Jøsok

Bjølsegrø

Kvam kommune, Vestland fylke

Klimalaster for 22 kV kraftledning

Oppdragsnr.: **52408353** Dokumentnr.: **KVT/2024/R167/JMS** Versjon: **J01** Dato: **2024-11-21**



KJELLER VINDTEKNIKK
En del av Norconsult

Oppdragsgiver:	Jøsok
Oppdragsgivers kontaktperson:	Per Bergesen
Rådgiver:	Norconsult Norge AS, Jåttåflaten 27, NO-4020 Stavanger
Oppdragsleder:	
Fagansvarlig:	Bjørn Egil Nygaard
Andre nøkkelpersoner:	

Versjon	Dato	Beskrivelse	Utarbeidet	Fagkontrollert	Godkjent
J01	2024-11-21	Klimalastrapport	Jonas Mundheim Strand	Bjørn Egil Nygaard	Amund Søvde Haslerud

Dette dokumentet er utarbeidet av Norconsult som del av det oppdraget som dokumentet omhandler. Norconsult har ikke noe ansvar overfor tredjepart som eventuelt måtte benytte dette dokumentet.

Sammendrag

I forbindelse med bygging av ny 22 kV-kraftledning Bjølsegrø er det beregnet vind- og islaster for prosjektering av ledningen. Klimalastene som presenteres i denne rapporten er basert på simulerte værdata, norsk vindstandard samt kvalitative vurderinger av meteorolog.

Kraftledningen strekker seg fra Svortekyrkja til Langhamrane i Ytre Ålvik i Kvam kommune, Vestland. Traseen er ca. 1.2 km lang og fremføres i nordvestlig retning i terreng med bratt stigning. Det høyeste punktet langs traseen er på 575 moh. ved Langhamrane.

I området hvor kraftledningen planlegges antyder modellen en gjennomsnittlig årsnedbør på rundt 1919 mm. Av gjennomsnittlig årlig nedbør er det ca.14 – 31 % som faller som snø. Andelen snø øker med høyden over havet.

Anbefalte verdier for dimensjonerende vind- og islaster er oppsummert i Tabell 1-1. Dimensjonerende islast med 50-års returperiode er beregnet til 3.5 kg/m for faselinen (universalkabel) og til 2.5 kg/m for jordlinen. Samme islast kan benyttes for hele traseen for begge linene.

Beregnede retningsuavhengig vindkast med 50-års returperiode varierer fra 38 m/s ved traseens laveste punkt til 44 m/s for høyeste punkt ved Langhamrane. Samtidig endres vindretningen med høyden på en måte som gjør at vindkastenes normalkomponent på traseen endres minimalt med høyden. Det kan dermed benyttes en normalkomponent (50-års vindkast) på 34 m/s for hele traseen. Kombinasjon av vind og islast er beregnet basert på modelldata, og sammenliknet med lasttilfellet gitt i NEK 445. For denne traseen bør det legges til grunn full kombinasjon som gitt i NEK445, kap. 4.6.1 NO.1.

*Tabell 1-1: Klimalaster for 22 kV Bjølsegrø. Vind- og islaster er gitt med 50-års returperiode. Samtlige laster er gyldige i 10 m høyde over bakken for universalkabel med linediameter på maksimalt 49 mm og jordline med linediameter på maksimalt 12 mm. * lineært økende med høyden over havet.*

Islast universalkabel (kg/m)	Islast jordline (kg/m)	Istype	Vindkast, retningsuavhengig (m/s)	Vindkast, normalkomponent (m/s)	Kombinasjon ihht. NEK 445
3.5	2.5	Våtsnø	38 – 44*	34	Ja

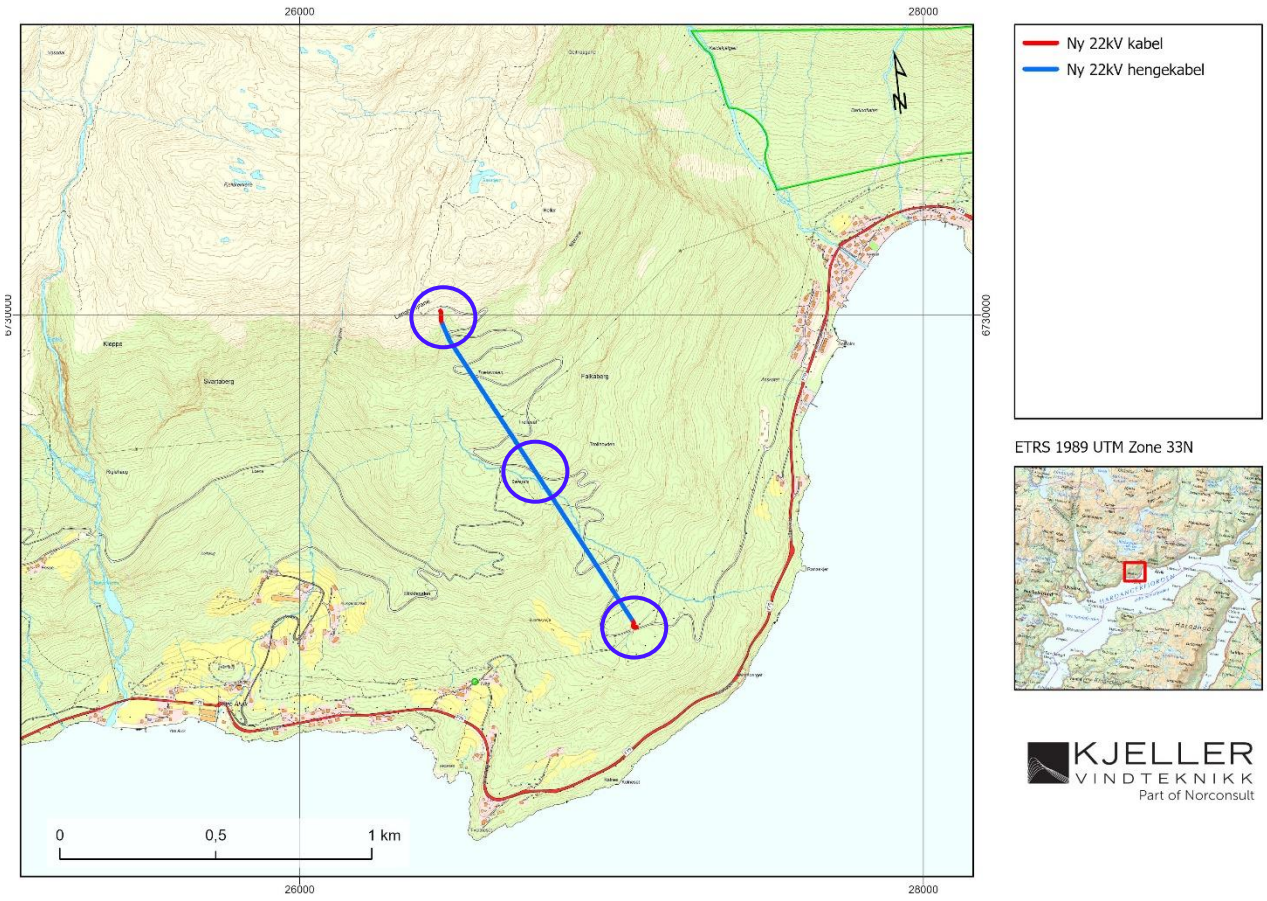
Innhold

1 Inndeling 4
1.1 Kraftledningstrasé 4
2 Datagrunnlag og metodikk 5
2.1 Data 5
2.2 Isberegninger 5
2.2.1 Våtsnø og tørrsnø 5
2.3 Vindberegninger 6
2.4 Ekstremverdiberegninger 6
2.4.1 Ising 6
2.4.2 Vind 7
2.4.3 Kombinasjon av vind- og islaster 7
3 Generell klimatologi 8
3.1 Vindroser 8
3.2 Ising i form av skyising 10
3.3 Ising som følge av snøfall 11
4 Dimensjonerende klimalaster 12
4.1 Vind- og islaster 12
5 Referanser 13
Vedlegg A Modellresultater i
Vedlegg B Beskrivelse av WRF-modellen iii
Vedlegg C Beskrivelse av isingsmodellen v

1 Inndeling

1.1 Kraftledningstrasé

Rapporten omhandler beregning av vind- og islaster for planlagt 22 kV-kraftledning Bjølsegrø som strekker seg fra Svortekyrkja til Langhamrane i Kvam kommune, Vestland fylke (Figur 1-1). Traseen er på ca. 1.2 km og er planlagt å fremføres i nordvestlig retning med bratt stigning. Ettersom at traseen planlegges i området nært Hardangerfjorden vil omkringliggende områder preges av komplekst terreng med fjell og dalfører hvor det er både skog og snaufjell. Høyeste punkt langs traseen er ca. 575 moh. på Langhamrane hvor det er relativt lite vegetasjon.



Figur 1-1: Oversiktskart over trasé som evalueres i denne rapporten. Blå sirkler markerer punkter der modellanalyser er utført. Fra nord til sør: Langhamrane, Trollhovda og Svortekyrkja.

2 Datagrunnlag og metodikk

2.1 Data

Beregningene av is- og vindlaster er basert på meteorologiske data generert med en numerisk værmodell. Modellen som er benyttet er WRF (Weather Research and Forecasting model) og er beskrevet i Vedlegg A. Modelldataene er fordelt i et horisontalt gitter med oppløsning på 3 km x 3 km og tidsoppløsning på én time for perioden 1979 – 2023. Denne simuleringen benevnes WRF3km. Modelldata er hentet ut for representative punkter i områdene nær traseen. Videre er et lignende modelldatasett med en horisontal oppløsning på 750 m x 750 m (heretter WRF750m) benyttet i isingsberegningene. Datasettet dekker to år og er brukt til å gjøre en statistisk korreksjon av vind og vanninnhold i WRF3km for å gi en økt presisjon i representasjonen av lokale terrengeffekter. Metodikken som benyttes for å korrigere vinddata mot WRF750m er beskrevet i (Liléo, Berge, Undheim, Klinkert, & Bredesen, 2013).

2.2 Isberegninger

2.2.1 Skyis

Skyising forekommer ved temperatur under 0 ˚C, lavt skydekke/tåke og vind. I slike tilfeller vil små underkjølte skydråper være i flytende tilstand, men samtidig ha en temperatur lik luftens temperatur. Ved vind på tvers av en ledning vil disse dråpene kollidere med lina, fryse spontant, og akkumuleres som et hvitt isbelegg. Ved temperatur like under 0 °C (eller ved høy isingsintensitet) fryser dråpene mer langsomt og danner en tettere og mer transparent is. Skyising forekommer i all hovedsak i eksponert fjellterreng, og mengden øker ofte raskt med høyden.

Tidsserier av vindhastighet, temperatur, konsentrasjon av skyvann (korrigert mot WRF750m) samt andre relevante skyparametere fra WRF3km anvendes for å beregne akkumulert skyis på et referanseobjekt. Beregningene er gjort etter formelverket gitt i ISO-standarden for atmosfærisk ising på konstruksjoner, ISO 12494, og er beskrevet i Vedlegg C.

2.2.2 Våtsnø og tørrsnø

Våtsnø forekommer ved snøfall ved temperaturer like over frysepunktet. I slike tilfeller vil snøflakene inneholde en viss mengde flytende vann, noe som gjør dem klebrige (kram snø) og får dem lett til å feste seg på en luftledning. Isingsraten øker med økt vindhastighet. For en horisontal ledning er det vinden på tvers av ledningen som er avgjørende.

Akkumulasjon av våtsnø på en horisontal ledning kan modelleres basert på informasjon om nedbør, vind, temperatur og luftfuktighet. Akkumulasjonsmodellen benyttet her er beskrevet i detalj i (Nygaard, Águstsson, & Somfalvi-Tóth, 2013) og er kalibrert mot et stort antall målinger på Island (Thorsteins, Nygaard, Ingvaldsen, & Eliasson, 2022). De nødvendige variablene er hentet ut som tidsserier fra WRF, og isingsraten i hvert tidspunkt bestemmes basert på de meteorologiske dataene.

Modellen inkluderer også følgende prosesser der våtsnø fjernes fra ledningen: Smelting, sublimasjon og «isfelling» - dvs. at snøen kan falle av ledningen dersom snøens tetthet er tilstrekkelig lav og vindhastigheten er tilstrekkelig høy.

Siden våtsnø kun forekommer under helt spesielle værforhold vil det på tross av en lengre tidsserie (44 år) være relativt få episoder å basere ekstremverdiberegningen på. For å øke det statistiske grunnlaget er det utført beregninger med en ensemblemetodikk som består av en rekke isingsberegninger for samme modellpunkt der temperaturen blir endret med verdier varierende mellom ± 2 °C. For hver isingsberegning endres temperaturen med 0.1°C, noe som resulterer i 40 realiseringer for hvert modellpunkt. Dette gir et vesentlig bedre datagrunnlag for beregning av ekstremverdier (Thorsteins, Nygaard, Ingvaldsen, & Eliasson, 2022).

I noen tilfeller kan tørr snø bidra til økt last dersom kraftledningen allerede er dekket av et lag med is (våtsnø). Slike tilfeller er typisk koblet til perioder med synkende temperaturer og lave vindhastigheter (<~5 m/s) etter perioder med våtsnøising. Dette fenomenet er derfor mest fremtredende i områder med skog og områder med generelt lave vindhastigheter nærme bakken. Beregningene av tørr snø er basert på de følgende antagelsene:

- Kraftledningen er allerede dekket av et lag med våtsnø.
- Vindhastigheten er lavere enn 5 m/s.

Tørr snø faller enklere av kraftledningen enn våtsnø. Sannsynlighet for isfelling øker med økt vindhastighet.

2.3 Vindberegninger

Ekstremverdier av vindkast er først beregnet basert på Norsk Standard for vindlaster (NS-EN 1991-1-4). Her er referansevindhastigheter oppgitt på kommunenivå, sammen med et formelverk for å beregne dimensjonerende vindkast med valgt returtid for ulike terrengtyper. Basert på referansevinden, høyden over bakken og terrengtype (overflatens ruhet) bestemmes turbulensintensiteten og korresponderende kastfaktor. Referansevinden er definert som 10-minutters middelvind i 10 m høyde i homogent og flatt terreng med terrengkategori II, med returtid på 50 år.

Ekstremvind fra WRF-modellen blir også beregnet med utgangspunkt i modellerte middelvindserier. Da vindkast (3 sek middelvind) ikke er tilgjengelig direkte fra WRF-modellen har det blitt parametrisert på følgende måte:

$$U_g(z) = U(z) + 3 \cdot \sqrt{TKE(z)},$$

der *Ug* er vindkast, *U* er 10 min middelvind, *TKE* er modellert turbulent kinetisk energi og *z* angir høyde over bakken. Videre beregnes det en kastfaktor (Ug/U) for hver sektor der kun de sterkeste vindepisodene (timesverdier som overskrider 90-persentilen innenfor hver sektor) fra WRF750m blir hensyntatt. Medianen av disse kastfaktorene blir videre brukt til å estimere vindkastserier i det vindkorrigerte referansedatasettet (WRF3km).

I vindberegningene er det ikke foretatt noen reduksjon av verken maksimalvind eller normalkomponent som følge av spennlengden. For normale spenn (med tilnærmet konstant høyde over bakken) må vindanalysen tolkes som en punktanalyse som er representativ for hele spennet.

2.4 Ekstremverdiberegninger

2.4.1 Ising

Det benyttes en statistisk analyse for å bestemme ekstremverdiene i seriene av modellerte våtsnølaster fra WRF. Ekstremverdianalysen heter Peaks-Over-Threshold (POT) og går ut på å tilpasse hendelsene som overstiger en høy grense med en teoretisk sannsynlighetsfordeling. I POT analysen tilpasses overskridelsene en generalisert Pareto-fordeling. Straks fordelingen er tilpasset dataene på beste måte kan returperioder bestemmes, med tilhørende returverdier. Koden som er brukt for ekstremverdiberegningen er dokumentert i (Coles, 2001). En utfordring med POT analysen er at det ikke finnes en robust og objektiv måte å bestemme terskelverdien på. I denne analysen er 98.5-persentilen brukt som grense.

Siden våtsnø opptrer svært sjeldent er det knyttet relativt stor usikkerhet til beregning av 50-års returverdier, selv med en 44-års dataserie. Å gjøre 40 uavhengige våtsnøberegninger for et modellpunkt ved å justere temperaturen innenfor små intervaller, slik beskrevet i kapittel 2.2.2, bidrar til å redusere usikkerheten i ekstremverdiestimatene. 50-års verdier for våtsnø estimeres ved å tilpasse en Pareto-fordeling til de maksimale våtsnølastene fra alle beregningene samlet.

For enkelte værelementer kan det være vanskelig å identifisere enkelthendelser, og det er i stedet naturlig å benytte årlige maksimalverdier som grunnlag i ekstremverdianalysen. For eksempel for skyising, som i

høyfjellet pågår over lang tid kan det være riktigere å forholde seg til årlige maksima i stedet for å dele inn i enkeltepisoder i en ekstremverdianalyse. Med årlige maksimalverdier som grunnlag benyttes en tilpasningsfordeling som heter GEV («Generalized Extreme Value distribution»). GEV inneholder en formparameter som tilpasses etter fordelingen av de dataene som brukes. Eksempelvis er den klassiske Gumbelfordelingen et spesialtilfelle av GEV.

2.4.2 Vind

De korrigerte dataseriene er framkommet gjennom en kvantilregresjon mellom vinden i WRF750m og WRF3km, og en ekstremvindanalyse gjennomføres på disse dataene. Det er benyttet Gumbel–Liebleins metodikk (Gumbel, 1958) (Lieblein, 1976) (Harris, 1996), som er en anerkjent metode for beregning av ekstremvind. Metodikken benytter årsmaksima av vindhastighet og forutsetter dataserier på minst 20 år. Dataserien benyttet her har lengde på 44 år.

2.4.3 Kombinasjon av vind- og islaster

Om ikke annet er oppgitt skal lasttilfellet med kombinasjon av vind- og islaster, dvs. vindtrykk på iset line, beregnes etter retningslinjene gitt i kapittel 4.6.1 i EN50341-2-16:2016 (NEK445). Det betyr at vindkreftene skal beregnes basert på vindkast med 50-års returperiode, V50, i kombinasjon med islast med 3-års returperiode, I3 (forutsatt pålitelighetsnivå 1). Når isingsformen er våt snø, skal V50 multipliseres med en kombinasjonsfaktor Bi lik 0.7. En skalering av vindhastigheten med 0.7 tilsvarer en skalering av vindtrykket med 0.49.

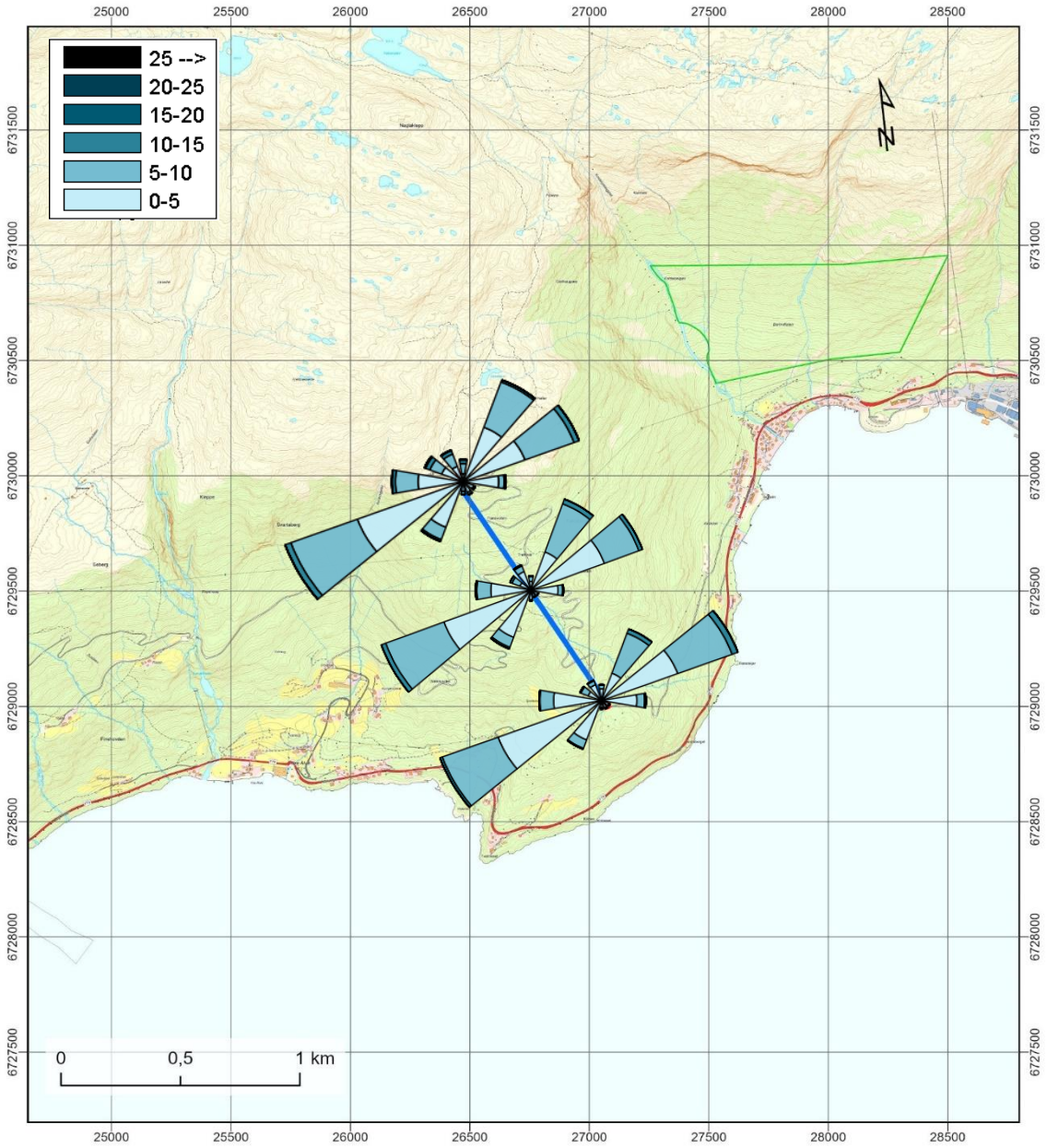
I kapittel 4.6 i EN 50341-2-16:2016 er det beskrevet at lasttilfellet med kombinerte vind- og islaster kan sløyfes etter råd fra meteorolog. Siden dataene fra WRF3km er gitt med 1 times oppløsning for hele perioden fra 1979 til 2023, har vi anledning til å studere den faktiske samtidigheten av sterk vind og is på linene. For alle modellpunktene regnes det ut timesverdier av kombinasjonslasten, og basert på disse tidsseriene kan det beregnes en kombinasjonsfaktor. Dersom den beregnede kombinasjonsfaktoren er lavere enn Bi lik 0.7 er det grunnlag for å anbefale en redusert kombinasjonslast. Dersom den beregnede kombinasjonsfaktoren er høyere enn eller lik Bi 0.7 anbefales det å regne kombinasjon i henhold til kapittel 4.6 i EN 50341-2-16:2016. I denne rapporten betegnes dette som «Ja» i dimensjonerende lasttabell i avsnitt 4. I noen tilfeller er det svært sjelden at sterk vind opptrer samtidig som det er is på linene. I slike tilfeller vil lasten forårsaket av vindkast med 50-års returperiode være større enn lasten forårsaket kombinasjon av vind og is på linene. Det vil da være unødvendig å beregne kombinasjonslast og vi betegner dette som «Nei».

3 Generell klimatologi

3.1 Vindroser

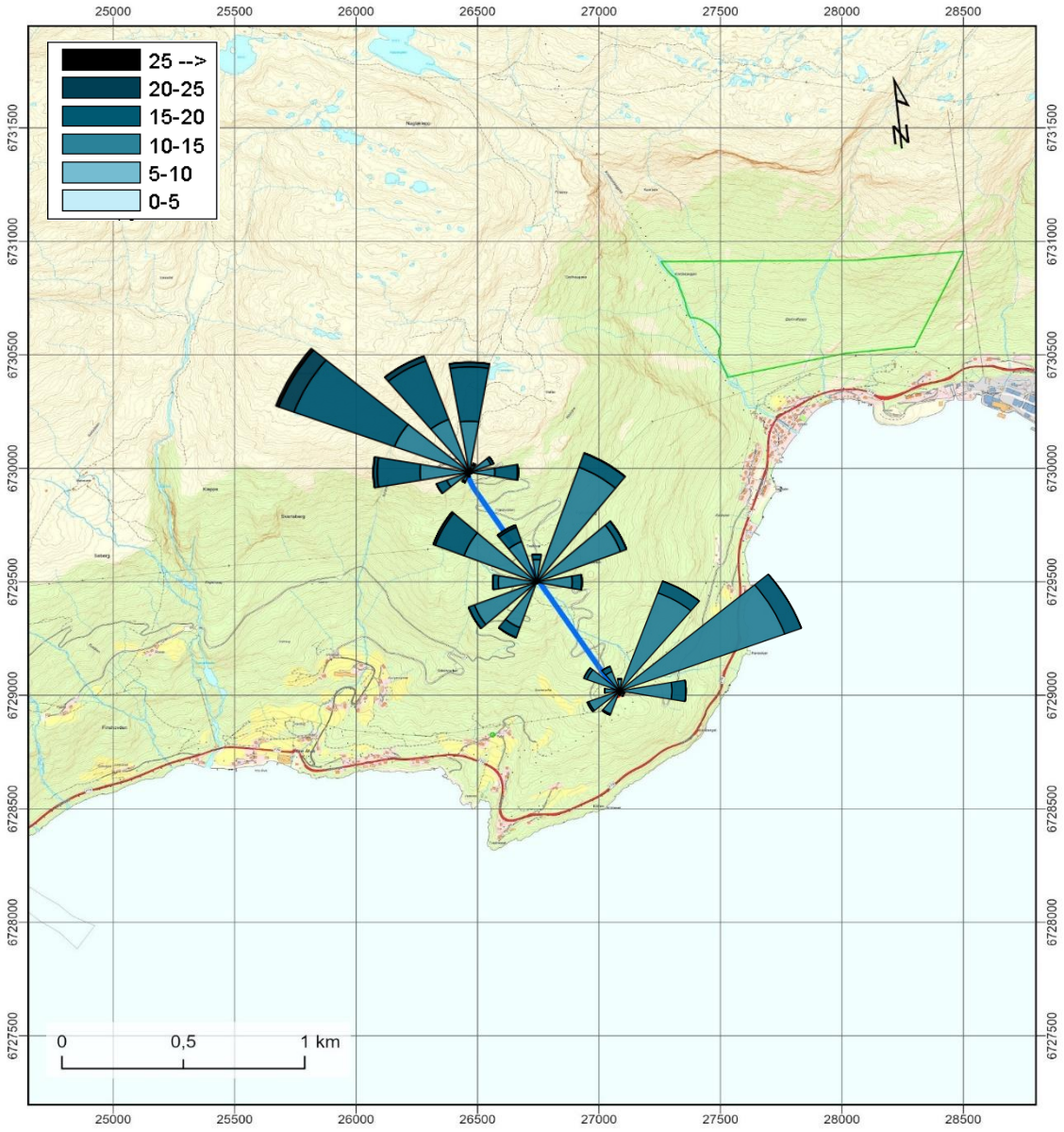
Figur 3-1 viser beregnede vindroser i 10 m over bakken for de utvalgte modellpunktene langs traseen. Vindrosene gjelder perioden 1979 – 2023 og er basert på WRF3km korrigert mot WRF750m. Vindrosene viser liten variasjon langs linjen, hvor østlige og vestlige vinder styrt parallelt med Hardangerfjorden er de dominerende retningene. For den høyestliggende delen ved Langhamrane er det noe hyppigere innslag av vind fra nordvest, ned fra fjellet.

For ekstremvindberegninger basert på modellseriene refereres til Vedlegg A.



Figur 3-1: 22 kV Bjølsegrø: Beregnede vindroser for perioden 1979 – 2023. Vindrosene er beregnet i 10 m over bakken og er basert på WRF3km data vindkorrigert mot WRF750m. Fargekoden på vindrosene viser vindhastighet som 10 min middelvind (m/s). Lengden på hver sektorstolpe indikerer andelen av tiden med vind fra gitt retning. Fra nord til sør: Langhamrane, Trollhovda og Svortekyrkja. Koordinatsystem: ETRS 1989 UTM Zone 33N.

Vindroser basert på kun de sterkeste vindepisodene i modellserien er vist Figur 3-2. Det er størst forekomst av sterke vinder fra vest og nordlig retning for Langhamrane i nord, mens det for Svortekyrkja i sør er særlig sterk vind fra nordøst. For Trollhovda er retningen for de sterkeste vindepisodene jevnere fordelt mellom vestlig og østlig retning. I såpass komplekst terreng er det likevel som regel relativt store usikkerheter tilknyttet modellerte vindroser da både vindhastighets- og retningsfordelinger kan ha store lokale variasjoner.



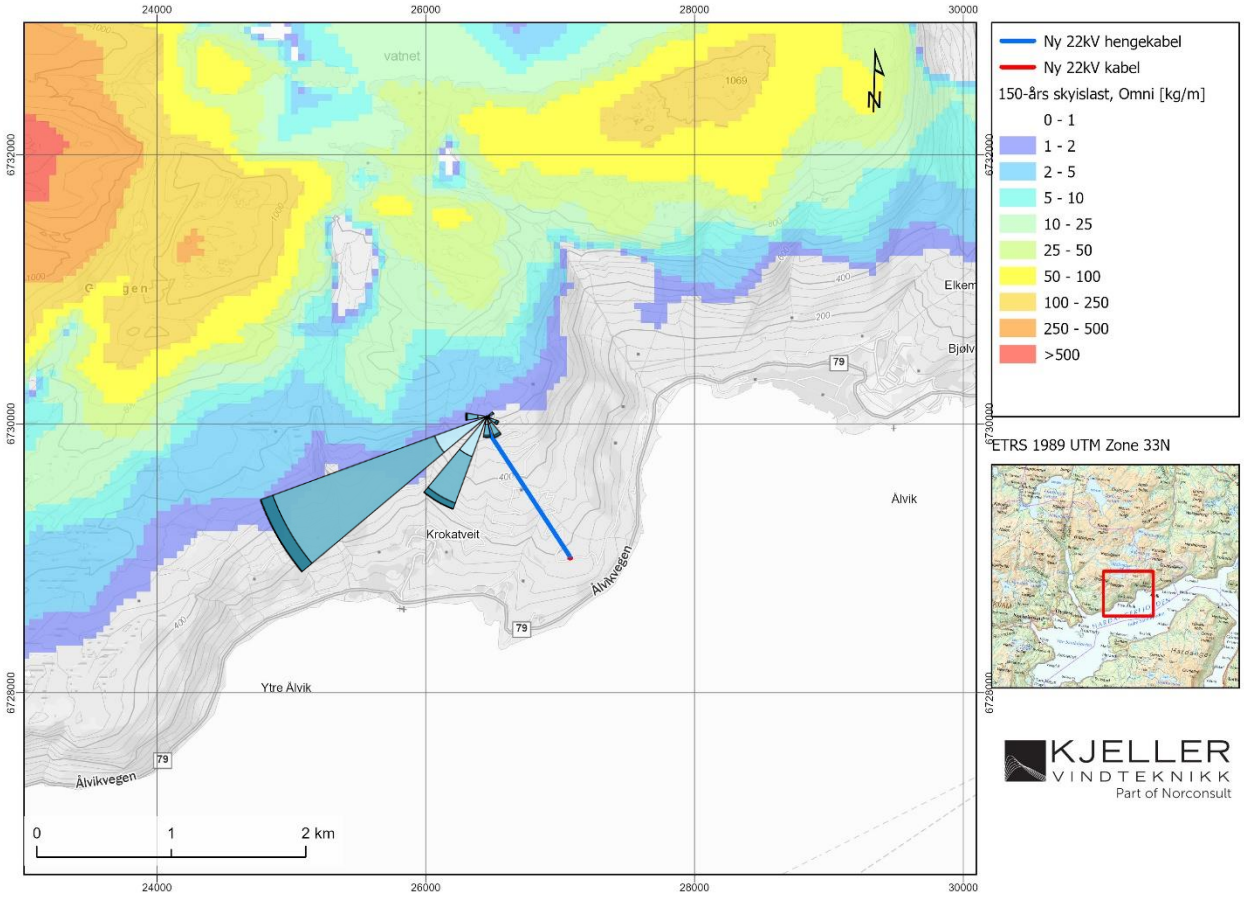
Figur 3-2: 22 kV Bjølsegrø: Beregnede vindroser for perioden 1979 – 2023. Vindrosene er beregnet i 10 m over bakken og er basert på WRF3km data vindkorrigert mot WRF750m. Fargekoden på vindrosene viser de 1% høyeste vindhastighetene som 10 min middelvind (m/s). Lengden på hver sektorstolpe indikerer andelen av tiden med vind fra gitt retning. Fra nord til sør: Langhamrane, Trollhovda og Svortekyrkja. Koordinatsystem: ETRS 1989 UTM Zone 33N.

3.2 Ising i form av skyising

Figur 3-3 viser et kartlag som gir beregnede 150-års[1] skyislaster gjeldene for et referanseobjekt i 15 m høyde over bakken. Kartlaget ble produsert av Kjeller Vindteknikk for Statnett via forskningsprosjektet ICEBOX[2] med svært lignende datagrunnlag og beregningsmetodikk som er benyttet i denne rapporten. Isingskartene er beskrevet i detalj i (B.E. Nygaard, 2022).

Kartet indikerer at området langs traseen er lite utsatt for skyising. Punktanalysen ved Langhamrane bekrefter dette med en relativt lav beregnet skyislast på 1.0 kg/m for linjeretningen. For den aktuelle traseen antas det derfor at islaster i form av våtsnø vil være av størst betydning, og vil være kilden til de dimensjonerende islastene.

For beregnede ekstremverdier av islaster som følge av skyising refereres til Vedlegg A.



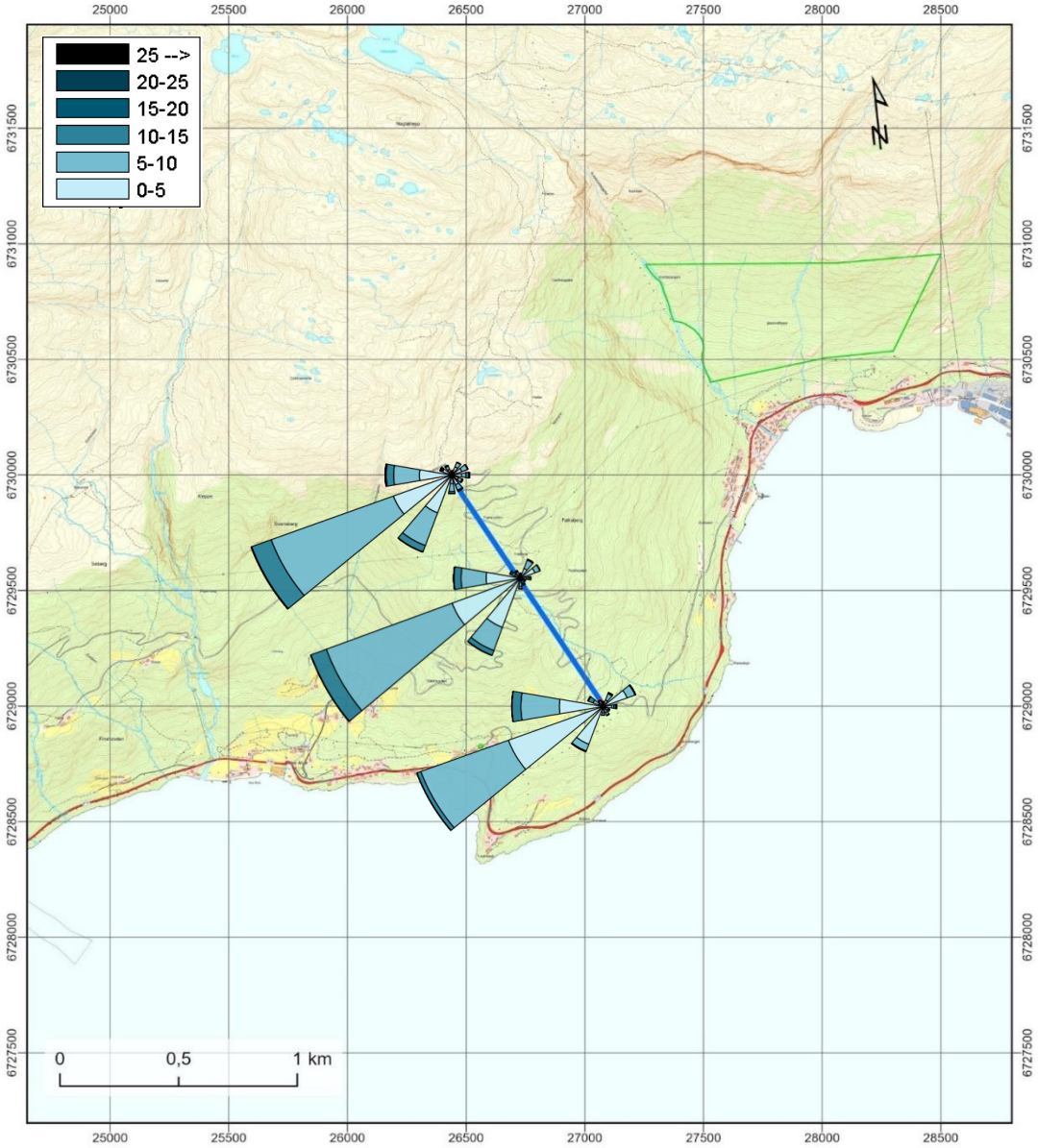
Figur 3-3: Kartlagte 150-års skyislaster gjeldene for et standard isingsobjekt (retningsuavhengig) i 15 m høyde, samt beregnet vindrose for tidspunkter med isingsintensiteter (skyis) høyere enn 0.01 kg/m per time. Vindrosen er basert på WRF-3km-data korrigert mot WRF750m. Fargekoden på vindrosen viser vindhastighet som 10 min middelvind (m/s) i 10 m høyde. Lengden på hver sektorstolpe indikerer andelen av tiden med vind fra gitt retning. Langhamrane. Koordinatsystem ETRS 1989 UTM Zone 33N.

[1] 150-års islaster er beregnet ved å multiplisere 50-årsverdien med 1.25, jamfør NEK 445.
[2] https://www.statnett.no/om-statnett/innovasjon-og-teknologiutvikling/vare-sentrale-prosjekter/icebox/

3.3 Ising som følge av snøfall

I området hvor kraftledningen planlegges antyder modellen en gjennomsnittlig årsnedbør på mellom 1919 mm. Modelldata indikerer at opp mot 31 % av årsnedbøren faller som snø i de høyestliggende delene av traseen, mens det er om lag 14 % av nedbøren som kommer som snø i lavere terreng.

Figur 3-4 viser vindroser basert på tidspunkter med isingsintensitet (våtsnø og tørrsnø) høyere enn 0.01 kg/m pr. time. Dette gir et bilde av ved hvilke vindretninger og vindhastigheter våtsnøakkumulasjon vil forekomme. Det forekommer våtsnø fra vestlige og sørvestlige retninger for alle tre lokasjonene, med relativ liten variasjon. For beregnede ekstremverdier av islaster som følge av snøfall refereres til Vedlegg A. Beregningene viser at 50-års islast endres svært lite med høyden, og at en islast på 3.5 kg/m kan brukes på universalkabelen på hele traseen. Det samme gjelder jordlinen hvor en islast på 2.5 kg/m kan brukes på hele traseen.



Figur 3-4: Beregnede vindroser for tidspunkter med isingsintensitet høyere enn 0.01 kg/m pr. time. Vindrosene er beregnet i 10 m høyde over bakken og er basert på WRF3km-data korrigert mot WRF750m. Fargekoden på vindrosene viser vindhastighet som 10 min middelvind (m/s). Lengden på hver sektorstolpe indikerer andelen av tiden med vind fra gitt retning. Fra nord til sør: Langhamrane, Trollhovda og Svortekyrkja. Koordinatsystem: ETRS 1989 UTM Zone 33N.

4 Dimensjonerende klimalaster

4.1 Vind- og islaster

Tabell 4-1 gir klimalaster for planlagt 22 kV-kraftlinje Bjølsegrø. Vind- og islaster er gitt med 50-års returperiode. Det er gjort beregninger for jordline med diameter 12 mm og universalkabel med diameter 49 mm. Beregningene for begge linene er gjort i 10 m over bakken. Klimalastene er bestemt med utgangspunkt i resultatene fra Vedlegg A samt kapittel 3 i denne rapporten.

Islastene er beregnet til 3.5 kg/m for faselinen (universalkabel) og til 2.5 kg/m for jordlinen for en 50-års returperiode og er av typen våtsnø. De høyeste lastene er beregnet ved Trollhovda hvor det er relativ stor forekomst av våtsnø-akkumulasjon ved vinder på tvers av lineretning.

Beregnet 50-års vindkast varierer fra 38 m/s for den mest skjermede delstrekningen, til 44 m/s for den mest eksponerte delstrekningen. Samtidig endres vindretningen med høyden på en måte som gjør at vindkastenes normalkomponent på traseen endres minimalt med høyden. Det kan dermed benyttes en normalkomponent (50-års vindkast) på 34 m/s for hele traseen. Kombinasjon av vind og islast er beregnet basert på modelldata, og sammenliknet med lasttilfellet gitt i NEK 445. For denne traseen bør det legges til grunn full kombinasjon som gitt i NEK445, kap. 4.6.1 NO.1.

*Tabell 4-1: Klimalaster for 22 kV Bjølsegrø. Vind- og islaster er gitt med 50-års returperiode. Samtlige laster er gyldige i 10 m høyde over bakken for en for universalkabel med linediameter på maksimalt 49 mm og jordline med linediameter på maksimalt 12 mm. Det er angitt hvorvidt det er nødvendig å hensynta kombinasjon av vind og is jamfør NEK445. * lineært økende med høyden over havet.*

Islast universalkabel (kg/m)	Islast jordline (kg/m)	Istype	Vindkast, retningsuavhengig (m/s)	Vindkast, normalkomponent (m/s)	Kombinasjon ihht. NEK 445
3.5	2.5	Våtsnø	38 – 44*	34	Ja

5 Referanser

B.E. Nygaard, K. I. (2022). Development of Ice Load Maps for Structural Design. *IWAIS.* Montreal.

Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modeling for extreme values* . Springer.

Elíasson, Á. J. (2019). Shedding of in-cloud icing. *IWAIS.* Reykjavik.

Elíasson, Á., Hannesson, G., & Thorsteinson, E. (2017). Wet snow icing—Analysis of field measurements 1999–2016. *International Workshop on Atmospheric Icing of Structures.*

Finstad, K. J., Lozowski, E. P., & Gates, E. M. (1988). A computational investigation of water droplet trajectories. *Journal of atmospheric and oceanic technology, 5(1),*, 160-170.

Gumbel, E. (1958). *Statistics of extremes.* Columbia University Press.

Harris, R. I. (1996). Gumbel re-visited-a new look at extreme value statistics applied to wind speeds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 59(1), 1-22.

Harstveit, K. (2009). Using metar-data to calculate in-cloud icing on a mountain site near by the airport. In , Andermatt, Switzerland. *WAIS.* Andermatt.

Ingvaldsen, K. N. (2019). Validation of Modelled In-cloud Ice Accretion on Overhead Power Lines at Exposed High Altitude Sites in Norway. *IWAIS.*

Ingvaldsen, K., Nygaard, B. E., Byrkjedal, Ø., & Iversen, E. C. (2019). Validation of Modelled In-cloud Ice Accretion on Overhead Power Lines at Exposed High Altitude Sites in Norway. *IWAIS.*

Lieblein, J. (1976). *Efficient methods of extreme-value methodology.* National Bureau of Standards, NEA-CSNI-R.

Liléo, S., Berge, E., Undheim, O., Klinkert, R., & Bredesen, R. E. (2013). Long-term correction of wind measurements. State-of-the-art, guidelines and future work. *Elforsk*, 13:18.

Makkonen, L. (1989). Estimation of wet snow accretion on structures. . *Cold Regions Science and Technology*, 17(1), 83-88.

Makkonen, L. (2000). Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 358(1776),*, 2913-2939.

Nygaard, B. E., Águstsson, H., & Somfalvi-Tóth, K. (2013). *Modeling wet snow accretion on power lines: Improvements to previous methods using 50 years of observations.* Journal of Applied Meteorology and Climatology.

Nygaard, B. E., Byrkjedal, Ø., Iversen, E., Fredbo, M., & Ágústsson, H. (2017). Development of a reliable modelling system for the calculation of rime ice loads on overhead transmission lines. *IWAIS.*

Nygaard, B. E., Carlshem, L., Bartsch, J., Lee, L., & Ágústsson, H. (2019). Development of a 50-year return value ice load map for Sweden. *International Workshop on Atmospheric Icing of Structures.*

Nygaard, B. E., Kristjánsson, J. E., & Makkonen, L. (2011). Prediction of in-cloud icing conditions at ground level using the WRF model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2445-2459.

Rasmussen, R. M., Geresdi, I., Thompson, G., Manning, K., & Karplus, E. (2002). Freezing drizzle formation in stably stratified layer clouds: The role of radiative cooling of cloud droplets, cloud condensation nuclei, and ice initiation. *Journal of the atmospheric sciences, 59(4)*, 837-860.

Roberge, M. (2005). The Physics of Wet Snow Accreted on an Overhead Wire. *Structural Engineering Series Report no. 2005-03*, 16.

Sokolov, P., & Virk, M. S. (2019). Droplet distribution spectrum effects on dry ice growth on cylinders. *Cold Regions Science and Technology, 160*, 80-88.

Thorsteins, E., Nygaard, B. E., Ingvaldsen, K., & Eliasson, Á. J. (2022). Wet snow icing modeling and comparison with field data. *International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS).*

Vedlegg A Modellresultater

Modellresultater er her oppsummert for vindkast og våtsnø for hvert av modellpunktene markert i oversiktskartet i Figur 1-1 i rapporten.

A.1 Vindkast

A.1.1 Basert på Norsk Vindstandard

Ekstremverdier for vindkast basert på standard NS-EN 1991-1-4 er beregnet for 10 m høyde over bakken. Referansevindhastigheten (10-min middelvind i 10 m høyde, terrengkategori 2) gitt i NS-EN 1991-1-4 for Hamarøy kommune er 24 m/s. Ut fra referanseverdien kan man ved hjelp av metodene og formelverket gitt i NS-EN 1991-1-4 beregne 50-års vindkast i en gitt høyde ved bruk av den lokale terrengruheten.

Tabell A- 1 viser de beregnede verdiene for tre ulike terrengkategorier. Terrengkategori 1 tilsvarer ruhetslengde på 0.01 m, og representerer glatte fjellpartier eller områder direkte nedstrøms av disse. Terrengkategori 2 tilsvarer en ruhetslengde på 0.05 m, og representerer områder med lav vegetasjon som busker og små trær, mens terrengkategori 3 representerer skogkledde områder med ruhetslengde 0.3 m.

Verdiene i tabellen er ikke justert for topografieffekter som vindforsterkning over topper, kanalisering og kostforsterkning bak bratt terreng. I komplekst terreng er realiteten ofte en blanding av disse effektene, og det er svært vanskelig å bestemme topografifaktorer basert på formelverket i standarden.

Tabell A- 1: Beregnede 50-års middelvindhastigheter og vindkast i 10 m høyde over bakken, basert på metodene og formelverket gitt i NS-EN 1991-1-4. Verdiene er beregnet for tre ulike terrengkategorier, og er basert på aktuell referanseverdi (24 m/s for Kvam kommune).

	50-års middelvind (m/s)	50-års vindkast (m/s)
Terrengkategori 1	28.0	39.7
Terrengkategori 2	24.0	36.6
Terrengkategori 3	18.0	31.2

A.1.2 Basert på modellerte værdata

Tabell A- 2 viser beregnede 50-års returverdier for vindkast basert på modelldata i 10 m over bakken for modellpunktene, beregnet ved bruk av Gumbel-Lieblein metoden som er nevnt i kapittel 2.4.2. 50-års vindkast er beregnet til mellom 38.2 og 44.0 m/s.

Avviket mellom modell og vindstandard kan skyldes nettopp lokale topografieffekter som modellen til en viss grad løser opp direkte. Vi velger derfor i størst grad å basere dimensjonerende vindlaster på modellresultatene, med ytterligere justeringer der modellen heller ikke fanger opp lokale effekter godt nok.

Tabell A- 2: Beregnede 50-årsverdier for vindkast (m/s) i 10 m høyde over bakken som normalkomponent for representative ledningsretninger, samt en maksimal, retningsuavhengig verdi. Resultatene er beregnet fra WRF3km-data korrigert mot WRF750m-data.

Lokasjon	N-S	NØ-SV	Ø-V	SØ-NV	Linjeretning (150°)	Retningsuavhengig
Langhamrane	39.7	43.1	36.9	29.9	33.6	44.0
Trollhovda	36.6	39.6	33.2	33.6	33.4	41.0
Svortekyrkja	35.0	34.5	30.2	34.0	34.7	38.2

A.2 Ising i form av skyis

Tabell A- 3 viser beregnede 50-års skyislaster for fire linjeretninger basert på data fra utvalgte modellpunkt. I tillegg angir tabellen retningsuavhengige 50-årsverdier gjeldene for et standard isingsobjekt[3]. For et standard isingsobjekt er 50-års skyislaster beregnet opp til 1.2 kg/m ved Langhamrane, mens lastene avtar betraktelig mot lavere terrenghøyder. De retningsvise islastene er ofte vesentlig lavere enn den retningsuavhengige verdien.

Tabell A- 3: Beregnede 50-års islaster fra skyising (kg/m) på en horisontal ledning orientert i ulike retninger. Det er i tillegg gitt en maksimal, retningsuavhengig verdi. Verdiene gjelder for liner med diameter på 49 mm 10 m over bakken.

Modellpunkt	Beregnede 50-års skyislaster (kg/m) gitt for ulike linjeretninger					
	N – S (0°)	NØ – SV (45°)	Ø – V (90°)	SØ – NV (135°)	Linjeretning (150°)	Omni
Langhamrane	0.8	0.8	0.9	1.1	1.0	1.2

A.3 Ising som følge av snøfall

Ekstremverdier av akkumulerte islaster fra våtsnø er beregnet ved bruk av POT-metoden som beskrevet i kapittel 2.4.1. Våtsnølaster med 50-års returperiode er gitt for representative ledningsretninger samt en retningsuavhengig verdi for utvalgte modellpunkter i Tabell A- 4 og Tabell A- 4. Verdiene gjelder for liner med diameter på 49 mm og 12 mm med en gjennomsnittlig høyde på 10 m over bakken.

Tabell A- 4: Beregnede 50-års islaster fra våtsnø/tørrsnø (kg/m) på en horisontal ledning orientert i ulike retninger. Det er i tillegg gitt en maksimal, retningsuavhengig verdi. Verdiene gjelder for liner med diameter på 49 mm og en gjennomsnittlig høyde på 10 m over bakken.

Modellpunkt	Beregnede 50-års våtsnølaster [kg/m] gitt for ulike linjeretninger					
	N – S (0°)	NØ – SV (45°)	Ø – V (90°)	SØ – NV (135°)	Linjeretning (150°)	Retningsuavhengig
Langhamrane	2.9	1.9	2.0	3.0	3.1	3.5
Trollhovda	3.0	2.0	1.8	3.2	3.3	3.8
Svortekyrkja	3.0	1.4	1.5	3.2	3.2	3.8

Tabell A-4: Beregnede 50-års islaster fra våtsnø/tørrsnø (kg/m) på en horisontal ledning orientert i ulike retninger. Det er i tillegg gitt en maksimal, retningsuavhengig verdi. Verdiene gjelder for liner med diameter på 12 mm og en gjennomsnittlig høyde på 10 m over bakken.

Modellpunkt	Beregnede 50-års våtsnølaster [kg/m] gitt for ulike linjeretninger					
	N – S (0°)	NØ – SV (45°)	Ø – V (90°)	SØ – NV (135°)	Linjeretning (150°)	Retningsuavhengig
Langhamrane	1.9	1.2	1.1	2.0	2.1	2.4
Trollhovda	1.9	1.0	0.8	2.1	2.2	2.7
Svortekyrkja	1.6	0.6	0.8	1.8	1.9	2.4

[3] Vertikal, roterende sylinder med diameter på 30 mm.

Vedlegg B Beskrivelse av WRF-modellen

Meso-Scale Model WRF

The Weather Research and Forecast (WRF) model is a state-of-the-art meso-scale numerical weather prediction system, aiming at both operational forecasting and atmospheric research needs. A description of the modelling system can be found at the home page https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model. The model version used in this work is v4.1.2 described in Skamarock et al. (2008)[4]. Details about the modelling structure, numerical routines and physical packages available can be found in for example Klemp et al. (2000)[5] and Michalakes et al. (2001)[6]. 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 at an international level. In addition, the code is freely 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- and meteorological data. The geographical dataset is obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), and includes topography, surface data, albedo and vegetation. These parameters have high influence on the meteorological variables in the atmospheric layers close to the ground. For the entire domain except for Sweden and Norway, the model uses land use data input from NOAA. The land use data for Sweden is retrieved from the Geografiska Sverigedata (GSD)-Land Cover which is classified in accordance with the European Union's CORINE Land Cover mapping project[7]. For Norway, the model input uses the N50 land use data provided by the Norwegian Mapping Authority[8].

For the solving of the model equations, boundary conditions of the area are required. Such lateral boundary data are available from the European Centre for Medium range Weather Forecasting (ECMWF). The reanalysis dataset ERA Interim[9,10] is available with a spatial resolution of approximately 0.7 degrees globally. The ECMWF have also released a new global reanalysis dataset (ERA5[11]) with higher spatial and temporal resolution compared to the ERA-Interim dataset (30 km and 3 hours, respectively). The reanalysis datasets represent the state of the atmosphere at 6 hours intervals and are generated through an assimilation model that incorporates all available observation data globally, including several thousand ground-based observation stations, vertical profiles from radiosondes, aircrafts, and satellites.

[4] 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
[5] Klemp JB., Skamarock WC. and Dudhia J., 2000: Conservative split-explicit time integration methods for the compressible non-hydrostatic equations (https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model)
6 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 Zwieflhofer and Norbert Kreitz. World Scientific, Singapore.
[7] http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover
[8] http://www.kartverket.no/eng/Norwegian_Mapping_Authority/
[9] 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
[10] http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/era-interim
[11] https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5

Model Setup

The model domains of the three different datasets are shown in Figure B - 1, while the most important properties of the model configurations are summarized in Table B - 1.

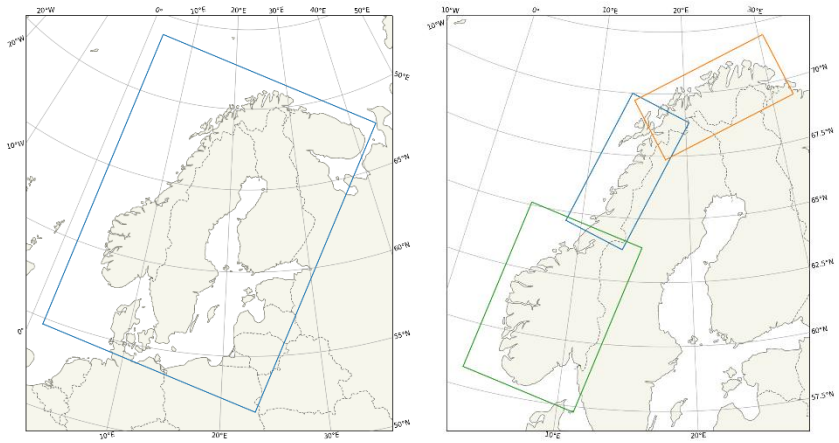


Figure B - 1: Model domain set up for: Left: WRF3km. Right: WRF750m.

Table B - 1: Overview of the most important properties of the WRF model simulations

Simulation name	Time period	Input dataset	Nr. of vertical levels	Boundary layer scheme	Microphysics scheme
WRF3km	1979 – 2023	ERA5	32	MYNN	Thompson-Eidhammer
WRF750m	Two full years covering autumn 2014 to spring 2015, and autumn 2019 to autumn 2020.	ERA5	51	MYNN	Thompson-Eidhammer

Vedlegg C Beskrivelse av isingsmodellen

C.1 Introduction

Since icing is not a variable in the WRF model itself, it needs to be calculated as a post processing of the WRF model data. The icing model used in this study is a generic, physically-based model developed by Kjeller Vindteknikk through various research and development projects over several years. The individual components of the model are based on well-known ice accretion models described in the scientific literature, however some parts have been further developed and fine-tuned through validation with icing measurements. The current model is applied by Kjeller Vindteknikk in various icing studies and ice mapping projects in different countries and climate zones both in Europe, North America and in Asia.

An icing model used for a continuous, long-term simulation of icing on conductors needs to include the following processes:

1. **Ice accumulation.** The primary icing processes are rime icing (in-cloud icing), wet-snow icing and glaze icing (freezing rain).
2. **Ice persistence.**
3. **Ice removal.** The ice removal processes are sublimation, melting and ice shedding.

It is site-dependent which process is the most important when considering extreme icing. Icing models are often documented in detail for the accumulation part. However, the severity of icing in cold areas can be strongly influenced by ice removal processes, e.g. in situations with repeated accumulation of, rime ice occurring before a situation with ice removal. Extreme icing can, in some cases continue for days, weeks and even months. In rare cases icing events can even be a mixture of different icing types.

Icing models are often applied without considering the actual span direction, named "omni" in this report. It generally should lead to overestimation since it accounts for accumulation from all directions without considering the icing particle's flux direction relative to the accumulating area. An example of such omni-directional model approach is the rime icing map for Sweden shown in (Nygaard, Carlshem, Bartsch, Lee, & Ágústsson, 2019).

For a particular power line when the actual span direction as well as the wind direction is known the icing particle flux is reduced/corrected when it is not perpendicular to the span. This is included in the model results presented in this report, however the omni-directional results are also presented in the same graphs.

Even though models for rime ice, wet snow and freezing rain often are described separately, the general approach is similar and can be described by equation (1). The model aims to simulate the icing process on the conductor from the start of accumulation until it disappears. The different terms on the right-hand side of (1) describe the rate of change of ice mass (dM/dt) due to rime icing from cloud droplets, wet snow accretion, dry snow accretion, freezing rain icing, sublimation, melting and shedding.

$$\left({}^{dM}/_{dt}\right)_{Tot} = \left({}^{dm}/_{dt}\right)_{Cloud} + \left({}^{dm}/_{dt}\right)_{Wet\ snow} + \left({}^{dm}/_{dt}\right)_{Dry\ snow} + \left({}^{dm}/_{dt}\right)_{Rain} - \left({}^{dm}/_{dt}\right)_{Sub} - \left({}^{dm}/_{dt}\right)_{Melt} - \left({}^{dm}/_{dt}\right)_{Shedding} \quad (1)$$

Different approaches can be taken when applying (1) for icing modelling, either to include all accumulation terms in one simulation (a) or run separate simulations for the different icing types (b). If single icing events consist of a mixture of icing types, (a) would give more realistic results, however to the author's experience such combined events are rare in nature and approach (b) normally gives similar results. In the current report we use approach (b) with all ice removal terms included, but approach (a) may be considered later in the project if considered more appropriate.

A basic approximation in many icing models is the cylindrical approximation. It is a well-studied model and is often referred to as the Makkonen model or the ISO12494 model. The main assumption of the cylindrical model is that the icing accumulates in the radial direction, so that the cylindrical geometry of the ice sleeve is

maintained during the icing event. In reality, icing only occurs on the upstream (exposed) side of the conductor, however due to twisting of the conductor as well as ice sliding on the conductor's surface, observed icing on overhead lines are often well described as cylindrically shaped. For torsional rigid conductors (e.g. short spans of bundled conductors) the cylindrical assumption may lead to conservative ice loads.

The basic equation for ice accumulation of the cylindrical icing model is

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot w \cdot V \cdot D \qquad (2)$$

where

- *dM/dt* is the icing rate
- *w* is the mass concentration (kg/m^3) of the icing particles in the air.
- α_1 is the collision efficiency. It describes if a particle hits the object through a collision.
- α_2 is the sticking efficiency. It explains if a particle that hits an object will stick to it or bounce back.
- α_3 is the accretion efficiency. It defines if a particle that sticks to an object will freeze or drip off as liquid water.
- *D* is the total diameter of the iced cylinder.
- *V* is the velocity of the particles perpendicular to the object [m/s]. The particle's velocity is the vector sum of the wind speed and the particle fall speed.

C.1.1 Time integration

A time step (*dt*) of one hour is used in the analysis. This corresponds to the temporal resolution of the WRF hindcast data. The time integration is performed in the following order:

1. Calculate ice mass *M* at time *i* using:

$$M_i = M_{i-1} + \left({}^{dM}/_{dt}\right)_i \cdot dt \qquad (3)$$

2. Update the total ice density ρ_i
3. Update the total icing diameter using:

$$D_i = \left[\frac{4(M_i - M_{i-1})}{\pi \rho_i} + D_{i-1}^2\right]^{1/2} \qquad (4)$$

In the following sub-chapters the icing models for rime ice and wet snow are described in more details, including the list of variables from the WRF hindcast used as input for the different models.

C.2 Model for rime ice

Rime ice accumulation is calculated based on the cylindrical approximation, using the formulas from (Finstad, Lozowski, & Gates, 1988) and (Makkonen L. , 2000). The model used for rime in this report includes the contribution from glaze ice caused by freezing rain/drizzle. The governing equation for the rime ice model used in this report thus becomes:

$$\left({}^{dM}/_{dt}\right)_{Rime} = \left({}^{dm}/_{dt}\right)_{Cloud} + \left({}^{dm}/_{dt}\right)_{Rain} - \left({}^{dm}/_{dt}\right)_{Sub} - \left({}^{dm}/_{dt}\right)_{Melt} \qquad (5)$$

A list of WRF variables used as input to the rime icing model is given in Table C - 1.

Table C - 1: List of meteorological variables used in the rime icing model.

Variable	Unit	Description
Wind speed	m/s	Horizontal wind speed
Wind direction	Deg (0-360)	
Air Temperature	K	Normally extracted at the lowest vertical level of WRF
Specific air humidity	g/kg	
Air pressure	Pa	
Q_{cloud}	kg/m^3	Mass concentration of cloud liquid water
Q_{rain}	kg/m^3	Mass concentration of rain/drizzle liquid water
SWDOWN	W/m_2	Incoming short-wave radiation

C.2.1 Efficiency coefficients

The collision efficiency α_1 is an essential part of the rime icing model. For cloud droplets we calculate α_1 according to (Finstad, Lozowski, & Gates, 1988), who calculated α_1 based on the wind speed, icing diameter and the median volume cloud droplet diameter (MVD). We diagnose the MVD from the WRF output according to the equations in (Nygaard, Kristjánsson, & Makkonen, Prediction of in-cloud icing conditions at ground level using the WRF model, 2011).

Traditionally, the MVD approach has been widely used for calculation of the collision efficiency between droplets and a cylinder. There are, however, limitations of the MVD approach which is particularly important for large icing diameters typically occurring in rime ice conditions at exposed sites ((Nygaard, Byrkjedal, Iversen, Fredbo, & Ágústsson, 2017), (Ingvaldsen, Nygaard, Byrkjedal, & Iversen, 2019) and (Sokolov & Virk, 2019)). In the current model we have replaced the MVD with a full droplet size distribution and calculate the collision efficiency for each bin of the distribution. Various droplet size distributions (referred to as “Langmuir distributions”) have been implemented as options in the model, based on the set of different distributions as shown in Table C - 2. The numbers in the table represent the ratio of the droplet diameter in the various bins to the MVD. An example of the Langmuir D distribution is shown visually in Figure C - 1.

Table C - 2: Langmuir droplet size distributions. The numbers represent the droplet diameter ratios for the various bins of the distributions.

LWC fraction	A	B	C	D	E	F	G	H	J
0.05	1.00	0.56	0.42	0.31	0.23	0.18	0.13	0.10	0.06
0.1	1.00	0.72	0.61	0.52	0.44	0.37	0.32	0.27	0.19
0.2	1.00	0.84	0.77	0.71	0.65	0.59	0.54	0.50	0.42
0.3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.2	1.00	1.17	1.26	1.37	1.48	1.60	1.73	1.88	2.20
0.1	1.00	1.32	1.51	1.74	2.00	2.30	2.64	3.03	4.00
0.05	1.00	1.49	1.81	2.22	2.71	3.31	4.04	4.93	7.34

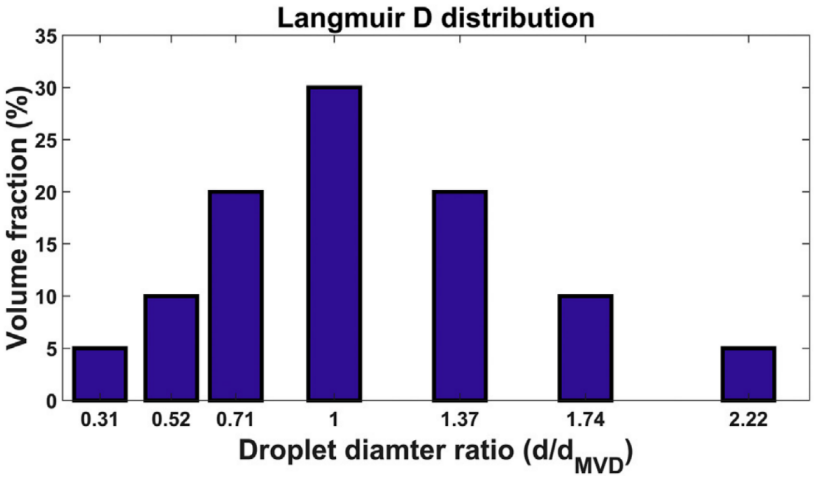


Figure C - 1: Langmuir D droplet size distribution.

In cases of high cloud LWC (liquid water content) the supercooled clouds may start to produce larger droplets, known as freezing drizzle. Such droplets typically have an MVD of 100 µm which implies a high collision efficiency of approximately 90 % with a reference cylinder, compared to about 10 % for a typical cloud droplet with MVD in the range 10 – 20 µm. Therefore, even at low mass concentrations, any freezing rain or drizzle in the air may contribute significantly to the total ice accumulation, with almost 10 times the collision efficiency of cloud droplets. In clean arctic air the likelihood of freezing drizzle is high due to a low cloud droplet number concentration, and the rapid growth of cloud to drizzle size droplets (Rasmussen, Geresdi, Thompson, Manning, & Karplus, 2002).

The details of the rime icing model are described in (Makkonen L. , 2000), including equations for the calculation of the collision efficiency (α_1) of cloud droplets with cylinders, as well as the accretion efficiency (α_3) which accounts for the effect of latent heat release on the ice surface. The formulas used for the accretion efficiency (α_3) in the rime icing model are identical to the ones in (Makkonen L. , 2000).

The sticking efficiency α_2 is assumed to be 1 for supercooled droplets hitting an object.

C.2.2 Melting and sublimation

Two processes responsible for the reduction of ice mass are implemented in the model. These are melting and sublimation. Melting takes place when there is a positive energy balance on the ice surface whereas sublimation takes place when the air is sub-saturated with respect to ice. Both processes have increasing rates with increasing wind speed, and the orientation of the conductor relative to the wind affects the melting and sublimation rates.

Ice melting is calculated by evaluating the energy balance model, given by

$$Q_{melt} = Q_h + Q_e + Q_n \quad (6)$$

where Q_h and Q_e are the sensible and latent heat fluxes. Q_n is the net radiation term. There are also other terms which will come into the total energy balance model, however they are of negligible size in this context. The term Q_{melt} in equation (6) is then the heat flux available to melt the ice. The melted ice mass (dM_{melt}) each time step in the model is found by

$$dM_{melt}=Q_{melt} / L_f \quad (7)$$

where L_f is the heat of fusion/melting (L_f =3.34 * 10^5 J/kg). More details on the energy balance model is given in (Harstveit, 2009).

Sublimation is calculated in the same manner, based on the energy balance. During sublimation the evaporative heat flux is balanced by the sensible heat flux and radiative heat flux.

$$Q_e = - (Q_h + Q_n) \quad (8)$$

In such conditions the surface temperature of the ice will be different from the air temperature, and the energy balance is solved numerically by iteration. Once the iteration has converged the sublimated mass dM_{sub} each time step is found by

$$dM_{sub}=Q_e / L_s \quad (9)$$

where L_s is the heat of sublimation (L_s =2.82 * 10^6 J/kg).

Experience has shown that the actual rates of reduction in ice mass during sublimation and melting are higher than the theoretical rates from the energy balance model. This has led to the introduction of shedding factors, to account for the mechanical loss of mass through e.g. parts of the accreted ice falling off. These are empirical factors that increase the melting and sublimation rates. In the current model the shedding factor for melting and sublimation are 3.5 and 1.15 respectively.

These factors have been optimized with respect to observed melting and sublimation rates on a test span at an exposed rime ice site in Norway (Ingvaldsen, Nygaard, Byrkjedal, & Iversen, 2019). The calibration of the shedding factors was based on three winter seasons worth of data (approximately a total of 20 melting episodes and 10 prolonged sublimation episodes, one of which lasted for almost six weeks).

C.2.3 Spontaneous shedding

Provided meteorological input data of sufficient quality, the rates at which rime ice accumulates, melts and sublimates on overhead power lines can be calculated deterministically with relatively high precision using current icing models (Ingvaldsen, Nygaard, Byrkjedal, & Iversen, 2019). However, even if the accumulation, melting and sublimation rates are captured perfectly, the ice accretion model will overestimate the long-term extreme values unless it also accounts for spontaneous ice shedding. This is particularly true when the model is used to predict ice accumulation on bundle conductors or other conductor configurations with high rotational stiffness on which ice will typically form as “ice vanes” on the windward side, compared to e.g. a thin earth wire which will allow for a more robust, cylindrical ice growth due to conductor rotation during icing.

Spontaneous shedding is a stochastic process and therefore inherently difficult to model deterministically (Elíasson Á. J., 2019). In the ongoing research project ICEBOX[12], we aim to develop a probabilistic ice shedding model based on long records of test span measurements on Iceland. However, the results are preliminary at this point and the shedding model needs to be properly validated before it can be applied to extreme value calculations.

C.2.4 Assumptions in the rime icing model

The following list summarizes the main assumptions of the rime icing model:

Table C - 3: List of main assumptions in the model used for rime ice.

Variable/parameter	Assumption
Icing criteria	Ice growth is only considered at temperature (T) < 0°C and requires the presence of cloud droplets and/or rain droplets.
The collision coefficient α_1 for cloud droplets	Calculated using the Langmuir J size distribution.
Lower limit for α_1	We limit α_1 by limiting the Stokes number K=max(K , 0.25)
The collision coefficient α_1 for rain and drizzle	assumed equal to 0.9.
Sticking coefficient α_2	Assumed equal to 1.

[12] https://www.statnett.no/en/about-statnett/research-and-development/our-prioritised-projects/icebox/

The accretion coefficient α_3	Calculated every time step based on the energy balance on the ice surface, considering accretion from both cloud water and rain.
Sublimation rate	Solved numerically every time step using the energy balance equation (7).
Melting rate	Calculated every time step using the energy balance equation (9).
Ice shedding during melting and sublimation	Sublimation and melting rates are scaled with empirical factors (shedding factors) SF_{sub}=1.15, SF_{melt} = 3.5
Spontaneous ice shedding	Not included in the model
Density of rime	Calculated every time step using the approach described in (Makkonen L. , 2000).
Density of Glaze	Calculated every time step using the approach described in (Makkonen L. , 2000) .
Total ice density	Calculated every time step as the mass weighted average of the contribution from cloud droplets and rain droplets.
Ice shape	Assumed cylindrical throughout the whole event.
Conductor diameter	Input parameter to the model. 30 mm used in this report.
Conductor torsional stiffness	Assumed to be 0. I.e., a freely rotating conductor.
Conductor temperature	Assumed equal to ambient temperature. Joule heating is not included.
Conductor height above ground	Input parameter to the model. 15 m used in this report.
Span direction	Input parameter to the model. Different for each site studied in this report.

C.3 Model for snow accretion

Wet snow occurs during snowfall at temperatures just above freezing. Snow particles falling from colder air aloft start to melt when entering warmer air closer to the ground. The vertical distance in which the melting of snowflakes occurs is called the melting layer of the atmosphere, and wet snow accretion may take place when a structure (e.g. a power line) is located within the melting layer (Figure 1). Snow particles that contain a certain amount of liquid water will become sticky, enabling the particles accrete on almost any type of object.

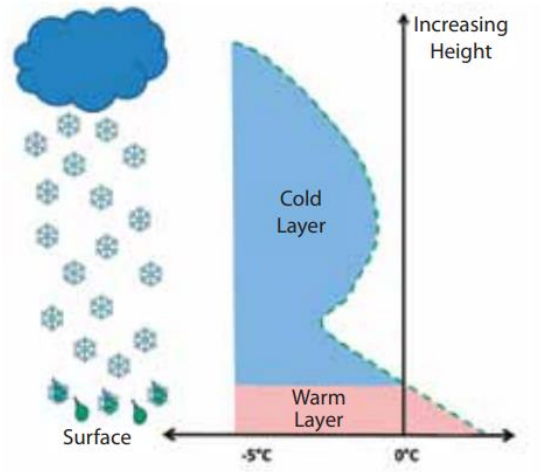


Figure 1: Conceptual figure showing a typical temperature profile during wet snow events, with a melting layer close to the ground.

Wet snow accumulation rates can be modelled based on precipitation, wind, temperature and humidity data. In particular, the effectiveness of which wet snowflakes stick to objects such as overhead power lines is highly sensitive to the wet-bulb temperature, T_w. As opposed to the dry-bulb temperature (normally referred to as air temperature), the wet-bulb temperature also accounts for evaporative cooling and is thus related to the relative humidity. In short, a snowflake in thermodynamic balance with its environment may contain liquid water only if the wet-bulb temperature is above 0 °C (Makkonen L. , 1989).

The accumulation model applied in the present analysis calculates wet snow accumulation using the cylindrical model approximation and is described in detail in (Nygaard, Águstsson, & Somfalvi-Tóth, 2013). The model is calibrated against a large dataset from Iceland consisting of icing observations on operational lines, load cell measurements in operational lines as well as load cell measurements in test spans (Elíasson, Hannesson, & Thorsteinson, 2017). In addition to accumulation of wet and dry snow, the model includes sublimation and melting. The governing equation for the snow accretion model used in this report is:

$$\left(dM/dt\right)_{Snow_tot} = \left(dm/dt\right)_{wet\ snow} + \left(dm/dt\right)_{dry\ snow} - \left(dm/dt\right)_{Sub} - \left(dm/dt\right)_{Melt} \quad (10)$$

The necessary meteorological variables listed in are extracted as hourly time series from WRF and used as input to the snow accretion model.

Table 1: List of meteorological variables used in the snow accretion model.

Variable	Unit	Description
Wind speed	m/s	Horizontal wind speed
Wind direction	Deg (0-360)	
Air Temperature	K	Extracted at the lowest vertical level of WRF
Specific air humidity	g/kg	
Air pressure	Pa	
Hourly precipitation rate	mm/h	
Q_{cloud}	kg/m^3	Mass concentration of cloud liquid water
Q_{snow}	kg/m^3	Mass concentration of snow
Q_{rain}	kg/m^3	Mass concentration of rain
Q_{graup}	kg/m^3	Mass concentration of graupel
SWDOWN	W/m^2	Incoming short-wave radiation

C.3.1 Dry snow accretion

Dry snow particles may also accumulate on overhead power lines under certain conditions. The criteria for dry snow accumulation are less known, however, studies have shown that dry snow particles tend to bounce off overhead power lines at wind speeds exceeding 2 – 3 m/s (Roberge, 2005). Our current ice accretion model allows for dry snow accumulation at wind speeds up to 5 – 6 m/s, however, the fraction of dry snow particles that contributes to the ice load is significantly reduced at wind speeds exceeding 2 – 3 m/s. Another precondition for dry snow accumulation is that the conductor is already covered by ice due to riming or wet snow accretion (dry snow particles tend to bounce off bare conductors, even at lower wind speeds than 2-3 m/s). To what extent dry snow accretion is an important contributor to the icing events along Hudson Bayis still uncertain.

C.3.2 Melting and sublimation

Two processes responsible for the reduction of ice mass are implemented in the model. These are melting and sublimation. Melting takes place when there is a positive energy balance on the ice surface whereas sublimation takes place when the air is sub-saturated with respect to ice. Both processes have increasing rates with increasing wind speed, and the orientation of the conductor relative to the wind affects the melting and sublimation rates.

Ice melting is calculated by evaluating the energy balance model, given by

$$Q_{melt} = Q_h + Q_e + Q_n \quad (6)$$

where Q_h and Q_e are the sensible and latent heat fluxes. Q_n is the net radiation term. There are also other terms which will come into the total energy balance model, however they are of negligible size in this context. The term Q_{melt} in equation (6) is then the heat flux available to melt the ice. The melted ice mass (dM_{melt}) each time step in the model is found by

$$dM_{melt}=Q_{melt} / L_f \quad (7)$$

where L_f is the heat of fusion/melting (L_f =3.34 * 10^5 J/kg). More details on the energy balance model is given in (Harstveit, 2009).

Sublimation is calculated in the same manner, based on the energy balance. During sublimation the evaporative heat flux is balanced by the sensible heat flux and radiative heat flux.

$$Q_e = - (Q_h + Q_n) \quad (8)$$

In such conditions the surface temperature of the ice will be different from the air temperature, and the energy balance is solved numerically by iteration. Once the iteration has converged the sublimated mass dM_{sub} each time step is found by

$$dM_{sub}=Q_e / L_s \quad (9)$$

where L_s is the heat of sublimation (L_s =2.82 * 10^6 J/kg).

Experience has shown that the actual rates of reduction in ice mass during sublimation and melting are higher than the theoretical rates from the energy balance model. This has led to the introduction of shedding factors, to account for the mechanical loss of mass through e.g. parts of the accreted ice falling off. These are empirical factors that increase the melting and sublimation rates. In the current model the shedding factor for melting and sublimation are 3.5 and 1.15 respectively.

These factors have been optimized with respect to observed melting and sublimation rates on a test span at an exposed rime ice site in Norway (Ingvaldsen, Nygaard, Byrkjedal, & Iversen, 2019). The calibration of the shedding factors was based on three winter seasons worth of data (approximately a total of 20 melting episodes and 10 prolonged sublimation episodes, one of which lasted for almost six weeks).

Melting of wet snow is calculated as follows. During wet snow icing, meltwater on the ice deposit surface tend to infiltrate the snow sleeve, due to the capillary forces. Normally melting takes place until the snow sleeve reach a critical liquid water fraction. At approximately 50% liquid water the cohesive forces in the snow will collapse, and complete shedding is observed. In the current model this is simplified to the assumption that all ice is removed by shedding if the wet-bulb temperature exceeds 1.5°C as an integrated value during a melting event. E.g. accreted snow can shed off if T_w exceeds 0.5°C during three consecutive hours, or T_w exceeds 1.5°C during one hour.

C.3.3 Assumptions in the wet snow icing model

The following list summarizes the main assumptions of the wet snow icing model:

Table 2: List of main assumptions in the model used for wet snow.

Variable/parameter	Assumption
Temperature criteria	$T_w > 0$
Precipitation intensity criteria	A certain precipitation intensity is required in order to initiate wet snow accumulation on power lines. The criteria is derived from the energy balance equation. $Q_{precip} > pi.*(T_w).*h. / (Lf .* SR .* U .* \alpha_2)$, where Q_{precip} is the total mass concentration of precipitation particles, h is the convective heat transfer coefficient, L_f is the latent heat of fusion, SR is the frozen fraction of the precipitation, U is the horizontal wind speed.
Dry snow criteria	Dry snow may accumulate when: 1. Pre-existing snow sleeve on the conductor

	2. U < 5 m/s
The collision coefficient α_1 for snow	Calculated as for rime but assuming an equivalent droplet MVD of 0.322 mm as a fixed value.
Sticking coefficient α_2	$\alpha_2 = \frac{1-\cos(9 \cdot SR - 4.5)}{2 \cdot U^{0.4}}$ when 0.5 < SR < 0.98, otherwise $\alpha_2 = 0$.
Graupel restriction of α_2	The sticking coefficient is reduced as a function of the graupel amount, if graupel is present during wet snow conditions.
The accretion coefficient α_3	$\alpha_3=1$
Sublimation rate	Similar as for rime ice.
Melting rate	Shedding when time integral of $T_w > 1.5$
Shedding	Complete shedding is assumed based on a combined criteria on ice density and wind speed: U > 40*(ρ*001) and ρ< 400
Density of wet snow	Calculated every time step using $\rho_{wetsnow}=200 + 25*U$
Density of dry snow	Calculated every time step using $\rho_{drysnow}=100 + 20 *U$
Total ice density	Calculated every time step as the mass weighted average of the contribution from wet snow and dry snow.
Ice shape	Assumed cylindrical throughout the whole event
Terminal velocity of wet snow	$W_{wetsnow} = -0.000223 * (SR* 100)^2 + 0.003276 * (SR * 100) + 3.108303$
Terminal velocity of dry snow	$W_{drysnows} = 1$ m/s
Conductor diameter	Input parameter to the model. 30 mm used in this report.
Conductor torsional stiffness	Assumed to be 0. I.e. a freely rotating conductor.
Conductor temperature	Assumed equal to ambient temperature. Joule heating is not included.