



Norwegian
Meteorological
Institute

MET report

no. 13/2014
Climate

Vurdering av sannsynlige vind og islaster i forbindelse med havari samt oppdaterte klimalaster for delstrekning på 420 kV Kvilldal - Rjukan

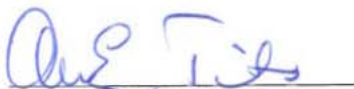
Harold Mc Innes
Bjørn Egil K. Nygaard (Kjeller Vindteknikk AS)



Norwegian
Meteorological
Institute

MET report

Title: Kvilldal – Rjukan, Tinn Kommune, Telemark	Date 2014-08-29
Section: Climate	Report no. no. 13/2014
Author(s): Harold Mc Innes Bjørn Egil K. Nygaard (Kjeller Vindteknikk AS)	Classification <input checked="" type="radio"/> Free <input type="radio"/> Restricted
Client(s): Statnett	Client's reference
Abstract I forbindelse med havari på 420 kV Rjukan – Kvilldal har Statnett bedt Meteorologisk institutt om å vurdere sannsynlige klimalaster ved havaritidspunktet som var 4. mars 2014 09:44. I tillegg ønskes dimensjonerende klimalaster. Oppdraget gjelder strekningen mellom mastene 317-338.	
Keywords Klimalast, vindlast, islast, våtsnø, kraftledning, ising	


Disiplinary signature


Responsible signature

Meteorologisk institutt
Meteorological Institute
Org.no 971274042
post@met.no

Oslo
P.O. Box 43 Blindern
0313 Oslo, Norway
T. +47 22 96 30 00

Bergen
Allégaten 70
5007 Bergen, Norway
T. +47 55 23 66 00

Tromsø
P.O. Box 6314
9293 Tromsø, Norway
T. +47 77 62 13 00

www.met.no

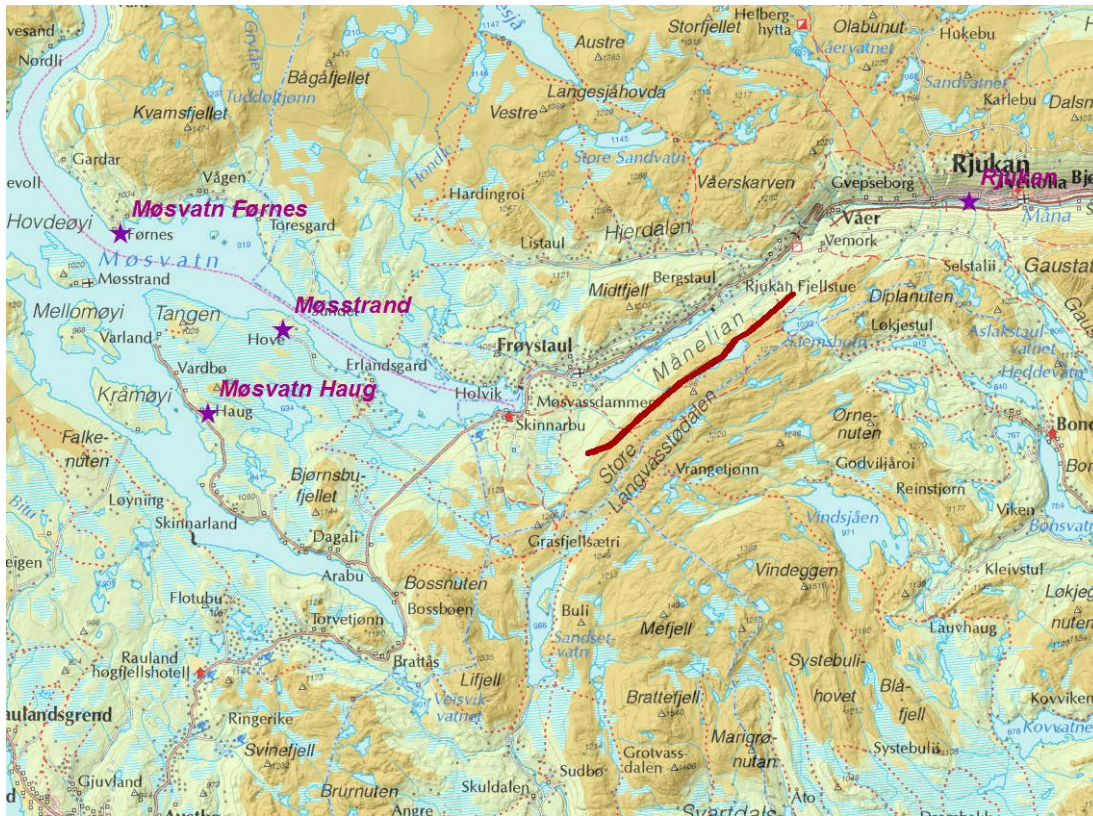
Innhold

Innhold	7
1 Innledning	8
2 Meteorologiske forhold	11
2.1 Generelt om meteorologiske forhold	11
2.2 Meteorologiske forhold i tiden rundt havariet	13
2.3 Sammenstilling av data fra WRF modellen og observasjoner	15
3 Vind og islaster	19
3.1 Befaring	19
3.2 Vind og islaster ved havaritidspunktet	19
3.3 Dimensjonerende vind og islaster	20
4. Oppsummering	22
Referanser	23
4 Vedlegg 1: Kjeller Vindteknikk rapport «Kvilldal - Rjukan, Tinn kommune, Telemark. Analyse av islaster i forbindelse med mastehavari på 420 Kv kraftledning»	24

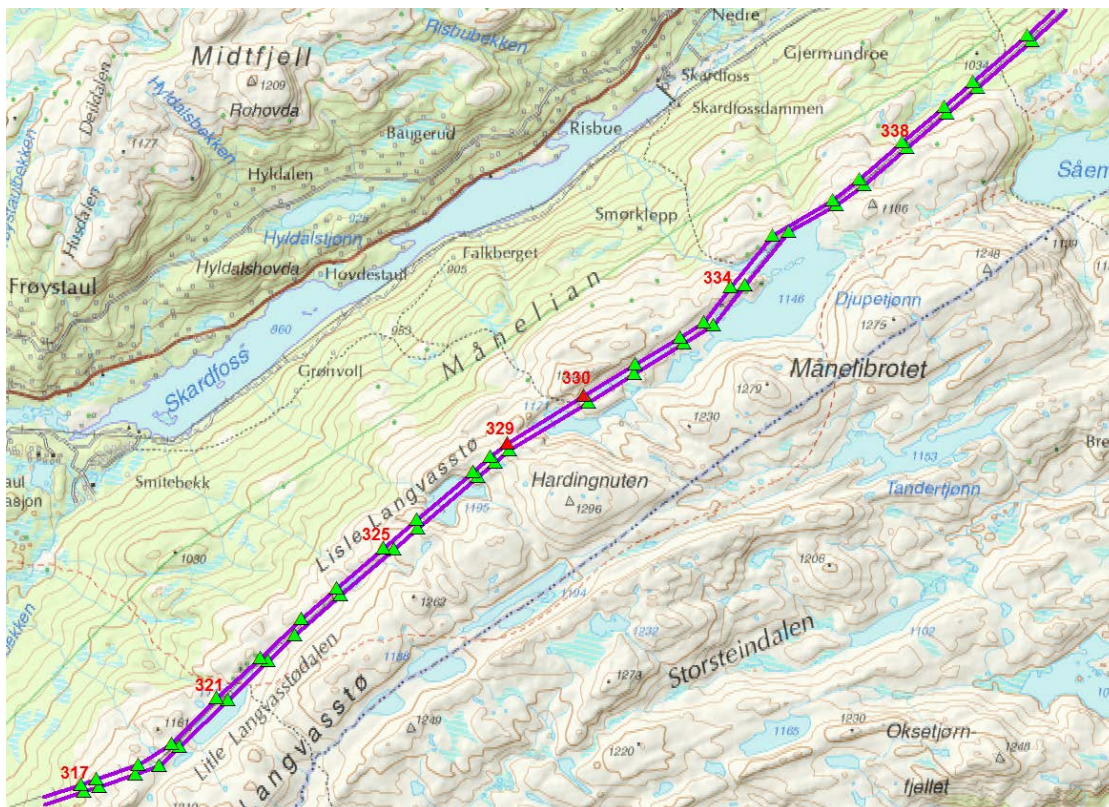
1 Innledning

Den 4. mars 2014 havarte to master på 420 kV ledningen mellom Kvilldal og Rjukan i Tinn kommune. I forbindelse med havariet ønsker Statnett en vurdering av sannsynlige vind og islaster på strekningen mellom mastene 317 og 338 på Kvilldal - Rjukan linjen (Figurene 1 og 2) på havaritidspunktet. Mastene som havarte hadde driftsnummer 329 og 330 og er markert i figurene 2 og 3 og vist på bilde i Figur 4. Statnett ønsker også oppdaterte klimalaster for strekningen mellom mastene 317 og 338.

Det aktuelle området befinner seg i høyfjellet sørvest for Skardfosdammen og ligger mellom 1100 og 1240 meter over havet. Vind og islastene i forbindelse med havariet er analysert på grunnlag av data fra værmodellen WRF og observasjoner fra de værstasjoner som er vurdert mest representative for området samt vurdering av området ved befaring. Oppdaterte 150 års verdier for islaster er satt på grunnlag av modellberegninger og befaring av området, og 50 års verdier for vindkast i hovedsak fastsatt utfra Norsk vindstandard. Det er tatt utgangspunkt i mastepunkter og trase i shape filer mottatt fra Statnett 23. mai 2014. På grunn av sin beliggenhet høyt til fjells er området utsatt for ising, og det har vært havari på grunn av ising her i 1974. Oppdraget er gitt av Statnett etter rammeavtale 2009/75.



Figur 1: Strekning på ledningen Kvilldal – Rjukan som skal ha oppdaterte klimalaster (mørkelrød linje). Meteorologiske stasjoner er markert som stjerner.



Figur 2: Strekning på ledningen Kvilldal – Rjukan som skal ha oppdaterte klimalaster i forbindelse med havari. Master er markert som grønne triangler. Master som havarerte er i rødt. Røde tall er mastenr.



Figur 3: Havariområdet. Grønne trekkanter markerer master. Master som havarete er i rødt.



Figur 4: Mastene som havarete. Mast 330 nærmest og mast 329 på andre siden av kløft.

2 Meteorologiske forhold

Nedenfor følger en generell beskrivelse av meteorologien i området der mastehavariet skjedde samt en beskrivelse av forholdene i tiden rundt havaritidspunktet. Området som skal vurderes befinner seg 1100 til 1240 m høyde mellom Rjukan og Møsvatn i Telemark fylke, og tilhører dermed Østlandet rent geografisk. Ca 15 km unna havaristedet ligger Møsstrand værstasjon (Figur 1) som har automatiske målinger av vind og temperatur tilbake til høsten 2006 og nedbørsmålinger tilbake til 1980. Stasjonen plassering på 977 moh ved Møsvatn gjør at den vurderes som den mest representative for den aktuelle strekningen av kraftledningen, men den ligger betydelig lavere og vil dermed være mindre utsatt for vind. Videre finnes nedbørsdata fra stasjonene Møsvatn Haug, Møsvatn Førnes og Rjukan (Figur 1).

2.1 Generelt om meteorologiske forhold

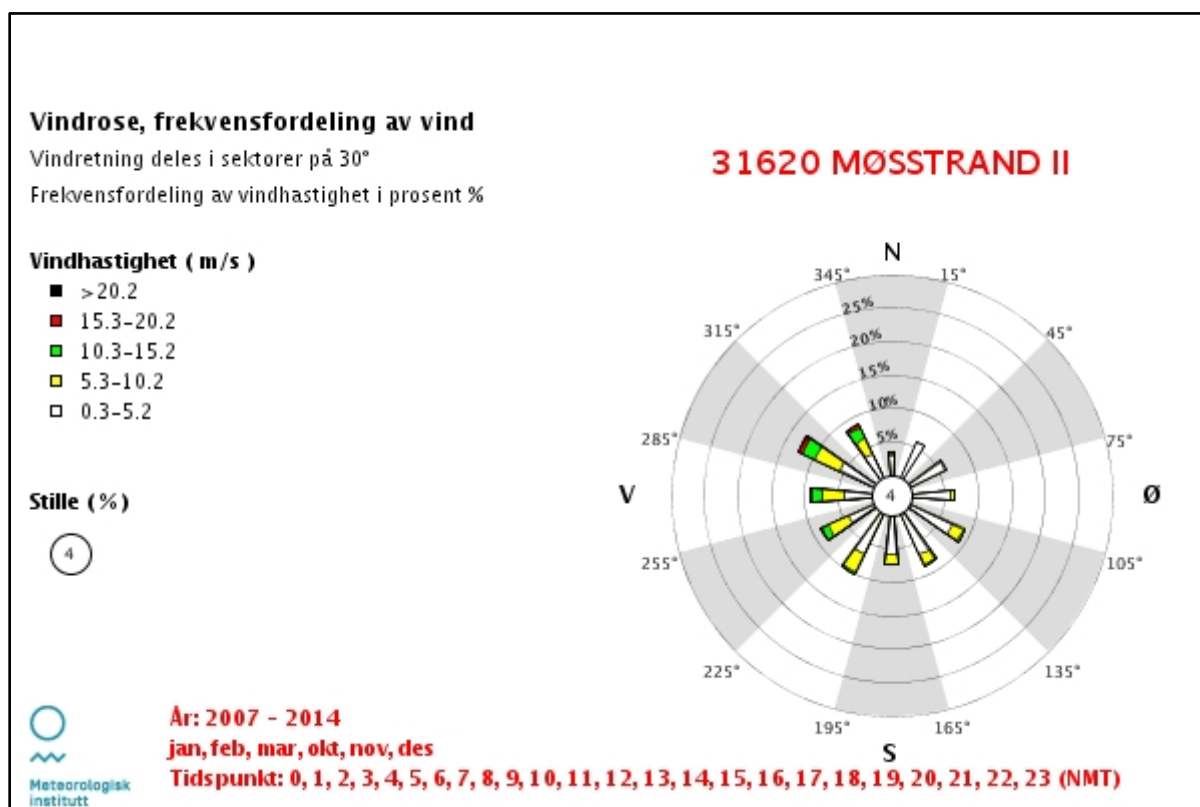
Tabell 1 viser døggnedbør med 10 og 50 års returperiode for 4 forskjellige værstasjoner, hvorav 3 av dem ligger ved Møsvatn og en ved Rjukan, det vil si nede i dalen. Stasjonene rundt Møsvatn vurderes som mest representative, og indikerer at området er preget av moderate nedbørmengder med 50 års døggnedbør på 40 til 50 mm. En tommelfingerregel sier at 150 års verdien av islast fra våt snø vil kunne relateres til 50 års døggnedbør med en faktor 0.1, noe som skulle tilsi at nedbør i form av våt snø vil kunne gi 4 – 5 kg /m is på en ledning. Dette er med andre ord ikke et spesielt nedbørsrikt område, og det er ikke særlig utsatt for ising fra våt snø.

Figur 5 viser vindrosen, det vil si prosentvise forekomsten av vind fordelt på sektorer og hastighetsklasser. Vindrosen viser at den vanligste vindretningen ved Møsstrand er fra nordvest, og at det var nordvestlig vind ca 13 % av tiden. Ellers forekommer vind hyppigst fra de vestlige retningene, og sjeldnest fra nord (ca 3 % av tiden). For østlige retninger er sørøst og sør – sørøst den mest vanlige (8 – 9 % av tiden), og ved vind fra disse retningene vil det være stor fare for ising ettersom fuktig luft da vil bli transportert inn fra Skagerak. Vestlige vindretninger vil i mindre grad gi ising ettersom fjellene gir en massiv skjerming mot kysten av Vestlandet og Sørvestlandet.

Tabell 1: Maksimal døgnedbør vinterstid. Returverdier angitt med to ulike metoder for ekstremverdberegning (Gumbel og NERC, hvor NERC er angitt i parentes).

Stasjon	Hoh	Periode	10-års returperiode	50-års returperiode
Møsstrand	977 m	1980 - 2014	32 (32) mm	39 (45) mm
Møssvatn Haug	946 m	1976 - 2013	35 (35) mm	44 (49) mm
Møssvatn Førnes	960 m	1976 - 2004	38 (38) mm	48 (52) mm
Rjukan	258 m	1920 - 2014	43 (42) mm	55 (58) mm

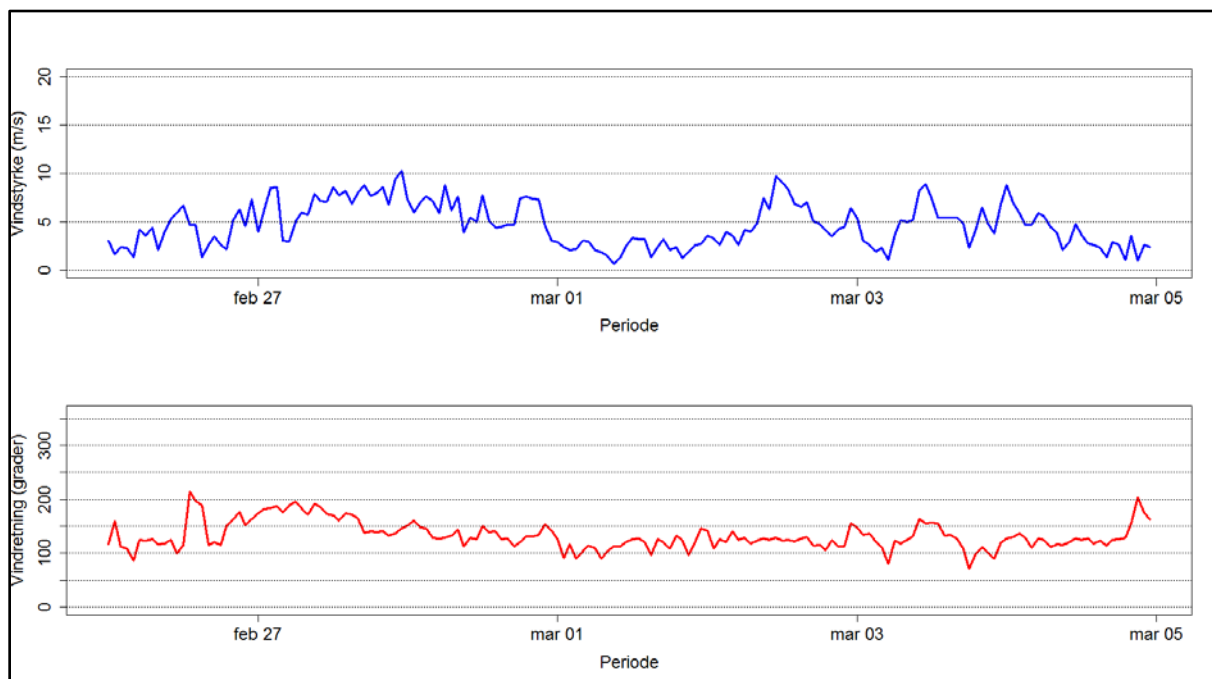
Det har vært automatiske målinger av vind på Møsstrand siden august 2006, og den maksimale 10 minutters vinden som er observert i denne tiden var 28.6 m/s den 23. mars 2011. Høyeste observert vindkast var 37.5 m/s 14. januar 2007. Ved dimensjonering for vindlaster tas det utgangspunkt i vindkast med 50 års returperiode, og siden måleserien på Møsstrand er relativt kort og ligger samtidig ligger betydelig lavere i terrenget må man ta utgangspunkt i Norsk vindstandard (Standard Norge, 2009). Den gir en referansevind for Tinn kommune på 24 m/s, og utfra referansevinden beregnes vindkast. Ved å bruke terrengkategori 1 i vindstandarden, anta høyde over havet på 1200 m og linenes høyde over bakken til 15 m fås vindkast med 50 års returperiode på 47 m/s.



Figur 5: Vindrose for Møsstrand for januar, februar, mars, oktober, november og desember for årene 2007 til 2014.

2.2 Meteorologiske forhold i tiden rundt havariet

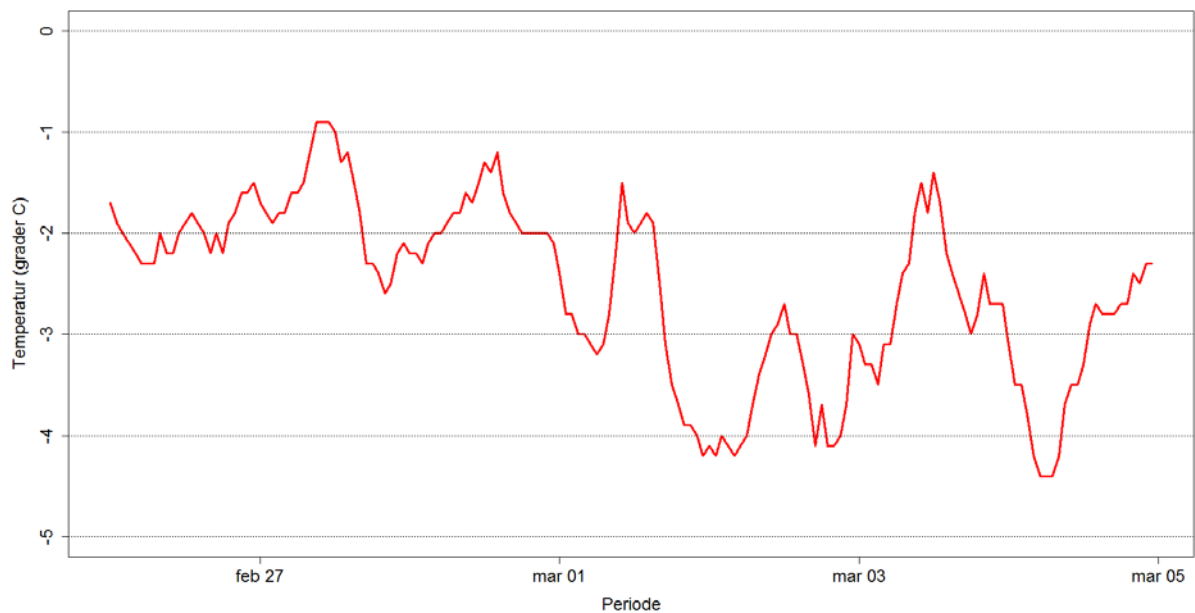
Havariet skjedde på formiddagen 4. mars 2014, og vindforholdene i dagene før og ved havaritidspunktet er vist i Figur 6. Fra 28. februar var vindretningen stort sett fra sørøst, noe som ga tilførsel av fuktig luft fra Skagerak. Dette betyr at luft fra havet blåste tilnærmet normalt på ledningen, med andre ord lå forholdene til rette for ising. Vindstyrken varierte fra 1 – 2 m/s til 10 m/s i dette tidsrommet, det vil si at det ikke var spesielt sterk vind. Ettersom den aktuelle strekningen på ledningen ligger over 200 m høyere enn Møsstrand vil vinden her sannsynligvis ha vært endel sterkere.



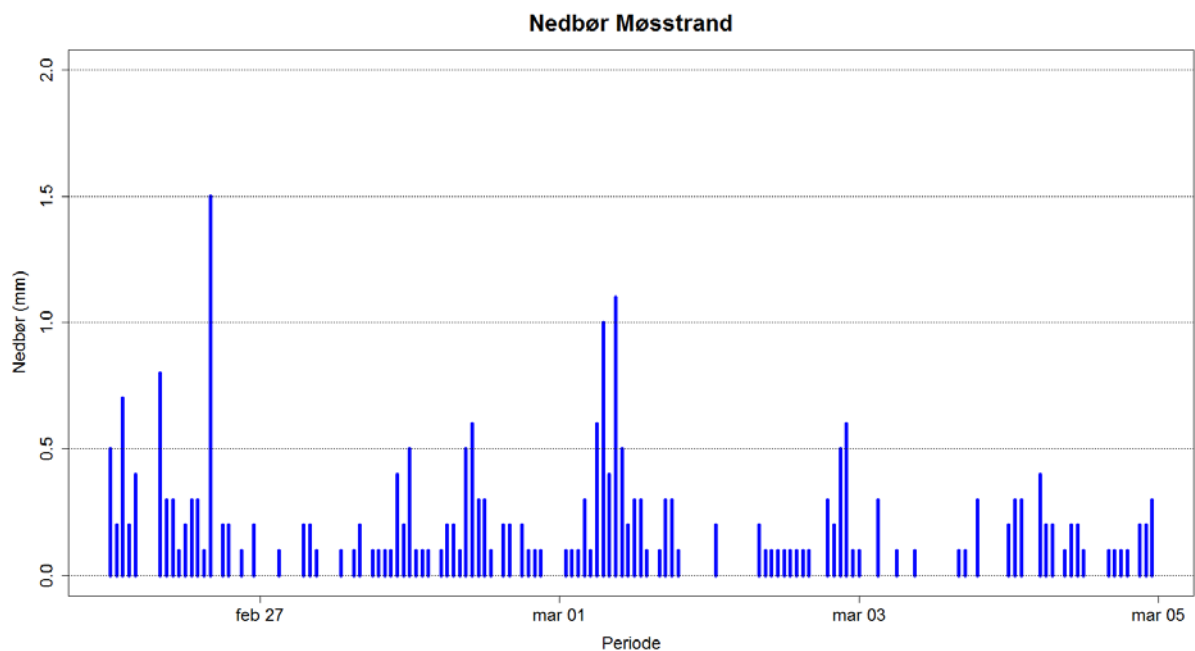
Figur 6: Vind målt på Møsstrand i perioden 26. februar til og med 4. Mars 2014. Øverste kurve viser vindstyrke (10 minutters middelvind i m/s) og nederste kurve viser vindretning (0 grader er fra nord, 180 grader er fra sør).

Figur 7 viser temperaturen målt på Møsstrand og figur 8 timesnedbøren målt på Møsstrand mellom 26. februar og 5. mars. Målingene viser at det stort sett var nedbør i hele perioden, og dermed skydekke. Temperaturen lå mellom -4.5 og -1 °C i dagene før og ved havariet, noe som gir en klar indikasjon på at nedbøren i denne perioden kom i form av tørr snø. Dette utelukker ising fra våt snø i dette tidsrommet, og indikerer at isdannelsen som medførte havariet i hovedsak kan tilskrives underkjølt skyvann.

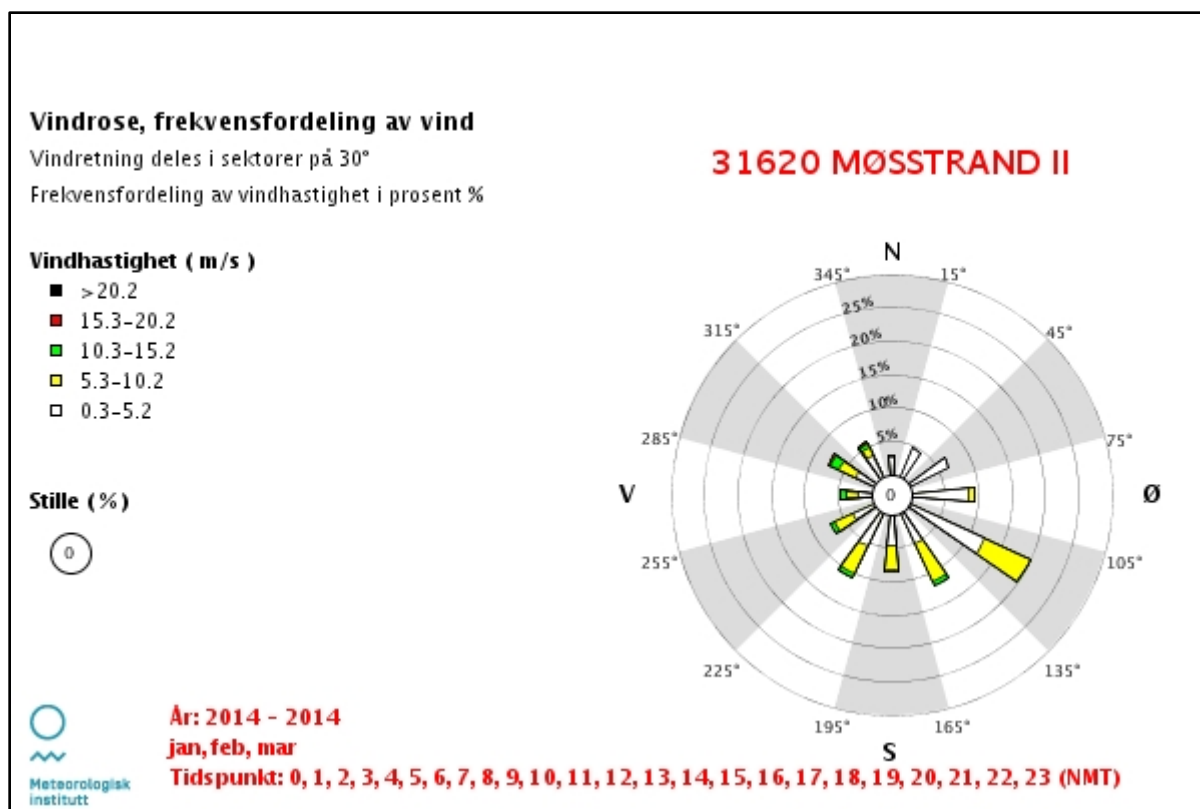
Observasjoner fra Møsstrand tyder på at vinteren 2014 var spesiell. Figur 9, som viser vindrose fra Møsstrand for januar, februar og mars 2014, viser betydelig lavere hyppighet av vind fra vest og nordvest mens sørøstlig vind var dominerende. Det har også falt betydelig mer nedbør enn normalt denne vinteren. For januar og februar indikerer nedbørkart fra www.senorge.no at nedbøren i området ligger på det dobbelte av normalen for 1971 - 2000. Den dominerende vindretningen og nedbørmengden tyder på at området har vært mer utsatt for ising enn det som er vanlig denne vinteren.



Figur 7: Temperatur målt på Møsstrand i perioden 26. februar til og med 4. mars 2014.



Figur 8: Timesnedbør (mm) målt på Møsstrand i perioden 26. februar til og med 4. mars 2014.



Figur 9: Vindrose for Møsstrand for jan, februar og mars 2014.

2.3 Sammenstilling av data fra WRF modellen og observasjoner

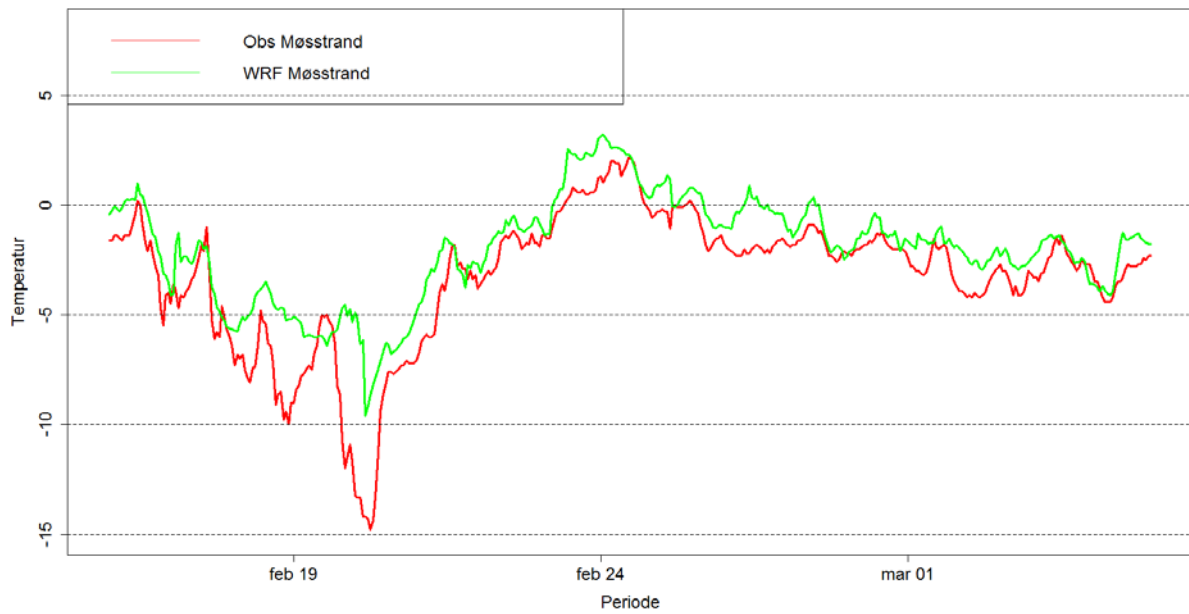
Data fra den numeriske atmosfæremodellen WRF er blitt brukt til å beregne islastene på ledningen ved havaritidspunktet i tillegg til islaster med 150 års returperiode for dimensjonering. Sammenstilling av observasjoner og data fra WRF gjort i forbindelse med tidligere oppdrag for Statnett (Meteorologisk institutt, 2014) indikerer at WRF gir realistiske simuleringer av parametere som vind og temperatur, og det er her gjort tilsvarende sammenstillinger mellom WRF data fra simuleringer med 500 m oppløsning og observasjoner av vindstyrke og temperatur fra Møsstrand.

Figur 10 viser temperatur fra WRF sammenlignet med observert temperatur for Møsstrand i perioden fra og med 16. februar til og med 4. mars. WRF har gir gjennomgående litt for høy temperatur, men forskjellen mellom WRF og observasjonene er relativt små, bortsett fra minimumstemperaturen rundt 20. februar, der WRF lå 5 til 6 grader for høyt. Dette kommer

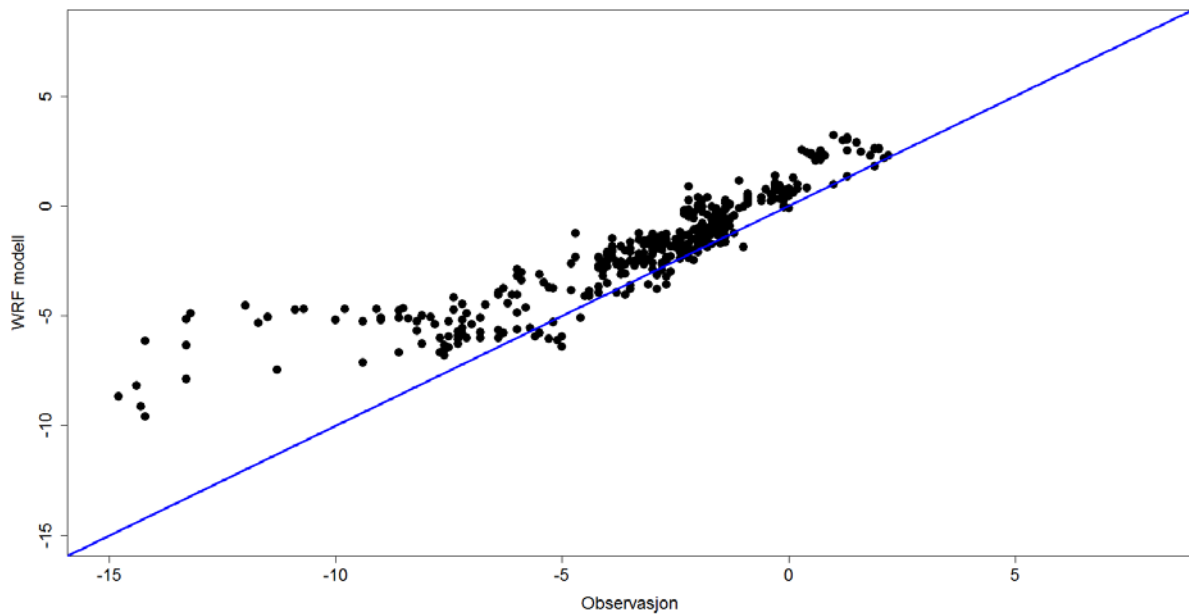
også frem i Figur 11 som viser temperatur simulert av WRF plottet mot observert temperatur på Møsstrand. Gjennomgående har WRF et lite overestimat av temperatur, mens når temperaturen kommer ned rundt -10° er avviket større. Over denne perioden er gjennomsnittlig overestimering av temperatur (bias) 1.28°C . Figur 10 indikerer at WRF simulerer temperatursvingningene svært godt, noe som bekreftes av at korrelasjonskoeffisienten er på 0.906. Denne beskriver samvariasjonen mellom observert og simulert temperatur der 0 er fravær av samvariasjon og 1 er perfekt.

Sammenstillinger av observert og simulert vindstyrke (Figurene 12 og 13) indikerer at WRF gir en realistisk beskrivelse, selv om samvariasjonen er noe svakere enn for temperatur med en korrelasjonskoeffisient på 0.696. Utfra Figur 13 er det ikke mulig å se noen systematiske feil i simuleringen av vindstyrken, og en bias 0.512 bekrefter at WRF jevnt over simulerer vindstyrken svært bra.

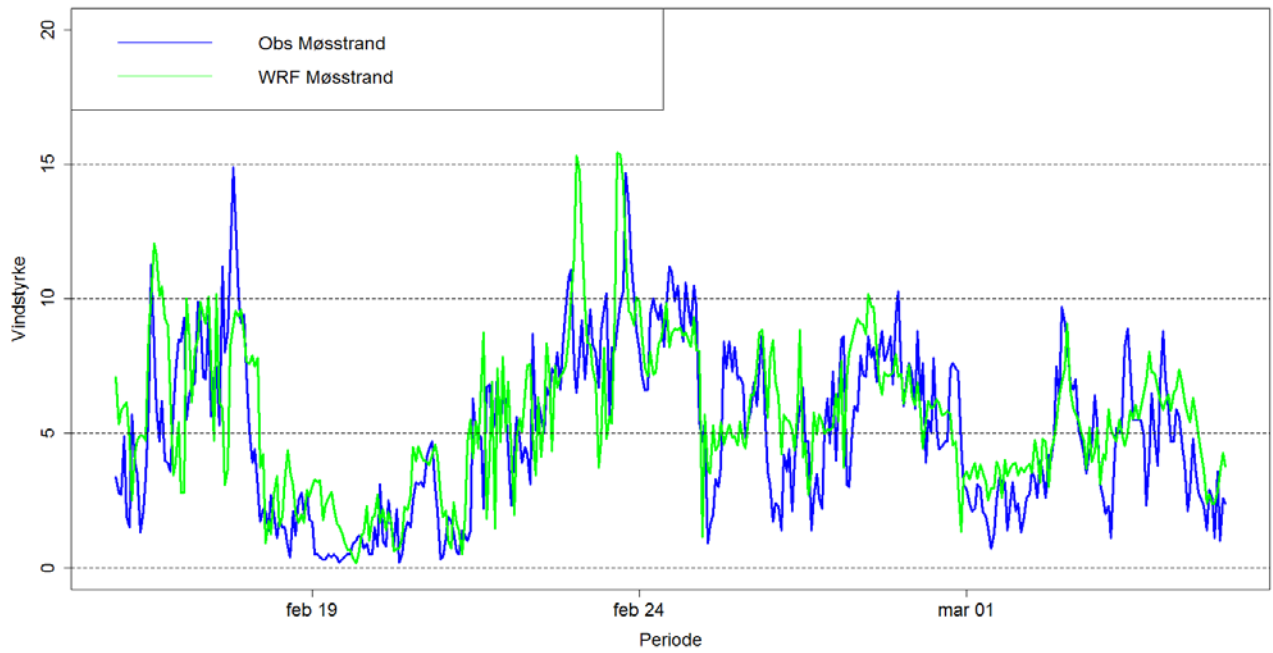
Sammenstillingen av observasjoner og WRF simuleringer indikerer at modellen gir en realistisk beskrivelse av værsituasjonen, selv om den gir for høy temperatur i den kaldeste perioden. Resultatet samsvarer i stor grad med tilsvarende sammenstillinger utført i forbindelse med tidligere oppdrag, noe som indikerer at den gir et godt grunnlag for kartlegging av isingsforhold.



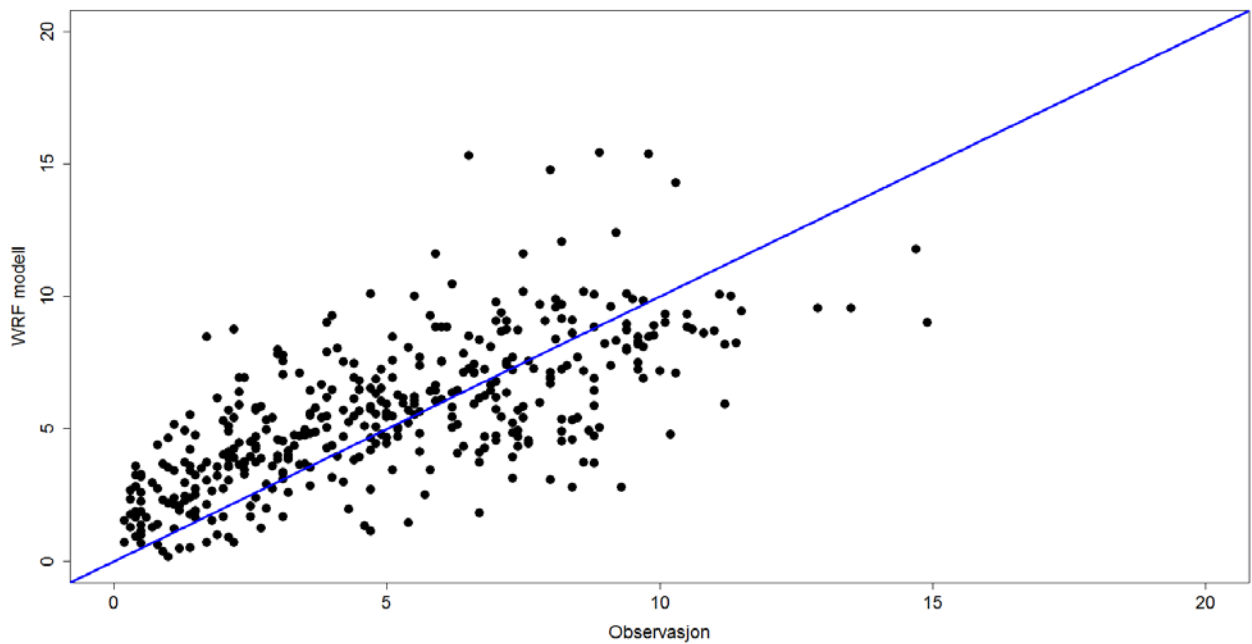
Figur 10: Observert temperatur (rød linje) og temperatur fra WRF simulering med 0.5 km oppløsning (grønn linje) for perioden fra og med 16. februar til og med 4. mars 2014 for Møsstrand.



Figur 11. Observert temperatur fra Møsstrand (x-aksen) plottet mot simulert temperatur fra WRF (y-aksen). Perioden fra og med 16. februar – til og med 4. mars 2014.



Figur 12. Observert vindstyrke (m/s) fra Møsstrand (x-aksen) plottet mot simulert vindstyrke fra WRF (y-aksen). Perioden fra og med 16. februar til og med 4. mars 2014.



Figur 13. Observert vindstyrke fra Møsstrand (x-aksen) plottet mot simulert vindstyrke fra WRF (y-aksen). Perioden fra og med 16. februar til og med 4. mars 2014

3 Vind og islaster

Vind og islaster mellom mastepunktene 317 og 338 på 420 kV linjen Kvilldal - Rjukan er vurdert for havaritidspunktet 4. mars 2014. Videre er islaster med 150 års returperiode og vindlaster med 50 års returperiode estimert for samme strekning. Vurderingen av vind og islaster er basert på modelldata (Vedlegg 1), observasjoner fra omkringliggende værstasjoner og befaring av området.

3.1 Befaring

Tirsdag 26. august ble området befart til fots sammen med Trygve Jonskås fra Statnett, som er godt kjent i området. Befaringen startet i nærheten av Vemorktoppen ved mast 345, og vi gikk inn til mast 328, som er ved strekningens høyeste punkt. Jonskås kunne fortelle at man i området fra mast 337 og videre innover ofte kunne observere is på master og ledninger om vinteren, og at det i helninger i terrenget ofte la seg store mengder snø inntil mastene. Han hadde videre erfart at det var betydelig sterkere vind oppe ved ledningen enn ved Møsstrand. Vi vurderte spennene mellom mastene 327 og 329 som de mest eksponerte for både vind og is ettersom dette området var det høyestliggende og minst skjermede delen av traseen, men også spennet fra mast 329 til 330 ble vurdert som utsatt på grunn av en åpning i terrenget i sørøst som vil gi vind med høy normalkomponent på ledningen. Fra en høyde i nærheten av mast 327 hadde vi også utsikt over mastene videre innover.

3.2 Vind og islaster ved havaritidspunktet

Ved vurdering av vindlaster der det tatt utgangspunkt observasjoner fra Møsstrand, som anses å gi vindobservasjoner som mest representative for den strekningen som vurderes. Ved havaritidspunktet var vinden observert til ca 4 m/s, mens det maksimale vindkastet var 5.4 m/s på denne tiden. Ettersom havaristedet ligger drøyt 200 m høyere enn værstasjonen kan vinden ha vært en god del sterkere her. Den maksimale vindlasten på ledningen har imidlertid neppe oversteget 10 – 15 m/s ved havaritidspunktet, noe som er lite i forhold til den dimensjonerende vindlast på 42 m/s oppgitt i lengdeprofil for traseen. Det er med andre ord lite sannsynlig at havariet er utløst av vind.

Temperaturobservasjonene i tiden før havariet tyder på at isingen på linene i sin helhet kan tilskrives underkjølt skyvann, og figurene 3 og 4 (modellerte islaster 20 m over bakken) i vedlegget fra Kjeller Vindteknikk indikerer at de største islastene har vært mellom mastepunktene 327 og 329 med laster rundt 15 kg/m. Langspennet mellom mastene som havarerte (329 til 330) har sannsynligvis hatt laster på mellom 10 og 12 kg/m, men på grunn av forsterkning av vinden normalt på linene gjennom en åpning i terrenget kan det ikke utelukkes at islasten har vært oppe i 15 kg/m. Mellom mastepunktene 330 og 332 har islasten sannsynligvis ligget mellom 10 og 13 kg/m.

En annen strekning med relativt høye islaster på dette tidspunktet var mastepunktene 325 til 327 med laster av størrelse 12 til 14 kg/m. Lenger sørvest (mastene 323 til 325) ligger lastene på mellom 8 og 12 kg/m mens mastene 317 til 323 har mellom 4 og 8 kg/m. De laveste islastene er i den nordøstlige delen av strekningen og ligger på 2 til 6 kg/m mellom mastene 337 og 341. Mellom 335 og 337 var islastene 5 til 7 kg/m, mens de økte videre til 7 - 9 kg/m mellom 332 og 335.

En eldre 300 kV ledning som går parallelt med 420 kV havarerte ikke. Det kom ikke frem noe under befaringen som skulle tilsi at 300 kV er mindre utsatt på havaristedet. Her er linenes høyde over bakken tilnærmet den samme, og den eneste synlige forskjellen er at 300 kV er simplex mens 420 kV er duplex. Det har forøvrig vært havari på grunn av ising i samme område i 1974.

3.3 Dimensjonerende vind og islaster

Stasjonen Møsstrand har hatt automatiske målinger av vind siden 2006, og det høyeste registrerte vindkastet var på 37.5 m/s den 14. januar 2007. Stasjonen kan betraktes som representativ for havariområdet selv om den ligger endel lavere i terrenget, men måleserien er for kort til å beregne vindkast med 50 års returperiode. Norsk vindstandard (Standard Norge, 2009) er derfor brukt, og det er tatt utgangspunkt i Tinn kommune som har en referansevind på 24 m/s. Terrenget i havariområdet er vurdert å være best representert ved terrengkategori 1 i vindstandarden, det er antatt en høyde på 1200 moh og at linenes gjennomsnittlige høyde over bakken er 15 m. Dette gir i følge vindstandarden vindkast med 50 års returperiode på ca 47 m/s, noe som vi har tatt utgangspunkt i når vindlaster på spennene er satt i Tabell 2.

Tabell 2 viser dimensjonerende islaster, det vil si islater med 150 års returperiode. Disse er fastsatt på grunnlag av 36 år med data fra den numeriske værmodellen WRF (Kapittel 4 i Vedlegg 1), samt vurderinger av skjermingseffekter gjort under befaring. Islastene beregnes ved hjelp av ekstremverdianalyse av 36 år med WRF-data, og utfra dette får man et konfidensintervall for de dimensjonerende islastene. På grunnlag av vurdering gjort under befaring, informasjon fra Statnett om at det observeres intens ising langs store deler av

strekningen samt det faktum at det var et havari i området, er det brukt islaster fra øvre del av konfidensintervallet.

Analysene av WRF data viser at ising vil kunne forkomme ved vind i sektorene fra øst-nordøst til sør – sørvest, noe som betyr at ising kan forventes når vinden har en høy komponent på tvers av ledningen, som går fra sørvest mot nordøst. Dette betyr at ledningen vil være svært utsatt for ising, noe det tas hensyn til ved fastsettelse av dimensjonerende islaster. Spennene mellom mastene 327 og 329 får den høyeste dimensjonerende islast på 20 kg/m, mens spennet mellom de havarerte mastene 329 og 330 får 16 kg/m. I lengdeprofil som vi mottok fra Statnett var dimensjonerende islaster tidligere satt til 15 kg/m for spennene 327 – 329 og 12 kg/m for 329 – 330. For de øvrige spennene var det mindre avvik mellom tidligere gitte islaster og de som er gitt i Tabell 2.

Tabell 2: Islaster med 150 års returperioden og vindkast med 50 års returperiode for strekningen mellom mastene 317 og 338. Mastene som havarerte er markert i rødt.

Mastenummer	Islast (kg/m)	Maks vind (m/s)	Normalkomponent (m/s)
317- 318	12	44	42
318 - 319	12	44	42
319 - 320	12	44	42
320 - 321	12	44	42
321 - 322	12	44	42
322 - 323	12	44	42
323 - 324	14	44	42
324 - 325	15	45	42
325 - 326	16	47	45
326 - 327	16	47	45
327 - 328	20	47	45
328 - 329	20	47	45
329 – 330	16	47	45
330 - 331	15	47	42
331 - 332	15	47	42
332 - 333	15	47	42
333 - 334	15	47	45
334- 335	15	47	45
335 - 336	15	44	42
336 - 337	15	44	42
337 - 338	12	44	40

4. Oppsummering

I forbindelse med havariet av mastene 329 og 330 på 420 kV Kvilldal – Rjukan er sannsynlige islaster på havaritidspunktet og dimensjonerende is og vindlaster vurdert. Mastene havarerte 4. mars kl 09:44. Da det var relativt lite vind på dette tidspunktet ansees ikke vindlaster som en medvirkende årsak til havariet. Analyse av data fra den numeriske værmodellen WRF indikerer at ledningen over flere uker har vært eksponert for ising fra skyvann, og det har dermed bygget seg opp is på ledningen over en lengere periode, noe som resulterte i havari. En vurdering av meteorologiske observasjoner tyder på at denne vinteren har vært spesiell, og at dette området har hatt mere tilførsel av fuktig luft og dermed vært mer utsatt for ising enn det som er normalt. Den aktuelle isingsepisoden vurderes å ha en returperiode på 30 til 50 år.

Det er på grunnlag av modelldataene samt vurderinger gjort under befaring utarbeidet nye dimensjonerende islaster for strekningen mellom mastene 317 og 338. Dimensjonerende islast for spennet 329 – 330 settes nå til 16 kg/m mot 12 kg/m tidligere. Det mest eksponerte delen (327 – 329) får 20 kg/m mot 15kg/m før. Forøvrig er det ingen vesentlig endringer av islastene. For de mest utsatte spennene er også vindlasten økt noe i forhold til det som er oppgitt tidligere.

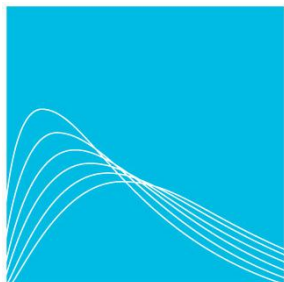
Referanser

Standard Norge (2009) *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del 1-4: Allmenne laster Vindlaster*
NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009

Meteorologisk institutt (2014), Klimalaster for 420 kV Lyse-Stølaheia, Rapport 6/2014

Meteorologisk institutt (2014), Klimalaster for 420 kV Sauda – Lyse vest for Stølsdalen, Rapport 15/2014

4 Vedlegg 1: Kjeller Vindteknikk rapport «Kvilldal - Rjukan, Tinn kommune, Telemark. Analyse av islaster i forbindelse med mastehavari på 420 Kv kraftledning»



KJELLER
VINDTEKNIKK

Kvilldal - Rjukan, Tinn kommune, Telemark

Analyse av islaster i forbindelse med mastehavari
på 420 kV kraftledning

Rapport: KVT/BEN/2014/R059



Rapportnummer	Dato
KVT/BEN/2014/R059	29.8.2014
Rapporttittel	Klassifisering
Kvilldal - Rjukan, Tinn kommune, Telemark Analyse av islaster i forbindelse med mastehavari på 420 kV kraftledning	Begrenset til kunde
	Utgave nummer
Kunde	Antall sider
Meteorologisk Institutt	16 + Vedlegg
Kundens referanse	Status
Harold Mc Innes	Endelig

Sammendrag

På bakgrunn av mastehavari på 420 kV kraftledningen Kvilldal - Rjukan den 4. mars 2014 er det gjort detaljerte studier av isingsforholdene i det berørte området.

Simuleringer med en meteorologisk modell med horisontal oppløsning på 500 m x 500 m viser en langvarig isingsepisode fra midten av desember 2013 og frem til havaritidspunktet. Modellert akkumulert ismengde når ca 15 kg/m ved havaristedet, men usikkerhetene tatt i betraktning kan en ikke utelukke laster opp mot 20 kg/m. Et finskala isingskart indikerer at spennene fra mast 327 til mast 329 er mest utsatt, og at isingen avtar gradvis på begge sider av disse spennene.

Simuleringen gir vind varierende mellom 5 og 10 m/s omkring havaritidspunktet.

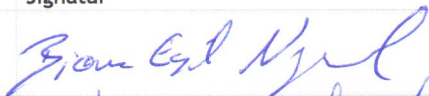


Modelldata med 6 km x 6 km oppløsning for perioden 1979 - 2014, høydejustert og kalibrert mot 500 m x 500 m modellen, er brukt for å studere sannsynligheten for gjentakelse av like eller større islaster. Resultatene indikerer at isingen gjennom vinteren 2013/2014 er en relativt sjelden hendelse, og det kun er vinteren 2000/2001 at samme ismengde kan ha bygget seg opp på ledningen. Ismengden på ledningen for vinteren 2013/2014 er estimert til en returtid på 30 - 50 år.

Forbehold

Selv om det i arbeidet med denne rapporten, så langt vi kjenner til, er benyttet oppdaterte analysemetoder, og vi i vårt arbeid forsøker å gi et så godt resultat som mulig, kan Kjeller vindteknikk AS ikke holdes ansvarlig for resultatene i rapporten eller for framtidig bruk av denne, og heller ikke for eventuelle direkte eller indirekte tap som skyldes eventuelle feil i rapporten.

Revisjonshistorie

Utgave	Dato	Antall eksemplarer	Kommentar	Distribusjon
1	29.8.2014	Kun elektronisk		Pdf

	Navn	Dato	Signatur
Utført av	Bjørn Egil Nygaard	29/8-2014	
Kontrollert av	Knut Harstveit	29/8-2014	
Godkjent av	Øyvind Byrkjedal	29.08.2014	

Innholdsfortegnelse

INNHOLDSFORTEGNELSE	2
1 INNLEDNING	3
2 METODE OG DATA	4
2.1 DATA	4
2.2 ISINGSBEREGNING	4
2.2.1 Skyising.....	4
2.3 EKSTREMVERDIANALYSE	4
3 FINSKALA SIMULERINGER	6
3.1 ISINGSKART FOR VINTEREN 2013/2014	6
4 BEREGNING AV RETURPERIODER FOR ISLASTER	12
4.1 KORREKSJON AV WRF6KM	12
4.2 ISLASTER FOR 1979 - 2014	13
5 REFERANSER.....	16
VEDLEGG A: WRF-MODELLEN.....	17

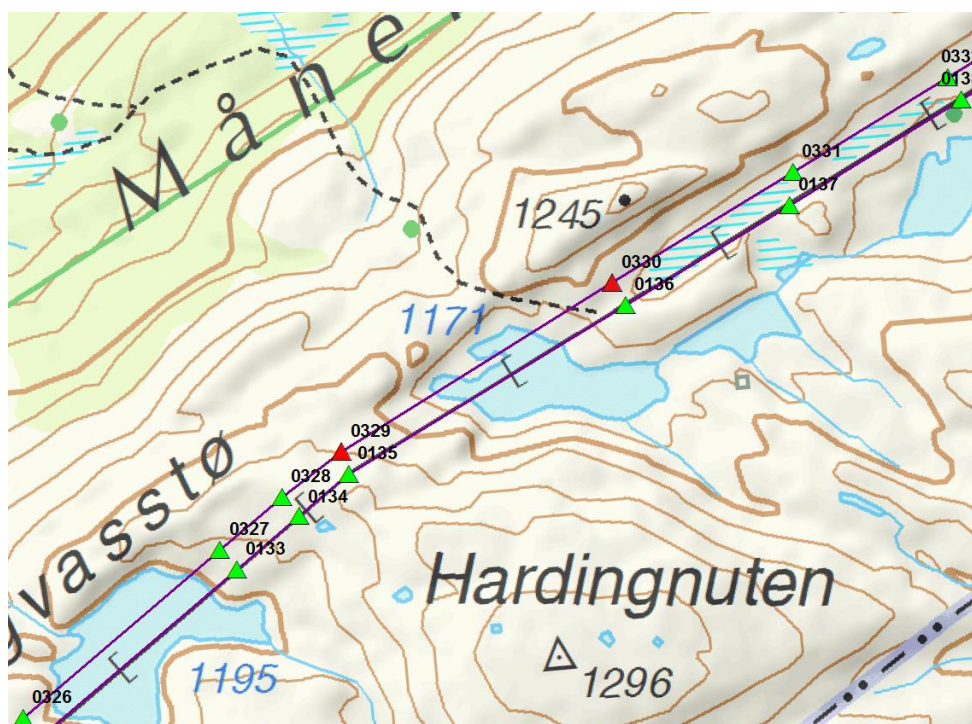
1 Innledning

Kjeller vindteknikk har på oppdrag fra Meteorologisk Institutt utført en analyse av islaster i forbindelse med mastehavari på 420 kV ledningen Kvilldal - Rjukan. Havariet skjedde den 4. mars 2014 og plasseringen til de havarerte mastene, 329 og 330 er markert i rødt i Figur 1. Oversiktskart over området finnes i Figur 2 og Figur 3.

For den aktuelle tidsperioden foreligger det verken kontinuerlige isingsmålinger eller meteorologiske målinger i umiddelbar nærhet. Numeriske værmodeller gjør det imidlertid mulig å simulere med høy oppløsning hvordan vær- og isingsforhold sannsynligvis har vært i denne perioden. Metodene bygger på ny forskning på bruk av atmosfæremodeller for å simulere ising på konstruksjoner (Nygaard 2013, doktorgradsprosjekt Universitetet i Oslo).

Rapporten inneholder en detaljert analyse av denne enkelthendelsen, samt en analyse av langtidsdata for å estimere returperioder og tilhørende sannsynlighet for gjentakelse av tilsvarende islaster. Modellsystemet er det samme som ble benyttet i analysene av isingsforholdene for 420 kV Sima - Samnanger på Ålvikfjellet.

Området ble befart den 26.8.2014 hvor Kjeller Vindteknikk deltok v/Bjørn Egil Nygaard.



Figur 1: Kart over den aktuelle delstrekningen. Havarerte master er markert med røde trekkanter.

2 Metode og data

2.1 Data

Beregningene er basert på meteorologiske data generert med en numerisk værmodell. Modellen heter WRF (Weather Research and Forecasting model) og er beskrevet i Vedlegg A. Modelldataene er fordelt i et horisontalt gitter med gitteravstand på 6 km, og strekker seg over perioden 1979 - 2013 (heretter kalt WRF6km). Data er hentet ut for de fire modellpunktene som ligger nærmest mast 329. Dataene har en tidsoppløsning på 1 time og inneholder alle nødvendige parametere for å beregne vind og islaster.

Modellert vind, temperatur, luftfuktighet, nedbør, snøfuktighet, konsentrasjonen av underkjølt skyvann samt konsentrasjonen av underkjølt yr er hentet ut som tidsserier fra WRF for alle de fire punktene. Disse dataene er videre brukt som inngangsdata til akkumulasjonsmodeller for skyising og våtsnø.

For å danne et detaljert bilde av den horisontale fordelingen av skyising er det i tillegg gjort simuleringer med WRF modellen på 500 m x 500 m oppløsning (heretter kalt WRF500m). Basert på resultatene for perioden 1979 - 2014 er tidsperioden for isingsepisoden identifisert

2.2 Isingsberegning

2.2.1 Skyising

Skyising forekommer ved temperatur under 0 °C, lavt skydekke/tåke og vind. I slike tilfeller vil små skydråper være i flytende tilstand, men samtidig ha en temperatur lik luftens temperatur. Når det blåser på tvers av en kraftledning vil disse dråpene kolliderer med linene, fryse spontant, og akkumuleres som et hvitt isbelegg. Skyising forekommer i all hovedsak i eksponert fjellterreng, og akkumulert ismengde øker raskt med terreng høyden.

Tidsserier av vindhastighet, temperatur, konsentrasjon av skyvann samt andre skyparametre fra WRF-simuleringen anvendes for å beregne akkumulert skyis på et standardlegeme, etter formelverket gitt i ISO-standarden for atmosfærisk ising på konstruksjoner, ISO 12494, og er beskrevet i Vedlegg A.

2.3 Ekstremverdianalyse

Det benyttes en statistisk analyse for å bestemme ekstremverdiene i seriene av modellerte is- og vindlaster fra WRF. Ekstremverdianalysen heter Peaks-Over-Threshold (POT) og går ut på å tilpasse de episodene som overstiger en høy grense (terskelverdi) med en teoretisk sannsynlighetsfordeling. I POT analysen tilpasses overskridelsene en generalisert Pareto-fordeling. Etter at fordelingen er tilpasset dataene på beste måte kan returperioder bestemmes, med tilhørende returverdier. Modellen som er brukt i ekstremverdiberegningen er dokumentert i Coles (2001).

En praktisk utfordring ved bruk av POT metoden på vinddata er forutsetningen om at verdiene over grensen skal være uavhengige, hvilket betyr at to eller flere høye verdier som ligger nær hverandre i tid kun skal gjelde som én hendelse. Dette håndteres ved å gruppere vinddataene med kriteriet om at det skal være minst 4 dager mellom hver hendelse, som da antas å være uavhengige episoder. 4 dager er bestemt ut ifra en typisk varighet på en passasje av et lavtrykkssystem.

En annen utfordring med POT analysen er at det ikke finnes en robust og objektiv måte å bestemme terskelverdien på. I denne analysen er 95 persentilen av verdiene satt som utgangspunkt. Vi bemerker at denne terskelverdien ofte må justeres manuelt for å få en god tilpasning til den teoretiske fordelingen.

For enkelte elementer 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 tilpassningsfordeling som heter GEV (Generalized Extreme Value distribution). GEV inneholder en formparameter som tilpasses etter fordelingen av de dataene som brukes. Eksempelvis er den klassiske Gumbel-fordelingen et spesialtilfelle av GEV for tilfeller der formparameteren for fordelingen lik 0.

3 Finskala simuleringer

For å beskrive de lokale variasjonene i ising langs traseen kreves simuleringer med svært høy horisontal oppløsning. For dette formålet er WRF modellen satt opp med oppløsning på 500 m x 500 m for et avgrenset område som dekker de delene av ledningstraseen hvor det potensielt kan forekomme skyising. Detaljer om modelloppsettet finnes i Tillegg B. Oppsettet er for øvrig det samme som er benyttet for å simulere isingshendelsen som førte til havari på 420 kV Sima - Samnanger, samt i analyser av islastene for 420 kV Lyse - Stølaheia og 420 kV Sauda - Lyse. Selv med en oppløsning på 500 m x 500 m er det lokale variasjoner i isingsforholdene som ikke er oppløst av modellen. Dette gjelder særlig over rygger og topper med liten utstrekning, i trange daler eller langs bratte fjellsider. For å ta hensyn til noe av denne variasjonen er det gjort en høydejustering av de modellerte islastene fra modellterrenget med oppløsning på 500 m x 500 m til et høyoppløst terreng med oppløsning på 30 m x 30 m. Algoritmen for høydejustering av islastene finner lokale høydegradienter fra modelldataene, og benytter disse til å fordele simulerte islaster ut i terrenget med 30 m x 30 m oppløsning. Metoden kan beskrives med likning (1):

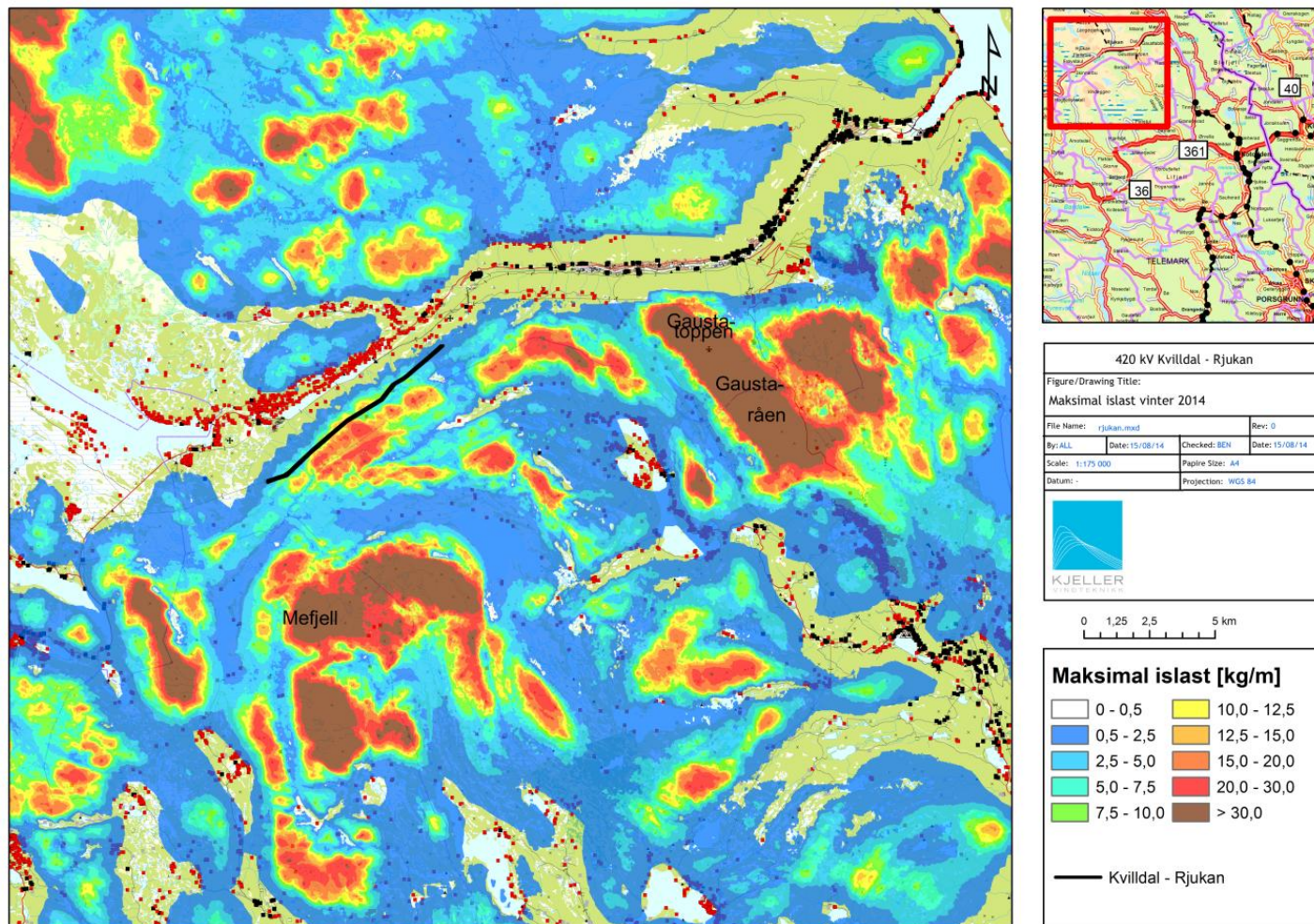
$$M_{30} = M_{WRF} + \left(\frac{dM_{WRF}}{dz_{WRF}} \right)_r (Z_{30} - Z_{WRF}) \quad (1)$$

Her er M_{30} islasten for et punkt i 30 m dataene, M_{WRF} er islasten fra nærmeste punkt i WRF dataene, dM_{WRF}/dz_{WRF} er høydegradienten innenfor et område med radius på r gridpunkter, mens $Z_{30} - Z_{WRF}$ representerer forskjellen i terrenghøyde mellom WRF og 30 m terrengdata. I terreng med kompleks topografi vil det likevel være variasjoner som ikke kommer med i en slik justering, for eksempel varierende grad av skjerming bak ujevne, småskala høydedrag.

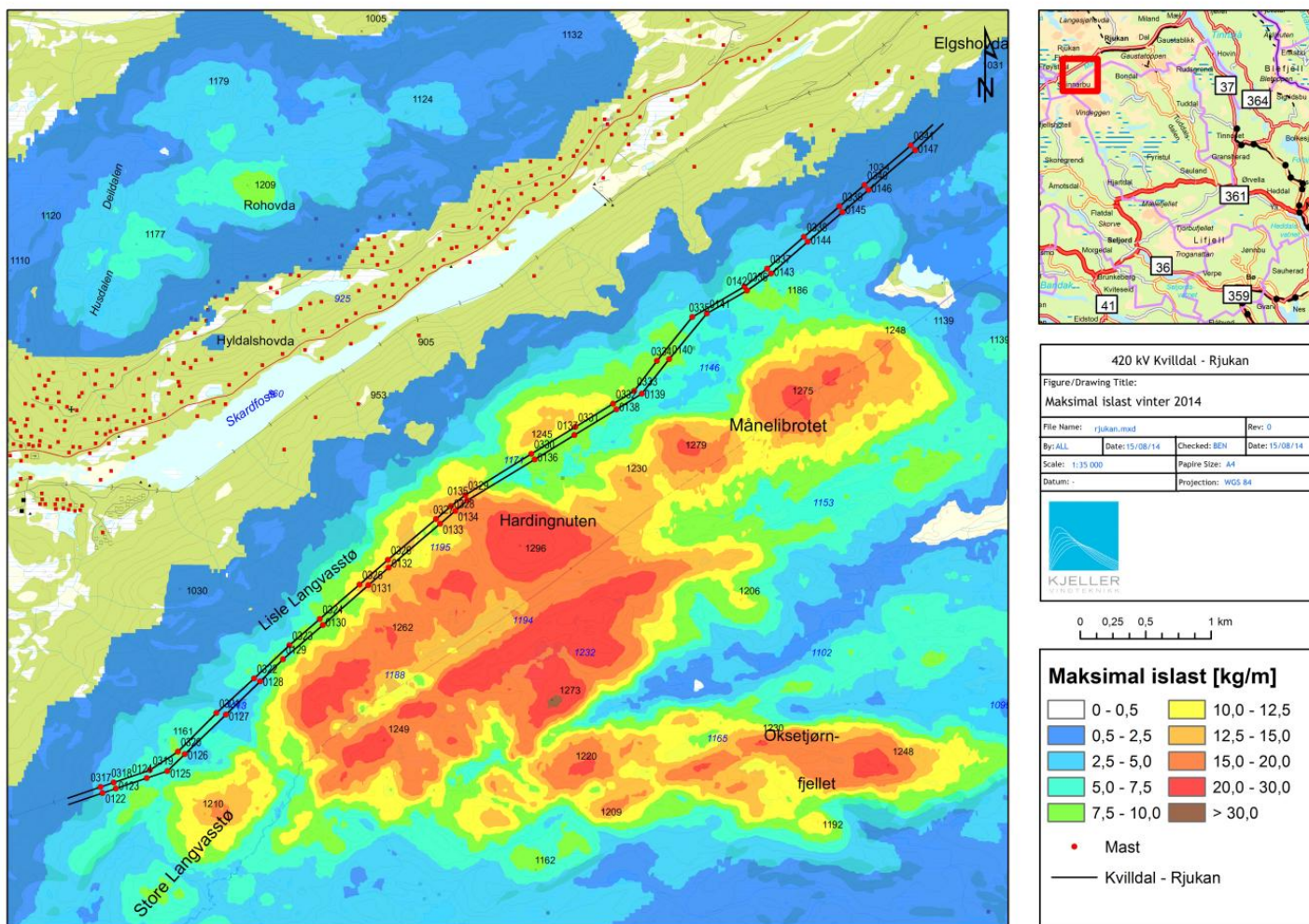
3.1 Isingskart for vinteren 2013/2014

Isingskartene basert på WRF500m simuleringen er vist i Figur 2 til Figur 4 og gjelder i en høyde omtrent 25 m over utjevnet terrenghøyde. Oversiktskartet i Figur 2 viser at ledningstraseen ligger i kanten av et område med islaster omkring 20 kg/m, og at skyising i all hovedsak forekommer over ca 1000 m.o.h. For å få frem tilstrekkelig detaljer i kartet er fargeskalaen begrenset til laster lavere enn 30 kg/m, selv om det er områder med langt større ismengder. På toppen av Gaustatoppen er beregnet islast om lag 350 kg/m for vinteren 2013/2014.

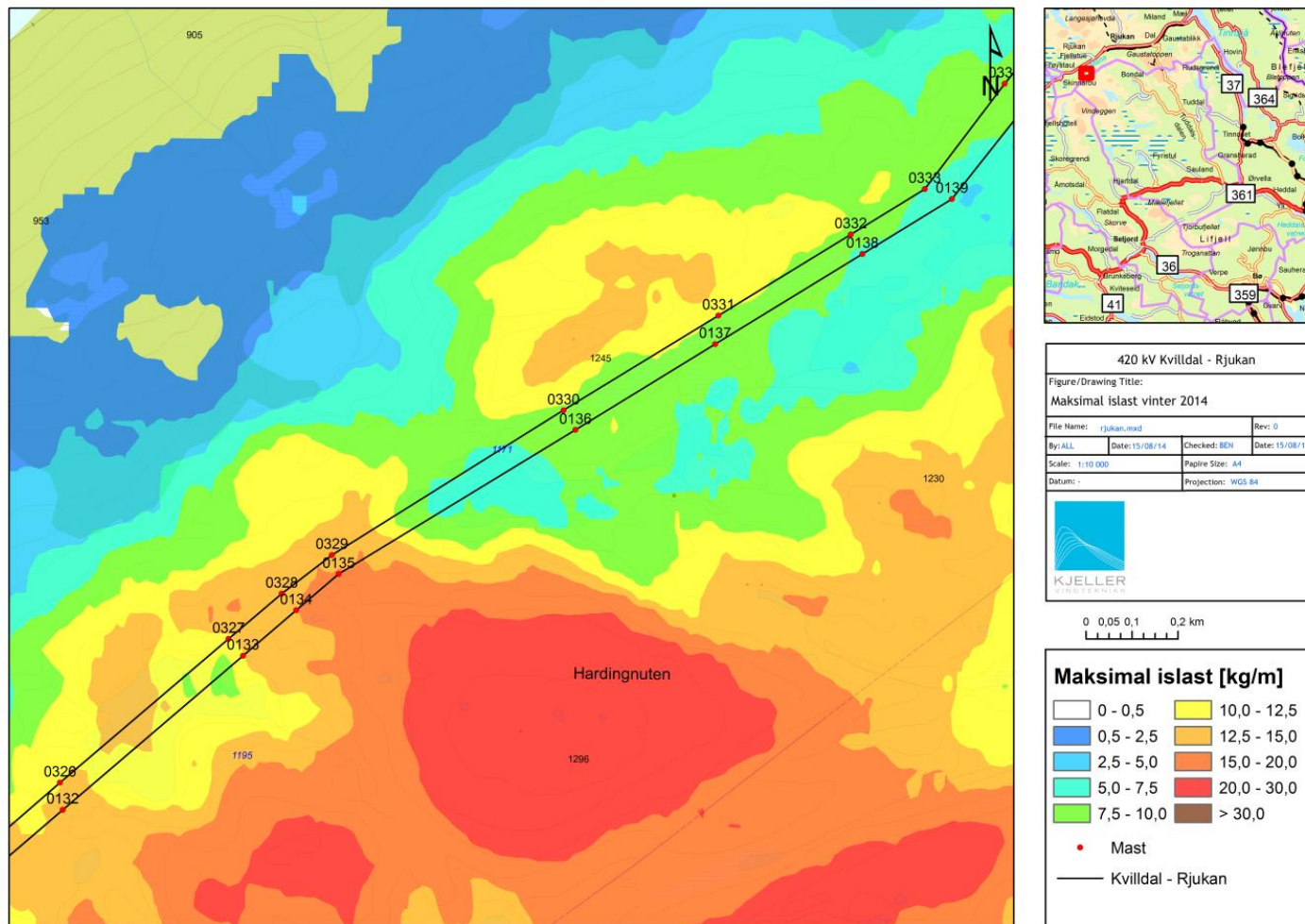
Utsnittet i Figur 3 viser at modellen gir skyising for hele den aktuelle delstrekningen, men laster over 5 kg/m begrenser seg til spennene mellom mast 318 og mast 337. Islastene øker med høyden og modellen gir høyest laster omkring ledningens høyeste punkt, ved mast 327 - 329 med verdier omkring 15 kg/m. Islastene i kartet er beregnet for et standardlegeme (ISO12494), dvs. en vertikalt orientert roterende sylinder med diameter 3 cm. Kartet er derfor et konservativt anslag på ising på en horisontal ledning. Dersom isførende vindretning er normalt på ledningen vil akkumulert is komme opp mot verdien i kartet. For langspennet 329-330 viser kartet varierende laster mellom ca 7 og 15 kg/m. Terrenget omkring dette spennet har en form som kan kanalisere og forsterke vinden noe på tvers av ledningene, altså i retning fra sørøst mot nordvest. En slik vindforsterkning vil ikke fanges opp i modellen, slik at lastene for langspennet kan være noe underestimert i kartet. For å besvare dette nærmere kreves målinger på stedet både av vind og islast.



Figur 2: Simulert maksimal akkumulert islast (kg/m) på et standardlegeme for perioden 12.12.2013 - 31.3.2014. Høydejustert ved bruk av terrengdata med 30 m x 30 m oppløsning. Den aktuelle delstrekningen på 420 kV Kvilldal - Rjukan er markert med sort strek.



Figur 3: Simulert maksimal akkumulert islast (kg/m) på et standardlegeme for perioden 12.12.2013 - 31.3.2014. Høydejustert ved bruk av terrengdata med 30 m x 30 m oppløsning.



Figur 4: Simulert maksimal akkumulert islast (kg/m) på et standardlegeme for perioden 12.12.2013 - 31.3.2014. Høydejustert ved bruk av terrengdata med 30 m x 30 m oppløsning.

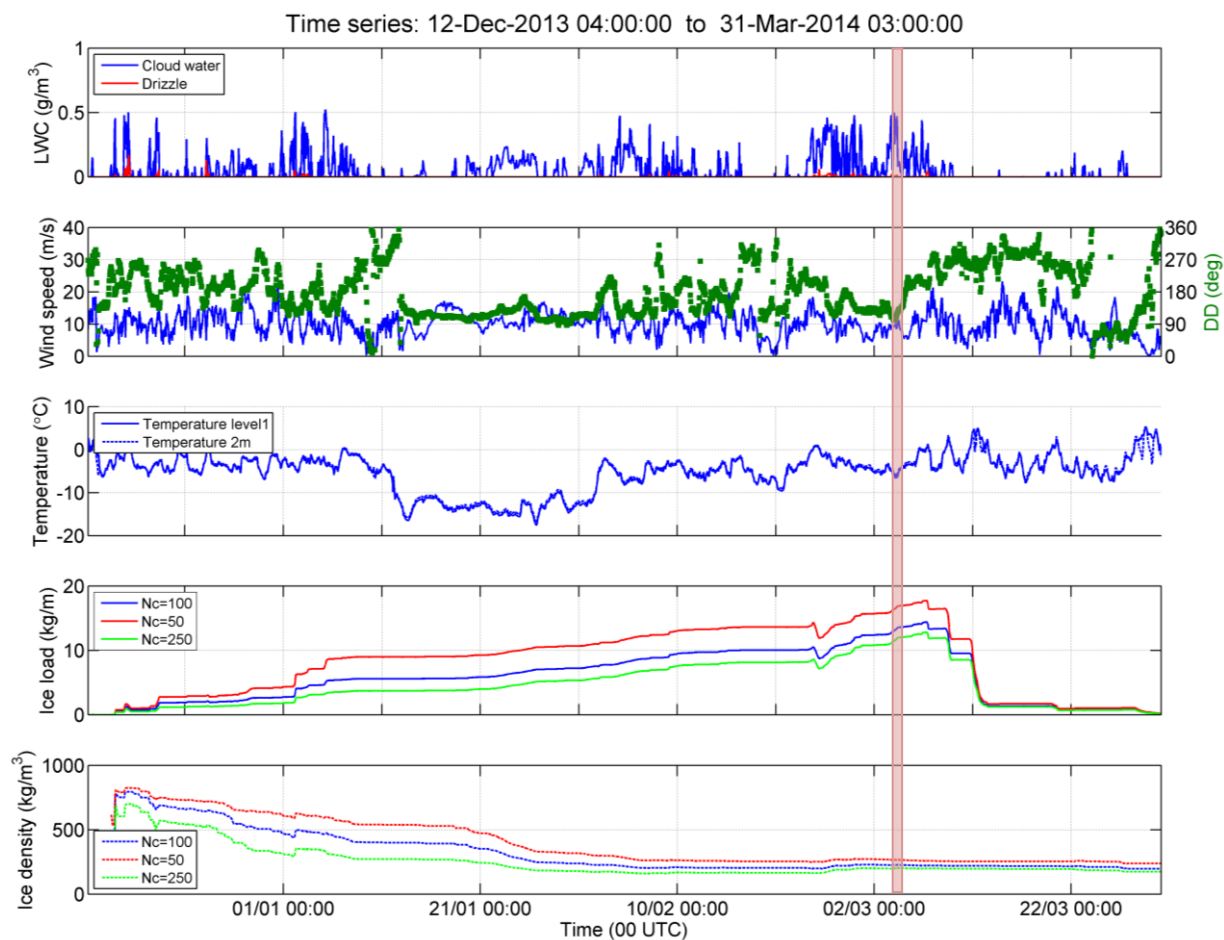
Figur 5 viser tidsserier av meteorologiske variabler samt modellert ising for modellpunktet nærmest mast 329. De tre øverste panelene viser de viktigste meteorologiske variablene som inngår i isingsmodellen. Skyenes vanninnhold samt konsentrasjonen av yr (drizzle), er vist i det øverste panelet. Skyising forekommer når skyvann og/eller yr er til stede, samtidig som lufttemperaturen er under 0°C (underkjølte dråper). Intensiteten øker med økt vindhastighet.

Islasten i Figur 6 er modellert ved tre forskjellige antakelser om skyenes dråpekonsentrasjon (N_c). Dette er den parameteren som representerer den største usikkerheten i modellering av skyising. For norske forhold med relativt ren luft er en konsentrasjon på 100 dråper per cm^3 en rimelig antakelse som en gjennomsnittsverdi (Miles et al. 2000). Men i enkeltsituasjoner kan dette variere betydelig. Islaster beregnet med dråpekonsentrasjoner på henholdsvis 50 cm^{-3} og 250 cm^{-3} gir betydelig utslag i simulert ising, både mengde og tetthet. I kartene (Figur 3 til 5) og i den videre analysen er beregningene gjort med utgangspunkt i 100 dråper per cm^3 .

Modellert islast i Figur 6 viser også en liten smelteperiode omkring den 24. februar, i forbindelse med at modellert temperatur er like over 0°C en kort periode. Hvorvidt denne smelteepisoden er reell er usikkert da det ikke finnes målinger lokalt som kan bekrefte at det faktisk har vært varmegrader. Dersom en ser bort fra denne avsmeltingen vil ismengden nå ca 20 kg/m (ikke vist her).

Basert på disse resultatene kan vi konkludere med at sannsynlig maksimal islast for spennet 328 - 329 har ligget omkring 15 kg/m. Tatt i betraktning usikkerhetene forbundet med både dråpekonsentrasjonen og den korte smelteepisoden kan vi ikke utelukke at islasten kan ha vært opp mot 20 kg/m. Langspennet mellom 329 og 330 har mer isskjerming fra høyere terreng omkring, og her har islasten sannsynligvis vært noe lavere omkring 10 - 12 kg/m som gjennomsnitt for spennet. For dette spennet er det samtidig en viss usikkerhet knyttet til forsterkning av vinden på tvers av ledningen. Vi kan derfor ikke utelukke at islasten kan ha vært opp mot 15 kg/m basert på denne analysen.

Figur 6 viser at vindretningen gjennom hele isingsepisoden i all hovedsak har ligget på øst til sørøst. Med denne retningen har vinden høy normalkomponent på ledningstraseen i dette området, og isingen vil derfor nå tett opp mot beregnede mengder på et standard legeme. Modellen indikerer samtidig at vinden ved havaritidspunktet ikke har vært spesielt høy (omkring 10 m/s). I dagene etter ledningshavariet økte vindhastigheten imidlertid noe da vinden dreide på sørvest til vest, og temperaturen steg over på plussiden.



Figur 5: Tidsserier av meteorologiske variabler samt modellert islast og tetthet, for gridpunktet nærmest mast 329 i 25 m høyde over bakken. Øverst: luftens vanninnhold i form av skydråper og yrdråper. Nest øverst: Vindhastighet og vindretning. Midten: Temperatur i laveste modellnivå og ved 2 m. Nest nederst: Modellert islast ved tre ulike antakelser om dråpekonsentrasjon. Nederst: Tilhørende modellert istetthet. Vertikal rød søyle viser datoen for mastehavariet.

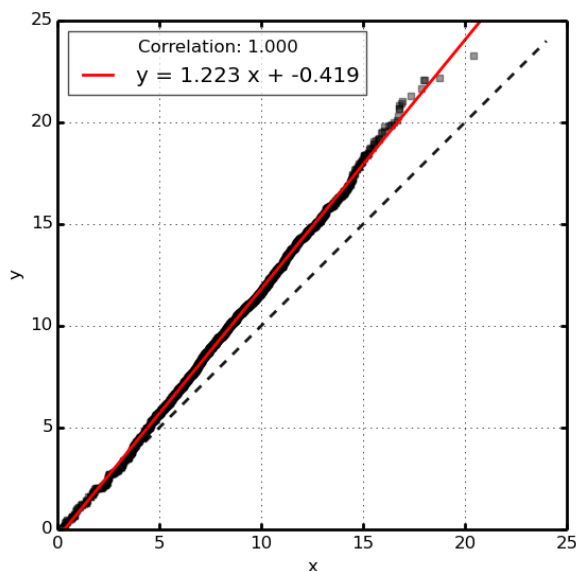
4 Beregning av returperioder for islaster

4.1 Korreksjon av WRF6km

For å analysere ekstremverdier og estimere returverdier for høye islaster er det hentet ut modelldata for en 36-års periode fra WRF6km for de fire gridpunktene som ligger nærmest traseens høyeste punkt (mast 329). Siden dataene har en oppløsning på 6 km beskrives strømmingen i et utjevnet terreng, og lokale strømmingseffekter løses ikke opp slik som i simuleringene med 500m oppløsning. Det foretas derfor en korrigering av vinden i WRF6km mot vinden i WRF500m baser på samtidige tidspunkter.

Punktene i Figur 6 viser alle timeverdier fra WRF500m og WRF6km i perioden 12.12.2013 - 31.3.2014. Som vi ser er det en systematisk forskjell i vindhastigheten. Sammenhengen kan best beskrives med den lineære tilpassingen som vist i figuren. Før WRF6km dataene er brukt videre i analysene er disse korrigert i henhold til denne funksjonen.

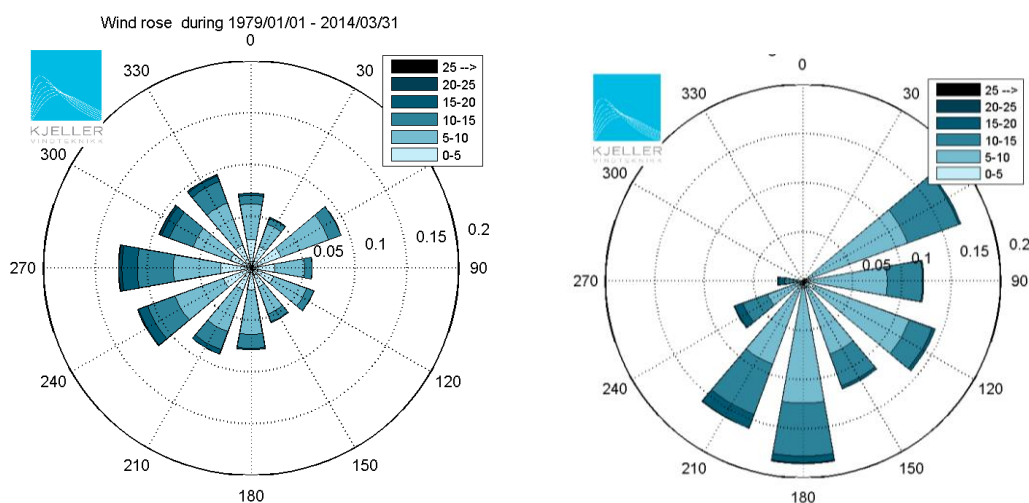
I tillegg til korreksjon av vinden er det foretatt en justering av temperatur og skyvariabler for å kompensere for et avvik mellom modellens terrenghøyde og virkelig terrenghøyde. I modellens topografi har punktet nærmest mast 329 en høyde på 1084 moh. og det er derfor foretatt en høydejustering til virkelig høyde på 1220 moh. I snitt fører denne justeringen til økt vanninnhold, og dermed økt isingsintensitet.



Figur 6 Sorterte vindhastigheter fra WRF6km (på x-aksen) og WRF500m (på y-aksen).

4.2 Islaster for 1979 - 2014

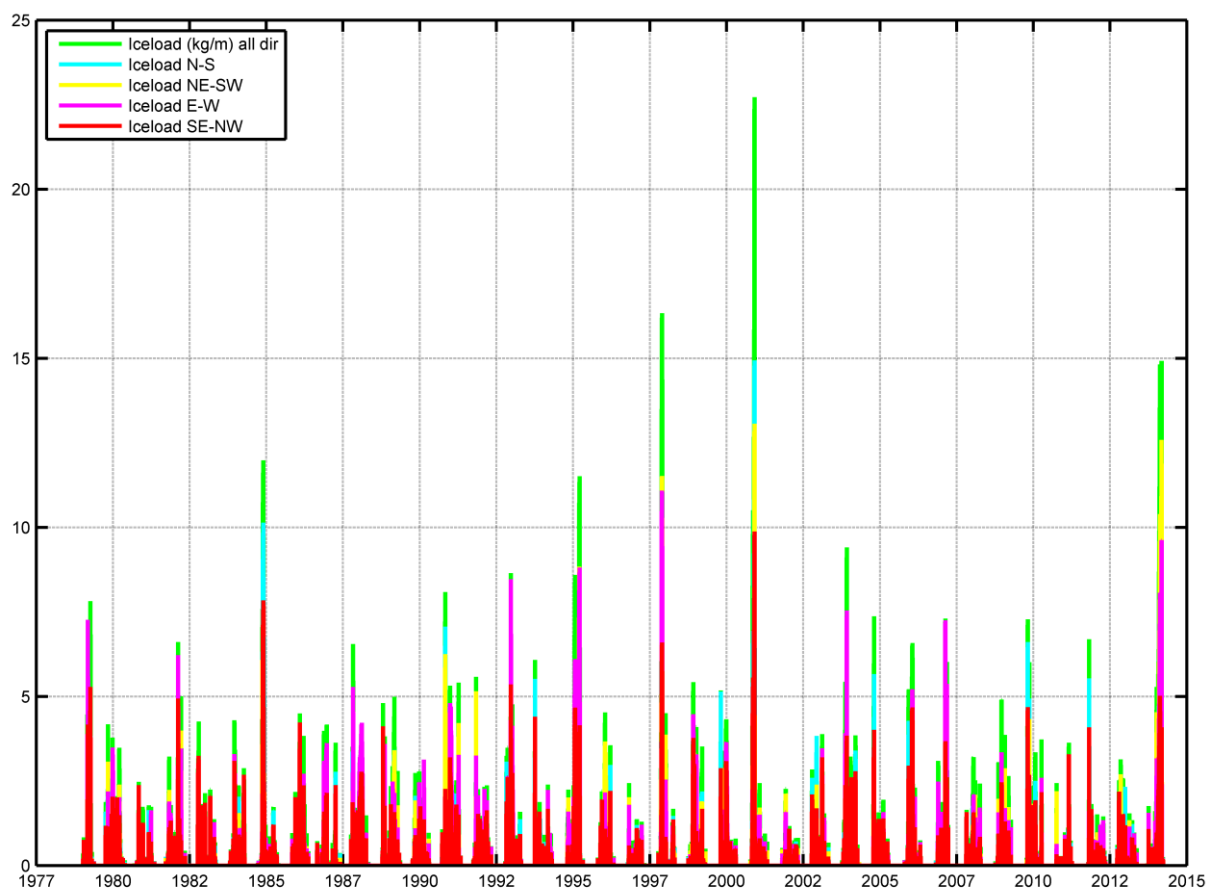
Figur 7 (venstre) viser vindstatistikk for hele modellperioden på 36 år for mast 329. Vindrosen for tidspunkter med ising (venstre) viser en at skyising forventes ved vind fra ulike retninger, men er stort sett forbundet med vind fra sørlig eller østlig retning. Ved vind fra vest, nordvest og nord forventes det sjeldent ising av betydning. Siden kraftledningen i dette området hovedsakelig går i retning fra nordøst mot sørvest forventes det relativt ofte ising med høy komponent på tvers av ledningen. Unntaket er ising ved vind fra sørvest og fra nordøst.



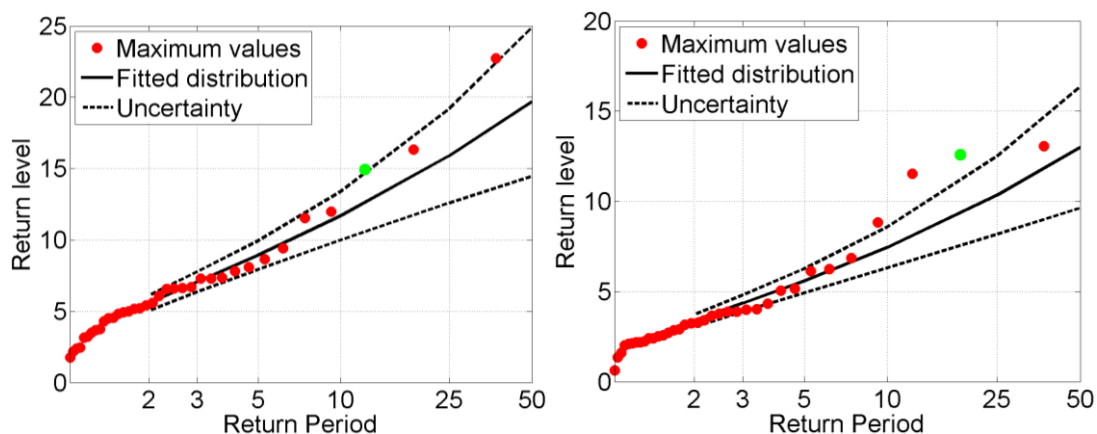
Figur 7: Vindrose for hele simuleringstiden (venstre). Vindrose for alle tidspunkt med isingsintensitet over 20 g/m per time (høyre). Basert på WRF6km i 25 m over bakken Fargekoden på vindrosene indikerer vindhastighet (m/s).

Resultatene for hele perioden (Figur 8) fra 1979 - 2014 viser at 2013/2014 er en av vintrene med høyest modellerte islaster. For ising beregnet på en ledning i retning i nordøst mot sørvest (lik den virkelige ledningen) er vinteren 2013/2014 høyest sammen med 2000/2001.

Ekstremverditilpassningene i Figur 9 viser at estimert returtid for ismengden i 2013/2014 er omtrent 20 år for beregning på et standardlegeme, mens for en horisontal ledning i retning nordøst - sørvest er returtiden for islasten i 2013/2014 estimert til 30-50 år. Det er verd å merke at den tilpassede teoretiske ekstremverdifordelingen representert med sort strek i Figur 9 ligger litt lavere enn de høyeste enkeltverdiene. Dette skyldes at fordelingen av islaster ikke helt følger den teoretiske GEV fordelingen, noe som også gir utslag i et relativt bredt konfidensintervall for estimerte returperioder.



Figur 8: Modellerte islaster for hele modellperioden basert på høyde- og vindjustert WRF6km for modellpunktet nærmest mast 329. Ulike farger representerer islaster på ledninger i ulike retninger. Grønn linje viser islaster på et standarlegeme.



Figur 9: Modellerte årlige ekstremverdier av islaster (kg/m, indikert med røde sirkler) ved mast 329. Svart linje er den tilpassede ekstremverdifordelingen og stiplede svarte linjer indikerer konfidensintervall med bredde på to standard avvik. Grønn sirkel indikerer beregnet islast for vinteren 2013/2014. Venstre: Beregnet for et standarlegeme. Høyre: beregnet for en horisontal ledning med retning fra nordøst mot sørvest.

Beregnete 150-års verdier for islaster (tabell 1) varierer fra 10.8 kg/m til 18.1 kg/m avhengig av ledningsretningen, og kommer opp i 24.6 kg/m for et standardlegeme. Årsaken til denne store variasjonen er, som vist i Figur 7 at ising kan forekomme fra mange ulike retninger. Beregnet 150-års islast for ledningen ved mast 329 er altså 16.2 kg/m. Tatt i betraktning usikkerheten i ekstremverditilpassingene, som vist i Figur 9, vil det være naturlig å legge seg noe på den konservative siden når lastene benyttes i dimensjonering.

Tabell 2 viser at islastene avtar relativt rakt med avtagende høyde over havet. Islastene i tabellen er beregnet for ledningens retning fra nordøst mot sørvest. Disse tallene kan derfor benyttes som utgangspunkt for å fastsette dimensjonerende islaster for hele den aktuelle strekningen, tatt i betraktning variasjonen i høyde over havet. Lokale terreng effekter er ikke gjengitt i disse modellberegningene, og må derfor tas hensyn til.

Tabell 1: Estimerte returverdier for skyising (kg/m) i 1220 moh, 25 m over bakken, som funksjon av ledningsretningen. Basert på gridpunktet nærmest mast M162, og tidsperioden 1979-2013. *Islast med 150-års returtid er lik 50-års verdien multiplisert med faktoren 1.25 (NEK 445: 2009).

Islaster (kg/m) med gitt returperiode							
Ledningsretning	2 år	3 år	5 år	10 år	25 år	50 år	150 år*
N-S	3.1	4.1	5.5	7.5	10.7	13.8	17.3
NØ-SV	3.4	4.3	5.6	7.4	10.3	13.0	16.2
Ø-V	3.4	4.5	5.9	8.0	11.4	14.5	18.1
SØ-NV	3.3	4.1	4.9	6.0	7.5	8.6	10.8
Standardlegeme	5.6	7.1	8.9	11.7	15.9	19.7	24.6

Tabell 2: Estimerte returverdier for skyising (kg/m) på en ledning i nordøst-sørvest retning i ulike høyder over havet, 25 m over bakken. Basert på gridpunktet nærmest mast 329 høydejustert til tre ulike høyder, og tidsperioden 1979-2014. *Islast med 150-års returtid er lik 50-års verdien multiplisert med faktoren 1.25 (NEK 445: 2009).

Høyde	Returverdier for skyising (kg/m)			
	3 år	10 år	50 år	150 år*
1180 moh.	3.5	5.8	9.5	11.9
1200 moh.	3.9	6.5	11.0	13.8
1220 moh.	4.3	7.4	13.0	16.2

5 Referanser

Norsk Elektroteknisk Komite, NEK445:2009 er en norskspråklig samleutgave av europanormene NEK EN 50341 og NEK EN 50423 samt norske tilpasninger.

NS-EN 1991-1-4:2005+NA, 2009: Eurocode 1: Laster på konstruksjoner. Standard Norge, 2009

ISO12494 (Atmospheric icing of structures)

Coles, Stuart. An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer, 2001.

Nygaard, Bjørn Egil Kringelbotn, Hálfván Ágústsson, and Katalin Somfalvi-Tóth. "Modeling Wet Snow Accretion on Power Lines: Improvements to Previous Methods Using 50 Years of Observations." *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013.

Vedlegg A: 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 . The model version used in this work is v3.2.1 described in Skamarock et al. (2008)¹. Details about the modelling structure, numerical routines and physical packages available can be found in for example Klemp et al. (2000)² and Michalakes et al. (2001)³. The development of the WRF-model is supported by a strong scientific and administrative community in U.S.A. The number of users is large and it is growing rapidly. In addition the code is accessible for the public.

The meso-scale model WRF solves coupled equations for all important physical processes (such as winds, temperatures, stability, clouds, radiation etc.) in the atmosphere based on the initial fields and the lateral boundary values derived from the global data.

Input Data

The most important input data are geographical data and meteorological data. The geographical data is from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). The data includes topography, surface data, albedo and vegetation. These parameters have high influence for the wind speed in the layers close to the ground. For the entire domain except for Sweden and Norway, the model uses land use data input from NOAA. The land use data for Sweden is retrieved from the Geografiska Sverigedata (GSD)-Land Cover which is classified in accordance with the European Union's CORINE Land Cover mapping project⁴. For Norway, the model input uses the N50 land use data provided by the Norwegian Mapping Authority⁵.

For the solving of the model equations it requires boundary conditions of the area considered. Such lateral boundary data is available from the National Centers for Environmental Protection (NCEP). The data originates from the Final Global Data Assimilation System (FNL)⁶ and is available as global data with 1 degree resolution every 6 hours. FNL is an operational assimilation model that incorporates all available observation

¹ Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Duda MG, Huang X-Y, Wang W. and Powers JG, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, Boulder, June 2008

² Klemp JB., Skamarock WC. and Dudhia J., 2000: Conservative split-explicit time integration methods for the compressible non-hydrostatic equations (<http://www.wrf-model.org/>)

³ Michalakes J., Chen S., Dudhia J., Hart L., Klemp J., Middlecoff J., and Skamarock W., 2001: Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model. Developments in Teracomputing: Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology. Eds. Walter Zwiefhofer and Norbert Kreitz. World Scientific, Singapore.

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

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

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

data globally, and uses this data to create a global analysis dataset, or a snapshot of the atmosphere, four times every day. The assimilation model incorporates data from several thousand ground based observation stations, vertical profiles from radiosondes, aircrafts, and satellites.

Similar lateral boundary data is also available from the European Center for Medium range Weather Forecasting (ECMWF). The reanalysis data ERA Interim^{7,8} is available with a spatial resolution of approximately 0.7 degrees globally. Data is available every 6 hours. The ERA interim dataset does also assimilate observational data. For weather forecasting the datasets from ECMWF is usually accepted to have higher quality compared to NCEP datasets, in particular for the European region.

Model Setup

The model setups used in these analyses are shown in Figure B-1. The simulations of the northern European region have been performed for 34 years covering the period of 1979-2013. The model has been set up with 2 nested domains. The horizontal resolutions are 18 km x 18 km and 6 km x 6 km for the longer period. The fine scale simulations are set up with three nested domains with horizontal resolution stepwise increasing from 12.5 km x 12.5 km to 0.5 km x 0.5 km from the outermost to the innermost domains.

The ERA Interim dataset is used as lateral boundary conditions for both the 6 km simulation and the 500 m. Each of the simulations has 32 layers in the vertical with four layers in the lower 200 m. We have used the Thompson microphysics scheme and the MYNN scheme for boundary layer mixing.

The 500 m simulations require a high resolution digital elevation dataset as input. For these simulations we have utilized the ASTER GDEM satellite retrieved elevation model, with a horizontal resolution of 1 sec (approximately 30 m).

With the current setup, the WRF-model calculates the change in the meteorological fields for each grid-cell for a time step from 2 to 108 seconds in the different domains with increasing time step for lower horizontal resolution. In this way a realistic temporal development of the meteorological variables is achieved. Data is stored to disk every 1 hours of simulation.

⁷ Dee, D. P., et al. (2011), The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553-597. doi: 10.1002/qj.828

⁸ <http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/era-interim>

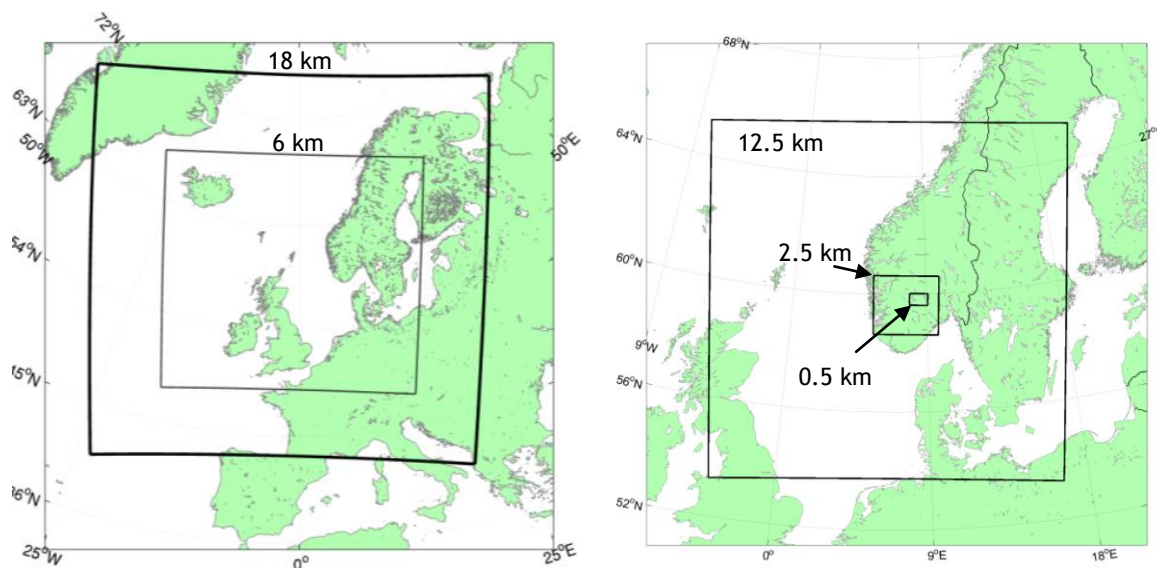


Figure B-1: Model set up for WRF simulations. Left: Coarse grid for 35 years simulation (6 km and 18 km), right: High resolution grid used for case studies (nested down to 0.5 km).

Ice load calculations

According to the standard ISO 12494 (ISO/TC98/SC3/WG6 2000)⁹ icing has been calculated from

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \cdot w \cdot A \cdot V \quad (1)$$

Here dM/dt is the icing rate on a standard cylindrical icing collector (defined by ISO 12494 as a cylinder of 1 m length and 30 mm diameter), w is the liquid water content, and A is the collision area of the exposed object. V is the wind speed and α_1 , α_2 and α_3 are the collision efficiency, sticking efficiency and accretion efficiency, respectively.

Accumulated over time (1) gives M as the mass of ice on a standard cylindrical icing collector. Icing is calculated at a specific height equivalent to the elevation of the line route.

There are several sources of uncertainty in the model data. The cloud processes are simplified and calculated by using parameterizations. Uncertainties therefore exist in the total amounts of cloud water available in the air masses, and in the distribution of cloud water vs. cloud ice in the air masses. The model setup is using a sophisticated microphysics scheme.¹⁰ This is the scheme that gives the most accurate calculations of liquid water content¹¹ and is thus recommended for icing calculations. Uncertainties are also related to

⁹ ISO 12494 2000: Atmospheric Icing of structures, International Standard, ISO/TC98/SC3/WG6.

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

¹¹ Nygaard, Bjørn Egil, Jón Egill Kristjánsson, Lasse Makkonen, 2011: Prediction of In-Cloud Icing Conditions at Ground Level Using the WRF Model. J. Appl. Meteor. Climatol., 50, 2445-2459.

the vertical distribution of the moist air and choice of parameterization scheme for the boundary layer mixing processes.

In the simulations also the topography is represented by a grid, and does not reflect the real height of the mountain peaks. This means that the mountain tops in the model are lower than in the real world. This discrepancy can lead to an underestimation of the icing amounts particularly for coarse model grids. We correct for the discrepancy in height between the model grid and the actual elevation of the sites. This correction is done by lifting the air in the model to the correct terrain height. This lifting will contribute to lower the pressure and temperature in the air, allowing for an increased amount of cloud water, or it will lead to condensation in the cases when the air will reach the water vapor saturation pressure. The lifting is performed according to the vertical profile of temperature and moisture locally in the model.

Removal of ice

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

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

where Q_h and Q_e are the sensible and latent heat fluxes. Q_n is the net radiation term. There are also other terms which will come into the total energy balance model, however they are assumed to be of negligible size in this context. A detailed description of the melting terms is given in Harstveit (2009).¹²

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

Sublimation is a process for ice removal that is found to be important, in particular for dry inland sites where the temperature can stay below freezing for several months continuously during the winter. At such sites the accumulated ice will not melt. Sublimation is defined as the transfer of ice from solid state directly to water vapor. This will happen in situations with dry air. The sublimation rate increases with wind speed when the ventilation of the iced object is high. This can allow for faster ice removal of e.g. a rotating turbine blade compared to a fixed object. The sublimation rate is calculated by evaluating the energy balance between outgoing long wave radiation and latent heat release from the sublimation process. Sublimation has been included in the icing calculations. During the process of sublimation we have observed that the ice becomes brittle and that small pieces of ice continuously fall off the cylinder. This shedding is included by multiplying the sublimation rate with a factor of 2.5.

¹² Harstveit K, Byrkjedal Ø. and E. Berge 2009: Validation of Regional In-Cloud Icing Maps in Norway, IWAIS, Andermatt 2009.

