





Sløvåg Vindkraftverk

Vurdering av risiko for iskast



Til	Kjetil Mork, Multiconsult AS
Fra	Meventus AS
Dato	08.05.2023
Rapportens tittel	Sløvåg Vindkraftverk – Vurdering av risiko for iskast
Rapportnr.	2023-008
Skrevet av	Anne Haaland Simonsen

	Navn	Dato	Signatur
Utført av	Anne Haaland Simonsen	08.05.2023	
Kontrollert av	Kyle Brennan	08.05.2023	

De presenterte resultatene er basert på informasjon som refereres til i dette dokumentet ved hjelp av kjente analysemetoder og industristandarder og betyr ikke at ikke noe informasjon kan endres. Alle estimater eller beregninger innebærer usikkerhet, og ingenting i dette dokumentet garanterer noen bestemt vindhastighet eller vindforhold. Meventus skal ikke være ansvarlig for fremtidig bruk av resultater i dette dokumentet, eller for direkte eller indirekte tap som kan skyldes mulige feil i dokumentet.

Innholdsfortegnelse

Innholdsfortegnelse	3
Sammendrag	4
1 Innledning.....	6
2 Vindkraftverket	7
3 Isingsforhold i området	9
4 Sannsynlighet for iskast	12
5 Konsekvens og risiko	17
5.1 Generelt	17
5.2 Risiko for iskast fra Sløvåg vindkraftverk	18
6 Anbefalinger og tiltak.....	21
7 Referanser.....	22
Appendiks A: Ballistisk modell	23
Appendiks B: Maksimal kastlengde for iskast.....	26

Sammendrag

En analyse av sannsynlighet og risiko for iskast fra en planlagt vindturbin i Sløvåg industriområde i Gulen kommune er utført. To aktuelle turbinlokasjoner er vurdert. Beregningene er i tråd med veiledende dokumentasjon fra NVE.

Modellerte meteorologiske data for området viser at ising vil kunne forekomme i det aktuelle området, men omfanget av ising er svært begrenset. Beregning av maksimal teoretisk kastavstand viser at avstanden mellom de to aktuelle turbinlokasjonene og nærliggende bolighus, hytter og offentlig vei er tilstrekkelig til at disse områdene ikke vil bli truffet av eventuelle isbiter som kastes fra den planlagte vindturbinen.

Flere lagerbygninger, kaianlegg og anleggsveier innenfor Sløvåg industriområde ligger imidlertid innenfor maksimal teoretisk kastavstand fra begge turbinlokasjonene, dette gjelder også skips- og båtruter langs nordsiden av Fensfjorden. Basert på beregnet sannsynlighet for iskast rundt de to turbinlokasjonene, i kombinasjon med konsekvensen av et treff på person med konstant eksponering er risikosoner for individuell risiko (LIRA) beregnet. Risiko knyttet til aktivitet i områdene rundt turbinlokasjonene er ikke vurdert i detalj, men følgende risikoreduserende tiltak for aktivitet i området anbefales:

- Det bør settes opp fareskilt ved inngangen til industriområdet som advarer om risiko knyttet til iskast og isnedfall når de meteorologiske forholdene ligger til rette for dette.
- For aktivitet knyttet til drift og vedlikehold av vindturbinen og annen aktivitet i industriområdet bør det utarbeides prosedyrer for hvordan man oppfører seg i perioder hvor det er sannsynlig at ising kan forekomme. Det kan være tiltak som at unødvendig opphold nær turbiner i drift skal unngås, samt at hjelm og annet sikkerhetsutstyr skal benyttes når man ferdes i området. Gjennom HMS-prosedyrer må det sikres at personalet har tilstrekkelig kunnskap og rutiner til å håndtere risikoen knyttet til iskast.
- For skips- og båttrafikk langs nordsiden av Fensfjorden, i det aktuelle området, bør det oppfordres til rutevalg i god avstand til vindturbinen ved forhold for ising, samt settes opp skilt som informerer om risikoen knyttet til iskast og isnedfall under slike forhold.
- Det anbefales at det installeres et system for isdeteksjon på turbinen. Dette signalet kan kobles opp mot en varselampe som blinker rødt når det registreres ising på turbinen og/eller benyttes inn i en varslingstjeneste for iskast på industriområdets nettside. Varsellampen må være synlig både fra land og i fjordområdene utenfor.
- Avhengig av aktivitetsnivået i området kan det også være fornuftig å stanse turbinen når i perioder hvor det registreres is på bladene, og eventuelt også vende rotoren slik at ikke bladene står over bygninger eller annen viktig infrastruktur.

Gjennom implementering av de nevnte tiltakene anses risikoen knyttet til iskast og isnedfall å være akseptabel. Periodisk evaluering av sikkerhetstiltakene bør implementeres i selskapets internkontrollsystem.

1 Innledning

Meventus har fått i oppgave å vurdere omfanget av ising og risikoen for iskast fra en planlagt vindturbin i Sløvåg industriområde. To aktuelle turbinlokasjoner er vurdert og det er utarbeidet forslag til tiltak som kan iverksettes for å redusere risikoen for iskast.

Atmosfærisk ising oppstår når vanndråper i luften fryser til is på gjenstander de kommer i kontakt med. Den vanligste formen for atmosfærisk ising inntreffer når underkjølte skydråper fryser til is på konstruksjoner (skyising), men ising kan også forekomme i nedbørsepisoder med underkjølt regn eller våt snø. En periode hvor de meteorologiske forholdene ligger til rette for ising kategoriseres ofte som en meteorologisk isingsperiode, mens en periode hvor eksponerte konstruksjoner (f.eks. måleutstyr) er påvirket av ising defineres som en instrumentell isingsperiode. Den instrumentelle isingsperioden starter typisk litt etter oppstart av periode med meteorologisk ising og vedvarer en stund etter den meteorologiske isingsperioden er over.

Også vindturbiner vil være utsatt for atmosfærisk ising, og isingsperioden på turbinenes rotor vil være noenlunde sammenlignbar med den instrumentelle isingsperioden. Is som faller eller kastes av en vindturbin kan utgjøre en fare for folk eller dyr som ferdes i nærheten av turbinene. Is som faller av et turbinblad, kan også medføre mindre skader på selve turbinen.

For å forstå risikoen knyttet til ising på turbiner er det viktig å kartlegge sannsynligheten for at ising inntreffer. Det er også viktig å ta hensyn til forventet bruk av områdene som kan være utsatt for isnedfall og iskast, siden konsekvensen av et eventuelt iskast er avhengig av hvorvidt det befinner seg mennesker eller utstyr innenfor sonen hvor iskast kan treffe.

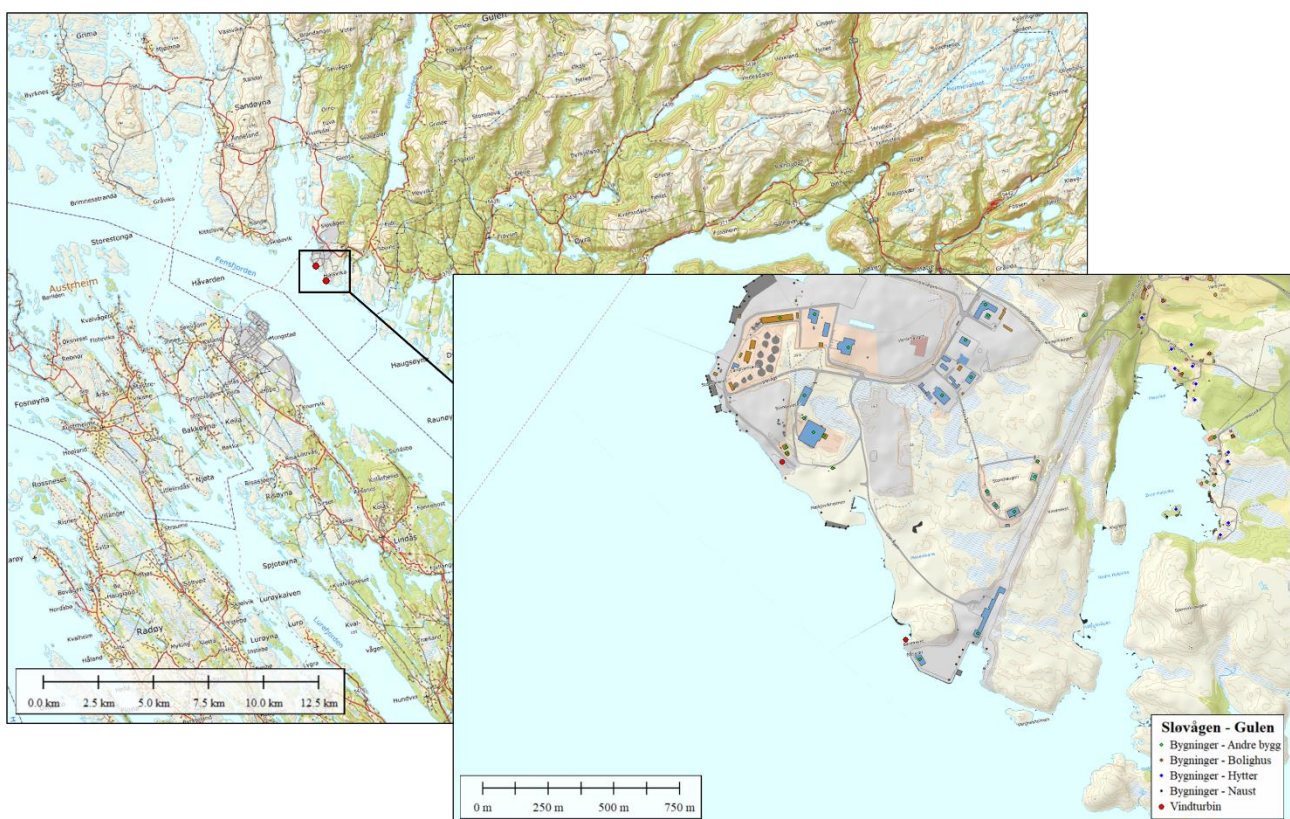
Denne rapporten gir noe bakgrunnsinformasjon om problematikken knyttet til iskast. Videre gjøres det en utredning om sannsynligheten for at uønskede hendelser kan oppstå, og hva konsekvensene kan være. I de tilfellene hvor risikoen anses å være høy foreslås tiltak som kan bidra til å redusere risikoen til et akseptabelt nivå.

2 Vindkraftverket

Den aktuelle vindturbinen er planlagt lokalisert i sjøkanten i Sløvåg industriområde i Gulen kommune i Vestland fylke, ca., 50km nord for Bergen. To ulike turbinlokasjoner er vurdert.

Vindturbinen er en GE-turbin (Haliade-X) med 250 m rotordiameter og 150 m navhøyde. Dette gir en totalhøyde på 275 m. Terreng høyden i lokasjon A og B er henholdsvis 0 og 5 m.o.h.

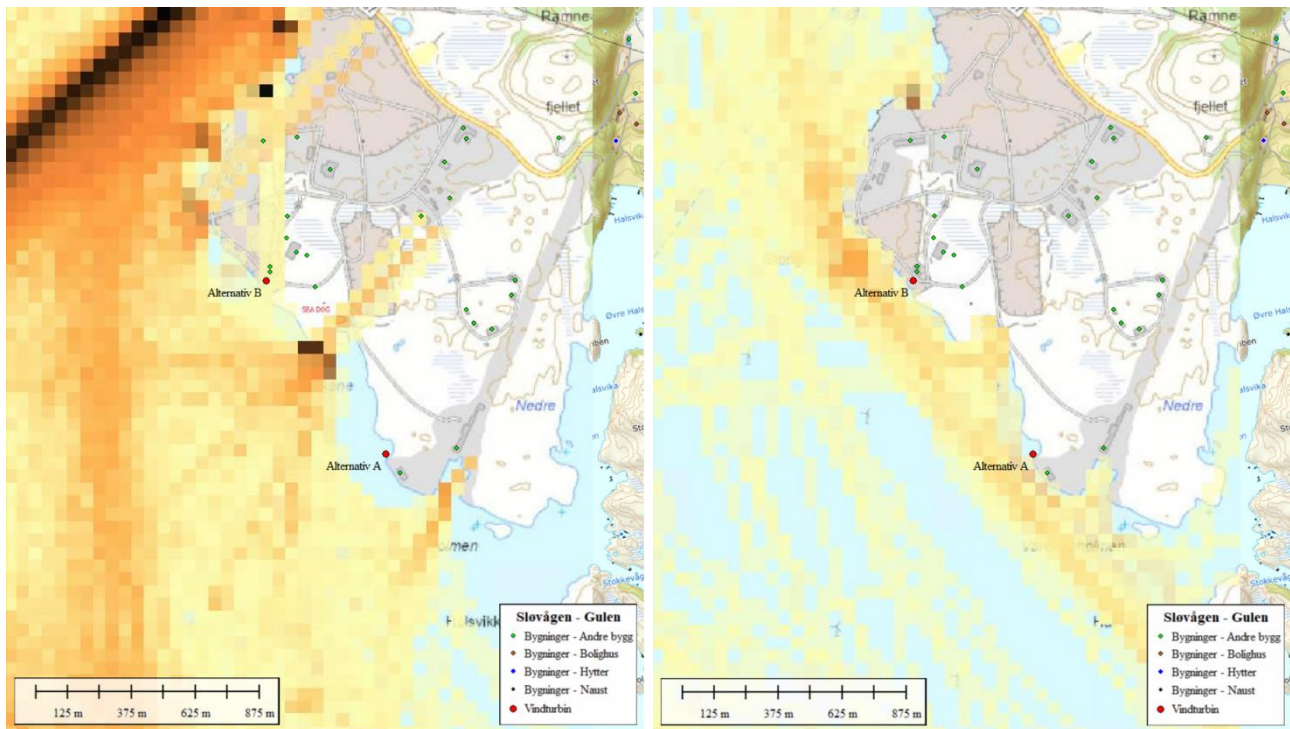
De to alternative turbinlokasjonene, nærliggende bolighus, hytter og næringsbygg er markert i Figur 1 under.



Figur 1 – Oversiktskart over prosjektområde, turbinposisjoner og nærliggende bebyggelse.

Som det fremgår i figuren over er det flere lagerbygninger i umiddelbar nærhet til de to alternative turbinlokasjonene. For alternativ lokasjon A ligger nærmeste bygg 92 m unna, mens for alternativ lokasjon B er det kun 30 og 58 m til de to nærmeste bygningene. Disse bygningene vil dermed ligge under vindturbinens rotor (bladene på den planlagte vindturbinen er 125 m lange) og være ekstra utsatt for is som faller eller kastes av vindturbinen. Avstanden til nærmeste hytte/bolighus er 1.1 km fra alternativ A og 1.5 km fra alternativ B. Det er ingen offentlige veier, kjente turstier eller utkikkspunkter i nærhet av turbinlokasjonene, men både kaianlegg og deler av anleggsveien i industriområdet ligger i umiddelbar nærhet.

Basert på informasjon fra Kystverket vil det også normalt være en del skips- og båttrafikk i området vinterstid (se oversikt over AIS klasse A og klasse B-registreringer for periodene januar-mars og oktober-desember 2020 i Figur 2). Som det fremgår av figurene, vil det være aktivitet tett innpå begge de aktuelle turbinlokasjonene og dette må også hensyntas ved vurdering av risiko for iskast fra vindturbinen.



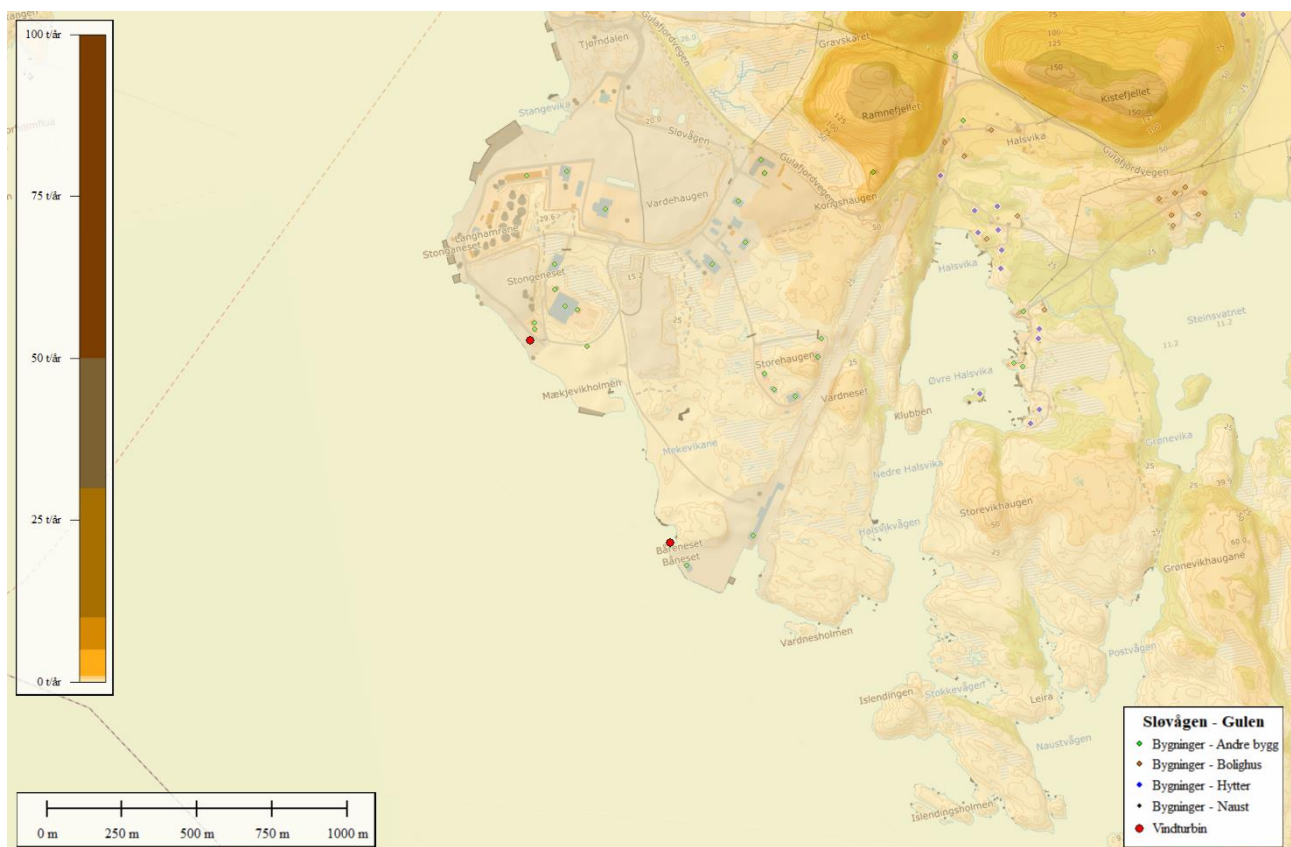
Figur 2 - Skips- og båttrafikk (AIS-registreringer for klasse A til venstre og klasse B til høyre) for periodene januar-mars og oktober-desember 2020. (Kilde: www.kystverket.no)

3 Isingsforhold i området

For å estimere sannsynligheten for at atmosfærisk ising oppstår på den aktuelle turbinen er isingsdata fra to ulike kilder hentet inn:

- Isingsdata fra EMD International A/S (EMD, 2022). Dette datasettet er generert med EMDs isingsmodell, «EMD–WRF OD ICING», og består av reanalyserte data fra datasettet ERA5, nedskalert til 3x3 km oppløsning med WRF-modellen. Både isingskart og en 10 års tidsserie med modellerte vind- og isingsdata er benyttet i denne analysen.
- NVEs kartlegging av isingspotensiale i Norge (NVE, 2009)

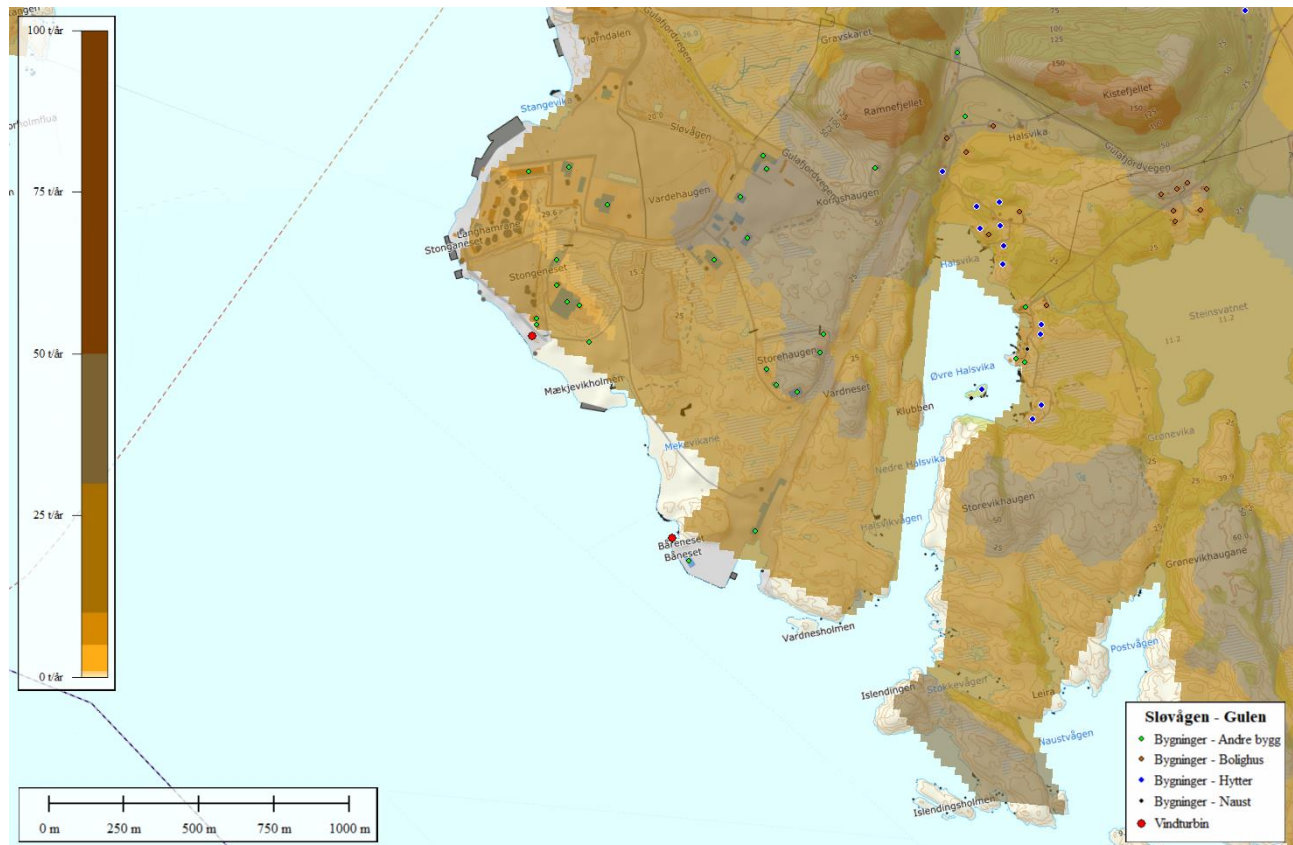
De modellerte dataene fra EMD viser kun minimale forekomster av ising i dette området. Basert på beregnet tidsserie er forventet hyppighet av meteorologisk ising (med intensitet > 10g/time) på 0.3 timer per år i de aktuelle turbinlokasjonene i 150 meters høyde i et gjennomsnittså (se Figur 3). De få tilfellene med ising som fremgår av datasettet inntreffer hovedsakelig ved sørøstlig vind, som er fremherskende vindretning i dette området.



Figur 3 – Estimert hyppighet av ising (>10g/time) i 150 meters høyde (Kilde: EMD–WRF OD ICING)

NVEs kartlegging av isingspotensiale i Norge (NVE, 2009) viser også små forekomster av ising i dette området, hvor forventet hyppighet av meteorologisk ising (med intensitet > 10 g/time) i de aktuelle

posisjonene ligger på grensen mellom 0 og 26 timer per år i 80 meters høyde i et gjennomsnittså (0.0 – 0.3 % av året) (se Figur 4). Isingsomfanget vil variere noe fra år til år, hvor det enkelte år ikke vil være noen isingshendelser, mens det andre år kan være noen timer med isingsforhold et par dager i året.



Figur 4 – Estimert hyppighet av ising (>10g/time) i 80 meters høyde (Kilde: NVE)

Basert på tilgjengelig informasjon om isingsforholdene i dette området er det i beregningene valgt å benytte et gjennomsnittlig isingsomfang på 13 timer per år med meteorologisk ising (med intensitet > 10 g/time) for de to aktuelle turbinlokasjonene.

Ifølge de overnevnte analysene kan prosjektet karakteriseres og plasseres i klasse 1 i henhold til IEA Wind Task 19 (Wind Power in Cold Climates) sin klassifisering av isforhold (se Tabell 1).

Tabell 1 – IEA Wind Task 19 isklassifisering (2012)

IEC Wind isklasse	Meteorologisk ising (% av året)	Instrumentell 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

Estimert isingsomfang i det aktuelle området anses å være svært lavt sammenlignet med øvrige vindkraftprosjekter i Skandinavia. Den lave forekomsten av atmosfærisk ising skyldes i hovedsak at vindturbinen vil være lokalisert lavt i terrenget (like over havnivå), i utløpet av Fensfjorden og nærme de store havområdene i vest, hvor vintrene preges av mye skiftninger i været og hvor temperaturen i stor grad er påvirket av sjøtemperaturen.

4 Sannsynlighet for iskast

Ettersom ising en sjelden gang i blant vil kunne forekomme på turbinene, er det nødvendig å vurdere hvilke områder som vil være utsatt for is som faller eller kastes fra turbinene.

NVE utarbeidet i 2018 en veileder for håndtering av risiko for skade ved iskast i norske vindkraftverk (NVE, 5/2018). Det ble samme år utarbeidet en temarapport om iskast som inngår som del av kunnskapsgrunnlaget til nasjonal ramme (NVE, 57/2018). I henhold til veilederen og temarapporten kan følgende formel benyttes for å beregne maksimal lengde for iskast:

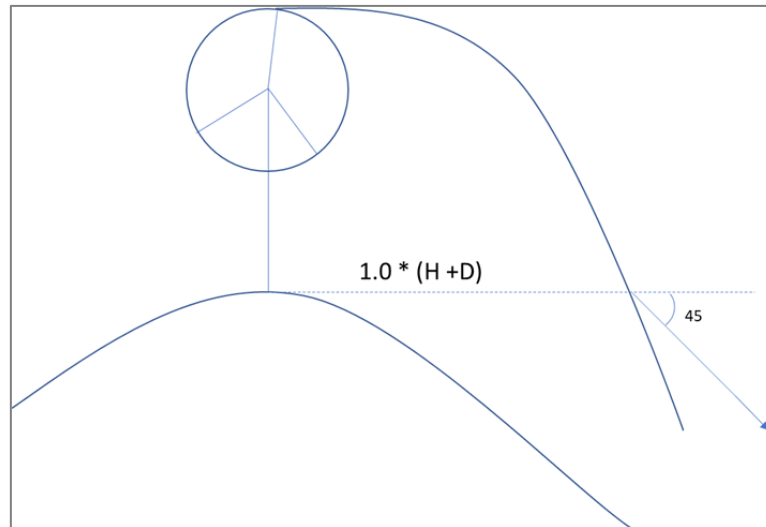
$$\text{Maksimal kastlengde (s)} = k \times (H + D) \quad \text{Formel 1}$$

hvor H er turbinens navhøyde, D er turbinens rotordiameter og k er iskastfaktoren. Denne formelen kalles Seiferts formel når iskastfaktoren $k = 1.5$ (Morgan et al, 1998). Seiferts formel vurderes imidlertid å være konservativ, og det oppgis at erfaringer og studier viser at maksimalt observert kastlengde fra vindturbiner med rotordiameter på 80–90 m generelt tilsvarer summen av turbinens navhøyde og rotordiameter ($H + D$). Dette gir en iskastfaktor på 1.0. I NVE's temarapport om iskast er det videre oppgitt at iskastfaktoren forventes å bli redusert for større turbiner, ettersom større rotordiameter ikke fører til store endringer av hastigheten til vingespissen.

Maksimal kastlengde for den planlagte turbinen ble beregnet i henhold til Formel 1 med k -faktor på 1.0. Dette til tross for at de planlagte turbinene er langt større enn de som ligger til grunn for utarbeidelsen av formelen i retningslinjen og man derfor kan forvente at k -faktoren i realiteten vil være lavere (NVE, 57/2018).

Den oppgitte formelen for beregning av kastlengde tar ikke hensyn til høydeforskjellen mellom vindturbinene og omkringliggende terreng. Dersom turbinposisjonen ligger høyere i terrenget enn omgivelsene vil isbiter kunne kastes lenger enn den beregnede maksimalavstanden, og i henhold til retningslinjen bør høydeforskjellen legges til turbinens tårnhøyde (H) i Formel 1.

Ettersom den planlagte vindturbinen vil lokaliseres i en høyde på maksimalt 5 m.o.h. (lokasjon B), vil det være minimale høydeforskjeller mellom denne posisjonen og eventuelle lavereliggende områder, men høydeforskjellen må likevel hensyntas. Dersom den utvidete kastavstanden skal inkluderes ved beregning som oppgitt i veilederen, der høydeforskjellen ble lagt direkte til tårnhøyden (H) i Formel 1, resulterer dette i hovedsak i ytterligere 1 m kastlengde for hver 1 m høydeforskjell. Beskrevet på en annen måte antar ligningen at når en isklump som ferdes nedover en skråning når maksimal kastlengde for flatt terreng (i samme høyde som turbinfundamentet), vil den bevege seg i 45 grader i forhold til det horisontale planet (illustrert i Figur 5 under) og fortsette denne banen frem til den treffer bakken.

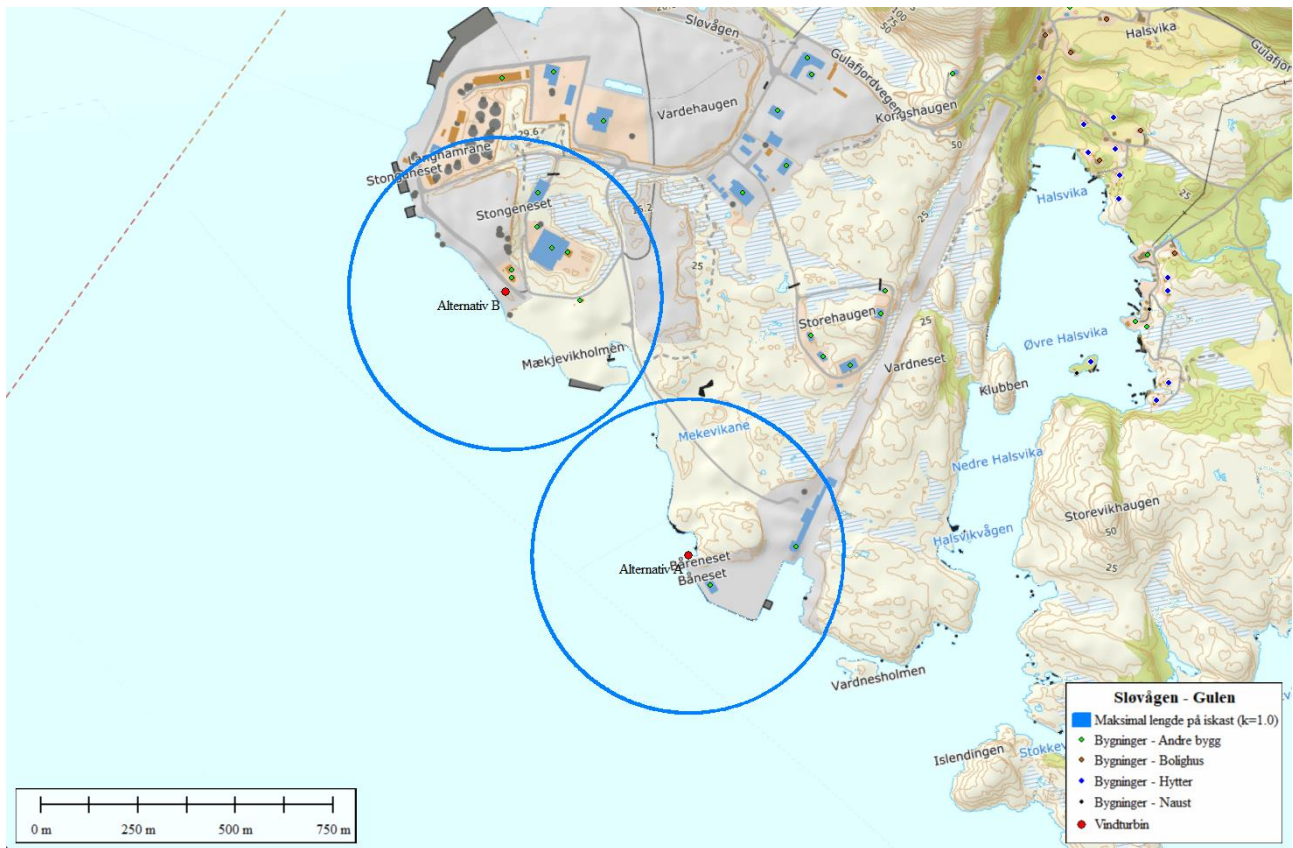


Figur 5 – Illustrasjon av hvordan høydeforskjellen mellom vindturbin og terrenget rundt bør hensyntas ifølge NVEs veileder

Denne ligningen tar ikke hensyn til virkningen av ballistiske parametere som isbitens tetthet, frontareal, lufttetthet, tyngdekraft, utgangshastighet, vindhastighet osv. I realiteten vil luftmotstanden i kasteretningen og tyngdekraften medføre en betydelig økning i fallvinkelen for et objekt som kastes fra en stor vindturbin, og slik bidra til at kastlengden ikke øker lineært med økende størrelse på turbinene. Kombinert med bruk av en k -faktor som er mer representativ for mindre turbinstørrelser enn det som vil benyttes for dette prosjektet, forventes en slik beregning å overestimere maksimal kastlengde for lavereliggende terreng.

En alternativ tilnærming for beregning av maksimal kastlengde for lavereliggende terreng ble utarbeidet ved bruk av en ballistisk modell som var innstilt for å passe til det empiriske beviset som Formel 1 var basert på. Modellen viste at objektets fallvinkel ved kryssing av det horisontale planet til fundamentet i realiteten ligger mellom 50 og 80 grader, avhengig av vindhastigheten. Basert på dette ble det valgt å benytte en krysningsvinkel på 50 grader i stedet for 45 grader (som oppgitt i veilederen). Dette forventes å gi et mer realistisk, men likevel konservativt resultat. Den maksimale forventede avstanden hvor iskast kan inntreffe, hensyntatt overhøyde (beregnet med denne metodikken), er markert med blå sirkler på kartet sammen med de respektive turbinposisjonene i Figur 6 under. Ytterligere detaljer om den ballistiske modellen er presentert i Vedlegg 1.

Med de aktuelle turbindingensjonene gir Formel 1 en maksimal kastlengde på 400 m. Når overhøyden mellom turbinposisjonen og nærliggende terreng hensyntas medfører dette en økning på maks 2.5 m for området rundt alternativ lokasjon B. Beregnet maksimal kastavstand, hensyntatt høydeforskjell, er presentert i form av blå sirkler på kartet i Figur 6. Dette kartet er også presentert i Appendiks B, hvor også sirkler beregnet med k -faktor på 1.5 er inkludert.



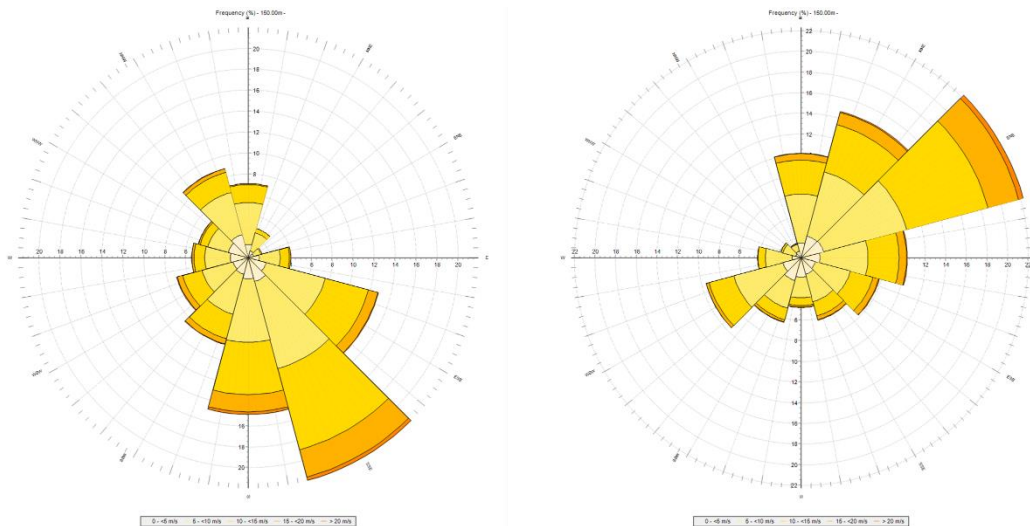
Figur 6 – Maksimal kastelengde for iskast, hensyntatt terreng (blå sirkler) for aktuelle turbinlokasjoner.

Beregnet maksimal kastavstand angir kun hvor langt det er teoretisk mulig at en isbit kan kastes fra en gitt turbin. Sannsynligheten for at is skal lande på en spesifikk flate avtar imidlertid svært raskt med avstand fra turbinen. Beregninger (GHC, 2007) viser at sannsynligheten for at is i løpet av et år skal falle på et 1 m² areal som ligger 150 m fra tårnet på turbinen, med aktuelle isingsforhold, er 1.5×10^{-3} (dvs. treff én gang hvert 649 år) hvis man korrigerer for hyppigheten av ising samt dimensjonene på den aktuelle vindturbinen.

Ettersom turbinens rotor alltid vil være vendt normalt på vindretningen, vil eventuelle isbiter kastes normalt på vindretningen og deretter dreie med vinden. Studier fra Sveits (Cattin, 2012) har vist at is som fester seg til turbinbladene typisk kastes 90 grader i forhold til dominerende vindretning ved ising i den retningen vingen peker når den beveger seg nedover. Avhengig av vindhastigheten vil isbitene også drive med vinden nedstrøms slik at de i realiteten kastes i en vinkel som til dels overstiger 90 grader. Basert på resultater fra den ballistiske modellen (beskrevet i vedlegg 1) er det antatt at vindens påvirkning i middel bidrar til en retningsendring på 15 grader.

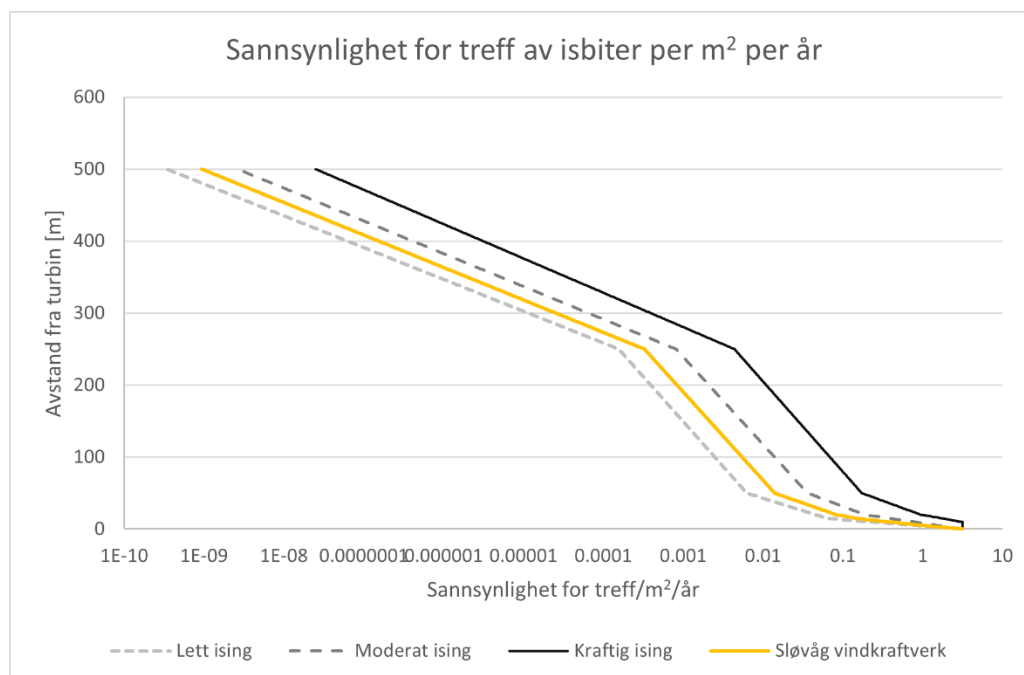
Kun et fåtall isingshendelser fremgår av den 10 år lange modellerte tidsserien (01.07.2012 til 01.07.2022) fra isingsmodellen til EMD. Mens hovedvekten av isingsepisodene forekommer ved vind fra sørøst, anses utvalget å være for lite til at vindretningen i disse periodene kan benyttes som indikator for ising i området. Basert på vindretningsfordelingen i denne 10-årsperioden fremgår det

at vindretningen i isingsperioder i stor grad sammenfaller med den generelle vindfordelingen i området. Ved beregning av sannsynlig retningsfordeling for iskast er det derfor tatt utgangspunkt i den generelle vindretningsfordelingen og trukket fra et 105-grader-skift fra denne. Med fremherskende vindretning fra sørøst vil størsteparten av isen som kastes av turbinene kastes mot nordvest (se Figur 7 under).



Figur 7 – Vindens retningsfordeling (venstre) og sannsynlig retningsfordeling ved iskast (høyre)

Basert på tidligere studier av kastlengder (GHC, 2007), skalert med aktuelle turbindimensjoner og individuelle isingsforhold for turbinposisjonene, er en sannsynlighetsfordeling for iskast beregnet for anlegget (se gul linje i Figur 8 under).



Figur 8 – Sannsynlighet for treff av isbiter per m² per år (skalert i hht isingsforhold og turbindimensjoner)

De beregnede sannsynlighetsverdiene er videre korrigert med sannsynlig retningsfordeling for iskast (presentert i Figur 7). Høydeforskjellen mellom turbinposisjon og nærliggende terreng er hensyntatt ved bruk av sannsynlighetsverdien som gjelder for punktet som ligger i en avstand tilsvarende høydeforskjellen nærmere turbinen. Resultatet av disse beregningene er presentert i form av et risikokart i seksjon 5.2.

5 Konsekvens og risiko

5.1 Generelt

Risikoen knyttet til iskast fra turbinene kan beregnes ved å multiplisere sannsynligheten for å bli truffet med konsekvensen av et slikt utfall.

DSB (Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap) opererer med et ulike akseptnivåer for individuell risiko. Individuell risiko (IR) er definert som *sannsynligheten for et uhell i løpet av et år multiplisert med sannsynligheten for å omkomme på den [gitte] avstanden*.

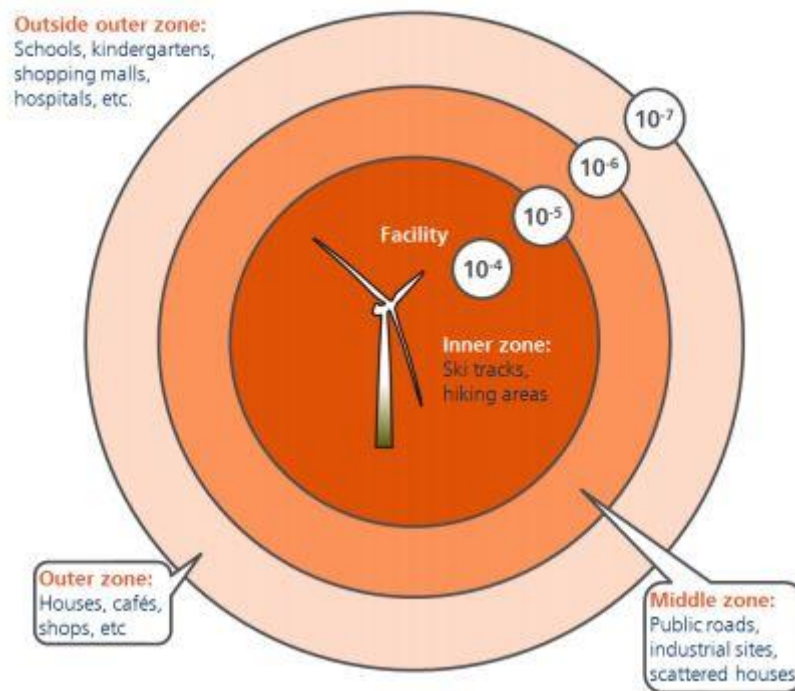
Det anbefales (IEA Wind, 2018) å benytte begrepet LIRA («Localised Individual Risk per Annum») ved utarbeiding av risikosoner rundt anlegg som utgjør en viss fare. Denne parameteren angir risikoen på en lokasjon for en ubeskyttet person med konstant eksponering. LIRA i en gitt m^2 i området rundt en vindturbin er dermed sannsynligheten for at en isbit treffer i denne posisjonen multiplisert med sannsynligheten for fatalitet som følge av isbiten. Dersom man har informasjon om bevegelsesmønsteret i området, kan også IRPA (Individual Risk per annum) beregnes. Denne angir den individuelle risikoen for en person gitt eksponering og vil aldri være høyere enn LIRA-verdien. Dersom LIRA-verdien er akseptabel, vil det ikke være behov for beregning av IRPA.

Konsekvensene ved treff av isbiter er i stor grad avhengig av størrelsen på isbitene. En studie fra Sveits (Cattin et al, 2007) viste at over halvparten av alle isbiter som ble kastet fra en vindturbin var lettere enn 50 gram. Studiet viste også at alle isbiter med masse > 600 g falt innenfor 20 meter av vindturbinens tårn, samt at de fleste isbiter som ble observert langt fra turbinen var lettere enn 100 gram (Cattin, 2012). En isbit på rundt 100 gram som treffer et kjøretøy eller en bygning, vil mest sannsynlig ikke forårsake noen skade av betydning.

Skadeomfang for et menneske som blir truffet av en isbit er i tillegg til størrelse på isbiten avhengig av hvor på kroppen isbiten treffer. Med en antagelse om at et menneske dekker et område på $1 m^2$, vil et konservativt anslag på sannsynligheten for fatalitet gitt et treff være 1 %. Is som treffer biler medfører også en viss fare for personskade, både direkte gjennom treff, eller som følge av forstyrrelser for føreren. Generelt benyttes en sannsynlighet for fatalitet ved treff på biler på 0.01%.

DSB operer med en tredelt inndeling av hensynssoner rundt anlegg som utgjør fare for omgivelsene. Den innerste sonen dekker individuell risiko på inntil 10^{-5} . Innenfor denne sonen bør aktivitet begrenses til kortvarig forbipassering av tredjeperson (turveier, skiløyper etc.). Offentlige veier og fastarbeidsplasser innen industri- og kontorvirksomhet bør ikke utsettes for risikonivå høyere enn 10^{-5} (midtre sone), mens områder regulert for boligformål ikke bør utsettes for risikonivå høyere enn 10^{-6} . For særskilt sårbare deler av befolkningen er akseptkriteriet enda strengere på 10^{-7} . Ved fastsettelse av akseptkriteriene har DSB fulgt prinsippet om at risikoen som virksomheten

introduserer ikke skal være vesentlig sammenlignet med den generelle daglige risikoen i samfunnet. Dette ligger også til grunn for NVEs anbefalinger om akseptkriterier for risiko for iskast, presentert i deres «Veileder for håndtering av risiko ved skade ved iskast i norske vindkraftverk» (NVE, 5/2018). En oversikt over de anbefalte grenseverdiene for LIRA, er presentert i Figur 9.



Figur 9 – Oversikt over akseptkriterier for LIRA (Localized Individual Risk) (IEA Wind, 2018)

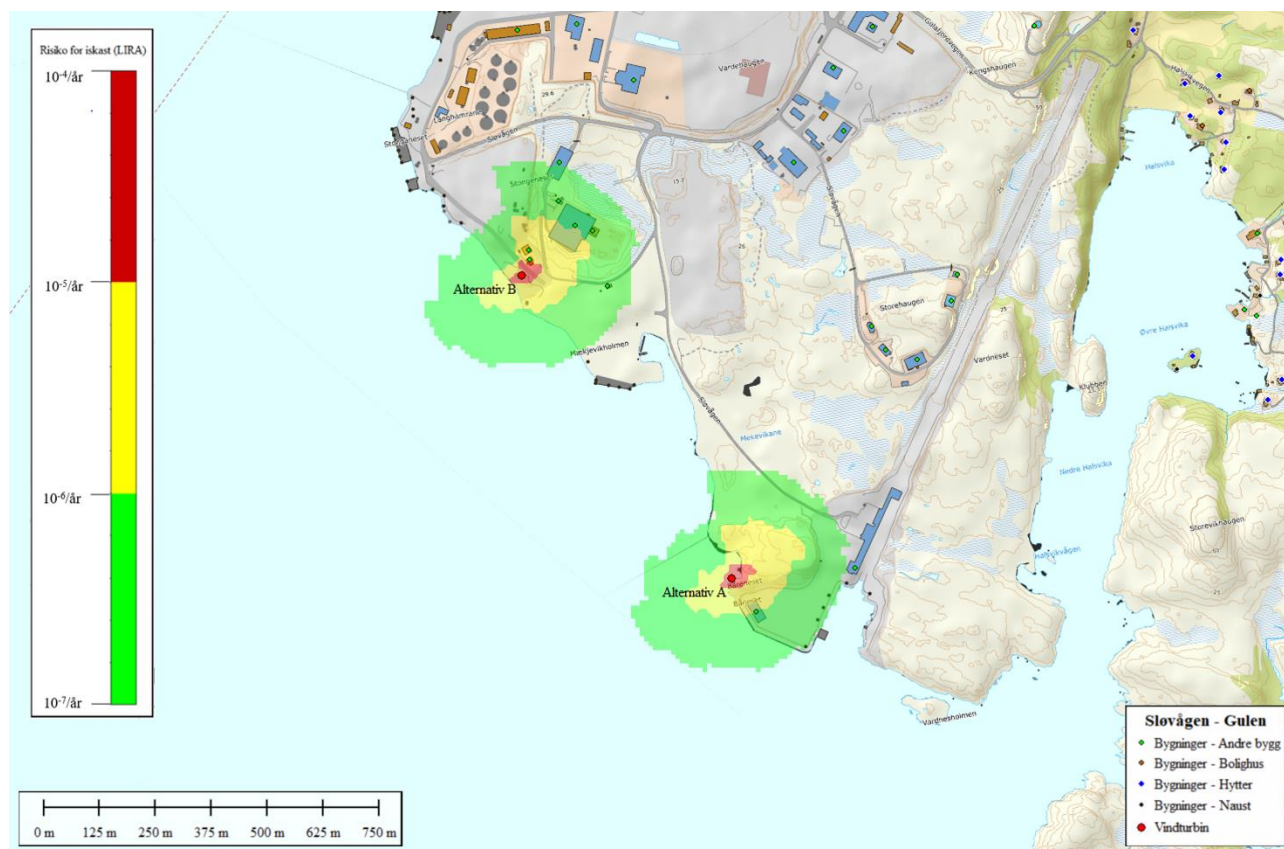
Risikonivået angir hvor mange treff som kan forventes per år. Et risikonivå på 10^{-5} i en gitt m^2 i nærheten av en turbin betyr dermed at det forventes at en isbit vil treffe i denne posisjonen én gang hvert 100 000 år.

5.2 Risiko for iskast fra Sløvåg vindkraftverk

Som det fremgår av Figur 6 ligger det flere lagerbygg innenfor beregnet maksimalavstand for iskast (blå sirkel) fra de to aktuelle turbinlokasjonene i Sløvåg. Deler av anleggsveiene i industriområdet, samt kaianlegg, ligger også innenfor maksimal kastavstand, men det er ingen offentlige eller øvrige private veier i området som vil være berørt basert på forventet maksimal kastavstand.

Risiko for iskast er dermed begrenset til aktivitet rundt de aktuelle lagerbyggene, ved kaianleggene og langs de aktuelle strekkene av anleggsveiene, samt aktivitet i fjorden i umiddelbar nærhet til turbinlokasjonene. Risiko knyttet til aktivitet i disse områdene er ikke vurdert i detalj, men forslag til risikoreducerende tiltak for aktivitet i parken er inkludert i kapittel 6.

Basert på beregnet sannsynlighet for iskast rundt de to aktuelle turbinlokasjonene i Sløvåg industriområde, i kombinasjon med konsekvensen av et treff på person med konstant eksponering er risikosoner for individuell risiko (LIRA) beregnet. Risikosonene er presentert i Figur 10.



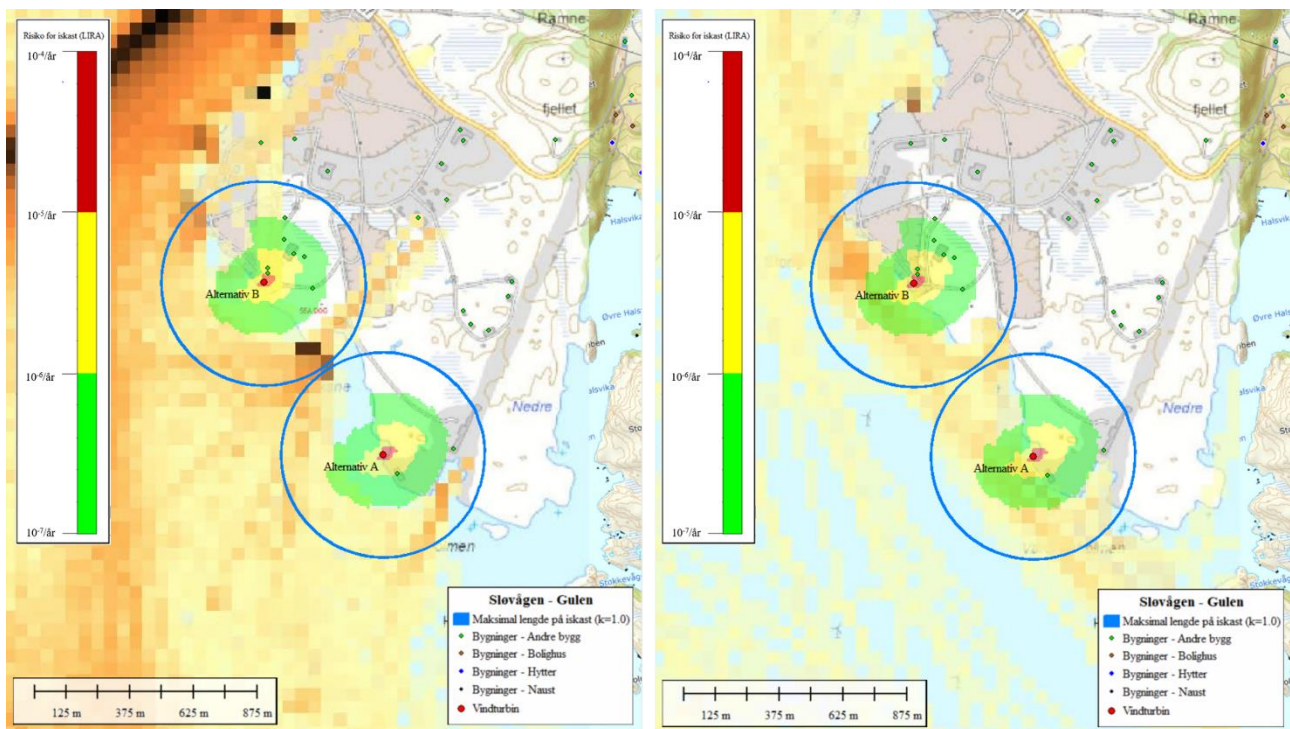
Figur 10 – Beregnet individuell risiko per år (LIRA) for områdene rundt de aktuelle turbinlokasjonene

Til tross for at den maksimale lengden for iskast fra den planlagte vindturbinen i Sløvåg industriområde er på ca. 400 m, er risikoen for iskast i denne avstanden fra turbinen svært lav grunnet lav forekomst av isingsforhold.

Basert på de utførte beregningene ligger grenseverdien for individuell risiko per år (LIRA) på 10⁻⁶ (midtre sone) i en avstand på ca. 30–175 m fra turbintårnet for de 2 turbinlokasjonene, med lengst avstand mot nordøst (størst risiko for iskast i denne sektoren). Grenseverdien for indre risikosone (10⁻⁵) er begrenset til områdene tett inntil tårnet for begge lokasjonene. Som det fremgår av Figur 10 ligger det nærmeste lagerbygget til turbinlokasjon B i indre risikosone (rød). Ved denne lokasjonen er det også ett bygg som ligger i midtre sone (gul) og 4 bygg i ytre sone (grønn). For turbinlokasjon A er det kun ett bygg som ligger innenfor midtre risikosone (gul).

Også for skips- og båttrafikk i området vil ferdsel nærme den planlagte vindturbinen medføre en viss risiko når det er forhold for ising, uavhengig av hvilken turbinlokasjon som benyttes. AIS-registreringer for klasse A og klasse B for periodene januar–mars og oktober–desember 2020 er

presentert i Figur 11, sammen med beregnet individuell risiko for iskast rundt turbinlokasjonene. AIS-registreringene er markert som gule linjer. Jo mørkere feltet er, jo flere registreringer.



Figur 11 – Oversikt over AIS-registreringer (klasse A til venstre, klasse B til høyre) for periodene januar-mars og oktober-desember 2020, sammen med beregnet individuell risiko for iskast fra de to turbinlokasjonene.

Som det fremgår av figurene, vil det være en del skips- og båttrafikk langs nordsiden av Fensfjorden i vinterhalvåret og mange av disse følger en rute som går innenfor risikosonen for iskast den planlagte vindturbinen (uansett hvilken av de to lokasjonene som velges).

Risikoen knyttet til ferdsel på fjorden og aktivitet langs anleggsveier og i områdene rundt turbinene vil være lav grunnet lite omfang av ising. Når det er forhold for ising, vil det imidlertid være en risiko for skadelige iskast og det bør gjøres tiltak for å redusere risikonivået ytterligere. Forslag til risikoreduserende tiltak er presentert i kapittel 6.

6 Anbefalinger og tiltak

Som beskrevet i foregående kapittel er risiko for å bli skadet ved iskast fra vindturbinen i Sløvåg industriområde begrenset til ferdsel i umiddelbar nærhet til turbinlokasjonene. Dette inkluderer flere lagerbygninger, kaianlegg og deler av anleggsveien i området, samt nærmeste deler av Fensfjorden.

Sannsynligheten for alminnelig ferdsel i nærheten av turbinlokasjonene under forhold for ising (tåke, underkjølt regn. etc.) antas å være liten. Det bør imidlertid settes opp fareskilt ved inngangen til industriområdet som advarer om risiko knyttet til iskast og isnedfall når de meteorologiske forholdene ligger til rette for dette.

For aktivitet knyttet til drift og vedlikehold av vindturbinen og annen aktivitet i industriområdet bør det utarbeides prosedyrer for hvordan man oppfører seg i perioder hvor det er sannsynlig at ising kan forekomme. Det kan være tiltak som at unødvendig opphold nær turbiner i drift skal unngås, samt at hjelm og annet sikkerhetsutstyr skal benyttes når man ferdes i området. Gjennom HMS-prosedyrer må det sikres at personalet har tilstrekkelig kunnskap og rutiner til å håndtere risikoen knyttet til iskast.

For skips- og båttrafikk langs nordsiden av Fensfjorden, i det aktuelle området, bør det oppfordres til rutevalg i god avstand til vindturbinen ved forhold for ising, samt settes opp skilt som informerer om risikoen knyttet til iskast og isnedfall under slike forhold.

Det anbefales også at det installeres et system for deteksjon av is på turbinen. Dette signalet kan kobles opp mot en varselampe som blinker rødt når det registreres ising på turbinen og/eller benyttes inn i en varslingstjeneste for iskast på anleggets nettsider. Dersom det velges å installere en varselampe bør denne være synlig både fra land og i fjordområdene utenfor. Avhengig av aktivitetsnivået i området kan det også være fornuftig å stanse turbinen når i perioder hvor det registreres is på bladene, og eventuelt også vende rotoren slik at ikke bladene står over bygninger eller annen viktig infrastruktur.

Gjennom implementering av de nevnte tiltakene anses risikoen knyttet til isnedfall og iskast i utgangspunktet å være akseptabel. Periodisk evaluering av sikkerhetstiltakene bør implementeres i selskapets internkontrollsystem.

7 Referanser

- Cattin et al, 2007 Wind turbine ice throw studies in the Swiss Alps. Proceedings from EWEC, 2007
- Cattin, 2012 Ice throw studies, Gütch and St. Brais. Proceedings from Winterwind, 2012
- DSB, 2012 Sikkerheten rundt anlegg som håndterer brannfarlige, reaksjonsfarlige, trykksatte og eksplosjonsfarlige stoffer, Kriterier for akseptabel risiko, Temaveileder 2012
- EMD, 2022 EMD–WRF On–Demand ICING ([EMD–WRF On–Demand ICING – Wiki–WindPRO](#)), EMD International A/S, September 2022
- GHC, 2007 Recommendations for risk assessments of ice throw and blade failure in Ontario, Garrad Hassan Canada Inc, M.p. LeBlanc, May 2007.
- IEA Wind, 2018 International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments, IEA Wind TCP Task 19, October 2018.
- Morgan et al, 1998 Assessment of safety risks arising from wind turbine icing. Proceedings from Boreas IV, 1998.
- NVE, 2009 Vindkart for Norge, Isingskart i 80 m høyde, Appendiks til rapport nummer KVT/ØB/2009/038, 2009
- NVE, 5/2018 Iskast fra vindturbiner – Veileder for håndtering av risiko for skade ved iskast i norske vindkraftverk, Veileder nr. 5/2018, Bushra Butt, Even Vegard Dalen og Marte Lundsbakken, NVE, Oktober 2018.
- NVE, 57/2018 Nasjonal ramme for vindkraft – Temarapport om iskast, Rapport nr. 57/2018, Erlend Bjerkestrand, Bushra Butt og Marte Lundsbakken, Mai 2018
- White, 2003 Fluid Mechanics, Fifth Edition, Frank M. White, 2003.

Appendiks A: Ballistisk modell

Ballistikk er definert som vitenskapen om legemer i fri bevegelse i rommet. Når et objekt kastes gjennom luften vil det, avhengig av objektets vekt og utforming bli utsatt for luftmotstand og gravitasjonskrefter som medfører endringer i hastighet og vinkel i forhold til horisontalplanet.

Basert på dette er det satt opp en ballistisk modell som kan benyttes ved beregning av maksimal lengde på iskast. Denne modellen tar hensyn til den kastede isbitens utgangshastighet/vinkel, masse (bevegelsesmengde) og bestemmer objektets fallvinkel og kastlengde basert på påvirkningen av luftmotstanden, gravitasjonskraften og vindhastigheten.

Endringen i isbitens hastighet beregnes i modellen for de tre hastighetskomponentene basert på gravitasjonskraften og luftmotstandens innvirkning på hastigheten, beregnet iterativt med tidssteg på 0.1 s ved hjelp av følgende formel:

$$\frac{dV_p}{dt} = C_D \left(\frac{1}{2} \rho_{\text{luft}} \frac{V^2}{\rho_{\text{is}} l} \right) t$$

Definisjon av variabler og respektive inngangsparametere, samt andre relevante parametere som benyttes i modellen, er presentert i Tabell 2 under.

Tabell 2 – Inngangsparametere til ballistisk modell

Parameter	Symbol	Verdi	Enhet	Kommentar
Isbitens hastighet	V_p	Beregnet stegvis	m/s	Beregnet for x, y, z-komponentene
Relativ hastighet mellom isbiten og luften(vind)	V	Beregnet stegvis	m/s	
Tetthet luft	ρ_{luft}	1.225	kg/m ³	Standardverdi for havnivå
Tidssteg	t	0.1	s	
Gravitasjonskoeffisient	--	9.81	m/s ²	
Parameter - Isbit				
Luftmotstandskoeffisient (drag)	C_D	0.8	-	Representativ isbitform
Tetthet is	ρ_{is}	920	kg/m ³	Representativ verdi
Volum	--	1	dm ³	Antatt representative dimensjoner for isbit, tilpasset k-faktor = 1
Frontareal	--	22.9	dm ²	
Karakteristisk lengde	l	0.0436	m	Volum / frontareal
Kastvinkel (fra horisontalt - initiell)	--	20	grader	Representativ verdi for lang kastavstand
Parameter – Vindturbin				
Rotordiameter	--	90	m	Turbindimensjoner empirisk data er basert på
Navhøyde	--	80	m	
Omdreiningshastighet	--	18.1	r/min	Tilhørende maksimal omdreiningshastighet
Parameter - Vind				
Vindhastighet i navhøyde (normalt på turbinen)	--	10	m/s	Representativ hastighet hvor turbin opererer med maks omdreiningshastighet
Vindskjær koeffisient	--	0.14	-	Typisk verdi for norske kystområder

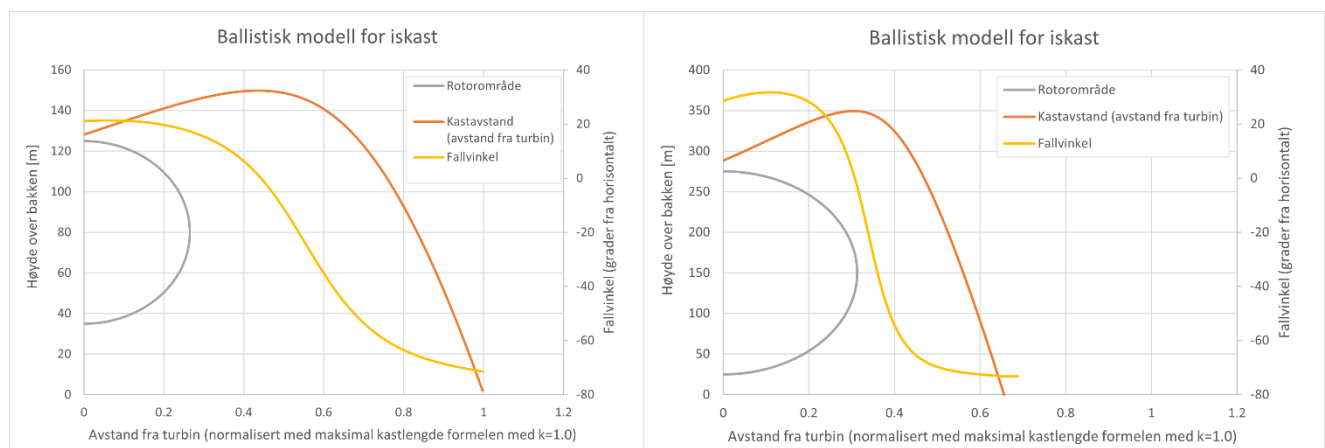
Isbitene som kastes fra vindturbinene kan variere mye i utforming og tetthet. Inngangsparameterne som er benyttet i modellen er i hovedsak valgt som representative verdier, men isbitens volum og frontareal er i utgangspunktet tilpasset en k -faktor på 1.0 for turbinstørrelsen som ligger til grunn for den utledede ligningen for maksimal kastavstand, som oppgitt i NVEs veileder fra 2018 (NVE, 5/2018).

Valg av luftmotstandskoeffisienten er basert på en vurdering av mulige utforminger av isbitene som kastes fra vindturbinene. Jo høyere verdi, jo større oppbremsing blir isbiten utsatt for når den kastes gjennom luften. En oversikt over ulike former og tilhørende luftmotstandskoeffisienter er presentert i Figur 12 under.

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09

Figur 12 – Oversikt over variasjon i luftmotstandskoeffisient (C_D) ved konstant Reynoldstall på 10^4 (White, 2003)

Basert på parametervalgene som gir kastlengder tilsvarende summen av rotordiameter og navhøyde for turbiner med rotordiameter 90 m og navhøyde 80 m, ble turbindingens i modellen oppdatert til å reflektere størrelsen på turbinene i det aktuelle vindkraftverket. De resulterende kastlengdene (normalisert med formelen for maksimal kastlengde med $k=1.0$) og fallvinklene for begge turbindingene er presentert i Figur 13. Fallvinkel er her definert som vinkelen på isbitens bane i forhold til horisontalplanet når isbiten passerer 0-nivået.



Figur 13 – Beregnet kastavstand (normalisert) og fallvinkel for isbit med dimensjonene og inngangsparameterne som beskrevet i Tabell 2 for en turbin med 80m HH/90m RD (venstre) og 250m HH/150m RD (høyre).

Figuren til venstre viser modellert kastlengde for scenario hvor turbindimensjonene er representative for de empiriske dataene som er brukt for å utlede formelen for maksimal kastlengde, som oppgitt i veilederen (NVE, 5/2018). Som det fremgår av figuren gir dette valg av parameterinnstillinger i modellen en kastlengde som tilsvarer k -faktor på 1 (tilsvarer $HH + RD$). Dette indikerer at inngangsparameterne og isbitdimensjonene som er valgt i modellen er representative for forholdene som gir maksimale kastlengder og dette kan videre brukes til å forutsi hvordan kastlengden vil være for samme isbit for turbinstørrelsene som forventes i det aktuelle prosjektet.

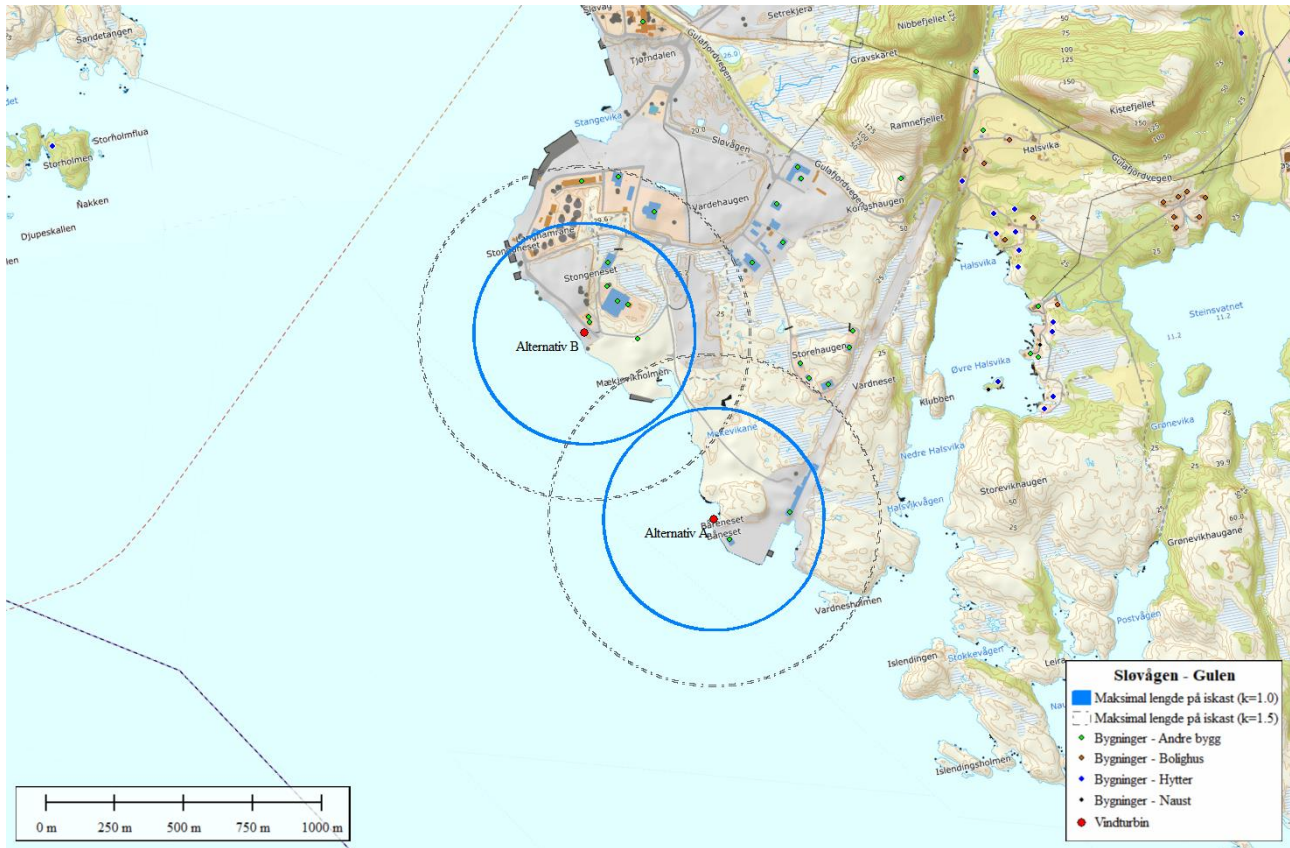
Det fremgår i figuren til høyre at dersom de aktuelle turbindimensjonene legges til grunn i modellen, reduseres k -faktoren fra 1.0 til 0.69 for de modellerte forholdene. Dette er i tråd med NVEs temarapport for iskast (NVE, 57/2018), hvor det er oppgitt at større turbindimensjoner ventes å resultere i lavere k -faktorer. K -faktoren øker noe med vindhastighetene, men modellen viser at vindhastigheten må opp i 28 m/s for de aktuelle turbinene for at k -faktoren skal nå opp i 1.0.

Figurene viser ellers at modellert fallvinkel i maksimal kastavstand er større enn 70 grader for begge scenariene. Dette er langt større enn de 45 gradene som legges til grunn i veilederen ved beregning av kastlengder ved høydeforskjell mellom turbinpunkt og terrenget rundt. En økt fallvinkel vil generelt føre til en redusert kastlengde i nedoverhellende terreng.

Variasjon i maksimal fallvinkel er imidlertid avhengig av vindhastigheten. I eksempelet over er det lagt til grunn en vindhastighet på 10 m/s, men med økende vindhastighet reduseres fallvinkelen. Basert på den ballistiske modellen kan fallvinkler mellom 50 og 80 grader forventes, med minst fallvinkler for vindhastigheter over 25 m/s. Grunnen til dette er at økt vindhastighet gir en økning i isbitens horisontale hastighet og dermed en økning i de horisontale komponentene i isbitens bane i forhold til den vertikale komponenten.

Det er for øvrig viktig å poengtere at scenarier der vindturbinene er i drift under forhold som, ifølge modellen, vil gi de lengste kastlengdene og minste fallvinklene anses som svært usannsynlig. Den kombinerte belastningen forårsaket av isen (som gir ujevn vektfordeling) og ekstremt høy vindhastighet vil mest sannsynlig føre til at turbinene stenges ned eller kjøres i redusert modus før disse forholdene inntreffer. Basert på dette blir valg av 50 grader for fallvinkel og en k -faktor på 1 ansett som et konservativt valg for beregning av maksimal kastlengde når høydeforskjeller i terrenget hensyntas.

Appendiks B: Maksimal kastlengde for iskast



Figur 14 – Maksimal kastlengde for iskast, hensyntatt terreng, (blå sirkler) for den planlagte vindturbinen i Sløvåg industriområde (to alternative lokasjoner). Maksimale kastavstander ved bruk av k-faktor på 1.5 er inkludert som referanse.