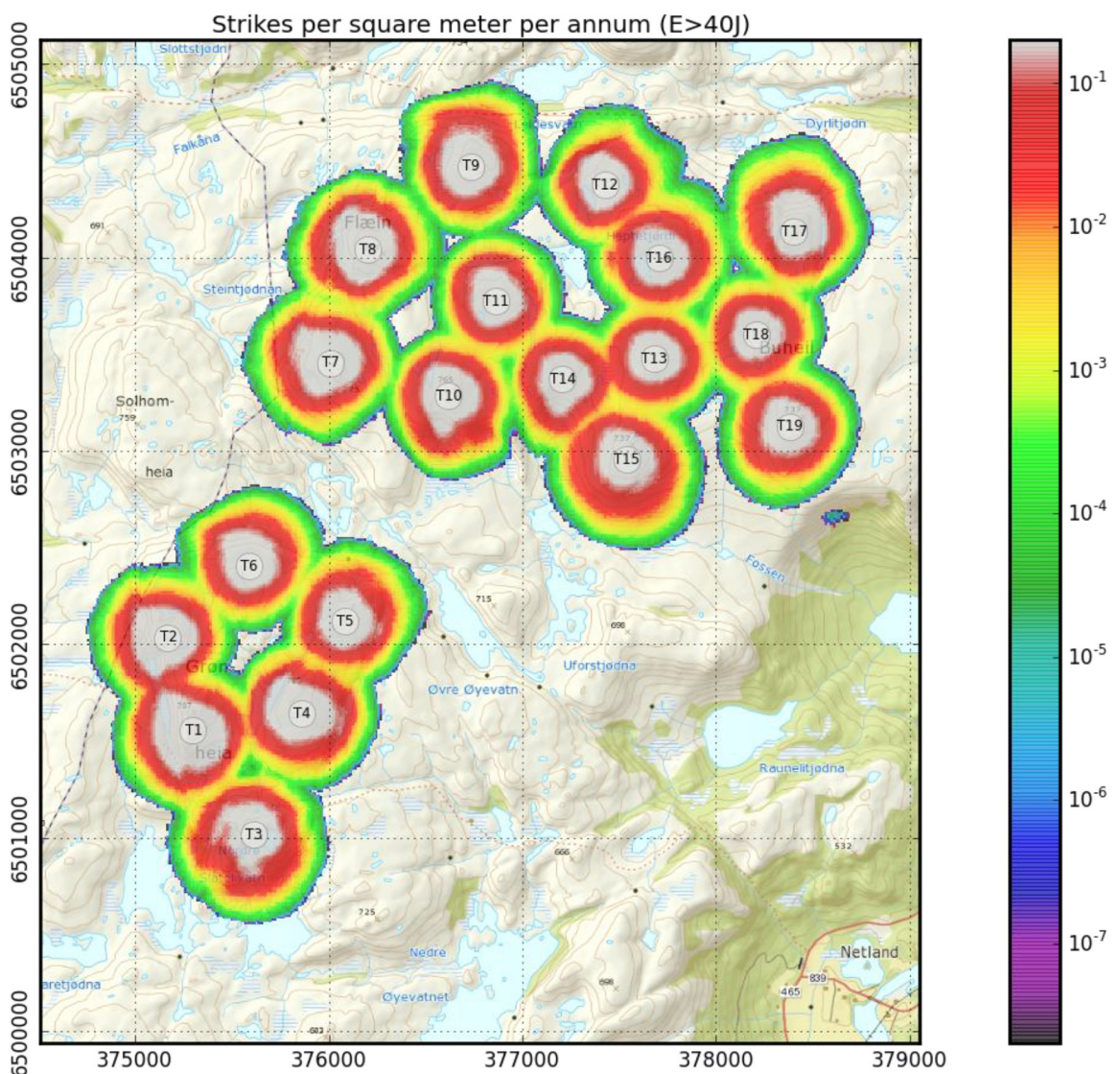
Det bør settes opp et skilt ved alle naturlige adkomstveier om at det er fare for isnedfall. Dette gjelder både kjøreveier og eventuelle turstier. Det bør også lages egne sikkerhetsrutiner for dem som arbeider i vindparken. I tillegg bør flere tiltak for å redusere risikoen vurderes.

¹ Sikkerhetsregelen (Morgan, 1997) gir maksimal kasteavstand = $1.5 \times (D + h)$. Der D er rotordiameteren og h er navhøyden. For Buheii vindpark er det foreslått turbiner med D=150 m og h=105 m Maksimal kasteavstand blir da 382 m.

² Beregnet som fritt roterende isterninger med anslagsenergi over 40 J etter metodikk beskrevet i Bredesen (2015, IWAIS).

Tabell 1. Sammenheng mellom returperiode for treff per kvadrat meter og sannsynlig for treff per kvadratmeter per år med en anslagsenergi over 40 J. Avstand angir ved hvilken avstand oppgitt sannsynlighet inntreffer som gjennomsnitt av alle sektorer rundt gjennomsnittsturbinen i parken (V150). For gjennomsnittsåret.

Returperiode	Sannsynlighet	Avstand
100 år	10^{-2}	220 m
1 000 år	10^{-3}	270 m
10 000 år	10^{-4}	320 m
100 000 år	10^{-5}	330 m
1 000 000 år	10^{-6}	340 m



Figur 1 Sannsynlighetskart (antall treff per kvadratmeter per år) for iskast fra turbiner ved Buheii for returperioder mellom 1 og 10 000 00 år for treff per kvadratmeter. Isbiter som treffer bakken med en anslagsenergi under 40 J er ikke presentert i kartet. Turbinene er angitt nummerert.

2 Innledning

Kjeller Vindteknikk har utført en studie av isingsforholdene for Buheii vindpark i Kvinesdal kommune i Vest-Agder, 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. I denne delen av Norge er det sjelden at ising oppstår som et resultat av underkjølt regn.



Figur 2 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.

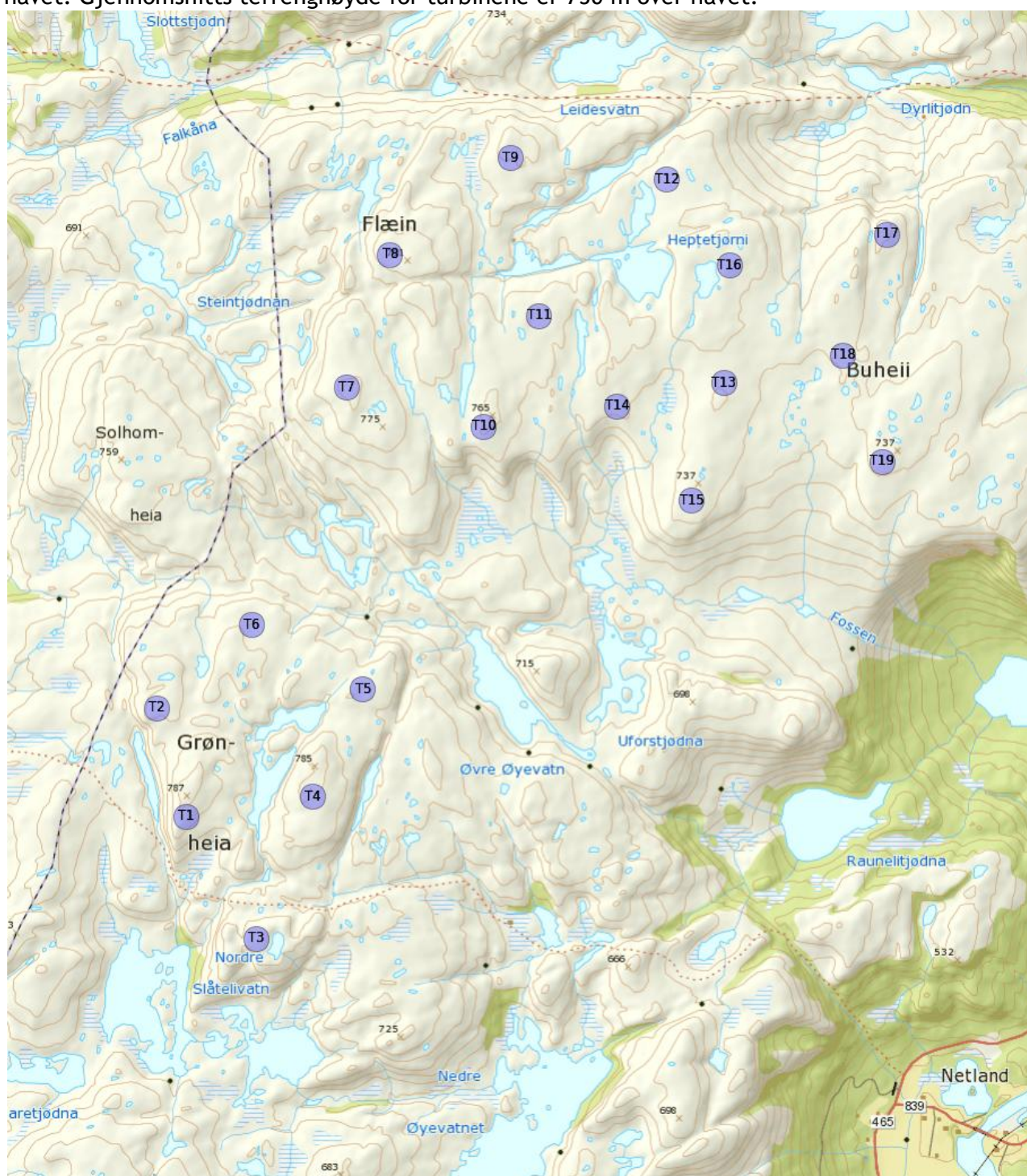
På en vindturbin vil det også legge seg is under slike værforhold. Dersom turbinen roterer samtidig som isen akkumuleres, vil normalt isen legge seg på fremkanten av vingen som vist i Figur 2. Denne isen vil kunne redusere produksjonen til turbinen, eller i verste fall stoppe den helt.

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 Buheii og hvor ofte og hvor langt denne isen kan bli kastet. En detaljert trajektoriemodell har blitt benyttet for å lage statistikk på også hvor farlig iskast er for personell og 3dje person.

3 Beskrivelse av området

Kart over området er vist i Figur 3 med 19 V150 turbiner. Med 105 m navhøyde og en rotordiameter på 150 m vil turbinbladene til de høyest plasserte turbinene nå opp til 965 m over havet. Terreng høyden til laveste og høyeste turbin er henholdsvis 721 m og 785 m over havet. Gjennomsnitts terreng høyde for turbinene er 750 m over havet.

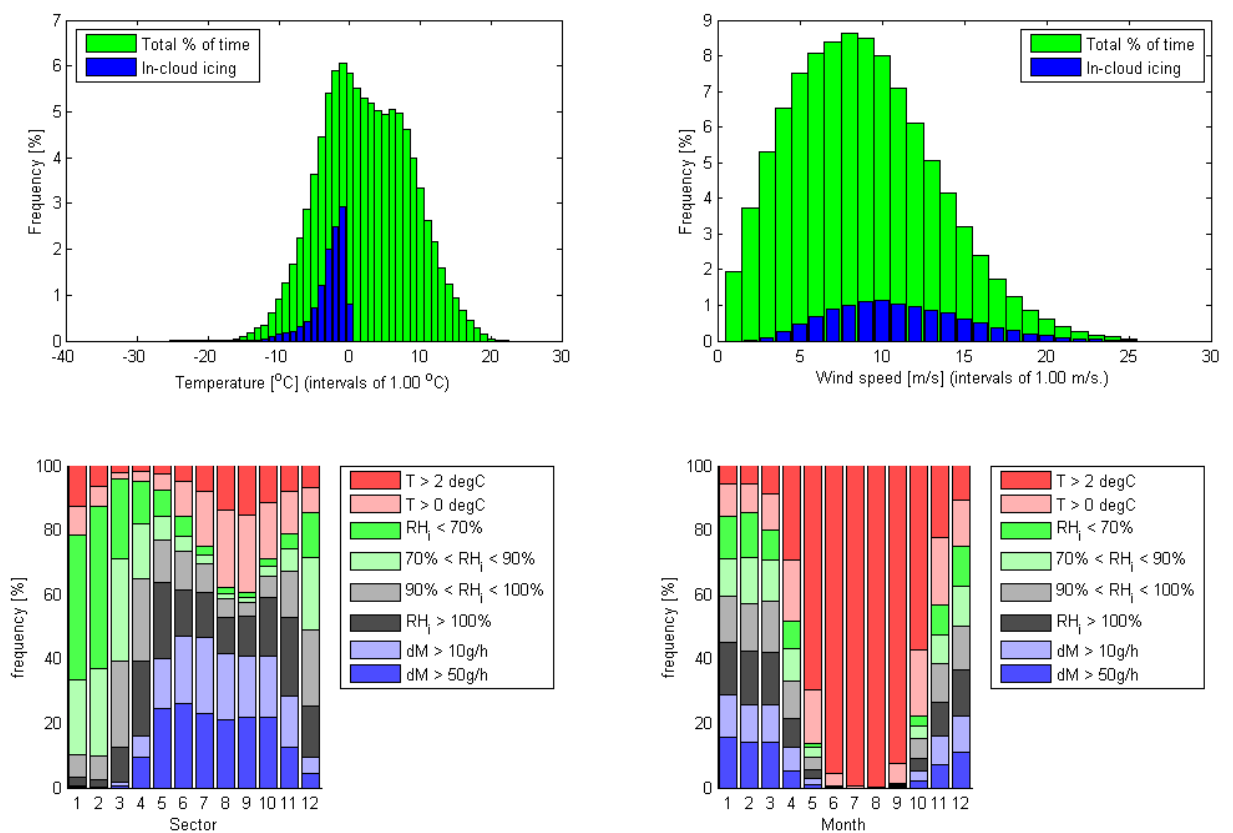


Figur 3 Kart over Buheii vindpark med 19 V150 turbiner (UTM32).

4 Isingsforhold for Buheii

Beregningene for isingsforhold ved Buheii som er presentert i dette kapittelet er basert på beregninger med tidligere layout (V126) med effektiv isingshøyde på 129m. Dette er justert til ny layout (V150) ved beregning av sannsynlighetskart og kasteavstand samt vurdering av risiko som er presentert i Kapittel 5.

For turbinene ved Buheii kan det være kuldegrader i rotor isingshøyde i alle måneder unntatt juli og august, med isingsforhold hovedsakelig fra og med oktober til og med mai.



Figur 4 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 (sektor 6 er fra sør), nederst til høyre fordelt på måned.

Fra Figur 4 ser vi at under forhold med meteorologisk ising (isvekst) ligger modellert temperatur mellom 0 og -10 °C mens vindstyrken ligger mellom 1 og 25 m/s ved Buheii. I modellen er vindretningen under forhold med ising (nedre venstre) med isvekstrate 10 g/time/m (lyseblå) og kraftigere isvekst 50 g/time/m (mørkeblå) fordelt på alle vindretninger bortsett fra ved vind fra nord til øst-nord-øst (sektor 1-3). Isingen er jevnt fordelt på vintermånedene november til april men kan forekomme sjeldne ganger også i mai og oktober. Dette er vist som blå stolper ($dM > 10 \text{ g/hr}$ og $dM > 50 \text{ g/hr}$) nede til høyre i Figur 4. Det er normalt ikke ising i perioden fra juni til september. 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 da bladene beveger seg raskt. 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 hyppig for sektorene fra nord-nord-vest til sør-øst. Andel av tiden hvor det er smelteforhold (" $T > 0 \text{ degC}$ " og " $T > 2 \text{ degC}$ ") er markert med røde stolper i figuren.

4.1 Klassifisering av isingsforhold på Buheii

I rotor-isingshøyde for tidligere layout, 129 meter over bakken, er det forventet meteorologisk ising i 10.6-13.3 % av tiden tilsvarende 39 - 49 dager, med et snitt på 42 dager per år for gjennomsnittsturbinen.

Benytter vi klassifiseringen fra IEA Wind (2012) for bruk i vindkraftsammenheng (vist i Tabell 2) får vi at Buheii klassifiseres i isklasse 5. Denne klassen tilsvarer ekstrem ising for turbinene i parken.

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

IEA Wind isklasse	Meteorologisk ising [% av året]	Instrument ising [% av året]	Produksjonstap [% av årlig produksjon]
5	>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

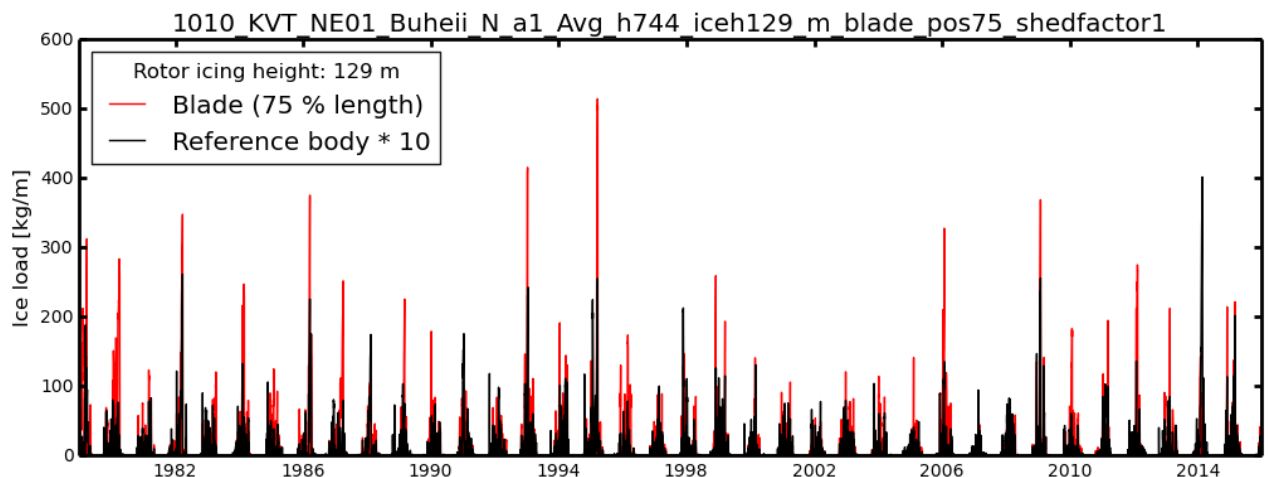
For vindturbiner på Buheii forventes ising i form av "skyrim". Denne istypen dannes på framsiden av rotorblad når skyvann fra lave skyer (tåke) fryser på en kald turbinvinge om vinteren. "Skyrim" (rime) har vanligvis en tetthet på 500 kg/m^3 . Dersom isingen skjer nær 0°C , eller det er store dråper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

Det er også utført beregninger av mengden is. Dette gjøres normalt på et "standardlegeme". Dette er et objekt som er minst 0.5 m langt og har en diameter på 0.03 m, står vertikalt og roterer (ISO 12494). Vi har benyttet WRF modelldata for perioden 1979-2015 for beregningene. Modellen og metode for beregning av mengden av is er beskrevet i Appendix A. Vi har beregnet største ismengde på standardlegeme i dataserien til 40 kg/m (se Figur 6).

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 isterner). Et eksempel på en isbit av denne størrelsen vises øverst til venstre i Figur 6 (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 6 så ser vi at det i parken kan forekomme isbiter større enn de vist nederst til venstre (Ice Class Rime 5, $2.8\text{-}5.0 \text{ kg/m}$). Bruker vi terskelverdien for ising på 500

g/m på et standardlegeme (ref Figur 6), kan vi si noe om hvor ofte det danner seg større isbiter på turbinene ved Buheii. I effektiv isingshøyde for V126 layouten beregner vi at vi når denne terskelverdien 20 % av tiden og opp mot 23 ganger per år. Ellers får vi i 7 % av tiden og opp mot 5 ganger per år en islast på 5 kg/m på standardlegemet. Det er også over 2 episoder per vinter med ismengde over 10 kg/m på standardlegemet, tilsvarende 3 % av tiden. Største ismengde i løpet av den 37 år lange dataserien er for standardlegemet er beregnet til 40 kg/m.



Figur 5 Akkumulert ismengde på standard legeme (fritt roterende vertikal stav med diameter 3 cm) i sort (med skalafaktor 10) og isoppbygging ved 75 % av lengden til turbinbladet, som har maks rotasjonshastighet 16.3 rotasjoner i minuttet, i rødt (V126).

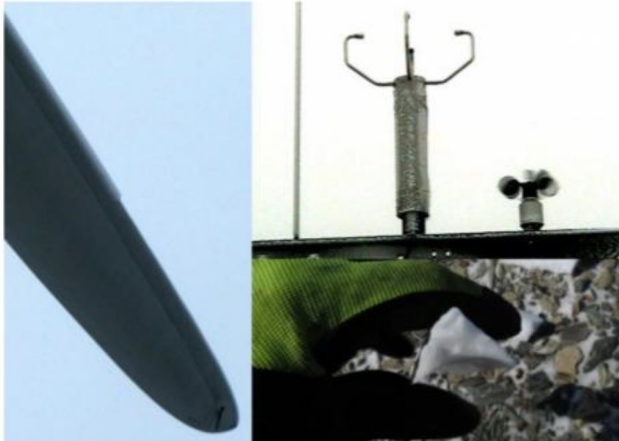
Beregninger med en forenklet isoppbyggingsmodell (Bredesen (2015, IWAIS)) for turbintypen V126 viser at det totalt kan kastes opp mot 120 tonn med is i løpet av en gjennomsnittsvinter (173 tonn for høyeste og 103 tonn for laveste V126 turbin). Av totalt 120 000 kg med is som bygges opp per turbin sublimerer (fordamper) 30 000 kg per vinter.³ Basert på løpende valideringer og sammenligninger kan det på et senere tidspunkt fremstilles pro-rata faktorer for skalering av sannsynligheter og ismengder beregnet med IceRisk metodikken. I presenterte sannsynlighetskart er en pro-rata faktor på 4 valgt etter sammenligninger av IceRisk med IceThrower-databasen over kastede isbiter (Bredesen et al 2017) og gjennomsnittsturbinen i ny layout. Ismengdene som kastes fra hver enkelt V150 turbin i den oppdaterte layouten har blitt estimert basert på tidligere resultater for V126 turbiner interpolert etter rotor isings høyde.

³ Beregningen er gjort for en avstand av 75 % av bladets lengde målt fra sentrum av rotoren og det antas at rotasjonshastigheten til turbinbladet blir redusert når akkumulert ismengde går over 5 kg/m. Største ismengde på turbinblad er for turbinen beregnet til over 500 kg /m ved 75 % av bladets lengde. Ismengdene ved 75 % av bladets lengde antas å tilsvare gjennomsnittet langs bladet. En slik ismengde er urealistisk som en enkelt hendelse, men hvis turbinen ikke stanser kan total mengde som akkumuleres og kastes være riktig, da fordelt på mange iskast.

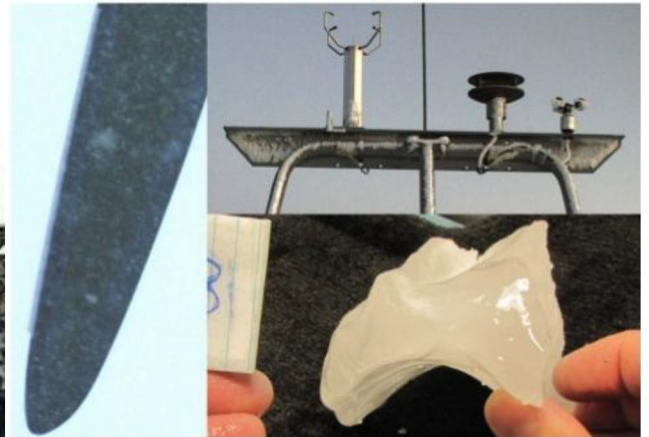
TechnoCentre *éolien*

Wind Energy TechnoCentre

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



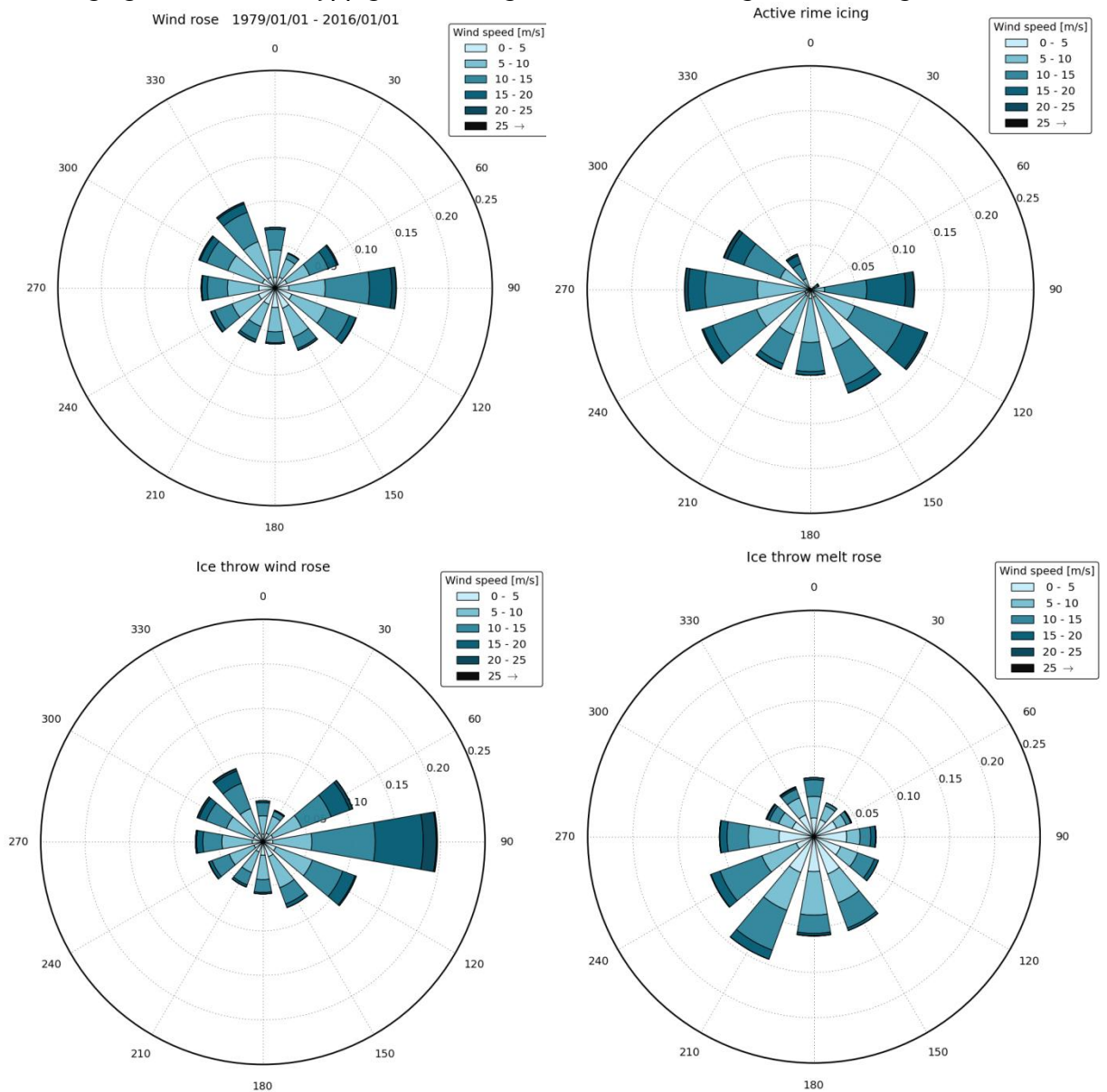
Ice Class Rime 5 (ICR5) – 2.8 to 5.0 kg/m



Figur 6 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

Modellert vindrose for gjennomsnittsturbine ved Buheii er vist øverst til venstre i Figur 7. Dataene er beregnet fra 37 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 øst, til vest-nord-vest med klokka og hyppigst fra vest og øst-sør-øst. Nede til venstre i Figur 7 vises vindrosa for tidspunkt hvor det er beregnet is på mer enn 1 kg/m på vindturbinbladene (instrumentell ising). Vindrosa for instrumentell ising viser at østavvinder med tilstøtende sektorer er fremtredende. Det er minst instrumentell ising i kombinasjon med vind fra nord og nord-nord-øst. Nederst til høyre i Figur 7 vises vindrosa for når is vil smelte og falle av et turbinblad. Under smelting ser vi mindre vind fra nord-østlige sektorer men mest fra vest-sør-vest og tilstøtende sektorer. Kombinasjonen smelting og sterk vind er hyppigst for sørlige til vest-sør-vestlige vindretninger.



Figur 7 Langtids modellert vindrose ved øverste turbin i parken (øvre venstre). Vindrose for når det er aktiv ising med intensitet ≥ 10 g/time/m vises i øverst til høyre (meteorologisk ising), mens vindrose for ismengde på turbinvinge er over 1 kg/m på 75 % radius av vinge vises nede til venstre (~instrumentell ising). Nede til høyre vises vindrosen for smelting av is fra turbinblad.

5 Sannsynlighetskart for iskast

I dette kapitlet presenteres sannsynlighetskartet (Figur 1) for iskast i Buheii vindpark. Kartet er beregnet ved å kombinere den underliggende vindstatistikk 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 (Figur 1). I tillegg er trajektoriemodellen benyttet for å skille mellom farlig og ufarlig is-kast/nedfall basert på den beregnede anslagsenergien (se Bredesen 2015/2016).

Beregnete sikkerhetsavstander for den aktuelle turbintypen ved Buheii er gitt i neste delkapittel.

5.1 Beregning av iskast fra en Vestas V150 4.2MW turbin

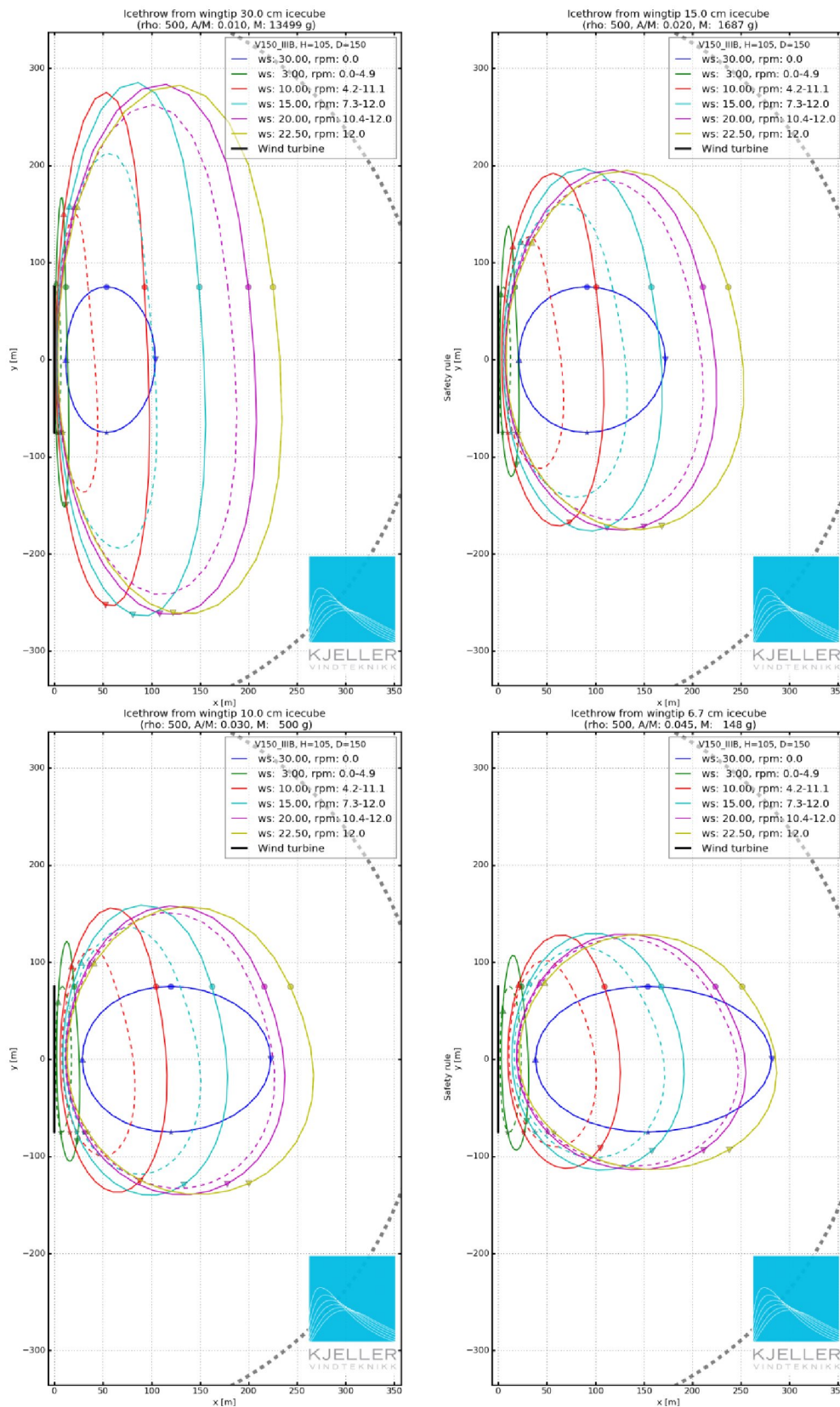
Beregninger gjort for Vestas V150 4.2 MW IEC:IIIB turbin med navhøyde 105 m og rotordiameter 150 m. Høyeste rotasjonshastighet for turbinen er 14 rpm. Beregninger med trajektoriemodell (Biswas 2012) viser forventede kastelengder for isbiter av ulik størrelse og under ulike vindforhold (Figur 9). Figuren viser kastelengder for de største isbitene vi kan forvente i figurene øverst til venstre (13.5kg). Mens kastelengder for de minste isbitene er vist nede til høyre (150g). Mindre isbiter enn det som er vist anses som ufarlige mens større isbiter er mindre sannsynlige ved Buheii. I forhold til forrige utgave av rapporten med beregninger for Vestas V126 turbiner (Figur 9) ser vi at kastlengdene til siden har gått ned, mens isen kan drive like langt eller noe lengre med vinden for de lettere isbitene. Kastelengdene er vist i forhold til den generelle sikkerhetsreglen⁵ ("safety rule") som for V126 turbinen vil være 320 m, mens den er 382 m for V150 turbinen. Vi ser at det for enkelte kombinasjoner av vind isbitstørrelse, tetthet og form kan forekomme isbiter som kastes lenger enn den generelle sikkerhetsregelen for V126 turbinen, mens sikkerhetsregelen⁵ er urimelig konservativ for den høyere V150 turbinen.

Det bemerkes at største sikkerhetsavstand ved Buheii avgjøres av hvor store isbiter som kan kastes fra bladet under drift. De beregnede sikkerhetsavstander gjelder for henholdsvis CdAoM-faktorer⁶ med verdi 0.01, 0.02, 0.03, og 0.045. Dette tilsvarer ved istetthet 800 kg/m³ en vekt fra 5 kg og nedover for en fritt roterende isterning. Hvis turbinen kan rotere med full rotasjonshastighet og samtidig kaste en isbit med formfaktor 0.008 fra spissen av turbinbladet (9 kg isterning med tetthet 850 kg/m³) er lengste kastavstand beregnet til underkant av 350 m for V150 og 360 m for V126.

⁵ Safety rule: $(H+D)^{3/2}$, der H er navhøyde og D er rotor diameter.

⁶ 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.

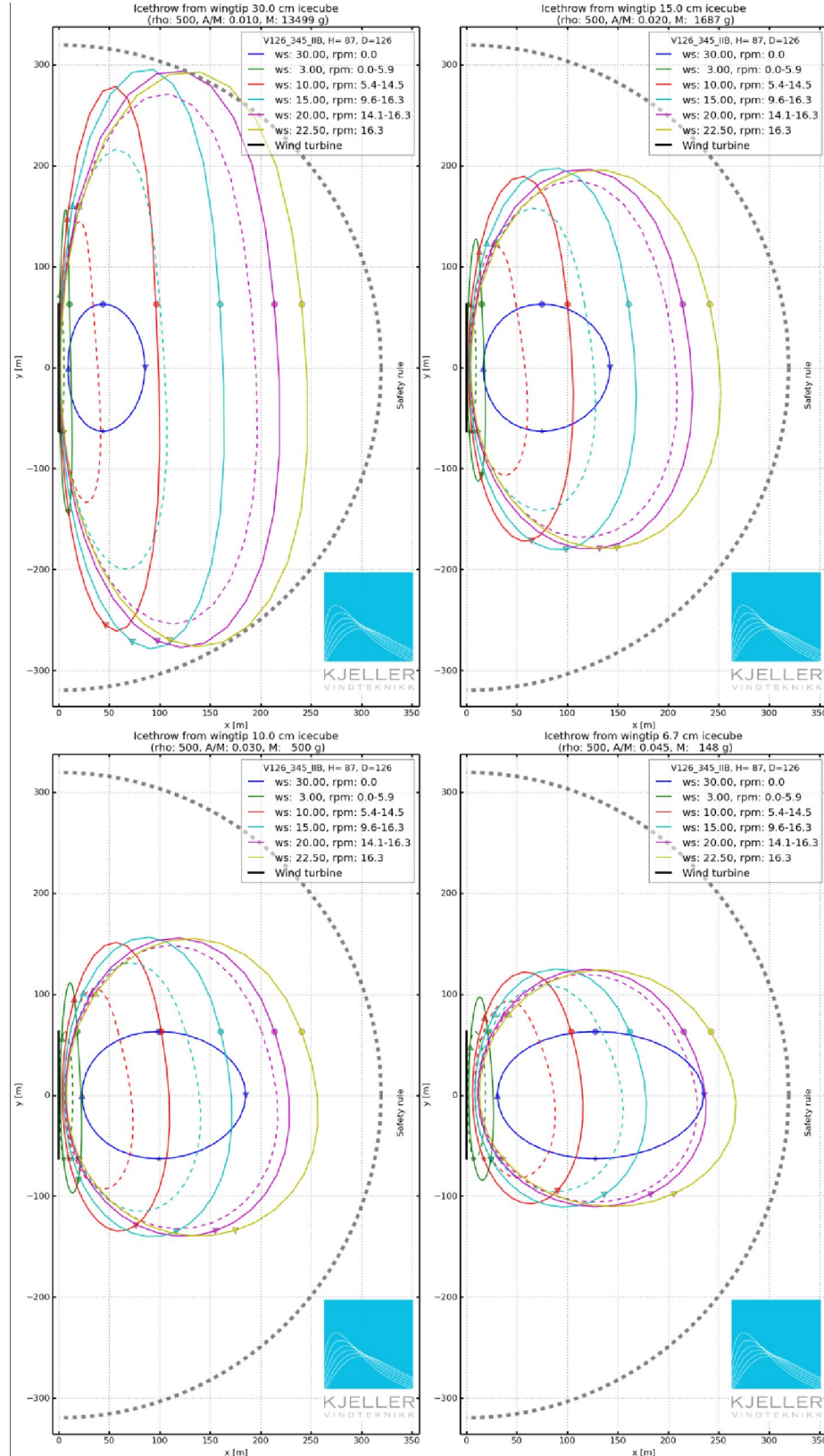
Vestas V150 4.2 MW IIIB



Vindretning er fra venstre mot høyre og sort linje viser turbinens posisjon og utstrekning sett rett ovenfra. Nedfallsonene for 4 forskjellige isbitstørrelser vises som 4 separate plott etter minkende størrelse og vekt. Blå sirkel viser isnedfall fra en turbin som har stoppet mens det blåser 30 m/s i navhøyde. Heltrukne linjer viser hvor istæringer som kastes fra vingespiss lander når en turbin opererer uten redusert rotasjonshastighet. Stiplet linje viser tilsvarende nedslagsfelt når isingen får turbinene til å rotere saktere. Markørene viser bevegelsesretningen til turbinvingen (vingen beveger seg langs +y-aksen når den er lavest (vist som trekant opp)). Grå stiplet linje viser avstand gitt fra sikkerhetsregelen $(H+D)^{3/2}$ (382 m). Rød, lyseblå, lilla og gule farger markerer nedslagssoner når det blåser henholdsvis 10, 15, 20 og 22.5 m/s i navhøyde. Ved tetthet 800 kg/m³ tilsvarer de beregnede nedslagssonene istæringer av størrelse 5kg (19 cm), 600 g (10 cm), 200 g (6 cm) og 60 g (4 cm). Hvis tettheten til isbiten er 500 kg/m³ tilsvarer nedslagssonene istæringer av størrelse 13.5 kg (30 cm), 1.7 kg (10 cm), 500 g (10 cm), og 150 g (6.7 cm). Det er antatt flatt terreng slik at kast kan gå lengre hvis det overhøyde mellom turbinposisjon og omgivelsene.

Figur 8 Beregnede soner for iskast av forskjellig størrelse fra vingespiss av en Vestas V150 4.2 MW. Denne turbinen har rotordiameter 150 m og navhøyde 105 m.

Vestas V126 3.45 MW IIB



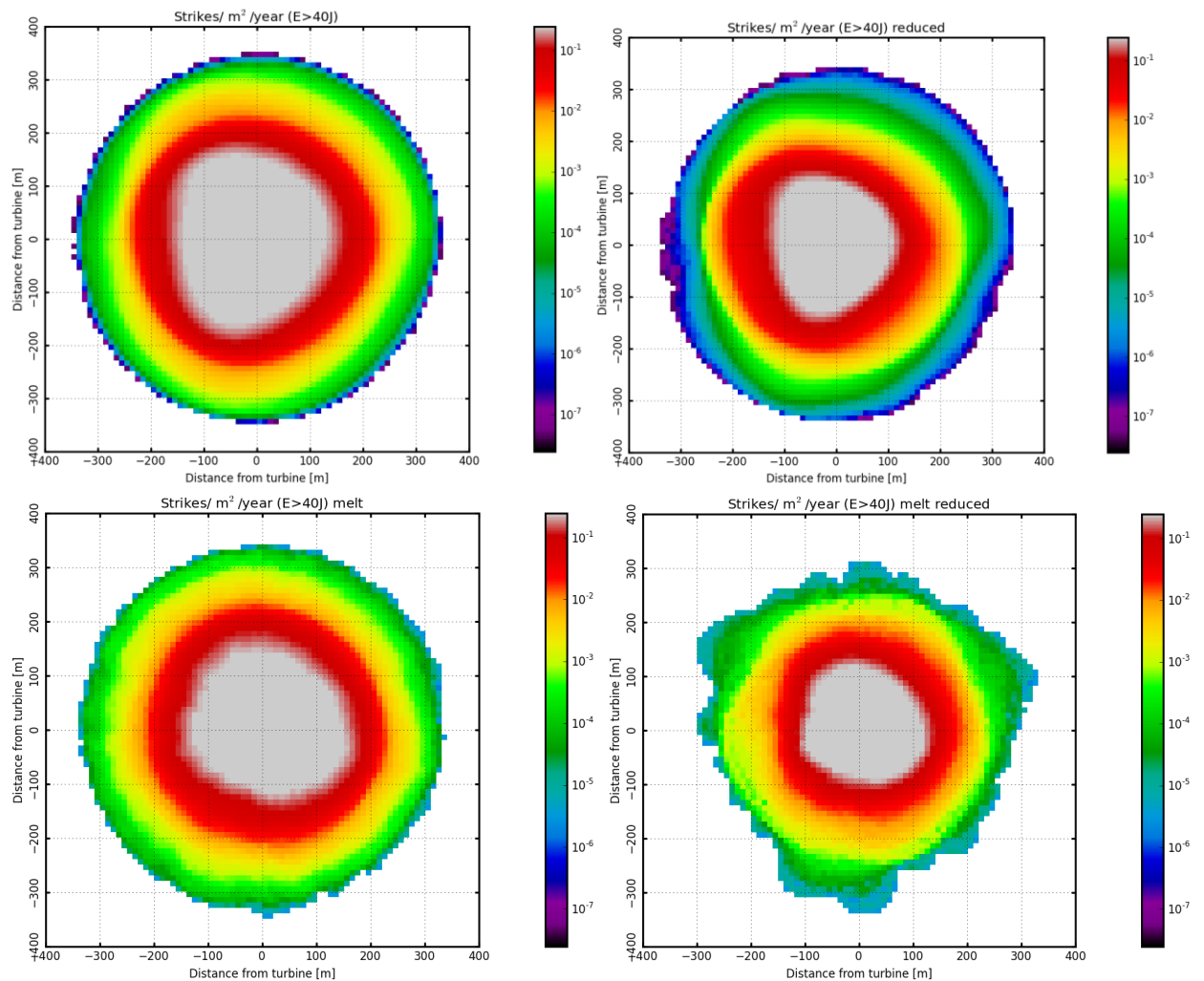
Vindretning er fra venstre mot høyre og sort linje viser turbinens posisjon og utstrekning sett rett ovenfra. Nedfallssonene for 4 forskjellige isbitstørrelser vises som 4 separate plott etter minkende størrelse og vekt. Blå sirkel viser isnedfall fra en turbin som har stoppet mens det blåser 30 m/s i navhøyde. Heltrukne linjer viser hvor isterner som kastes fra vingespiss lander når en turbin opererer uten redusert rotasjonshastighet. Stiplet linje viser tilsvarende nedslagsfelt når isingen får turbinene til å rotere saktere. Markørene viser bevegelsesretningen til turbinvingen (vingen beveger seg langs +y-aksen når den er lavest (vist som trekant opp). Grå stiplet linje viser avstand gitt fra sikkerhetsregelen (H+D)^{3/2} (320 m). Rød, lyseblå, lilla og gule farger markerer nedslagssoner når det blåser henholdsvis 10, 15, 20 og 22.5 m/s i navhøyde. Ved tetthet 800 kg/m³ tilsvarer de beregnede nedslagssonene isterner av størrelse 5kg (19 cm), 600 g (10 cm), 200 g (6 cm) og 60 g (4 cm). Hvis tettheten til isbiten er 500 kg/m³ tilsvarer nedslagssonene isterner av størrelse 13.5 kg (30 cm), 1.7 kg (10 cm), 500 g (6.7 cm), og 150 g (4 cm). Det er antatt flatt terreng slik at kast kan gå lengre hvis det overhøyde mellom turbinposisjon og omgivelsene.

Figur 9 Beregnede soner for iskast av forskjellig størrelse fra vingespiss av en Vestas V126 3.45 MW. Denne turbinen har rotordiameter 126 m og navhøyde 87 m.

5.2 Sannsynlighetsfordeling for iskast i Buheii vindpark

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 pga 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 scenarier med kombinasjon av full ytelse og redusert ytelse (redusert RPM) pga av ising på turbinene og kombinasjon av vindforhold med ismengder 1 kg/m is på turbinvingen og denne med samtidig smelting/shedding av is.



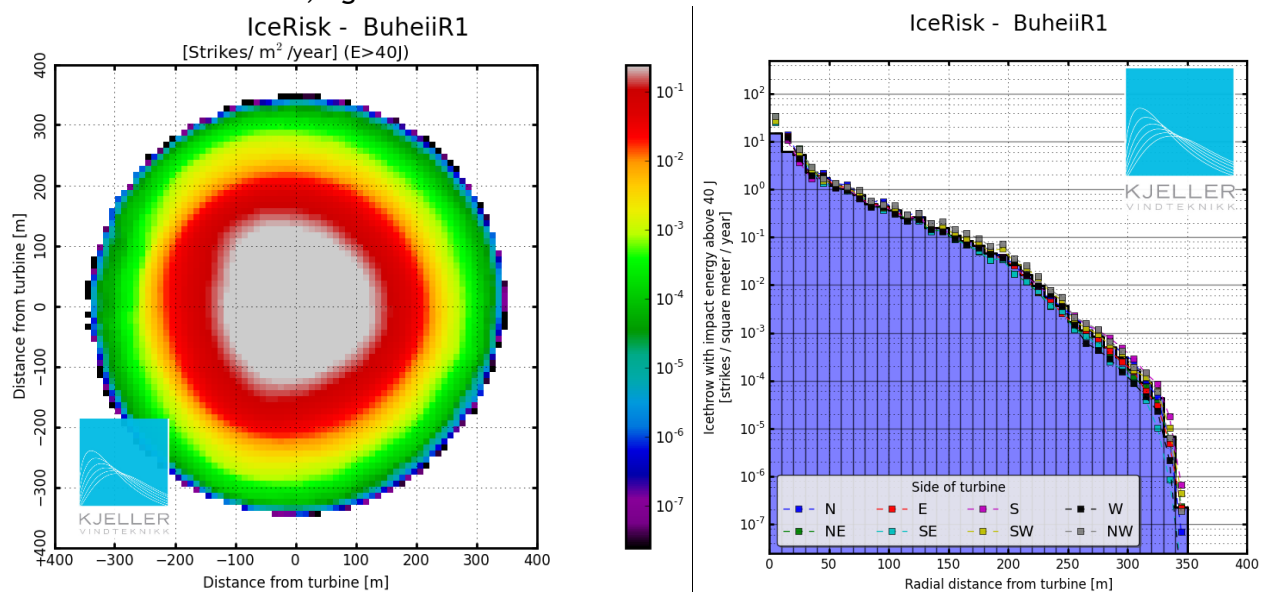
Figur 10 Over: turbin som roterer med full ytelse selv om det er is på bladet. Under: redusert ytelse på turbin pga av ising. Venstre: Isen slippes under vindforhold de siste 37 år der det sitter minst 1 kg /m is på vingen. Høyre: Ismengde på 1 kg/m på vingen med samtidig smelting/shedding.

Isbiter med anslagsenergi over 40 J kan ansees som farlige for personell (ref Bredesen (2015, IWAI), Bredesen (2014), Refsum (2015), og TNO Greenbook). Det er kun isbiter med anslagsenergi større enn denne grensa som er tatt med i beregningene. Dette 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. I Figur 10 vises

kombinert statistikk av nedslagssoner for farlige isbiter binget på 10x10 m gridceller gitt 4 forskjellige slippscenarier. I det endelige sannsynlighetskartet (Figur 1 og Figur 11) har vi gitt hver av disse 4 scenariene lik sannsynlighet samt tatt hensyn til overhøyde til omgivelsene rundt hver turbin. Det er også tatt hensyn til at det kastes flere isbiter for de højestliggende turbinene og færre for de lavestliggende. Vi antar at halvparten av iskastene vil forekomme når det er is på bladene og det er temperaturer over 0 grader hvor altså smelting foregår. Resten av iskastene antar vi vil foregå tilfeldig i perioder hvor det er mer enn 1 kg/m med is på bladet. Vi antar også at halvparten av kastene kommer når turbinene er i normal drift og roterer med normal hastighet (RPM). Rotasjonshastigheten vil ofte bli redusert når det er is på bladene. Vi antar at andre halvparten av kastene kommer når turbinen opererer med redusert rotasjonshastighet.

For smelte-scenariene vist til høyre i Figur 10 er det benyttet vindstatistikk fra 1186 timesverdier i den 37 år lange tidsserie hvor ismengden er over 1 kg/m vinge og det samtidig forekommer smelting. Ujevnhetene i figurene skyldes det lavere antallet med unike smelteepisoder. Vindstatistikken under forhold med minst 1 kg/m is på vingen har 74 767 sampler over 37 år og gir en jevnere fordeling (vist til venstre i Figur 10). For alle 4 scenariene er det svært usannsynlig at farlige isbiter kan kastes over en avstand på 350 m (standard sikkerhetsavstand er 270 m). Vi ser fra figuren at ved avstand 350 m vil det være en returperiode på 10 000 000 år mellom treff per kvadratmeter for en farlig isbit. Dette fordrer at antagelser og underliggende beregninger er riktige.

Den kombinerte statistikken fra de 4 scenariene vises øverst i Figur 11 for gjennomsnitts turbin ved Buheii. Sannsynligheten for farlig iskast/isnedfall er tilnærmet jevnt fordelt på retning. Til høyre i Figur 11 vises gjennomsnittelig sannsynlighet for iskast/isnedfall uavhengig av retning som blå vertikale søyler. 270 m fra turbinen er returperioden for kast av en isbit med anslagsenergi over 40 J 1000 år per kvadratmeter eller sjeldnere. Leser vi av den radielle sannsynlighetsfunksjonen får vi at for en enkelt kvadratmeter rute vil kast med returperiode 100 år forekomme 220 m fra turbin, 1000 år 270 m fra turbin, 10 000 år 320 m fra turbin, 100 000 år 330 m fra turbin, og 1 000 000 år 340 m fra turbin.



Figur 11 Kombinert sannsynlighet for farlig iskast /nedfall gitt gjennomsnittsturbin i Buheii og flatt terreng. Venstre: romlig fordeling. Høyre: radiell fordeling.

De beregnede sannsynlighetene for at kastede isbiter fra turbiner treffer forskjellige områder ved Buheii er vist i Figur 1. 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.

5.3 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.

Risikoen⁷ for farlig iskast i sonene rundt vindkraftanlegget er beregnet som individuell risiko (LIRA)⁸ i Figur 12. Mellom hver sone (konturlinje) øker risikoen med en faktor på 10. Det anbefales risikoreduserende tiltak for arbeidere, især der LIRA verdi er større enn 10^{-3} per år og for 3dje person der LIRA verdi er større enn 10^{-4} per år (se Bredesen og Refsum, 2015).⁹

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) og til NVE sin temarapport om iskast (2018). For en mer detaljert risikoanalyse¹⁰ henviser vi til Lloyds' Register. Det anbefales at risikoen for iskast monitoreres.

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.

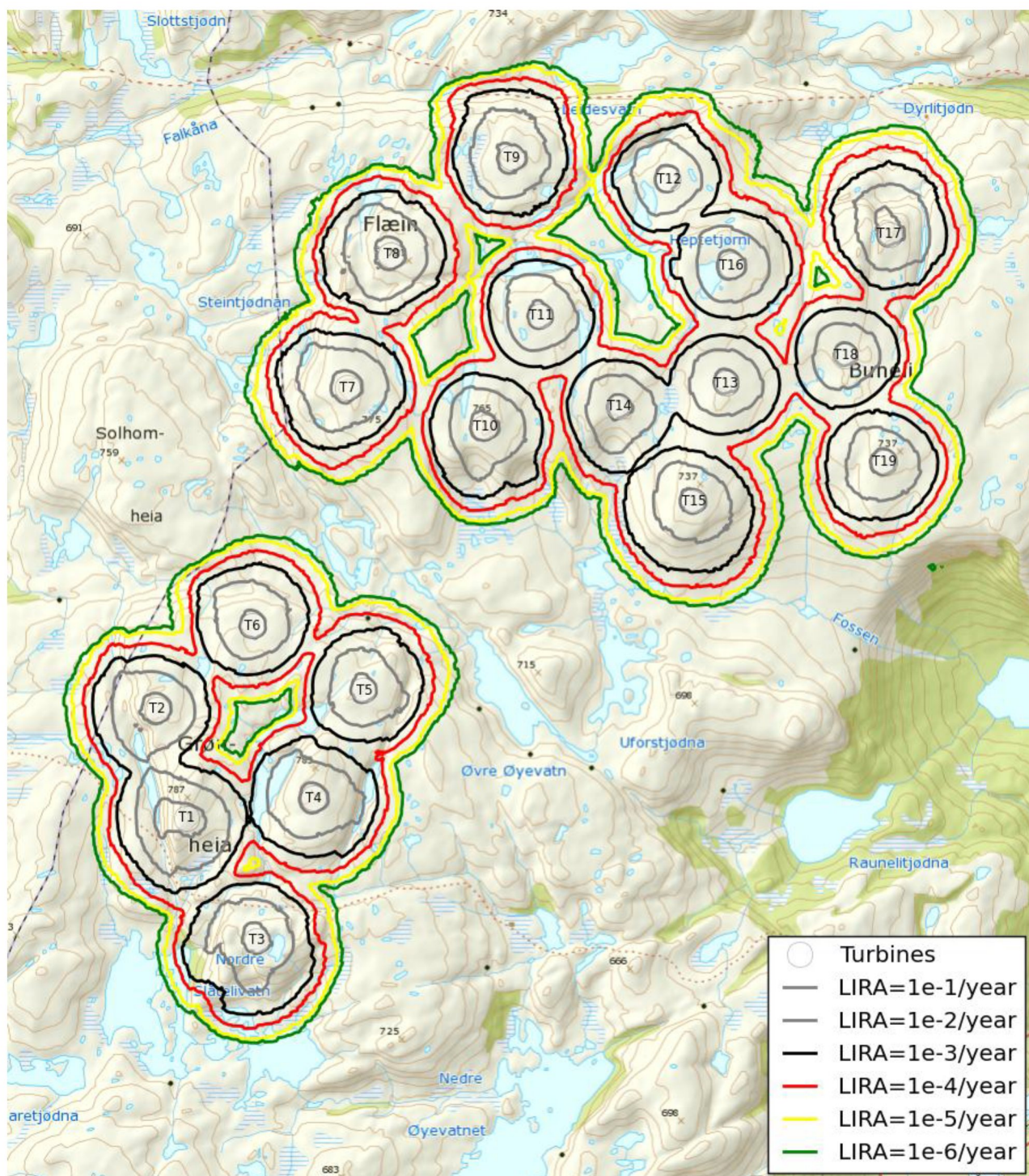
Det bør også lages egne sikkerhetsrutiner for dem som arbeider i vindparken.

⁷Risiko = sannsynlighet * konsekvens

⁸Definisjon fra "Risk Assessment – Theory, Methods and Applications" av Marvin Rausand: Localized individual risk (LIRA): The probability that an average unprotected person, permanently present at a specified location, is killed in a period of one year due to an accident at a hazardous installation. Dette begrepet tilsvarer det Direktoratet for samfunnsrisiko og beredskap (DSB) kaller individuell risiko: Den individuelle risikoen uttrykker i denne sammenheng sannsynlighet for å omkomme for et enkelt individ som eksponeres for en ulykkeshendelse. Risikokonturer er i denne rapporten benyttet for å uttrykke individuell risiko i områdene rundt anlegg som håndterer farlig stoff. Risikokonturer 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.

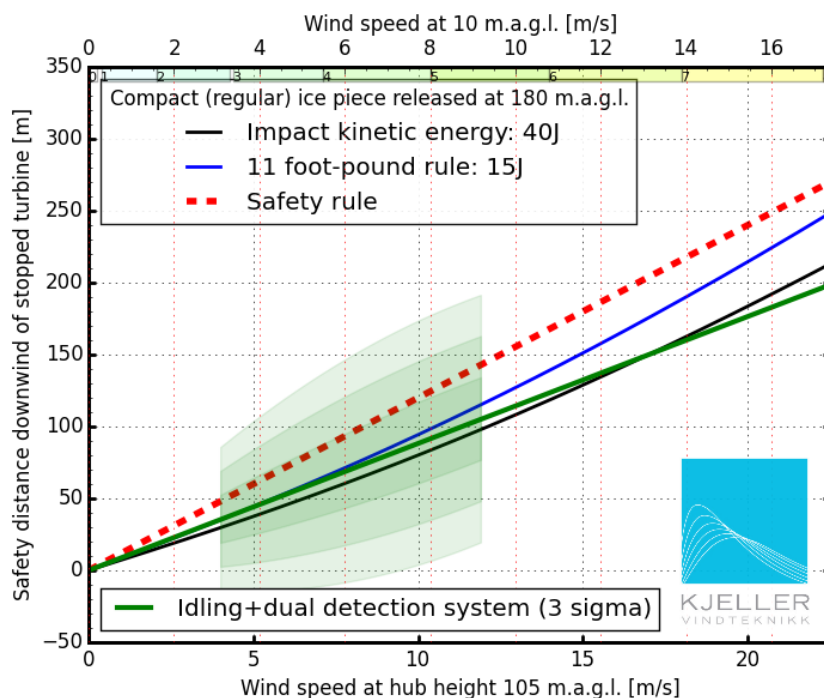
⁹ Vi bemerker at ubeskyttet eksponering for en person 0.2 % av tiden (nesten 3 minutter per dag hver dag) ved LIRA verdi 1×10^{-4} tilsvarer et individuelt risikonivå på 2×10^{-7} for denne personen. Hvis 500 personer eksponeres 0.2 % av tiden ved LIRA verdi 1×10^{-4} så er grupperisikoen 1×10^{-4} . Ved mer detaljert risikoberegning er dette typiske risikoakseptkrav i Norge. Til sammenligning var det 109 drepte i trafikken i Norge for fjoråret hvilket tilsvarer en gjennomsnittelig individuell risiko på 2.1×10^{-5} .

¹⁰ Norsk standard NS 5814:2008, Krav til risikovurderinger.



Figur 12 Beregnet individuell risiko (LIRA) etter metodikk beskrevet i Bredesen og Refsum (2015). Sort konturlinje viser LIRA=1e-3/år, mens grå konturlinje viser LIRA=1e-2/år.

5.4 Sikkerhetsavstand fra en stanset turbin



Figur 13 Venstre: Sikkerhetsavstand for stanset V150 turbin for isbit som funksjon av vindhastighet beregnet etter metodikk vist i Bredesen (2015). Beregningen gjelder nedstrøm av en turbin som alltid er orientert opp mot vinden. Vindhastighet 10 mob er gitt som øvre x-akse¹¹. Det er antatt at isen slipper fra spissen av et vindturbinblad som er orientert rett opp. For et blad som er orientert horisontalt vil området innenfor en avstand på 75m være direkte under dreieplanet til turbinen. "Safety rule" er en linjær funksjon som tilsvarer totalhøyden til konstruksjonen ved vindhastighet 15 m/s i navhøyde: $(H+D/2)*ws/15$. Høyre: tynn isplate som landet ved sikkerhetsavstand 40 J for Tryvann, Oslo. Foto Kjell Amundsen. Norkring. Grønn kurve viser funksjon tilpasset 500 observasjoner av isnedfall fra "stanset" turbin i Østerrike (Bredesen et al 2017). Det forventes at 99.9 % av isbiter lander innenfor det grønnskaverte området fra en turbin som stanser (idler) når is detekteres. Vindstyrkeklasser etter Beaufort skalaen er angitt øverst i figur. For vindhastigheter over vist styrke er det i fjellet særdeles tungt å gå mot vinden og vanskelig å følge selv godt kvistede løyper (sterk kuling, klasse 8).

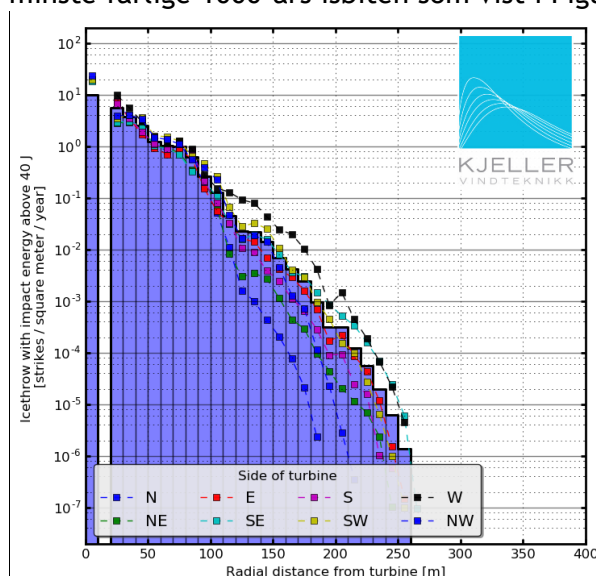
Analysen har vist at sikkerhetsavstanden kan reduseres hvis for eksempel turbinen stanses når det er is på bladene. Sikkerhetsavstanden nedstrøms for en stoppet turbin av typen V150 er vist i Figur 13 som funksjon av vindhastighet. Fra figuren kan sikkerhetsavstanden for en isbit med anslagsenergi 40 J for stoppet turbin avleses til henholdsvis 120 m - 170 m og 170 m - 210 m for vindklassene liten kuling og stiv kuling. Mindre isbiter kan imidlertid drive lenger med vinden. Innenfor disse avstandene avtar sannsynligheten for å overleve et treff av farligste isnedfall raskt. For isnedfall er det den minste farlige isbiten som kan drive langt med vinden som angir de beregnede sikkerhetsavstandene. Beregningen gjelder for en turbin som alltid er orientert opp mot vinden. Ved videre arbeid kan det tas hensyn til ulik orientering på turbin og turbinblad. Dette anbefales utført siden det ofte er tett tåke med liten sikt under isingsforhold som hindrer visuell verifisering av bladenes posisjon og orientering under arbeid i parken.

¹¹ Når det blåser liten kuling (vind mellom 10.8 og 13.8 m/s i 10 m høyde) merkes vindmotstanden når en går. Ved stiv kuling (10 m vind mellom 13.9 og 17.1 m/s) er det tungt å gå mot vinden. Det er antatt en vindskjærskoeffisient på 0.11 i beregning av 10 m vind.

5.5 Sannsynlighet for isnedfall fra stoppet turbin

For å beregne sannsynligheten for isnedfall i området gitt at turbinen stopper for å avvise har vi antatt at systemet er 100 % effektivt slik at is kun kastes mens turbin står stille (isnedfall). For å beregne sannsynlighetskartet vist under til venstre har vi benyttet vindstatistikken for alle tilfeller det sitter minst 1 kg/m på bladet sammen med tidligere beregnet størrelsesfordeling på isbiter. Det er antatt en istetthet på 500 kg/m³ i beregningen. Det er beregnet at det slippes 235 000 farlige isbiter med anslagsenergi over 40 J, hvorav 80 000 isbiter har anslagsenergi over 140 J fra en turbin i parken. Siden det ikke er benyttet en prorata faktor i denne fremstillingen vurderes avstandene å kunne gjelde alle turbinene i vindparken.

Resultatet for isnedfall fra en stoppet turbin er vist i Figur 14. Avstandene vist er justert opp med 29 % av de beregnede sonene (220 m/170m) for å være avstemt med avstandene i Figur 13. Med avstandsskalering blir de respektive sikkerhetsavstandene mellom 130 og 210 m for den minste farlige 1000-års isbiten som vist i Figur 14.



Figur 14 Sannsynlighet for farlig isnedfall fra stoppet turbin vist som radiell statistikk. Sannsynlighetsnivået for beregnet isnedfall er sensitivt på klasseinndelingen i formfaktor¹². Siden benyttet fordelig vurderes litt grov for å beregne avstand for isnedfall har de beregnede avstandene blitt skaleres opp med 29 % for gitte sannsynlighetsnivåer slik at de tilsvarer 40 J beregnet sikkerhetsavstand i Figur 13 for vindhastigheten 22.5 m/s (220 m /170 m =29 %).

5.6 Sannsynlighetsnivå for iskast ved bruk av et avisingsssystem

Det forventes ikke at et avisingsssystem er 100 % effektivt, derfor vil risikobildet være et vektet middel av sannsynlighetskartene for stanset og for en operasjonell turbin ved en vurdering som tar hensyn til et slikt system. Siden turbinene stanser for å avvise vil mengden is som totalt bygger på bladet også bli redusert i forhold til denne betraktningen. Dette kan det tas hensyn til ved en videre analyse. Om vi antar grovt at 90 % av ismengden slippes når turbinen står stille og at 10 % av isen kastes får vi en retur periode på 1000 år for farlig iskast for en kvadratmeter i en avstand på 230 m fra gjennomsnitts turbinen med V150 layout (LIRA=1e-4). Vi bemerker imidlertid at for et avisingsssystem som ikke er 100 % effektivt er det sannsynlig at is kastes idet

¹² Her med Formfaktor CdAoM: 0.045, 0.04, 0.035, 0.03, 0.025, 0.02, 0.015, 0.01, 0.008 m²/kg

turbinen starter opp igjen i en avisings-syklus. Det er og mulig at is kan kastes før faren detekteres.

6 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). Assessement of safety risks arising from wind turbine icing. *EWEC*. Dublin.

Morgan, C., Bossanyi, E., & Seifert, H. (1998). Assessement 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*. Pyhäntunturi: VTT.

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)¹³. Details about the modelling structure, numerical routines and physical packages available can be found in for example Klemp et al. (2000)¹⁴ and Michalakes et al. (2001)¹⁵. 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 project¹⁶. For Norway, the model input uses the N50 land use data provided by the Norwegian Mapping Authority¹⁷.

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)¹⁸ 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^{19,20} 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.

¹³ 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

¹⁴ 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/>)

¹⁵ 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.

¹⁶ <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>

¹⁷ http://www.kartverket.no/eng/Norwegian_Mapping_Authority/

¹⁸ <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/para/parabout.html>

¹⁹ 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

²⁰ <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.

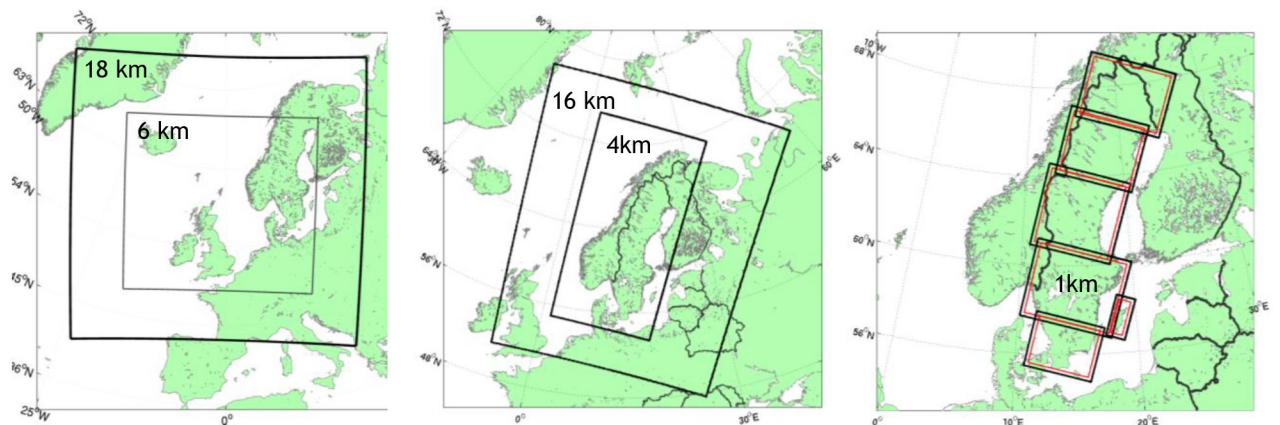


Figure A-1: Model set up for WRF simulations. Left: 6 km (and 18 km), middle: 4 km (and 16 km), right: several 1 km domains covering Sweden.

Ice load calculations

According to the standard ISO 12494 (ISO/TC98/SC3/WG6 2000)²¹ 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 a_1 , a_2 and a_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.²² This is the scheme that gives the most accurate calculations of liquid water content²³ 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.

²¹ ISO 12494 2000: Atmospheric Icing of structures, International Standard, ISO/TC98/SC3/WG6.

²² Thompson G., P.R. Field, W.D. Hall and R Rasmussen, 2006: A new bulk Microphysical Parameterization Scheme for WRF (and MM5)

²³ 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

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

where Q_h and Q_e are the sensible and latent heat fluxes. Q_r 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).²⁴

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.

²⁴ Harstveit K, Byrkjedal Ø. and E. Berge 2009: Validation of Regional In-Cloud Icing Maps in Norway, IWALS, Andermatt 2009.