



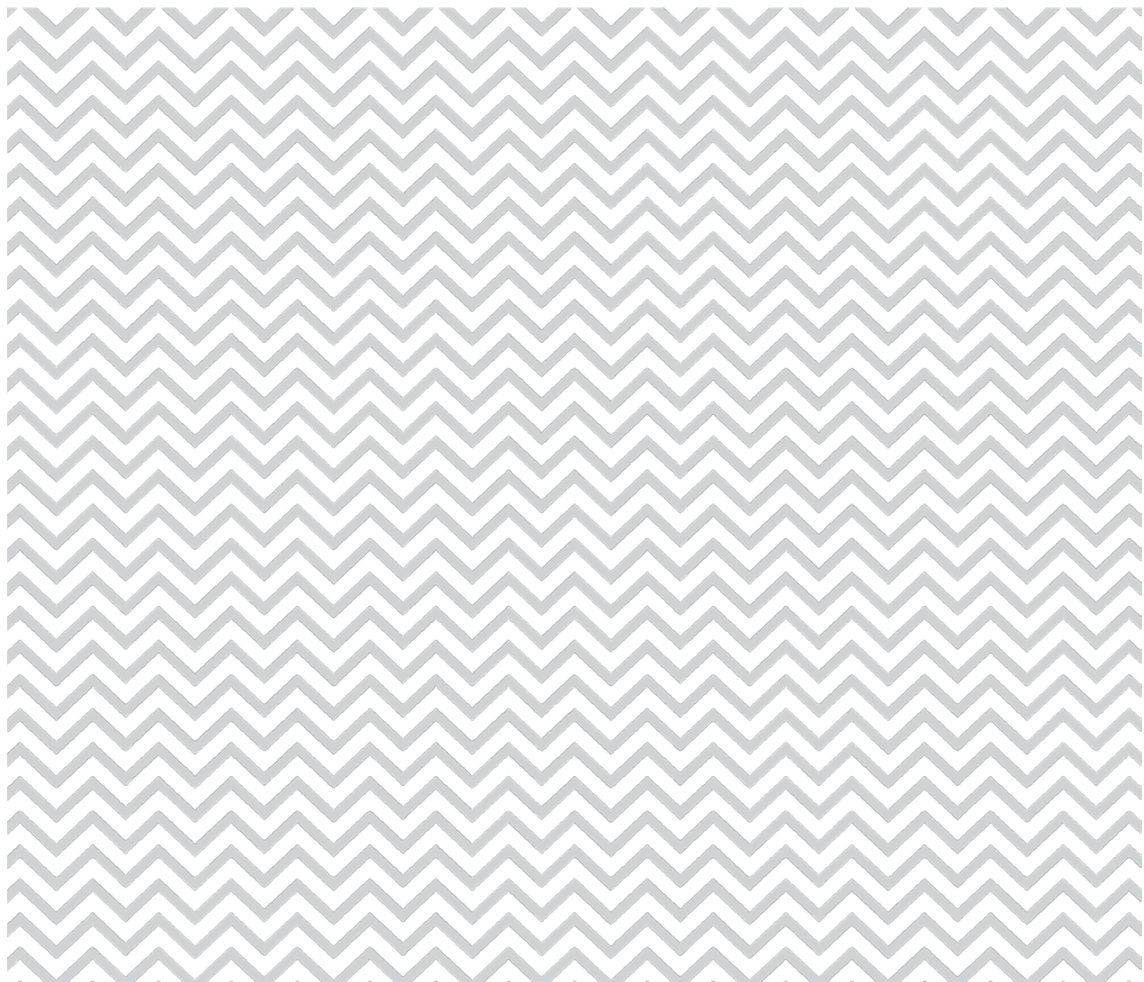
Norwegian
Meteorological
Institute

MET report

no. 7/2014
Climate

**420 kV Sima-Samnanger
Foreløpig analyse av værforhold og
islaster
i forbindelse med brudd på toppline og
havarete toppspir**

Karianne Ødemark
Helga Therese Tilley Tajet
Bjørn Egil K. Nygaard (Kjeller Vindteknikk AS)
Harold Mc Innes





Norwegian
Meteorological
Institute

MET report

Title: 420 kV Sima-Samnanger Foreløpig analyse av værforhold og islaster i forbindelse med brudd på toppline og havarete toppspir	Date 2014-08-25
Section: Klimatjenesteavdelingen	Report no. no. 7/2014
Author(s): Karianne Ødemark Helga Therese Tilley Tajet Bjørn Egil K. Nygaard (Kjeller Vindteknikk AS) Harold Mc Innes	Classification <input checked="" type="radio"/> Free <input type="radio"/> Restricted
Client(s): Statnett	Client's reference 26534
Abstract <p>Denne rapporten omfatter en analyse av isings- og værforhold i området for traseen 420 kV Sima-Samnanger under havariet i desember 2013. Kjeller Vindteknikk (KVT) har utarbeidet modellanalyser for den aktuelle episoden som førte til havariet, gitt i vedlegg 1. Første del av rapporten tar for seg værstatistikk fra perioden, samt gir en sammenligning av observasjoner og modelldata.</p>	
Keywords Klimalast, vindlast, islast, kraftledning, WRF, havari	

Disciplinary 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 Værstatistikk	10
3 Verifisering av modelldata	14
3.1 Temperatur	14
3.1.1 Kvamsøy	15
3.1.2 Kvamskogen	17
3.1.3 Midtstova	18
3.2 Vind	20
3.2.1 Flesland	20
4 Islaster med returtid 150 år	21
5 Konklusjon	23
Referanser	24
Vedlegg 1: Kjeller Vindteknikk (KVT) rapport: «420 kV Sima – Samnanger, Kvam kommune, Hordaland» KVT/BEN/2014/R028	25

1 Innledning

Denne rapporten gir en analyse av isingsforhold i forkant av og under havarieret på 420 kV traseen mellom Sima og Samnanger desember 2013.

Isingsforholdene avhenger av vær-situasjonen, særlig nedbør- og temperaturforhold. Rapporten tar derfor for seg målinger fra relevante stasjoner under den aktuelle perioden. I tillegg har Kjeller Vindteknikk (KVT) utarbeidet omfattende modellsimuleringer for episoden, med en finskala værmodell, samt langtidsstatistikk for perioden 1979 - 2014. Resultater fra modellstudiet er gitt vedlegg 1.

Rapporten inneholder

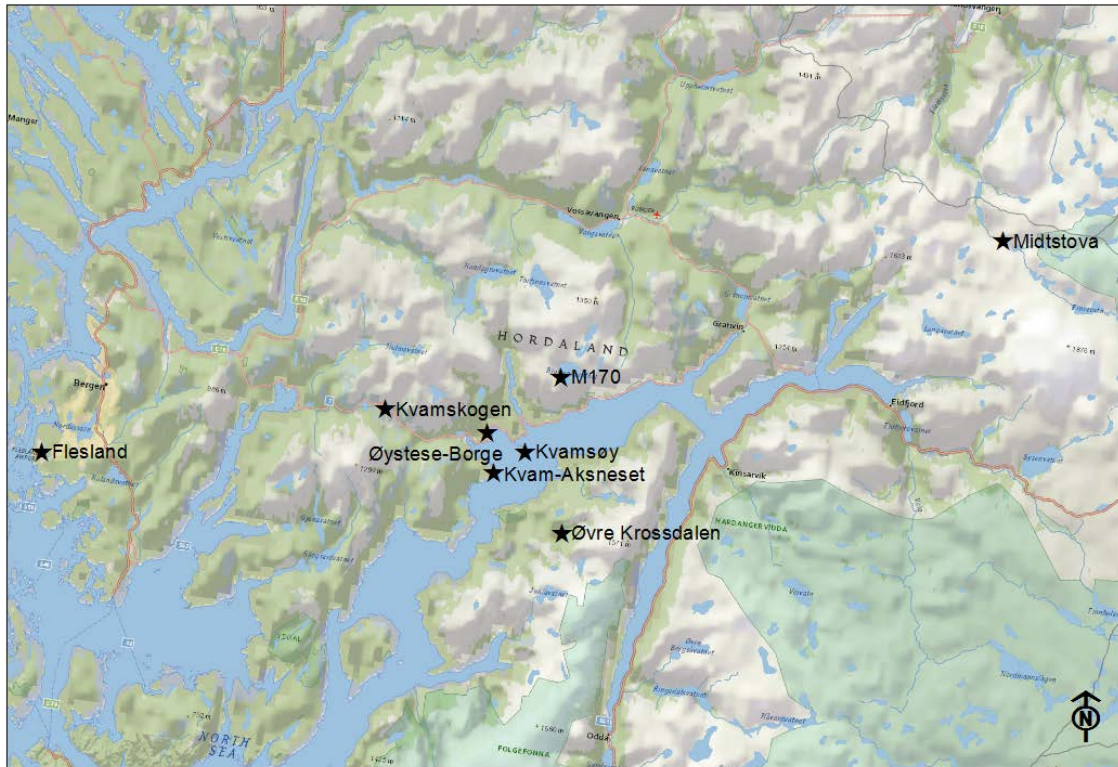
- 1) Analyse av værdata fra relevante værstasjoner, og en sammenstilling av resultatene med informasjon som modellanalysene gir – for å validere modellresultatene.
- 2) Sammenstilling av KVTs rapport med modellresultatene, gitt som vedlegg 1.

Kartet under (Figur 1) over Hardangerfjorden viser nærmeste værstasjoner fra havaristedet, hvor det er hentet data fra til bruk i denne rapporten, samt mastepunkt 170 på traseen fra Sima til Samnanger.

Stasjonene på Kvamsøy og Kvamskogen er nærmest havaristedet i luftlinje, så temperatur og nedbør er relevante parametere å se på fra disse stasjonene. Vinden vil derimot være såpass styrt av terrenget lokalt rundt stasjonene, at vinden ikke er representativ for havaristedet. Denne terrengstyringen gjør at vinden herfra heller ikke er egnet til å verifisere vindfeltet i finskalamodellen.

Øystese-Borge og Øvre Krossdalen måler bare nedbør, så herfra var det bare aktuelt med denne parameteren. Kvam-Aksneset er også kun brukt til å vurdere nedbørmengder, selv om den også måler temperatur.

Midtstova er tatt med for å ha en fjellstasjon å sammenligne modellen med. Selv om denne stasjonen ligger høyt, 1162 moh., er vinden herfra fremdeles styrt av terrenget, da den ligger i en liten senkning i forhold til terrenget rundt. For å se på vind fra en stasjon som vil være tilnærmet upåvirket av lokale forhold er Flesland tatt med.



Figur 1: Oversiktskart hvor stjernene angir hvilke værstasjoner det er hentet data fra, samt mastepunkt 170 på strekningen Sima-Samnanger.

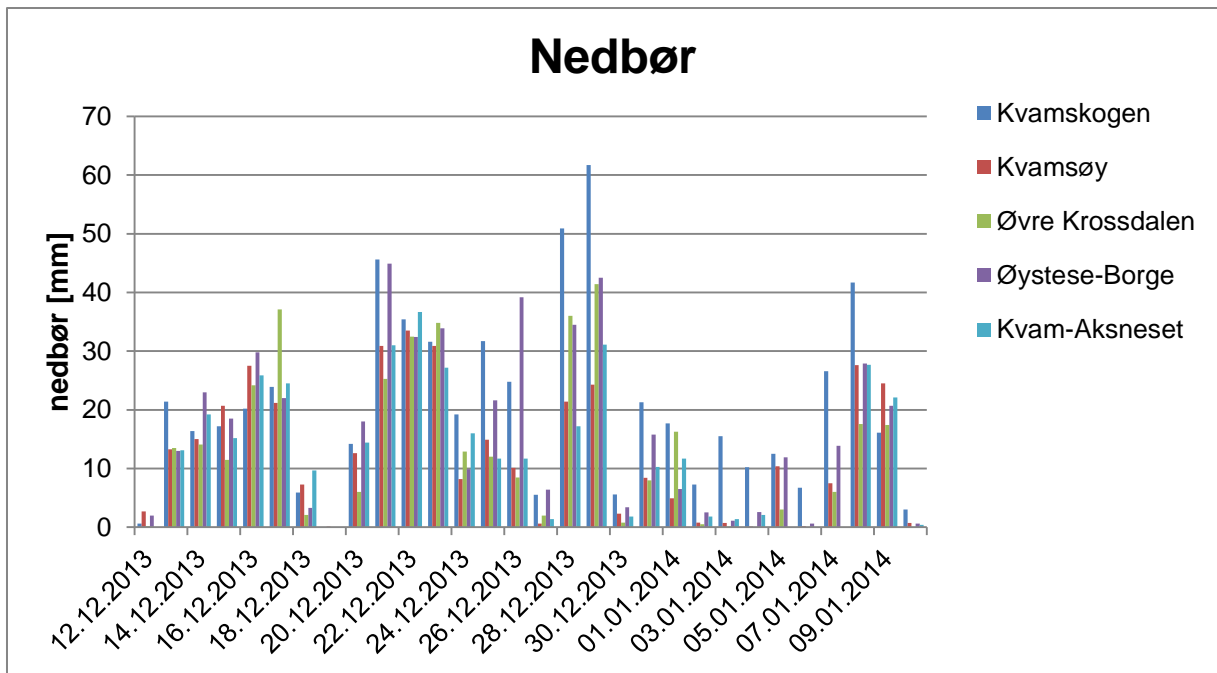
2 Værstatistikk

Vinteren 2013/2014 satte mange rekorder med lite nedbør enkelte steder, mye nedbør andre steder og med mildvær. Vinteren for Norge som helhet hadde en temperatur 3,7 grader over normalen. Nærmeste stasjoner til havariet er Kvamskogen og Kvamsøy. Kvamskogen var 2,9 grader over normalen for vinteren og 3,4 grader over normalen for desember. Desember 2013 var også mild og nedbørrik for landet. Månedstemperaturen for desember 2013 var 4,2 grader over normalen for hele Norge, månedsnedbøren var 180 % av normalen, det er den nest våteste desembermåned som er registrert i serien som går tilbake til 1900. Med tanke på nedbøren var landet helt motsatt av hva som er vanlig. Store deler av vinteren var vinden fra sør og sørøst med relativt milde luftmasser. Det førte til mye nedbør på Sør- og Østlandet og i Rogaland, mens det var veldig tørt nord for Stadt og Dovre. Nedbøren vinteren 2013/2014 for hele Norge var 120 % av normalen. Agder og Østlandet opplevde den mest nedbørrike vinteren registrert, hvor enkelte stasjoner hadde det tredobbelte av det normale, mens Trøndelag og Nord-Norge fikk halvparten av den normale nedbøren. Kvamsøy og Kvamskogen målte hhv. 109 % og 131 % av normalen for vinteren. For desember registrerte stasjonene hhv. 169 % og 176 % av normal nedbør.

Isingstypen som var fremherskende i den aktuelle perioden var skyising (Vedlegg 1). Skyising måles ikke ved værstasjoner og kan ikke enkelt avledes fra standard værelementer. Basert på fysiske argumentasjonsrekker forventes allikevel en viss sammenheng mellom nedbørsmengder i lavlandet og intensiteten av skyising i fjellet. En unormal isingsvinter i fjellet forventes å gjenspeiles i unormale nedbørsverdier. Sammenhengen mellom nedbør og skyising er dog begrenset til perioder uten varmegrader i fjellet.

Det er sett på nedbør fra stasjoner i nærheten av havaristedet. Figur 2 viser nedbør i nedbørdøgnet¹ for de fem nærmeste stasjonene i perioden 12.12.2013-10.01.2014. Det er tydelig at det kom mye nedbør i denne perioden. For å se total mengde nedbør over flere dager er det blitt summert opp nedbør fra ulike perioder. Returperiode for de forskjellige nedbørsummene og antall dager ble sett på. For høyeste nedbørhendelse sett i forhold til bare desember er returperioden ca. 20 – 30 år for de to stasjonene som har fått mest nedbør (Kvamskogen og Øystese-Borge). Sett i forhold til vinteren fant vi ikke noe ekstremt tilfelle utfra kun mengde nedbør ved disse stasjonene. Slike hendelser er noe som skjer fra årlig til hvert fjerde år vinterstid.

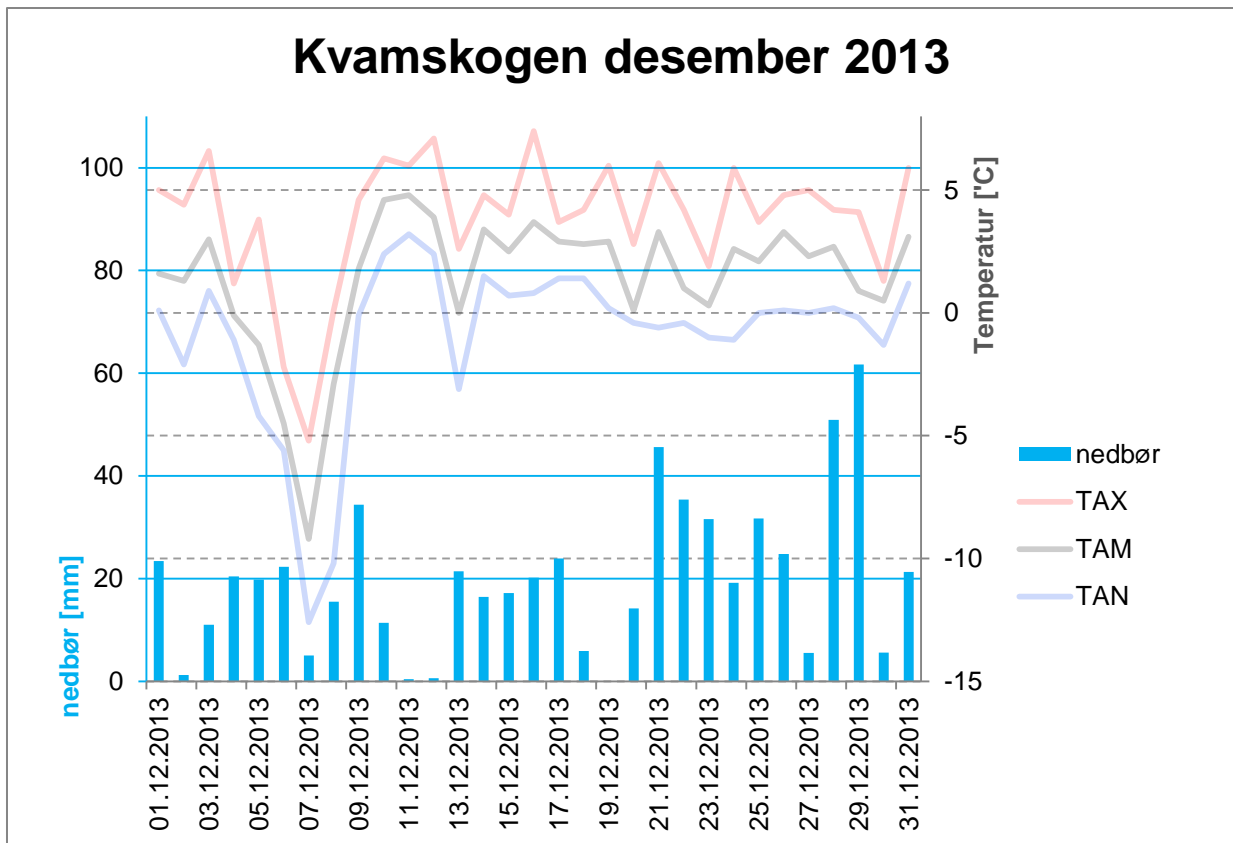
¹ Nedbøren måles kl. 07 norsk normaltid. Datoens verdi viser hvor mye nedbør (i mm) som kom siste 24 timer fram til kl. 07 den dagen.



Figur 2: Nedbør i døgnverdier for de fem nærmeste stasjonene i området i perioden 12.12.2013-10.01.2014.

Siden episoden med havariet ikke viser seg å være spesielt ekstremt fra bare å se på nedbørverdier, har det blitt sett på tilfellet når det settes en temperaturbegrensning. Døgnverdier og månedsnedbør har blitt hentet ut for desember alle årene Kvamskogen stasjon har målt nedbør; 1957 – august 2006, og overlappende med Kvamskogen-Jonshøgdi; august 2006 – i dag. De årene hvor nedbøren på stasjonen overstiger normalen (351 mm i desember måned), har blitt studert i henhold til en temperaturbegrensning. Som allerede nevnt over, kom det i desember 2013 mye nedbør, 176 % av normalen for Kvamskogen. Av de 57 årene med nedbørsmålinger har 28 år vært over normalen i desember, det er som forventet ca. halvparten.

Siden Kvamskogen ligger lavere enn havaristedet, er temperaturen i gjennomsnitt høyere på Kvamskogen. Kvamskogen ligger 455 moh., og havariet fant sted ved ca. 1100 moh. Ved å ta utgangspunkt i den gjennomsnittlige temperaturgradienten for lavere deler av atmosfæren på 0,6 grader/100 m, vil estimert temperatur ved havaristedet i gjennomsnitt ligge ca. 4 grader lavere enn på Kvamskogen. Vi antar videre at makstemperaturen må overstige ca. 2 °C i løpet av dagen ved havaristedet for å unngå skyising. Dette betyr at makstemperaturen på Kvamskogen stasjon har en begrensning på 6 °C og vi henter ut nedbøren de dagene i desember hvor dette har vært tilfelle. Deretter er nedbøren summert for å se om 2013 var uvanlig med tanke på mye nedbør og med en slik temperaturbetingelse. Figur 3 viser temperatur og nedbør for Kvamskogen stasjon i desember 2013. Nedbør som søyler dag for dag, og maksimum-, middel og minimumstemperatur i hhv. rødt, grått og blått.



Figur 3: Nedbør (blå søyler) og temperatur for Kvamskogen desember 2013. Maksimumstemperatur (TAX); rød, middeltemperatur (TAM); grå og minimumstemperatur (TAN); blå.

Desember 2013 hadde 24 av 31 dager med nedbør og en makstemperatur under 6 °C på Kvamskogen. Mengden nedbør disse dagene var 528,7 mm. Tabell 1 viser alle årene som har hatt nedbør over normalen og summert de dagene med nedbør hvor maksimumstemperaturen ikke oversteg 6 °C. Fra disse 28 desembermånedene har bare en av dem hatt mer nedbør enn 2013 med slik temperaturbetingelse, det var i 1980. For år med temperaturbetingelsen og nedbør over 400 mm er det 7 av 28 år, markert med rødt i tabell 1. Det er vanlig med mye nedbør i området, men når det settes på en betingelse på maksimumstemperaturen ser det ikke ut til å være like vanlig med en slik situasjon som i desember 2013, som også returperiodene tilsier uten temperaturbetingelse. I tillegg vises dette i modelldataen for ising i desember 2013, selv om returperioden for hele vinteren ikke er uvanlig, se vedlegg 1.

Tabell 1: Summert nedbør på Kvamskogen i desember de dagene med maksimumstemperatur under 6 °C og månedsnedbøren har vært over normalen (351 mm).

år	nedbør [mm]	år	nedbør [mm]
1957	366,8	1988	448,4
1966	277,0	1990	316,4
1967	287,3	1991	387,4
1971	331,5	1992	399,2
1972	309,2	1993	282,7
1973	437,4	1994	466,2
1974	393,8	1998	257,6
1975	439,4	1999	372,6

1980	678,4	2003	397,2
1982	346,1	2004	322,0
1983	345,5	2006	355,5
1985	341,5	2007	230,1
1986	313,8	2011	426,6
1987	289,1	2013	528,7

Tabell 2 nedenfor angir returperioder for døggnedbør ved de to nærmeste nedbørstasjonene til havariet, Kvamskogen og Kvamskogen-Jonshøgdi er overlappende.

Tabell 2: Maksimal døggnedbør vinterstid. Returverdier angitt med to ulike metoder for ekstremverdigberegning (Gumbel og NERC, hvor NERC er angitt i parentes).

Stasjon	I drift	10-års returperiode	50-års returperiode
Kvamsøy	2003-2013	88 (84) mm	116 (108) mm
Kvamskogen	1957-2006	104 (101) mm	133 (128) mm
Kvamskogen – Jonshøgdi	2006-2013	112 (106) mm	145 (164) mm

3 Verifisering av modelldata

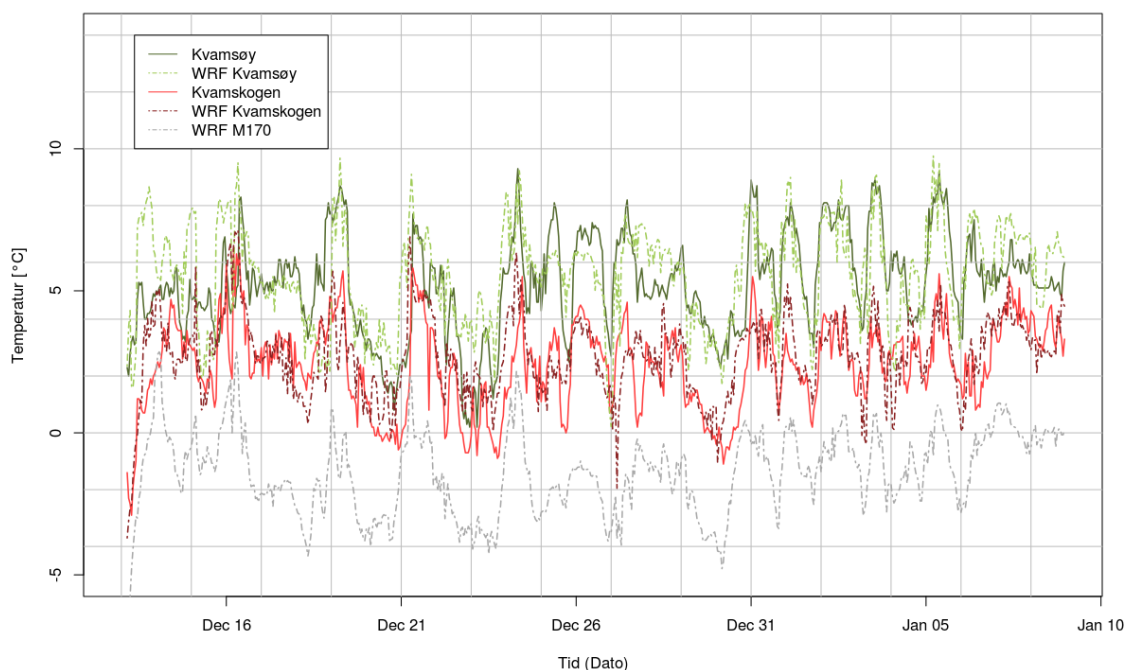
I dette kapitlet er modelldata fra KVT (vedlegg 1) verifisert mot observasjoner fra MET sine værstasjoner. Fra modellsimuleringene er det hentet ut data for nærmeste gridpunkt til værstasjonene Kvamsøy, Kvamskogen og Midtstova, slik at modellerte verdier er sammenliknet med observasjonene. Dette er gjort for perioden da isingen fant sted, 13. desember 2013 – 9. januar 2014. Hensikten med en slik sammenstilling er å kontrollere at modellen gjengir de generelle trekkene ved vær-situasjonen, og eventuelt avdekke om det er større systematiske feil i modellsimuleringene, som vil ha betydelig innvirkning på de simulerte islastene.

Plassering til værstasjonene kan sees i kartet i innledningen, Figur 1. Kvamsøy stasjon ligger på en øy i Hardangerfjorden, rett sør for havaristedet. Stasjonen ligger 49 moh., mens høyden i modellen data er hentet fra, for sammenligning med værstasjonen, er 14 moh. Kvamskogen værstasjon ligger litt vest for havaristedet. Høyden til denne stasjonen er 455 moh., og modellhøyden for punktet er 435 moh. Stasjonen Midtstova er tatt med for å sammenligne med en høyfjellstasjon. Den ligger øst for havaristedet, på 1162 meters høyde. Modellhøyde er her 1268 moh. For å se på vind fra en stasjon som vil være tilnærmet upåvirket av lokale forhold er Flesland tatt med. Flesland ligger 48 moh. og modellhøyden for dette punktet er 13 moh. Gridpunktet ved Flesland befinner seg ikke innenfor området modellen med høyest oppløsning (innerste domenet), men i det neste domenet med oppløsning på 2,5 km.

3.1 Temperatur

Figur 4 viser temperatur i perioden fra 13. desember 2013 til 9. januar 2014, for både observerte og modellerte verdier. Grønn heltrukken linje er observert temperatur ved Kvamsøy, mens grønn stiplet linje er modellert temperatur fra WRF for gridpunkt ved Kvamsøy. Tilsvarende er heltrukken og stiplet rød linje observert og modellert temperatur fra Kvamskogen, henholdsvis. Grå stiplet linje viser modellert temperatur ved mastepunkt 170. Fra figuren kan det sees at modellert temperatur følger observert temperatur godt.

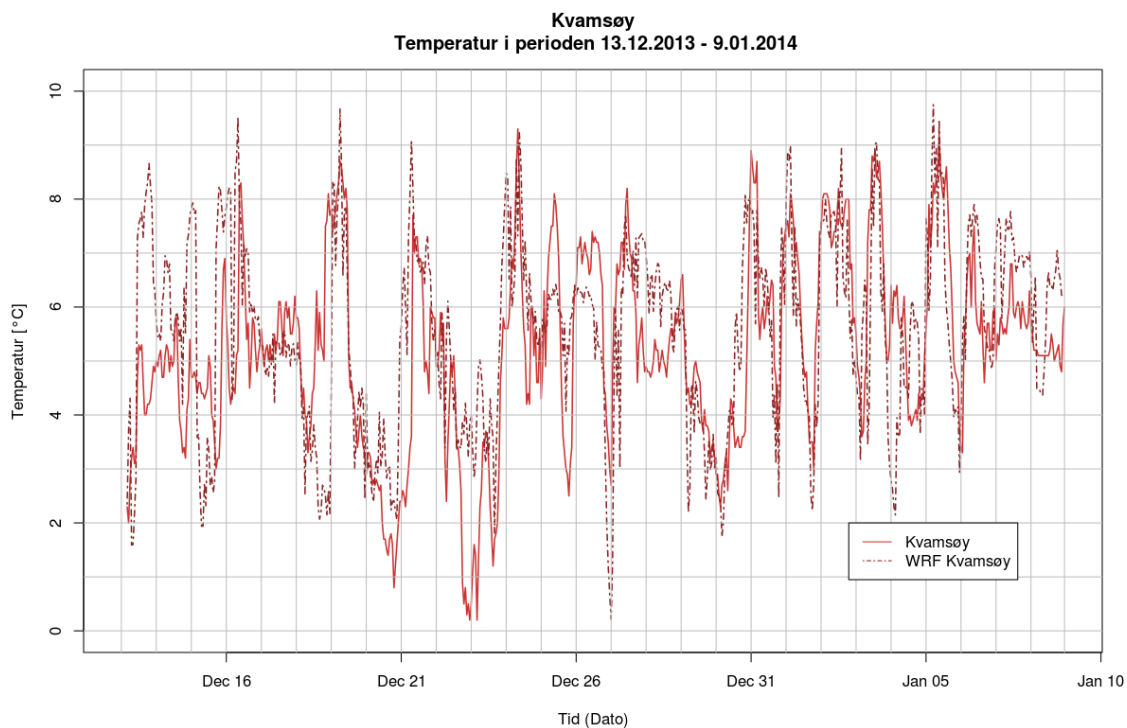
Temperatur i perioden 13.12.2013 - 9.01.2014



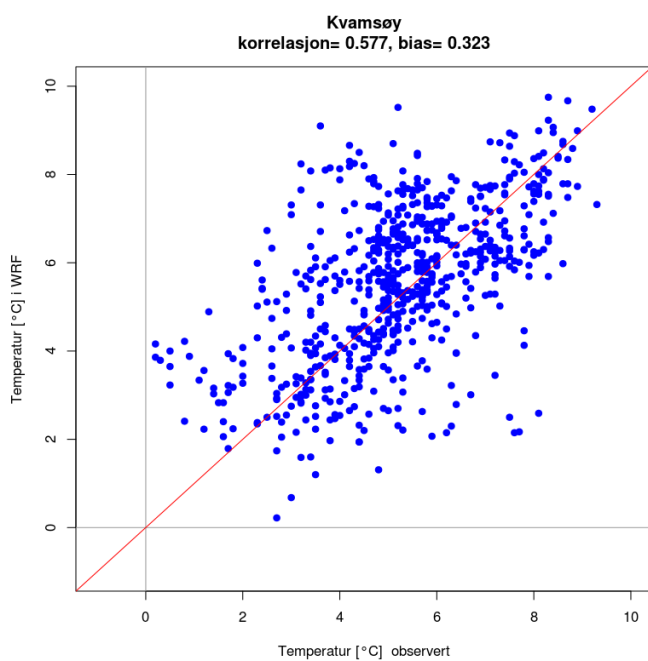
Figur 4: Temperatur timesverdier fra Kvamsøy stasjon (grønn heltrukken), Kvamsøy modelldata (grønn stiplet), Kvamskogen stasjon (rød heltrukken), Kvamskogen modelldata (rød stiplet) og modelldata ved havariet, mast 170 (grå stiplet) for perioden 13.12.2013-09.01.2013.

3.1.1 Kvamsøy

Figur 5 er tilsvarende som figuren over, men her vises kun observerte og modellerte verdier ved Kvamsøy i perioden 13. desember 2013 til 9. januar 2014. Figur 6 viser timesverdiene av temperatur fra observasjoner og fra modelldata mot hverandre. Diagonalen er satt inn i rødt for å se hvordan observasjonene og modelldataen plasserer seg. Korrelasjonen mellom dem er 0,577 (~ 0,6). Bias er 0,323, det forteller at temperatur fra modellen er litt høyere enn observasjonene i dette tilfellet for Kvamsøy.



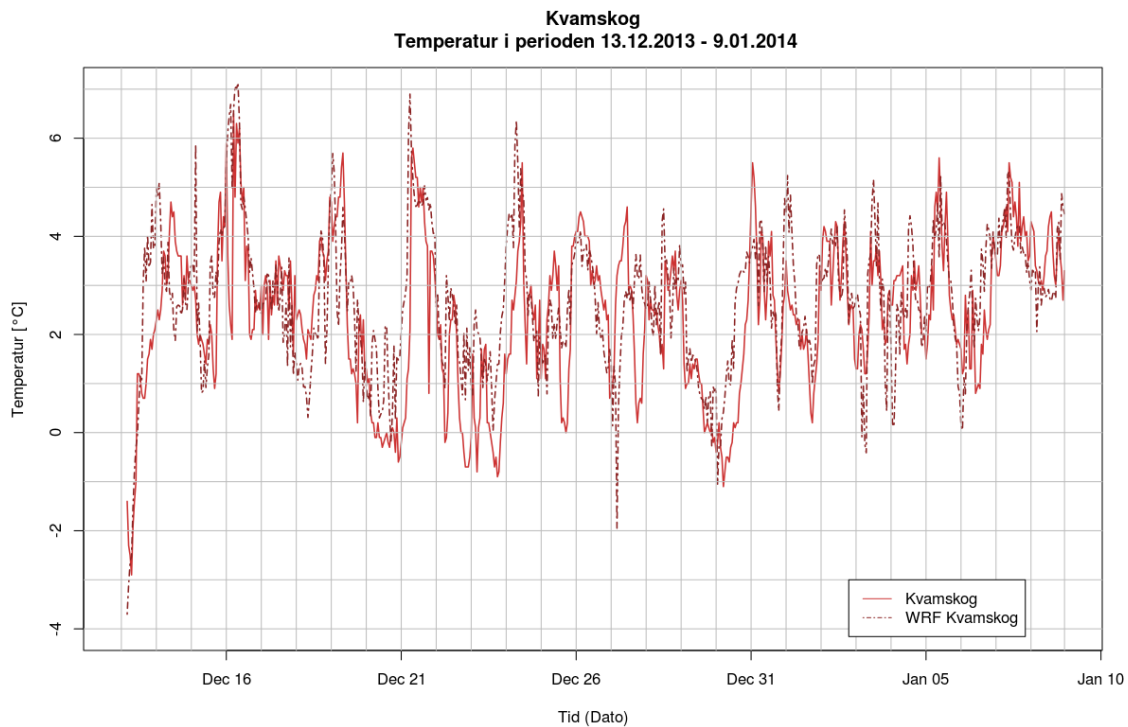
Figur 5: Temperatur timesverdier fra Kvamsøy stasjon (rød heltrukken) og modelldata (rød stiplet) i perioden 13.12.2013-09.01.2014.



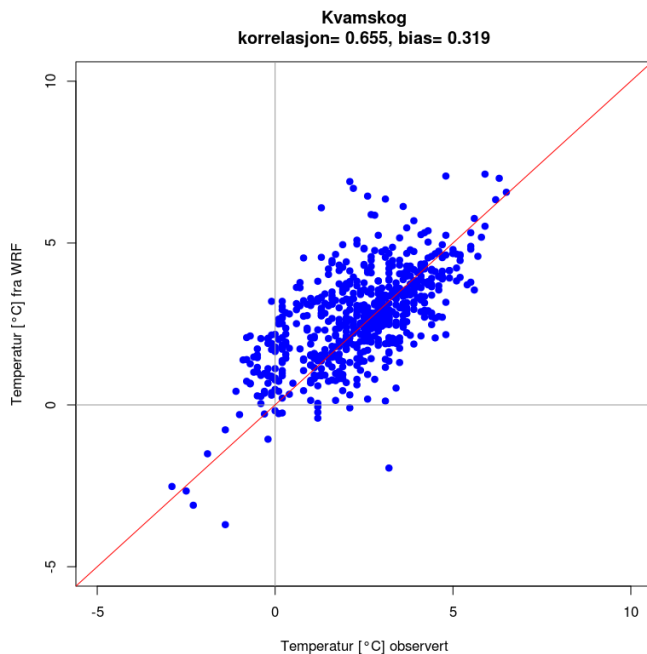
Figur 6: Observerte og modellerte timesverdier av temperatur for Kvamsøy i perioden 13.12.2013-09.01.2014.

3.1.2 Kvamskogen

Figur 7 viser observert (heltrukken rød linje) og modellert (stiplet rød linje) temperatur for Kvamskogen, i samme periode som tidligere. Ved dette punktet er korrelasjonen mellom observerte og modellerte verdier 0,655, mens bias er 0,319. Det vil si at også her er modellerte verdier litt høyere enn observerte, se Figur 8. Det kan ikke sies at det er noen store systematiske avvik i modellen.



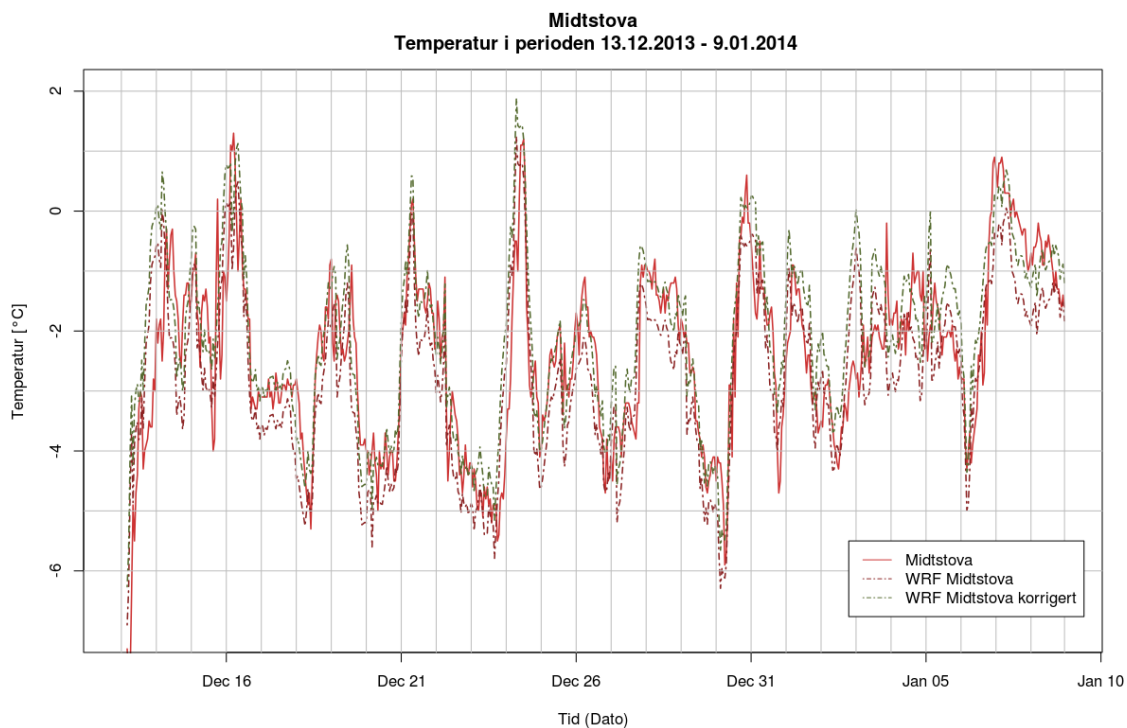
Figur 7: Temperatur timesverdier fra Kvamskogen stasjon (rød heltrukken) og modelldata (rød stiplet) i perioden 13.12.2013-09.01.2014.



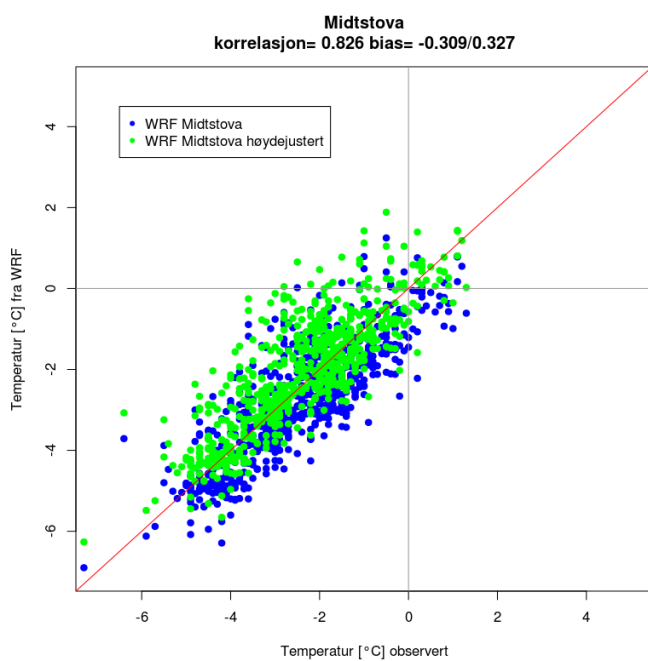
Figur 8: Observerte og modellerte timesverdier av temperatur for Kvamskogen i perioden 13.12.2013-09.01.2014.

3.1.3 Midtstova

Midtstova befinner seg ikke innenfor området modellen med høyest oppløsning (innerste domenet), men i det neste domenet med oppløsning på 2,5 km. Denne stasjonen er tatt med for å ha en høyfjellstasjon å sammenligne modellen med. Stasjonen ligger på 1162 moh., litt øst for hvor havariet fant sted. Observert og modellert temperatur er vist i Figur 9, og viser god overenstemmelse. Punktet for Midtstova i modellen ligger på 1268 moh., slik at det er 106 m høyere enn der stasjonen faktisk ligger. Derfor er det gjort en høydekorrigering for temperaturen (0,6 °C/100m). Dette vises som den grønne stiplede linjen i figuren. Den gode overenstemmelsen kan også sees fra Figur 10 hvor de observerte og modellerte verdiene er plottet mot hverandre, blå prikker er mot WRF modellhøyde på 1268 moh., mens grønne er mot høydejusterte WRF-verdier. Korrelasjonen mellom observert og modellert er 0,826, mens bias er -0,309 for modellverdier uten høydejustering, og 0,327 med høydejustering. Biasen er omtrent like stor for modellverdiene med og uten høydejustering, men med motsatt fortegn. Det vil si at modellverdien uten høydejustering er litt for lav, mens med høydejusteringen er modellverdien litt for høy.



Figur 9: Temperatur timesverdier fra Midstova stasjon (rød heltrukken) og modelldata (rød stiplet) i perioden 13.12.2013-09.01.2014. Grønn stiplet linje er modellverdier fra 1268 moh. justert til 1162 moh. som er høyden Midstova stasjon ligger på.



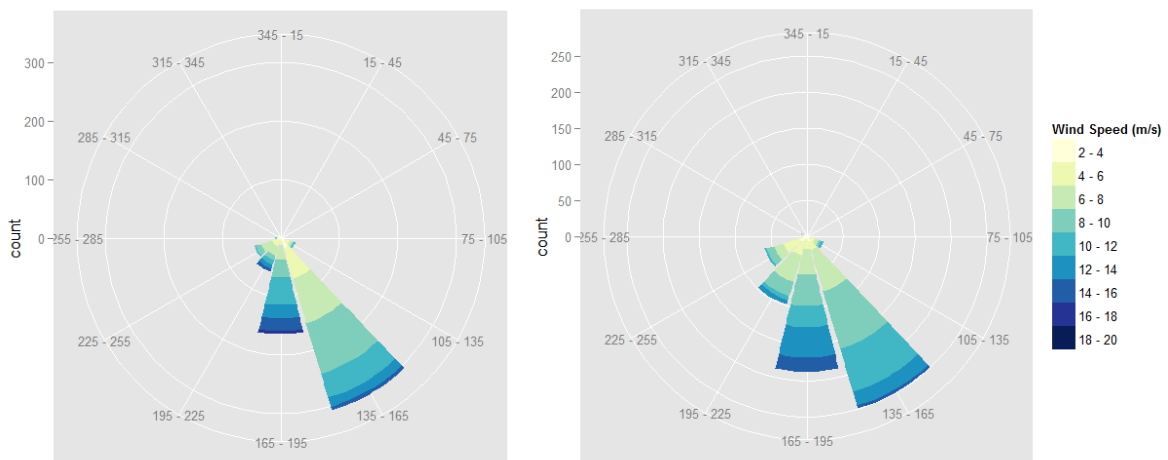
Figur 10: Observert og modellerte timesverdier av temperatur for Midstova i perioden 13.12.2013-09.01.2014. Blå prikker er fra modell i høyde 1268 m, mens grønne prikker er modellverdier fra 1268 moh. justert til 1162 moh. som er høyden Midstova stasjon ligger på.

3.2 Vind

Vindroser for samme periode har blitt lagd for Flesland, både for observerte og modellerte verdier.

3.2.1 Flesland

Vind ved Flesland vil være nærmest upåvirket av lokale effekter, i motsetning til f.eks. Kvamsøy. Derfor er vind fra kun denne stasjonen tatt med i vurderingen av modellert vind. Gridpunktet ved Flesland befinner seg ikke innenfor området modellen med høyest oppløsning (innerste domenet), men i det neste domenet med oppløsning på 2,5 km. Figur 11 viser vindroser for observasjoner fra Flesland (t.v.) og modellerte verdier for nærmeste gridpunkt (t.h.) for perioden 13. desember 2013 – 9. januar 2014. Figuren viser god overenstemmelse mellom de observerte og modellerte verdiene. Vinden fra sør er svakt overestimert i modellen.



Figur 11: Vind observert ved Flesland (t.v.) og vind fra WRF i gridpunkt ved Flesland (t.h.).

4 Islaster med returtid 150 år

Islaster med returtid 150 år er estimert basert på modelldata, gitt i Vedlegg 1. Tabell 3 sammenstiller islaster fra denne rapporten med opprinnelige islaster som ble gitt i rapport Meteorologisk institutt (2008). Estimerte islaster med returtid 150 år i kolonne 2 er basert på en modellanalyse av skyising, som er den fremherskende isingstypen i området. Kolonne 3 angir usikkerheten i ekstremverditilpassingen som ligger til grunn for estimering av 150 års returverdier.

Modellert is på en horisontal ledning i virkelig linjeretning indikerer noe lavere laster enn det som ble observert ved mast 168-170, modellert ca. 47 kg/m mot observert 50-70 kg/m. Dette er ikke korrigert for i tabellen nedenfor. Det er knyttet en viss usikkerhet til hvorvidt våtsnø kan ha bidratt islastene for vinteren 2013/2014 i kombinasjon med skyising. Dette kan forklare avviket man ser. Inntil det blir gjennomført ytterligere studier og valideringsarbeid bør en ta høyde for at reelle islaster med 150 års returperiode kan ligge opp mot 30 % høyere enn lastene i tabellen. Dette gjelder særlig de mest eksponerte seksjonene hvor de høyeste islastene er forventet.

Siden dataserien som ligger til grunn for beregningene har en lengde på 36 år gir ikke ekstremverdianalysen robuste estimater for islaster med 150 års returperiode direkte. Det er derfor benyttet en standard overgangsfaktor på 1.25 for konvertering fra islast med returtid 50 år til islast med returtid 150 år (NEK, 2009).

Tabell 3: Islaster (skyising) estimert med returtid 150 år. Konfidensintervallet indikerer usikkerheten i ekstremverditilpassingen.

Mastnummer	Islast (kg/m)	Konfidensintervall (kg/m)	Islast fra rapport av 2008 (kg/m)
145 - 148	15	(11 - 20)	15*
148 - 149	25	(18 - 32)	20*
149 - 152	30	(23 - 39)	20*
152 - 155	40	(30 - 52)	20
155 - 158	25	(18 - 32)	20
158 - 161	18	(14 - 24)	15
161 - 164	20	(15 - 26)	15
164 - 166	45	(34 - 59)	15
166 - 167	60	(45 - 78)	18
167 - 168	100	(75 - 130)	25
168 - 171	125	(94 - 163)	25
171 - 172	65	(49 - 85)	20
172 - 175	70	(53 - 91)	25

* Islaster gitt i Fikke (2006).

For den aktuelle delen av Sima – Samnanger er det til dels store avvik mellom islaster vurdert i rapporten Meteorologisk institutt (2008) og islaster her i denne rapporten. Forskjellen må sees i lys av datagrunnlaget og metodene som var tilgjengelig da de to rapportene ble utarbeidet. Selv om MET i

2008 vurderte området som svært isingsutsatt, var grunnlaget for å beregne islaster begrenset. Særlig har det vist seg at vertikalgradientene av islaster er meget store i området, noe det ikke var mulig å se utfra data som var tilgjengelig på denne tiden.

Rapporten av Meteorologisk institutt (2008) var basert på:

- Foreløpig vurderinger av islastene gitt i rapport Fikke (2006).
- Skjønnsmessige vurderinger av lokale skjermingseffekter basert på tidligere erfaringer i tilsvarende terreng
- Ismålinger ved Giljafjell (Bjølsegrøvvatnet) og Myklavatn utført av BKK for perioden 1996 – 2005
- Testsimulering av to enkelthendelser i forbindelse med utredning av Ålforbrealternativet på 420 kV Ørskog – Fardal. Modellverktøyet var på den tiden under utvikling og ble benyttet for første gang i denne sammenhengen

I perioden 2008 – 2013 har MET gjennom forskning/dr.grads. arbeidet til Bjørn Egil Nygaard (i samarbeid med Statnett) utviklet verktøy for mer nøyaktig modellering av ising på liner. De nye modellverktøyene som nå er tilgjengelig gir anledning til å analysere isingsforhold på en objektiv måte også i områder hvor det verken foreligger målinger eller tidligere erfaringer. Det er blitt klart for MET gjennom bruk av modelldata at vertikalgradienten i islaster er enorm i dette området, og mer dramatisk enn det som ble vurdert i 2008. Observasjonene som ble gjort i etterkant av ødeleggelsene på ledningen vinteren 2013/2014 har gitt anledning til å verifisere modellresultatene, og overensstemmelsen er relativt god. Ledningens høyeste, og mest utsatte punkt har en viss lokal skjerming mot ising fra S og dels SSV på grunn av delvis høyere terreng oppstrøms. Det viser nå seg at denne skjermingseffekten er betydelig svakere enn det som ble vurdert i tidligere rapporter.

Det er viktig å merke seg at de modellbaserte islastene presentert i denne rapporten gjelder for et sylindrerformet objekt, med andre ord en simplex ledning. Mens topplinene er simplex ledninger, er fasene duplex (flerledere). Ettersom disse er stivere og i mindre grad antas å rotere enn simplex, vil islastene på fasene med stor sannsynlighet være noe mindre. Forholdet mellom islaster på simplex og duplex lar seg på nåværende tidspunkt ikke kvantifisere, men det utføres for tiden forskningsarbeid på dette temaet. Ved havaristedet på denne traseen settes det opp lastmålinger for is på fasene og det monteres et testspenn med simplex ledning og lastmåling. Det utføres også tilsvarende arbeid med lastmålinger på simplex og duplex på Island.

5 Konklusjon

For å se total mengde nedbør over flere dager er det blitt summert opp nedbør fra ulike perioder. Returperiode for de forskjellige nedbørsummene og antall dager ble sett på. For høyeste nedbørhendelse sett i forhold til bare desember er returperioden ca. 20 – 30 år. I forhold til vinteren fant vi derimot ikke noe uvanlig. Slike hendelser er noe som skjer fra årlig til hvert fjerde år vinterstid.

Når det gjelder ising viser en statistisk analyse av ekstremverdiene, vedlegg 1, estimert returtid på ca. 3 år for islasten i 2013/2014 vinteren. Sammenlikner man kun desember måned for alle årene har 2013 den tredje høyeste islasten. Desember 2013 er i så måte noe uvanlig, men vinteren som helhet er altså ikke en ekstrem isingsvinter.

For temperatur gir modellen en god gjengivelse av observasjonene i den valgte perioden. Modellen gjengir det storskala værmønsteret godt, og viser ingen store systematiske avvik. For temperatur er det naturlig å forvente noen graders avvik i en prognose i forhold til observasjoner innenfor kortere tidsperioder, men så lenge det ikke er systematiske feil vil dette ha liten betydning for denne bruken av modellen, hvor vi skal kartlegge isingsforholdene over en lengre tidsperiode.

For vind er det også god overenstemmelse ved vind modellert ved Flesland sammenlignet med observasjoner herfra.

Det er svært sannsynlig at islastene i tidligere rapporter har vært underestimert i de mest utsatte partiene. Dette skyldes at beslutnings-/datagrunnlaget var tidligere for mangelfullt til å avdekke den store gradienten i islaster over 900-1000 moh. Islaster i denne rapporten er skyising. Det kan ikke utelukkes at våtsnø har bidratt til islastene vinteren 2013/2014. Dersom våtsnø bidrar i tillegg til skyising vil islastene kunne bli høyere enn de som er beregnet her i de mest utsatte områdene, men for å si noe nærmere om dette kreves det videre studier.

Ettersom modellberegningene gjelder for simplex ledninger er det sannsynlig at fasene, som er duplex, har hatt noe lavere islaster. Forholdet mellom islaster på duplex og simplex er for tiden gjenstand for forskning både i Norge og på Island, og når resultatet av dette forskningsarbeidet foreligger vil det være mulig å modellere ising på duplex mer nøyaktig.

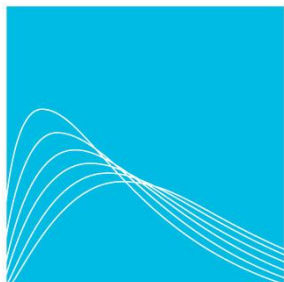
Referanser

Fikke, S.M. (2006) *420 kV ledning Sima – Samnanger. Is- og vindlaster for strekningen Sima – Ålvik* Klimalastrapport bestilt av Statnett

NEK (Norsk Elektroteknisk Komite) (2009) *Luftledninger over 1 kV* NEK445:2009 er en norskspråklig samleutgave av europainormene NEK EN 50341 og NEK EN 50423 samt norske tilpasninger.

Meteorologisk institutt. (2008) *420 kV Sima-Samnanger Lastrapport for strekningen Ålvik – Samnanger* Klimadivisjonen DNMI (Klimalastrapport bestilt av Statnett)

**Vedlegg 1: Kjeller Vindteknikk (KVT) rapport: «420
kV Sima – Samnanger, Kvam kommune, Hordaland»
KVT/BEN/2014/R028**



KJELLER
VINDTEKNIKK

420 kV Sima - Samnanger, Kvam kommune, Hordaland

Analyse av islaster i forbindelse med brudd på
toppline og havareerte toppspir

Rapport: KVT/BEN/2014/R028



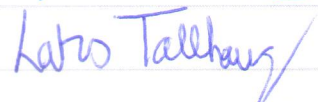


Foto Ole Gustav Berg

Rapportnummer KVT/BEN/2014/R028	Dato 25.8.2014
Rapporttittel 420 kV Sima - Samnanger, Kvam kommune, Hordaland Analyse av islaster i forbindelse med brudd på toppline og havarerte toppspir	Klassifisering Begrenset til kunde Utgave nummer 2
Kunde Meteorologisk Institutt	Antall sider 18 + Vedlegg
Kundens referanse Per-Ove Kjensli	Status Endelig
Sammendrag På bakgrunn av ødeleggelse på 420 kV kraftledningen Sima - Samnanger i perioden desember 2013 - januar 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 betydelige islaster på omkring 60 kg/m ved havaristedet. De høyestliggende spennene er mest utsatt, og islastene avtar raskt med høyde over havet. Islastene simulert ved mast 167 - 170 stemmer godt overens med de observasjonene som ble gjort under befaringene. 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 ikke er av ekstraordinær art, og at det i løpet av modellperioden på 35 år er flere år hvor det forventes langt større islaster. Skyisingen fra vinteren 2013/2014 er estimert til en returtid på 3 - 5 år. Følsomhetsanalyser viser stor usikkerhet i absoluttverdien av islasten, men estimert returtid på 3 - 5 år for denne hendelsen har lavere usikkerhet. Betydningen av mulig bidrag fra våtsnø bør studeres videre. Validering av modellen mot nye observasjoner i området er viktig.	
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
0	21.3.2014	Kun elektronisk		Pdf
1	4.4.2014	Kun elektronisk	Oppdatert med estimerte 150-års laster	Pdf
2	25.8.2014	Kun Elektronisk	Kontrollberegning med data fra ECMWF	Pdf

	Navn	Dato	Signatur
Utført av	Bjørn Egil Nygaard	25/8-2014	
Kontrollert av	Johannes Lindvall	25/8-2014	
Godkjent av	Lars Tallhaug	25/8-2014	

Innholdsfortegnelse

INNHALDSFORTEGNELSE	2
1 INNLEDNING	3
1.1 BEFARINGER	4
2 METODE OG DATA	5
2.1 DATA	5
2.2 ISINGSBEREGNING	5
2.2.1 Skyising	5
2.3 EKSTREMVERDIANALYSE	5
3 FINSKALA SIMULERING	7
4 SANNSYNLIGHET FOR GJENTAKELSE	11
4.1 ESTIMERING AV RETURPERIODER	14
5 REFERANSER.....	18
VEDLEGG A: WRF-MODELLEN	19
VEDLEGG B: ISLASTBEREGNINGER	22

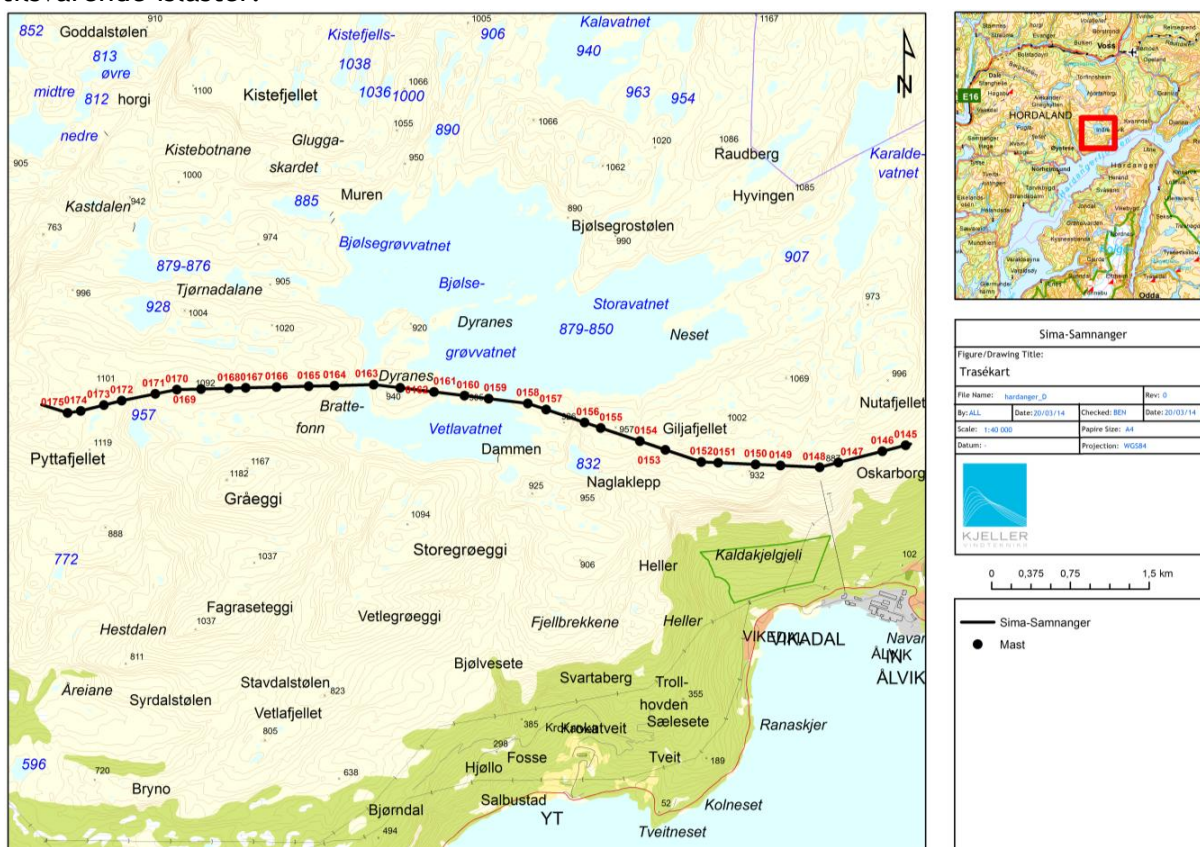
1 Innledning

Det vises til henvendelse fra Statnett SF v/Geir Bruun om analyse av isingsforhold i forbindelse med brudd på toppline og havarerte toppspir på 420 kV Sima - Samnanger. I løpet av siste uka i desember 2013 og første uka i januar 2014 var det driftsforstyrrelser og ødeleggelser på ledningen i spennene 167-169, som følge av store islaster¹ i fjellpartiet ved Bjølsegrøvvatnet, nord for Ålvik i Kvam kommune (Figur 1).

Statnett har bedt om et en analyse av isingsforholdene for dette området.

For den aktuelle tidsperioden foreligger det verken kontinuerlige isingsmålinger eller meteorologiske målinger i dette fjellområdet. 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.



Figur 1: Trasekart 420 kV Sima - Samnanger, utsnitt over den berørte delstrekningen.

¹ Definert som massen is per meter ledning.

1.1 Befaringer

Figur 2 viser et bilde fra befaring den 9. januar 2014. Nøyaktig islast er vanskelig å fastslå, men det ble tatt isprøver og mål i forbindelse med befaringen, og mengden ble da estimert til 68 kg/m ved mast 169. Bjørn Egil Nygaard (Kjeller vindteknikk) deltok senere på befaring den 22. januar. Ved dette tidspunktet ble det tatt mål av isdimensjonene som indikerte 50-60 kg/m ved mast 168. Det er en del usikkerhet knyttet til om isen har forandret seg i vekt og tetthet i perioden mellom havariet og befaringene. I tillegg er det vanskelig å måle en isdimensjon som er representativ for et helt spenn. Tatt disse usikkerhetene i betraktning er det allikevel sannsynlig at islasten har vært over 50 kg/m som snitt per spenn ved mastene 167 - 170, kanskje opp mot 70 kg/m. Disse tallene gjelder på toppliner. På fasene var det mindre is. Isavsetningen på fasene hadde en mer avlang form (som en fane mot isførende vindretning) og mengden var tydelig begrenset av at fasene ikke roterer like lett som topplinene.

Isingstypen er i all hovedsak skyising, som er typisk for kystnære og eksponerte fjellpartier. Det kan i korte perioder ha forekommet nedbøris i form av våt snø, men dette bidraget er trolig neglisjerbart sammenliknet med skyisen. Prøvene som ble tatt under befaringene viste is med høy tetthet. Store deler av isen hadde tetthet opp mot 900 kg/m³ hvilket tilsvarer stålis, mens deler av isen hadde noe lavere tetthet. Som helhet for hele issylindringen lå tettheten omkring 700-800 kg/m³. Is med så høy tetthet er et tegn på svært høy isingsintensitet.



Figur 2: Ising på røket toppline (OPGW) datert 09.01.2014. Foto: Ole Gustav Berg

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.

For langtidsstatistikk benyttes modelldata fordelt i et horisontalt gitter med oppløsning på 6 km x 6 km, som strekker seg over perioden 1979 - 2014. De fire modellpunktene som ligger nærmest havaristedet er hentet ut, og spenner over høyder fra 664 - 1088 moh. Dataene har en tidsoppløsning på 1 time og inneholder alle nødvendige parametere for å analysere klimalaster. Vind, temperatur, luftfuktighet, konsentrasjonen av underkjølt skyvann og underkjølt yr fra nederste modellflate (ca 20 meters høyde) er videre brukt som inngangsdata til en akkumulasjonsmodell for skyising (Vedlegg B). Modellen drives av inputdata fra globale væranalyser som hentes fra det Europeiske værcenteret (ECMWF). Disse dataene tilgjengeliggjøres med en forsinkelse på ca 3 måneder og dekket derfor ikke den aktuelle isingsperioden da analysene ble gjennomført. Inputdata for vinteren 2013 og 2014 er i stedet hentet fra den amerikanske modellen (NCEP - FNL). Kontrollberegninger med input data fra ECMWF utført i august 2014, viser kun marginale forskjeller i modellerte islaster.

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.

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. Ved vind på tvers av en ledning vil disse dråpene kolliderer med lina, fryse spontant, og akkumuleres som et hvitt isbelegg. Skyising forekommer i all hovedsak i eksponert fjellterreng, og mengden øker ofte raskt med 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 B.

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 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 praktisk utfordring ved bruk av POT metoden 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. WRF dataene har derfor blitt gruppert med kriteriet om at det skal være minst 4 dager mellom hver hendelse. 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 satt som utgangspunkt. I enkelte tilpasninger er terskelen justert noe manuelt for å optimalisere den teoretiske kurven.

For enkelte elementer kan det være vanskelig å identifisere enkelthendelser, og det er i stedet naturlig å benytte årlig maksimalverdier som basis for ekstremverdianalysen. F.eks for skyising som i høyfjellet pågår over lang tid kan være enklere å forholde seg til årlig maksima i stedet for å dele inn i enkeltepisoder. Med årlige maksimalverdier som basis benyttes en tilpassningsfordeling som heter GEV (Generalized Extreme Value distribution). GEV inneholder en formparameter som tilpasses etter formen på fordelingen av dataene som brukes. Eksempelvis er den klassiske Gumbel-fordelingen et spesialtilfelle av GEV, i tilfeller hvor formparameteren er lik 0.

3 Finskala simulering

Skyising opptrer først og fremst i eksponert fjellterreng og varierer betydelig i terrenget avhengig av lokale strømningsforhold og skjermingseffekter. For å danne et realistisk bilde av fordelingen av 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 A.

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 på 500 m x 500m oppløsning 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):

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

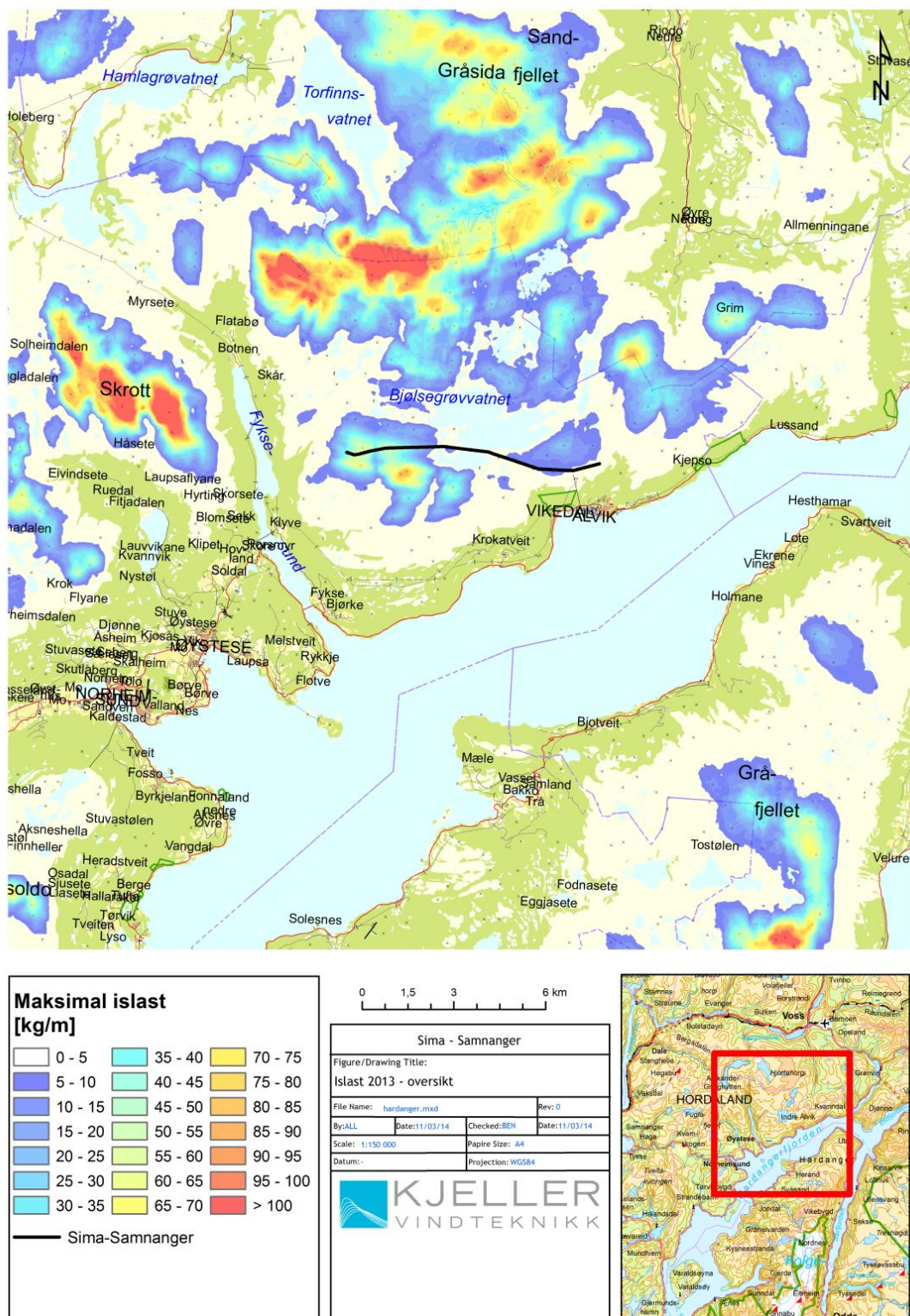
Her er M_{30} islasten for et punkt i 30 m dataene, M_{WRF} er islasten fra nærmeste punkt i WRF dataene, dM_{WRF}/dz_{WRF} er høydegradienten innenfor et område med radius på r gridpunkter, mens $Z_{30} - Z_{WRF}$ representerer forskjellen i terrenghøyde mellom WRF og 30 m terrengdata.

Kartet i Figur 3 viser simulerte maksimale islaster for perioden med havariet for området som dekkes av modellen i 500 m oppløsning. Resultatene viser ising hovedsakelig over 800-900 moh., og islaster som øker dramatisk med høyden over dette. Et utsnitt for den aktuelle delstrekningen er vist i Figur 4. Dette kartet viser tydelig at området sørvest for Bjørsegrøvatnet er svært utsatt, med islaster opp 60-70 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.

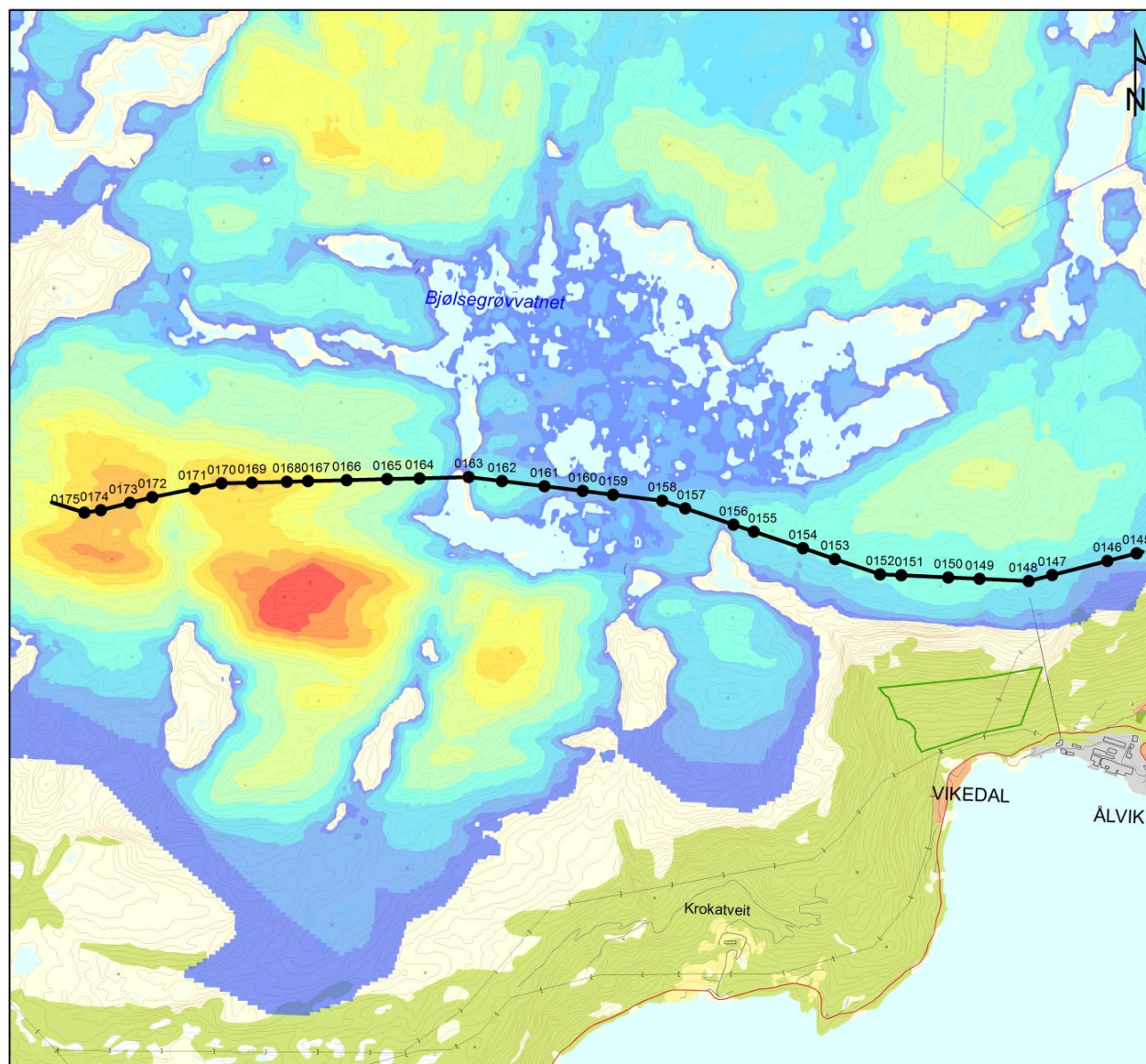
Figur 5 viser tidsserier av meteorologiske variabler samt modellert ising for et punkt ved mast 170. De tre øverste panelene viser de viktigste meteorologiske variablene som inngår i isingsmodellen. Skyenes vanninnhold samt konsentrasjonen av yr (drizzle), er vist i det øverste panelet. Skyising forkommer når skyvann og/eller yr er til stede, og lufttemperaturen er under 0°C (underkjølte dråper). Isingsintensiteten er spesielt høy i tilfeller med betydelig mengde underkjølt yr, som for eksempel 26. desember. Panel 2 fra toppen viser at isingen i hovedsak forekommer ved vind fra sørvestlig kant (225 grader) og med høye vindhastigheter, tidvis opp mot 30 m/s.

Islasten i Figur 5 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 maritime områder (som langs Vestlandskysten) 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

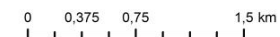
simulert ising, både mengde og tetthet. I kartene (Figur 2 og 3) og i den videre analysen er beregningene gjort med utgangspunkt i 100 dråper per cm^3 .



Figur 3: Simulert maksimal akkumulert islast (kg/m) på et standardlegeme for perioden 13.12.2013 - 09.01.2014. Ledningstraseen er markert med sort strek.

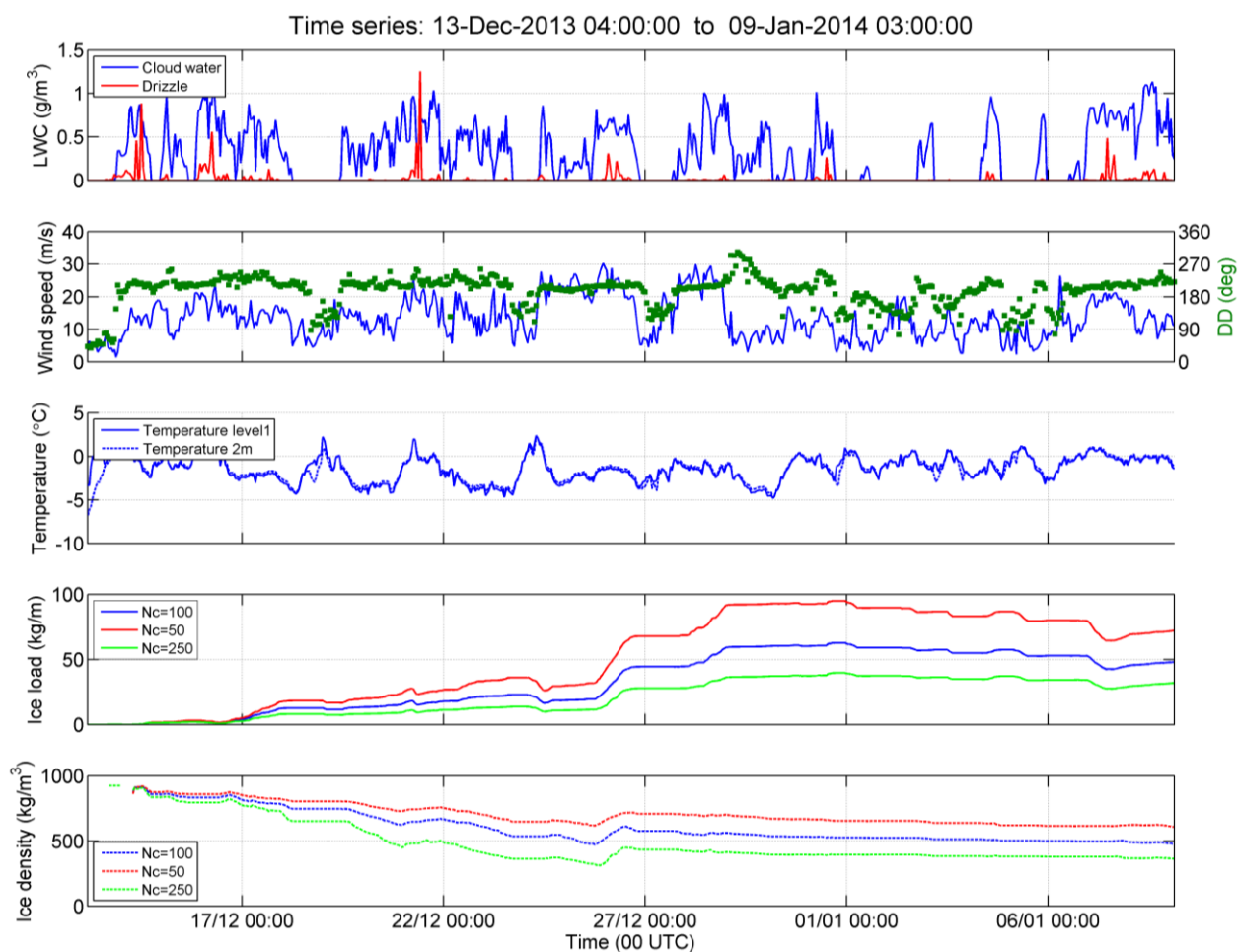


Sima-Sammanger			
Figure/Drawing Title: Islast 2013 - detalj			
File Name: hardanger_D		Rev: 0	
By: ALL	Date: 11/03/14	Checked: BEN	Date: 11/03/14
Scale: 1:40 000		Papire Size: A4	
Datum: -		Projection: WGS84	
 KJELLER VINDTEKNIKK			



Maksimal islast [kg/m]	
0 - 0,5	20,0 - 30,0
0,5 - 1,0	30,0 - 40,0
1,0 - 2,0	40,0 - 50,0
2,0 - 5,0	50,0 - 60,0
5,0 - 10,0	60,0 - 70,0
10,0 - 20,0	> 70,0
— Sima-Sammanger	
● Mast	

Figur 4: Simulert maksimal akkumulert islast (kg/m) på et standardlegeme for perioden 13.12.2013 - 09.01.2014.



Figur 5: Tidsserier av meteorologiske variabler samt modellert islast og tetthet, for gridpunktet nærmest mast 170 i ca 20 m høyde over bakken. Øverst: luftens vanninnhold i form av skydråper og yrdråper. Nest øverst: Vindstyrke 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.

4 Sannsynlighet for gjentakelse

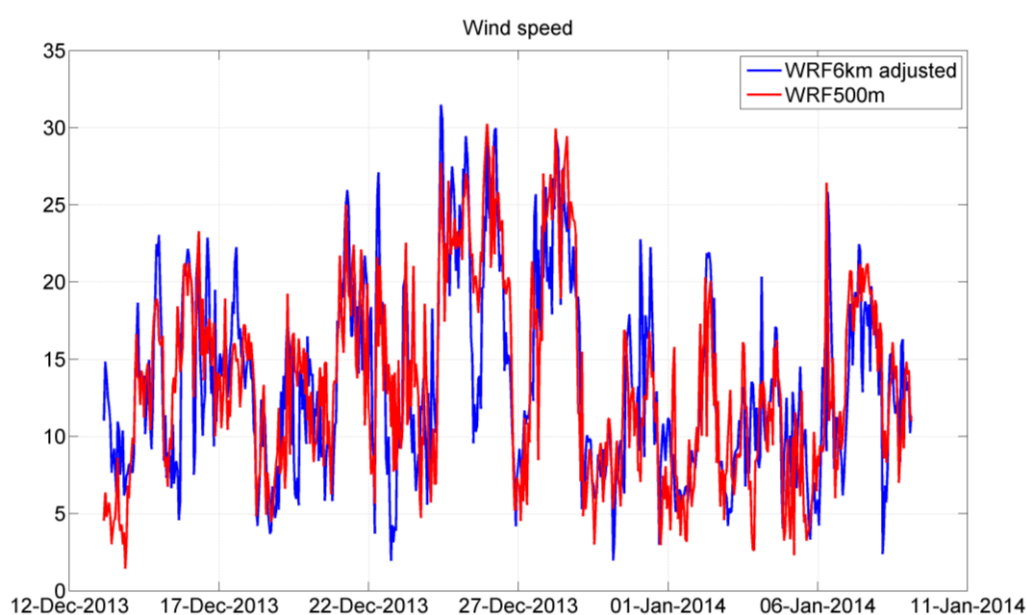
Før en sammenlikner isingsforholdene i desember 2013 med perioden 1979 - 2014 er det viktig å kontrollere at isingen i desember gjengis realistisk i 6 km modellen. Vi sammenlikner derfor meteorologiske data og modellert ising fra WRF 6 km og WRF 500 m, for området ved mast 170.

Nærmeste gridpunkt i WRF 6 km har en terrenghøyde på 821 moh. Dette er et betydelig avvik fra virkelig terrenghøyde på 1090 m. Før dataene brukes må de derfor høydejusteres til riktig nivå. Høydejusteringen påvirker i første rekke temperatur og mengden skyvann (Vedlegg A). Etter høydejusteringen samsvarer temperaturen og skyvannmengden godt mellom WRF 6 km og WRF 500 m for den overlappende perioden (Tabell 1).

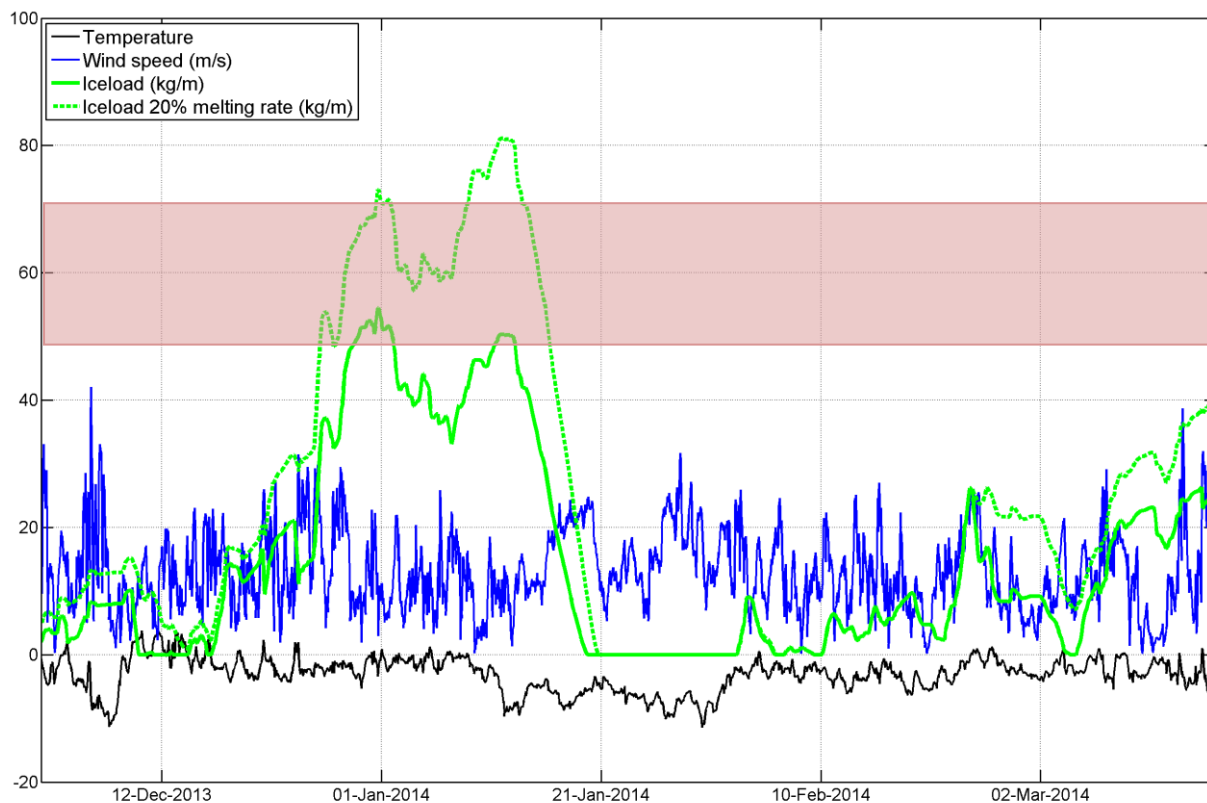
Det er en betydelig og systematisk forskjell i vinden mellom WRF 6 km og WRF 500. Årsaken er en vindforsterking lokalt over fjellryggen som ikke løses opp i 6 km modellen. Denne vindforsterkningen er høyst realistisk, og er tydelig i WRF 500 m simuleringen. Vindforsterkningen er i snitt 68 % for simuleringsperioden. Ved å skalere vinden i WRF 6 km med faktoren på 1.68, samsvarer vinden godt med WRF 500 m som vist i Tabell 1 og Figur 6.

Tabell 1: Sammenstilling av ulike modelldata ved mast 170 for perioden 13.12.2013 - 09.01.2014.

Gjennomsnittsverdier for perioden			
	Temperatur (°C)	Skyvann (g/m ³)	Vind (m/s)
WRF 500 m	-1.38	0.31	13.3
WRF 6km - justert	-1.42	0.33	13.4
WRF 6km - ukorrigert	0.17	0.09	8.0



Figur 6: Sammenstilling av vind fra WRF 500 m og korrigert WRF 6 km ved mast 170.



Figur 7: Modellert ising, vind og temperatur for perioden 02.12.2013 - 18.3.2014 basert på høydejusterte WRF 6 km data, ved mast 170. Stiplet grønn linje viser modellert ising med en modell hvor intensiteten på smeltingen er redusert til 20 % av opprinnelig verdi. Rød bakgrunnsfarge viser nivået for de observerte islastene (50 - 70 kg/m).

Etter at 6 km dataene er høydejustert og vindkorrigert gjengis isingsperioden godt, som vist i Figur 7. Modellen indikerer at isingen er mest intens i siste halvdel av desember 2013 og at akkumulert islast når sitt maksimum tidlig i januar. Siste halvdel av januar og første halvdel av februar var preget av østlige vinder, relativt tørr luft og lite skyer på Vestlandet. I denne perioden indikerer modellen at isen vil sublimeres (fordampe), før det igjen begynner å akkumuleres is periodevis i siste halvdel av februar og utover i mars.

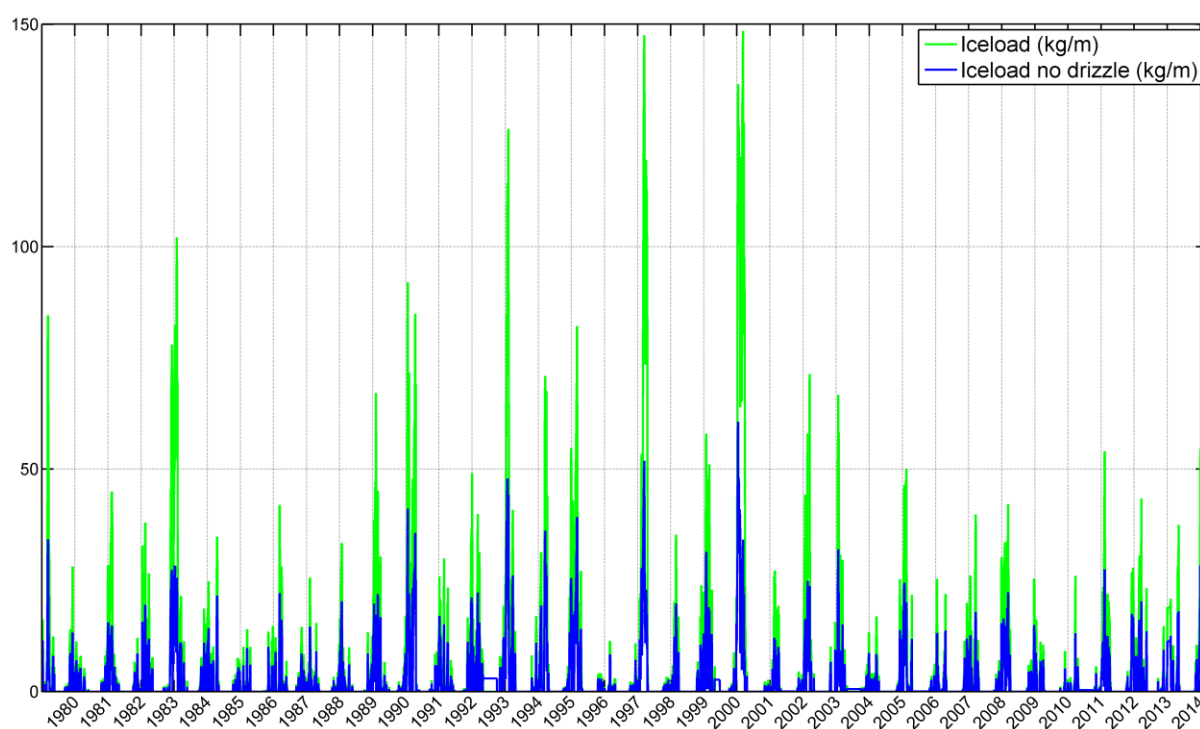
Figur 7. viser også at det i løpet av isingsperioden i desember var simulert kortere perioder med temperatur over 0°C. I modellen fører det til korte perioder med smelting i stedet for akkumulasjon. I slike tilfeller blir den totale islasten svært følsom for små unøyaktigheter i modellert temperatur. En sammenstilling med målinger fra nærmeste værstasjoner viser at modellen er 0.5 - 1 grader for varm i disse korte periodene ved værstasjonspunktene. Vi må ta høyde for at det samme kan være tilfelle ved mast 170. Det er derfor lagt på en grønn stiplet kurve på Figur 7 som viser modellert islast i en modell hvor smeltingen i disse periodene er redusert til 20 % av opprinnelig verdi. Utslaget på maksimal islast blir om lag 20 kg/m, eller ca 40 % økning. Forskjellen mellom kurvene viser at det er betydelig usikkerhet i den absolutte islasten som simuleres. Tross usikkerhetene viser resultatene at den justerte 6 km modellen er i stand til å beskrive isingshendelsen som førte til havariet på en tilfredsstillende måte.

Den høydejusterte og vindkorrigerede 6 km modellen er videre brukt for å simulere ising for hele perioden 1979 - 2014. Figur 8 viser at det er en betydelig variasjon fra år til år.

Figuren viser også at det er flere vintre hvor modellen gir langt større islaster enn vinteren 2013/2014. Selv om 2013/2014 har den høyeste islasten de siste 10 årene er det en periode på 90-tallet og begynnelsen av 2000-tallet hvor modellen gir betydelig høyere verdier. De absolutte islastene i denne analysen må tolkes med stor forsiktighet, fordi ismodellens usikkerhet øker med økt islast, særlig når islastene overstiger noen titalls kg/m, og isingen vedvarer over lang tid og inneholder flere smeltings og akkumulasjonsperioder. Eksempelvis var vinteren 1999/2000 var preget av isingsforhold i svært lange perioder, og temperaturen var aldri tilstrekkelig høy til at all isen forsvant. Modellen indikerer her betydelige men varierende islaster gjennom hele vinteren.

Det viktigste resultatet fra Figur 8 er den relative forskjellen mellom vinteren 2013/2014 og hele modellperioden. En statistisk analyse av ekstremverdiene, som beskrevet i Kap. 2.3, estimerer en returtid på ca 3 år for islasten i 2013/2014 vinteren. Sammenlikner man kun desember måned for alle årene har 2013 den tredje høyeste islasten. Desember 2013 er i så måte noe uvanlig, men vinteren som helhet er altså ikke en ekstrem isingsvinter.

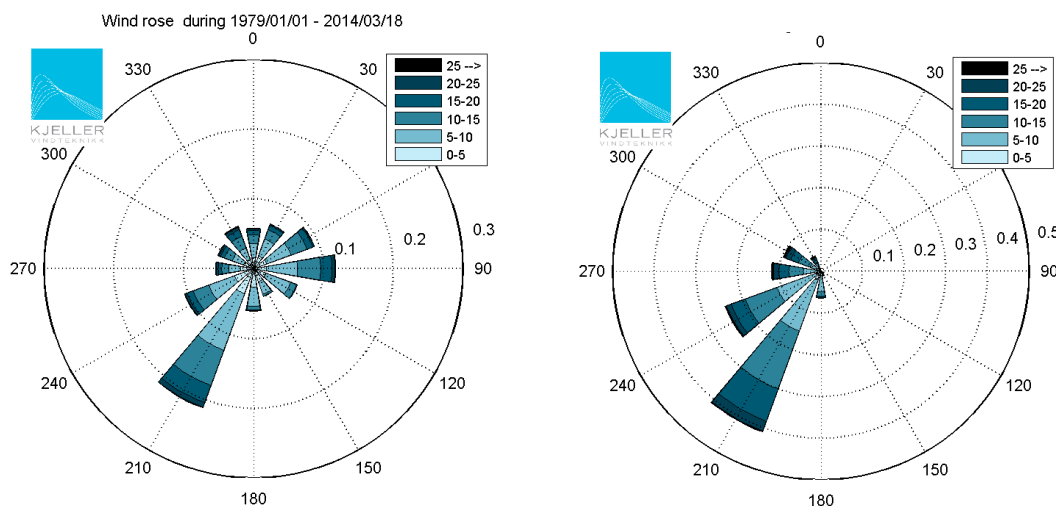
Det er gjort en rekke følsomhetsstudier for å undersøke i hvilken grad noen av antakelsene eller enkeltparameterne i isingsmodellen har innvirkning på denne konklusjonen. Figur 8 viser eksempelvis en modellversjon (blå strek) som ikke tar hensyn til underkjølt yr fra modellen. Vi ser at dette har stor innvirkning på islastene, men den relative forskjellen mellom de ulike årene forandrer seg lite, og islasten for vinteren 2013/2014 estimeres også nå til en returtid på ca 3 år.



Figur 8: Modellert islast på standardlegeme ved mast 170, basert på WRF 6 km høydejustert og vindkorrigert.

De modellerte islastene gjelder for et referanseobjekt, som er vertikalt orientert og dermed uavhengig av retningen på vinden. De faktiske islastene på en ledning er avhengig av ledningens orientering i forhold til isførende vindretning. Figur 9 viser vindstatistikk for

hele modellperioden på 35 år. Vindrosen for tidspunkter med ising viser en tydelig isførende vindretning omkring sørvest. Slik ledningen ligger ved havaristedet har den altså en stor normalkomponent mot fremherskende isingsretning.



Figur 9: Vindrose for hele perioden (venstre). Vindrose for alle tidspunkt med isingsintensitet (skyising) på mer enn 20 g/m per time. Fargekoden på vindrosene indikerer vindhastighet (m/s).

4.1 Estimering av returperioder

For å estimere returperioder for islaster for ledningstraseen er ledningens retning tatt inn i isakkumulasjonsmodellen, slik at det i praksis blir fluksen av skydråper normalt på ledningen som bidrar til ising. Mengden skyis på en horisontal ledning vil dermed være mindre eller lik mengden skyis på et standardlegeme. En ledning orientert parallelt med isførende vindretning vil fange ubetydelig med is, mens en ledning 90 grader på isførende vindretning vil samle maksimal mengde, lik et standardlegeme.

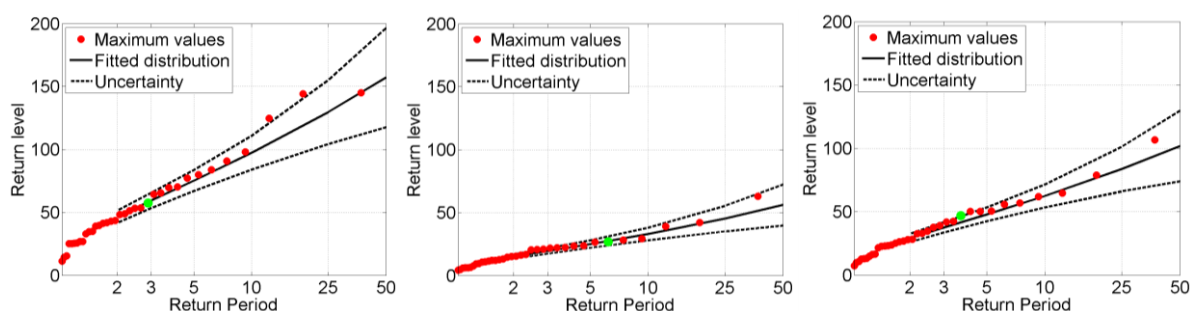
For å bestemme returperioder for islaster er WRF 6 km dataene benyttet, etter kalibrering mot WRF 500 m, som beskrevet i forrige kapittel. Siden forholdet mellom WRF 6 km og WRF 500 m varierer langs traseen er kalibreringen ved tre ulike punkter, M170, M163 og M153 (figur 1). Ved disse punktene er vinden i WRF 6 km korrigert med faktorer på henholdsvis 1.63, 1.18 og 1.58 for å overensstemme med vinden i WRF 500 m. I tillegg er temperatur, fuktighet og skyvariabler høydejustert til riktig terrenghøyde ved disse tre punktene, henholdsvis 1090 moh., 905 moh. og 960 moh.

Islaster beregner for hver av de tre områdene for en horisontal ledning med retning som den faktiske linja, og for et standardlegeme. For hvert av de tre punktene er det gjort beregninger for to ulike retninger som er relevante for den faktiske linja i det aktuelle området. Årlig maksimal islast for de tre områdene med tilpassede ekstremverdifordelinger er vist i figur 10-12.

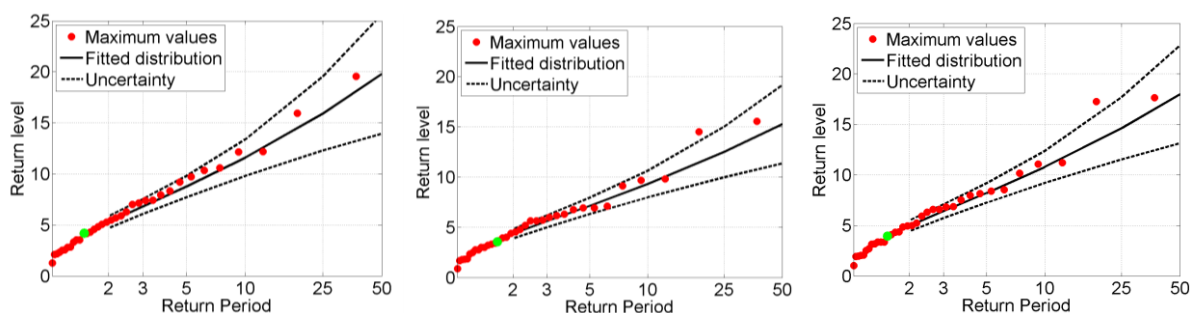
Figur 10 viser modellerte islaster for ledningens høyeste punkt, omtrent hvor observasjonene ble foretatt. Figurene i midten og til høyre viser at simulerte islaster varierer betydelig når man endrer ledningens retning. Figuren i midten er beregnet for retningen til ledningen på plussiden av M170, mens figuren til høyre viser islaster beregnet med ledningsretningen på minussiden av M170. Resultatene indikerer en betydelig forskjell i islastene på hver side av vinkelmast M170. Dette er konsistent med de observasjonene som ble gjort under befaringene. Det ble observert betydelige mengder is på M170 - M175, men langt mindre enn ved M167 - M170.

Figur 10 (høyre) viser samtidig at når islastene beregnes for en horisontal ledning orientert i samme retning som ledningen, blir simulert islast ved havaristedet ca 47 kg/m for vinteren 2013/2014. Dette er noe lavere enn de observerte lastene. Det er mange kilder til usikkerhet som kan forårsake dette avviket. Et moment som bør studeres mer i detalj er hvorvidt våtsnø kan ha bidratt til isvekst i tillegg til skyising. De store nedbørmengdene i desember 2013 kan ha bidratt til isakkumulasjon fra våtsnø, som følgelig ikke er tatt hensyn til i denne analysen. Det blir derfor særdeles viktig å verifisere modellen mot nye observasjoner eller målinger av ising i dette området.

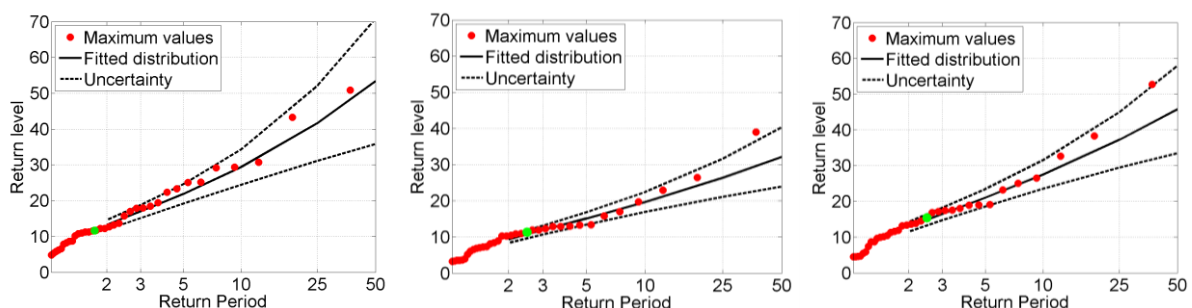
Figur 11 viser at modellerte islaster i område ved Bjøsegrøvvatnet betydelig lavere. En ledning med retning på 112.5 grader (høyre) får mer is enn en ledning med retning 100 grader (midten). Dette skyldes at førstnevnte har større normalkomponent mot isførende vindretning fra SV.



Figur 10: Modellerte årlige ekstremverdier av islast fra skyising (kg/m, indikert med røde sirkler) ved mast M170. Svart linje er den tilpassede ekstremverdifordelingen og stiplede svarte linjer indikerer konfidensintervall med bredde på to standard avvik. Venstre: Beregnet for et standardlegeme. Midten: beregnet for en horisontal ledning med retning på 67.5 grader (mot VSV). Høyre: Beregnet for en horisontal ledning med retning på 90.0 grader (mot V). Verdien for vinteren 2013/2014 er markert med grønn sirkel.



Figur 11: Samme som figur 10, men nå ved M163 (905 moh.). Venstre: Beregnet for et standardlegeme. Midten: beregnet for en horisontal ledning med retning på 100 grader. Høyre: Beregnet for en horisontal ledning med retning på 112.5 grader.



Figur 12: Samme som figur 10, men nå ved M153 (960 moh.). Venstre: Beregnet for et standardlegeme. Midten: beregnet for en horisontal ledning med retning på 90 grader. Høyre: Beregnet for en horisontal ledning med retning på 112.5 grader.

Estimerte islaster med 150 års returperiode er gitt i Tabell 2. Disse verdiene er estimater basert på modellert skyising for punktene beskrevet ovenfor. Siden dataserien har en lengde på 36 år gir ikke ekstremverdianalysen robuste estimater for islaster med 150 års returperiode direkte. Det er derfor benyttet en standard overgangsfaktor på 1.25 for konvertering fra islast med returtid 50 år til islast med returtid 150 år (NEK445:2009). Modellresultatene er tilgjengelig for tre områder langs traseen. Mellom disse er det gjort en interpolasjon hvor det er tatt hensyn til islastenes variasjon med terreng høyden.

Modellert is på en horisontal ledning i virkelig linjeretning indikerer noe lavere laster enn det som ble observert ved mast 168-170. Dette er ikke korrigert for i tabellen nedenfor. Inntil det blir gjennomført ytterligere studier og valideringsarbeid bør en ta høyde for at reelle islaster med 150 års returperiode kan ligge opp mot øvre grense i konfidensintervallet. Dette gjelder særlig i seksjonene med høyest laster.

Tabell 2: Islaster (skyising) estimert med returtid 150 år. Konfidensintervallet indikerer usikkerheten i ekstremverditilpassingen.

Mastnummer	Islast (kg/m)	Konfidensintervall (kg/m)
145 - 148	15	(11 - 20)
148 - 149	25	(18 - 32)
149 - 152	30	(23 - 39)
152 - 155	40	(30 - 52)
155 - 158	25	(18 - 32)
158 - 161	18	(14 - 24)
161 - 164	20	(15 - 26)
164 - 166	45	(34 - 59)
166 - 167	60	(45 - 78)
167 - 168	100	(75 - 130)
168 - 171	125	(94 - 163)
171 - 172	65	(49 - 85)
172 - 175	70	(53 - 91)

5 Referanser

ISO12494 (Atmospheric icing of structures)

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

Miles, N. L., Verlinde, J., Clothiaux, E. E. (2000). Cloud droplet size distributions in low-level stratiform clouds. *Journal of the atmospheric sciences*, 57(2), 295-311.

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

Nygaard, Bjørn Egil Kringlebotn, Hálfðán 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.

Nygaard, Bjørn Egil Kringlebotn, "Modelling atmospheric icing of structures using high resolution numerical weather prediction models" PhD thesis, University of Oslo, 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 <http://www.wrfmodel.org/>. The model version used in this work is v3.2.1 described in Skamarock et al. (2008)². Details about the modelling structure, numerical routines and physical packages available can be found in for example Klemp et al. (2000)³ and Michalakes et al. (2001)⁴. 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 on 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 project⁵. For Norway, the model input uses the N50 land use data provided by the Norwegian Mapping Authority⁶.

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 Prediction (NCEP). The data originates from the Final Global Data Assimilation System (FNL)⁷ and is available as global data with 1 degree resolution every 6 hours. FNL is an operational assimilation model that incorporates all available observation

² 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

³ 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/>)

⁴ 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.

⁵ <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>

⁶ http://www.kartverket.no/eng/Norwegian_Mapping_Authority/

⁷ <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^{8,9} 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 A-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 the 6 km simulation, however due to a 3 months delay in the availability of the ERA Interim data the entire year of 2013 is replaced with input from the NCEP-FNL dataset. The latter dataset was also used as input for the 500 m simulation.

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.

⁸ 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

⁹ <http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/era-interim>

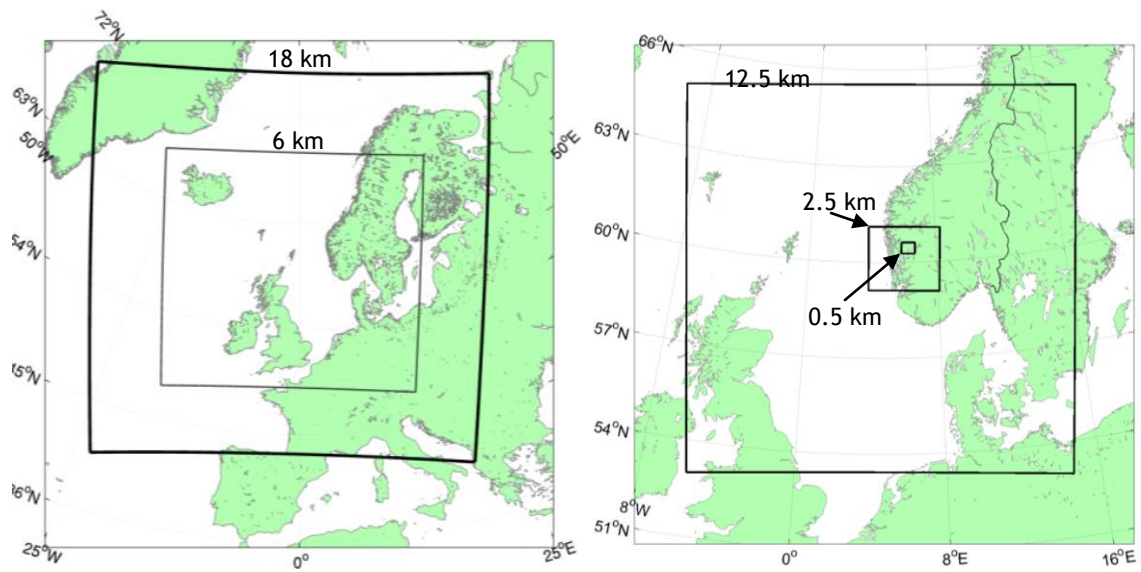


Figure A-1: Model set up for WRF simulations. Left: Coarse grid for the 35-year simulation (6 km and 18 km), right: High resolution grid used for the case study (nested down to 0.5 km).

Vedlegg B: Islastberegninger

Ice load calculations

According to the standard ISO 12494 (ISO/TC98/SC3/WG6 2000)¹⁰ icing has been calculated from

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

Here dM/dt is the icing rate on a standard cylindrical icing collector (defined by ISO 12494 as a cylinder of 1 m length and 30 mm diameter), w is the liquid water content, and A is the collision area of the exposed object. V is the wind speed and a_1 , a_2 and a_3 are the collision efficiency, sticking efficiency and accretion efficiency, respectively.

Accumulated over time (B-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 scheme¹¹. This is the scheme that gives the most accurate calculations of liquid water content¹² and is thus recommended for icing calculations. Uncertainties are also related to the vertical distribution of the moist air and choice of parameterization scheme for the boundary layer mixing processes.

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

¹⁰ ISO 12494 2000: Atmospheric Icing of structures, International Standard, ISO/TC98/SC3/WG6.

¹¹ Thompson G., P.R. Field, W.D. Hall and R Rasmussen, 2006: A new bulk Microphysical Parameterization Scheme for WRF (and MM5)

¹² 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.

Removal of ice

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

$$Q = Q_h + Q_e + Q_n, \quad (\text{B-2})$$

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)¹³.

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. 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.

¹³ Harstveit K, Byrkjedal Ø. and E. Berge 2009: Validation of Regional In-Cloud Icing Maps in Norway, IWAIS, Andermatt 2009.