



Norwegian  
Meteorological  
Institute

**MET** report

no. 9/2015  
ISSN 2387-4201  
Climate

# 300 kV kraftledning Songa – Vemorktoppen ved Bitdalsvatn Vurdering av sannsynlige is- og vindlaster i forbindelse med utfall og oppdaterte klimalaster

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



*Fra befaring av traseen 12. mars 2015. Mast 40 – 41 over Hillejuv, Bitdalsvann og Gaustatoppen i bakgrunn.  
Foto: Helga Therese Tilley Tajet*





Norwegian  
Meteorological  
Institute

# MET report

<b>Title:</b> 300 kV kraftledning Songa – Vemorktoppen ved Bitdalsvatn Vurdering av sannsynlige is- og vindlaster i forbindelse med utfall og oppdaterte klimalaster	<b>Date</b> 2015-03-16
<b>Section:</b> Klimatjenesteavdelingen	<b>Report no.</b> no. 9/2015 ISSN 2387-4201
<b>Author(s):</b> Helga Therese Tilley Tajet Harold Mc Innes Bjørn Egil K. Nygaard (Kjeller Vindteknikk)	<b>Classification</b> <input checked="" type="radio"/> Free <input type="radio"/> Restricted
<b>Client(s):</b> Statnett	<b>Client's reference</b> [Client's reference]
<b>Abstract</b>  I forbindelse med utfall på 300 kV kraftledning Songa – Vemorktoppen har Statnett bedt Meteorologisk institutt om å vurdere klimalaster ved havaritidspunktet 15. november 2014. I tillegg ønskes dimensjonerende klimalaster for mastene 34 – 41. Kjeller Vindteknikk (KVT) har utarbeidet modellanalyser for den aktuelle episoden, gitt i vedlegg 1. Befaring av området ble gjort 12. mars 2015.	
<b>Keywords</b> 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](http://www.met.no)



# Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Meteorologiske forhold</b>	<b>11</b>
2.1	Generelt om meteorologiske forhold i området	11
2.2	Meteorologiske forhold i tiden rundt havariet	13
<b>3</b>	<b>Is- og vindlaster</b>	<b>16</b>
3.1	Befaring	17
3.2	Is- og vindlaster ved utfallet	18
3.3	Dimensjonerende is- og vindlaster	19
<b>4</b>	<b>Oppsummering</b>	<b>20</b>
	<b>Referanser</b>	<b>21</b>
	<b>Vedlegg 1: Kjeller Vindteknikk rapport «Songa – Vemorktoppen, Telemark Analyse av islaster etter mastehavari»</b>	<b>22</b>



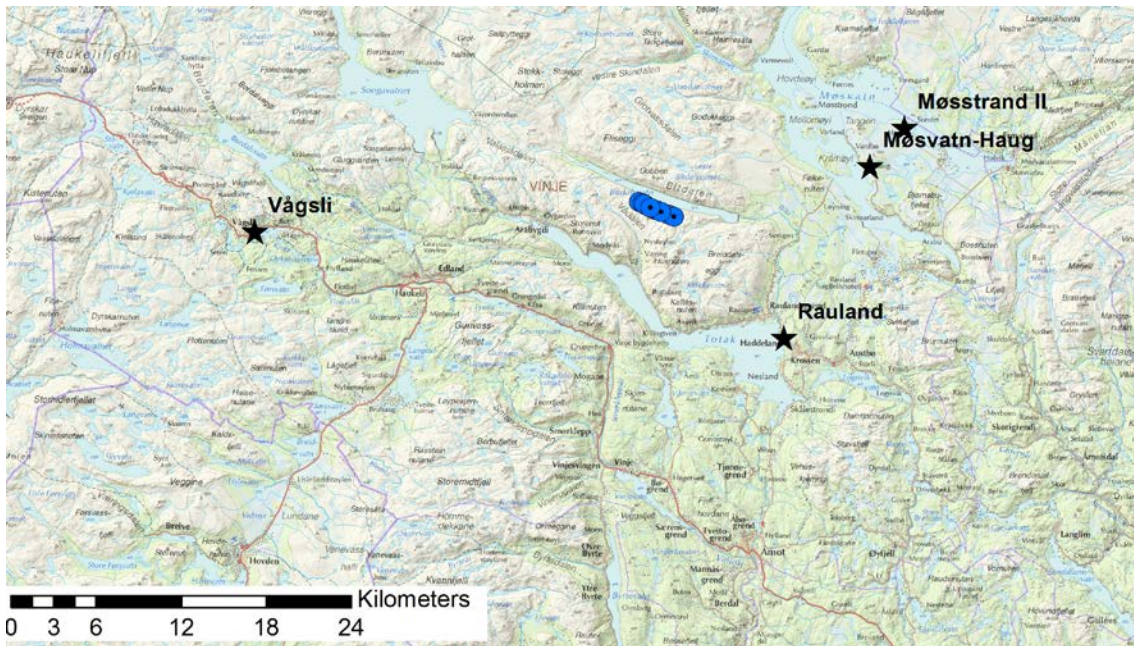


# 1 Innledning

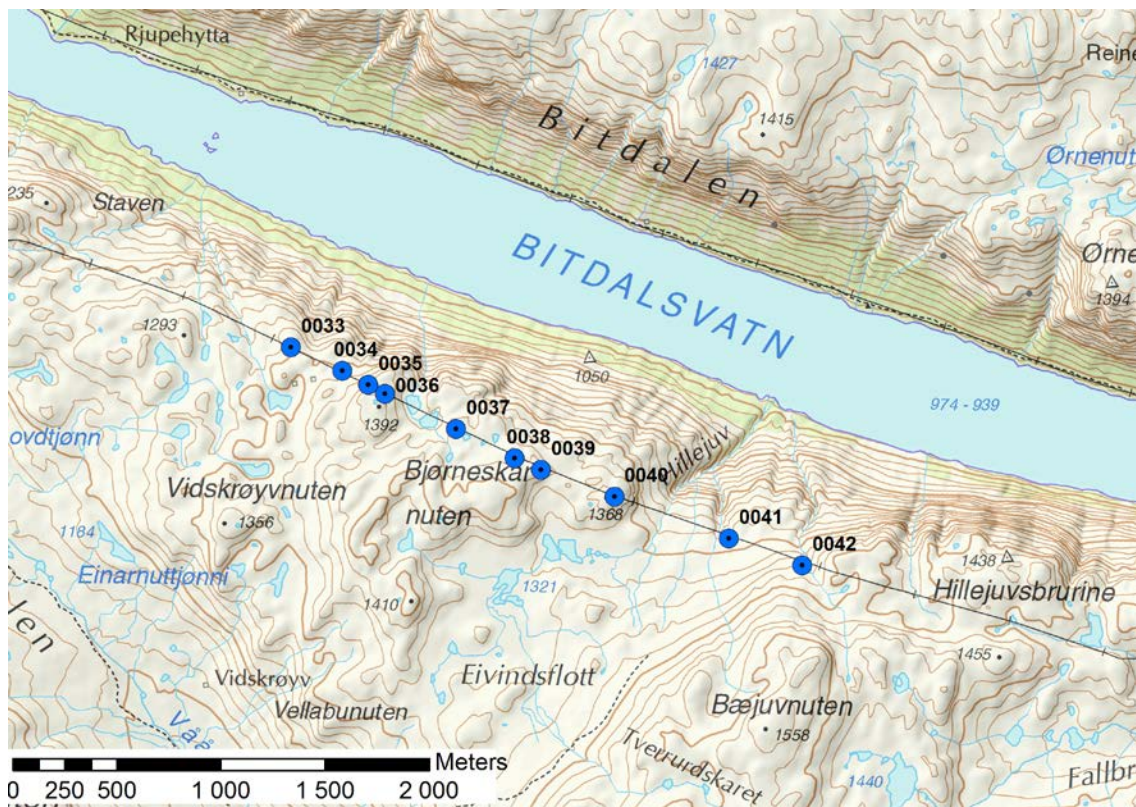
Lørdag 15. november 2014 kl. 12:38 og kl. 15:45 var det utfall på 300 kV kraftledningen mellom Songa og Vemorktoppen i fjellet sør for Bitdalsvatn i Vinje kommune. I den forbindelse har Statnett bedt Meteorologisk institutt om å estimere sannsynlige is- og vindlaster da utfallet skjedde samt oppdaterte islaster med 150 års returperiode og vindlaster med 50 års returperiode. Strekningen som skal vurderes er spesifisert i shape filer mottatt fra Statnett 2. desember 2014. Figur 1 viser mastene fra traseen i blått, og værstasjoner (stjerner) brukt i denne rapporten. Figur 2 viser et forstørret utsnitt av de aktuelle mastene, med mastenummer. Utfallet ble forårsaket av skader på mast 40, som ligger ca. 1365 moh.

Isingsforholdene avhenger av værsituasjonen, særlig skyer, 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 i Vedlegg 1.

Oppdraget er gitt under rammeavtale 2009/75.



Figur 1: Oversiktsbilde over mastepunkter (blå sirkler) og stasjoner (stjerner). (Bakgrunnskart: Kartverket)



Figur 2: Oversikt over seksjonen fra mast 33-42 på strekningen Songa – Vemokrstoppen. (Bakgrunnskart: Kartverket)

## 2 Meteorologiske forhold

Mast 40 på delstrekket for traseen Songa – Vemorktoppen som var berørt av utfallet den 15. november 2014 ligger på ca. 1365 moh. Værstasjoner i nærheten (Figur 1) er brukt til å beskrive de meteorologiske forholdene denne dagen og dagene i forkant. Ingen av stasjonene ligger like høyt som den aktuelle delstrekningen, men de gir en indikasjon på hvordan forholdene var i området.

### 2.1 Generelt om meteorologiske forhold i området

Tabell 1 viser døgnedbør med 10 og 50 års returperiode for 3 forskjellige værstasjoner i nærheten av det aktuelle området. Stasjonene indikerer at området er preget av moderate nedbørmengder med 50 års døgnedbør på 40 til 50 mm. En tommelfingerregel sier at 150 års verdien av islast fra våt snø vil kunne relateres til 50 års døgnedbør 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 området er med andre ord ikke spesielt utsatt for høye laster fra ising fra våt snø.

Tabell 1: Maksimal døgnedbør for oktober, november, desember, januar, februar og mars. 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
<b>Møssvatn - Haug</b>	946 m	1976 - 2014	35 (35) mm	44 (49) mm
<b>Møsstrand II</b>	977 m	1980 - 2014	32 (32) mm	40 (45) mm
<b>Rauland</b>	715 m	1884 - 2014	40 (39) mm	53 (53) mm

Figur 3 viser vindrosen for Møsstrand for hele året i perioden værstasjonen har hatt automatiske målinger av vind; 2007 - 2014. Dette er den prosentvise forekomsten av vind fordelt på sektorer og vindhastighetsklasser. Den vanligste vindretningen på Møsstrand er fra nordvest, og vinden forekommer hyppigst fra sektoren sørøst til nordvest, og sjeldnest fra nord, og sektoren nord til øst.

Vindrose for november i perioden 2007-2014 er også inkludert, Figur 4. Det samme vindmønsteret ses igjen her. Hyppigst vind fra sørvest. De høyeste vindhastighetene er i sektoren vest til nordvest. Det er også betydelig vind med retning fra sørøst. Sjeldnest fra nord også for november. Likevel er det en del vind fra sektoren nordøst til øst, men da bare fra flau vind opp til frisk bris.

### Vindrose, frekvensfordeling av vind

Vindretning deles i sektorer på 30°

Frekvensfordeling av vindhastighet i prosent %

#### Vindhastighet ( m/s )

- > 20.2
- 15.3-20.2
- 10.3-15.2
- 5.3-10.2
- 0.3-5.2

#### Stille (%)

3

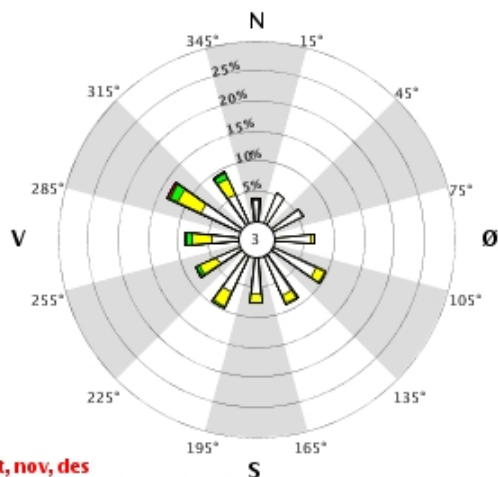


År: 2007 - 2014

jan, feb, mar, apr, mai, jun, jul, aug, sep, okt, nov, des

Tidspunkt: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 (NMT)

### 3 1620 MØSSTRAND II



Figur 3: Vindrose for Møsstrand II hele året for perioden 2007-2014.

### Vindrose, frekvensfordeling av vind

Vindretning deles i sektorer på 30°

Frekvensfordeling av vindhastighet i prosent %

#### Vindhastighet ( m/s )

- > 20.2
- 15.3-20.2
- 10.3-15.2
- 5.3-10.2
- 0.3-5.2

#### Stille (%)

2

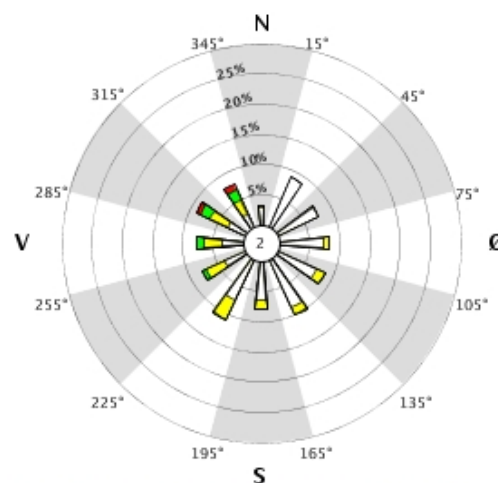


År: 2007 - 2014

nov

Tidspunkt: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 (NMT)

### 3 1620 MØSSTRAND II



Figur 4: Vindrose for Møsstrand II for november I perioden 2007-2014.

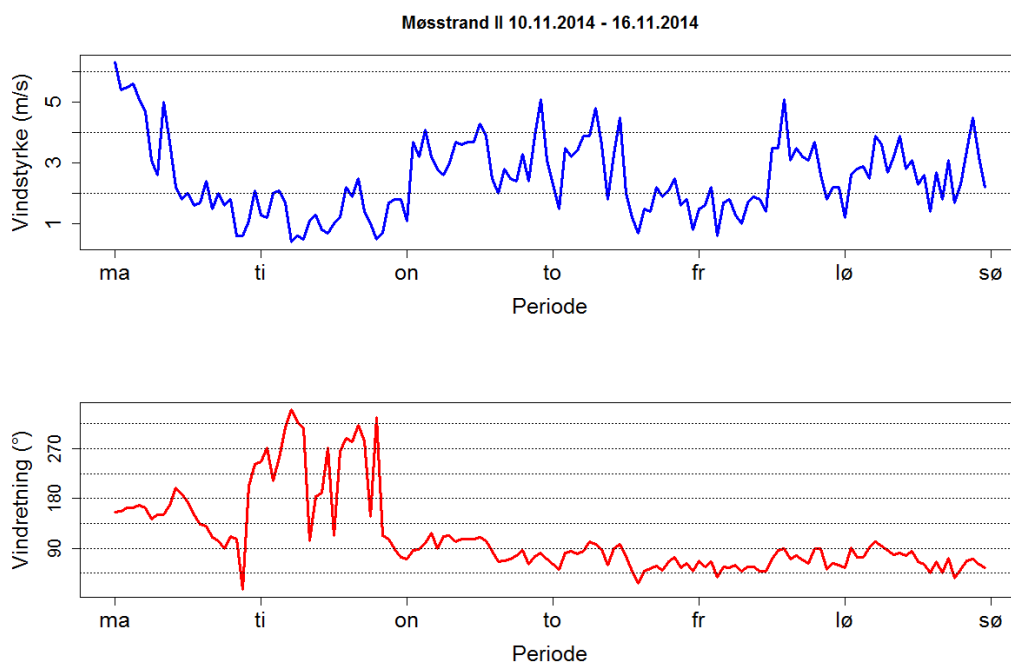
Det har vært automatiske målinger av vind på Møsstrand siden august 2006, og den maksimale 10 minutters vinden som er observert i denne tiden var 28.6 m/s (sterk storm) den 23. mars 2011. Høyeste observert vindkast var 37.5 m/s 14. januar 2007. Ved dimensjonering for vindlaster tas det utgangspunkt i vindkast med 50 års returperiode, og siden måleserien på Møsstrand er relativt kort og ligger samtidig betydelig lavere i terrenget må man ta utgangspunkt i Norsk vindstandard (Standard Norge, 2009). Den gir en referansevind for Vinje kommune på 24 m/s, og ut fra referansevinden beregnes vindkast. Ved å bruke terrengkategori 1 i vindstandarden, anta høyde over havet på 1300 m og linenes høyde over bakken til 15 m fås vindkast med 50 års returperiode på 49 m/s. Ved 1400 moh. fås vindkast med 50 års returperiode på 50,5 m/s.

## 2.2 Meteorologiske forhold i tiden rundt havariet

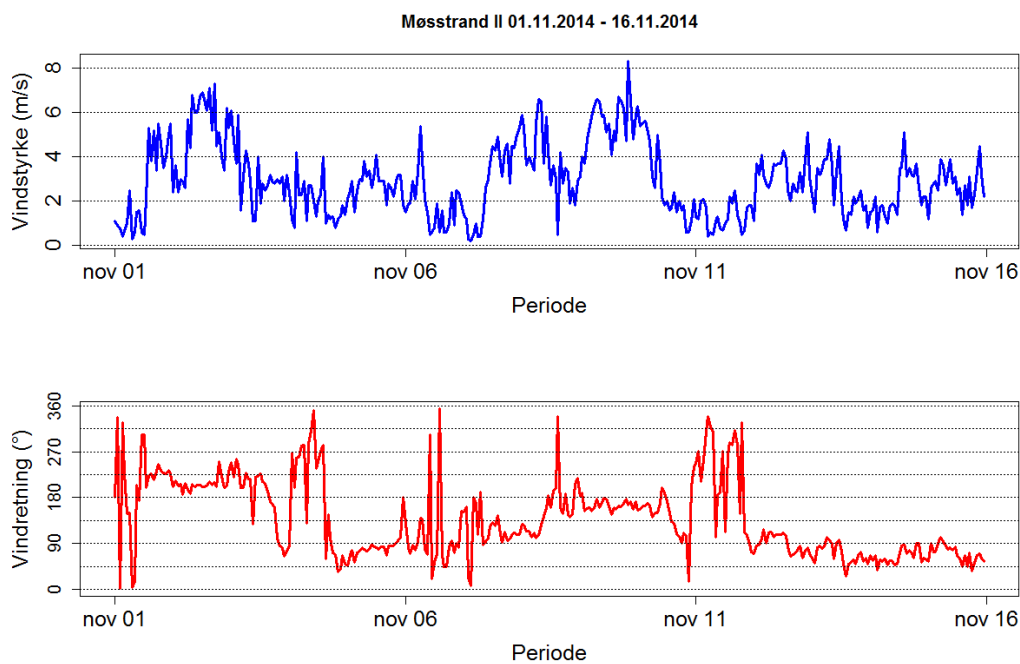
Lørdag 15. november lå det et høytrykk over Finland og Russland og et lavtrykk over Storbritannia. Dette har ført til vind fra øst for Sør-Norge. Lavtrykket fører med seg fuktig luft, i tillegg heves denne luften opp over fjellet slik at vandrdåper kondenseres ut, og det dannes lave skyer og tett tåke i høyfjellet.

Utfallet på ledningen skjedde lørdag 15. november 2014 kl. 12:38 og kl. 15:45. Figur 5 viser vinden fra Møsstrand den dagen og dagene før utfallet. Fra den 12. november har vinden ligget i sektoren mellom nordøst og øst. Den 15. november varierte vinden mellom 1,2 - 4,5 m/s, og med en retning fra øst som dreier mer til nordøst utover dagen. Figur 5 viser vinden for perioden 10 – 16. november, mens Figur 6 viser vinden for første halvdel av november 2014. Middelvinden har maksimalt blitt målt til 8,3 m/s (frisk bris) mellom 1. – 16. november 2014, dette den 9. november kl. 20. Høyeste vindkast samme dag var 11,4 m/s.

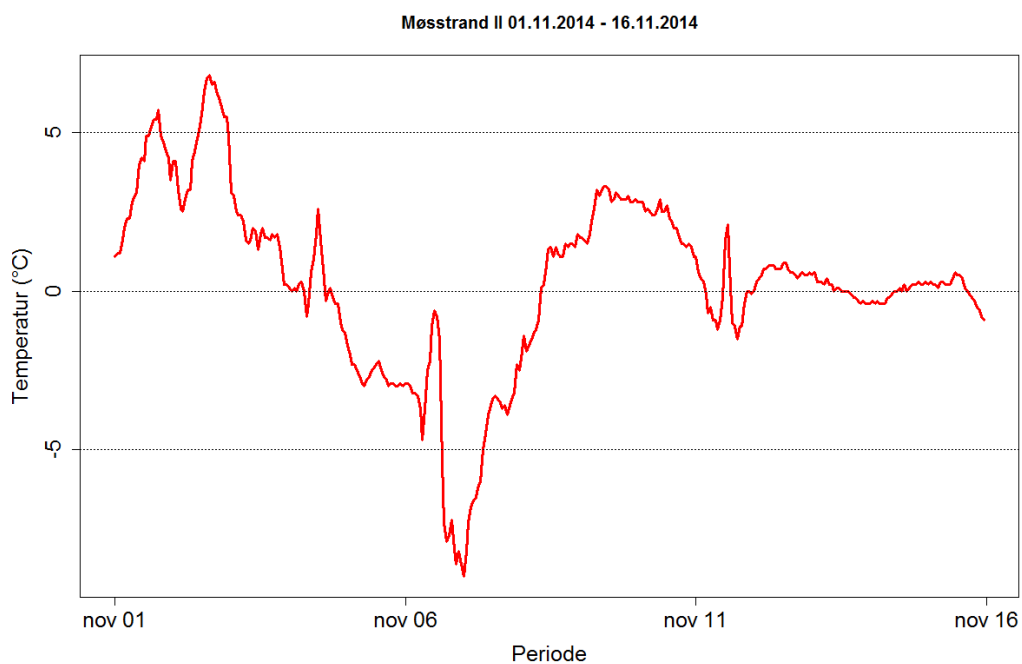
Figur 7 viser temperatur i første halvdel av november 2014. Temperaturen har svingt en del rundt null grader, spesielt de siste dagene forut for utfallet. 400 meter høyere opp vil temperaturen være ca. 2,5 °C lavere, temperaturen minker med høyden (0,6 °C/100 m). Dette indikerer at ising på linene har vært underkjølte skydråper. Det bekreftes med nedbørsobservasjoner for stasjonene i nærheten. På Møssvatn har det blitt observert nedbør alle dagene i første halvdel av november (Figur 8). For oktober og november 2014 til sammen har nedbøren vært 131 % av normalen. Stasjonene Møssvatn-Haug, Rauland og Vågsli viser tilsvarende, med hhv. 152 %, 145 % og 144 % av normalen de to månedene. Værstasjonene viser at det har vært en del nedbør i området, som tilsier at det må ha vært en skyet værtype i perioden forut for havariet.



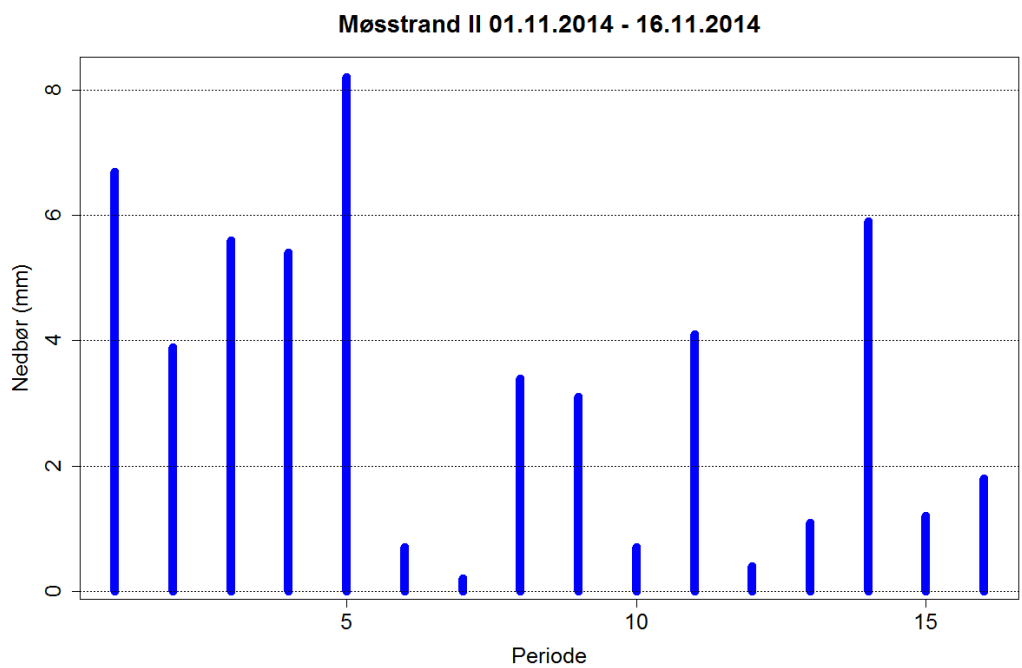
Figur 5: Vind målt på Møsstrand II mandag 10. – søndag 16. november 2014. Øverst; vindstyrke (10 min middelvind) og nederst; vindretning (0° er fra nord og 180° er fra sør).



Figur 6: Vind målt på Møsstrand II I perioden 1. november – 16. november 2014. Øverst; vindstyrke(10 min middelvind) og nederst; vindretning (0° er fra nord og 180° er fra sør).



Figur 7: Temperatur målt på Møsstrand II i perioden 1. november – 16. november 2014.



Figur 8: Døgnetnedbør målt på Møsstrand II i perioden 1. november – 16. november 2014.

### 3 Is- og vindlaster

Is- og vindlaster for mastenummer 34 – 41 på strekningen Songa – Vemorktoppen er vurdert på tidspunkt for utfall 15. november 2014. Videre er islaster med 150-års returperiode og vindlaster med 50-års returperiode estimert for samme mastepunkter. Delstrekningen ligger i fjellet sør for Bitdalsvatn, mellom 1280 og 1380 moh. Vurderingen av is- og vindlaster er basert på modelldata (Vedlegg 1), observasjoner fra omkringliggende værstasjoner og befaring av området.

I Norge vil islaster av betydning enten kunne tilskrives underkjølte skydråper som fryser på gjenstanden (skyising) eller at snøflak som inneholder flytende vann fester seg på den aktuelle gjenstanden (ising fra våt snø). Ising fra våt snø kan forekomme over hele landet og skjer i temperaturintervallet mellom 0,5 og 2 °C, mens skyising forutsetter at skybasen når helt ned til ledningen og er dermed mest vanlig i fjellet, der det i enkelte tilfeller har gitt islaster på ledninger av en størrelsesorden 100 kg/m (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2012).

Da meteorologiske observasjoner fra tiden rundt utfallet indikerer at temperaturen var under 0 °C vurderes isingen ved denne hendelsen å være fra underkjølte skydråper (skyis). Dette vil være den dominerende isingsprosessen i denne høyden, og 150 års islaster vil dermed også kunne tilskrives skyis. Analyser utført i forbindelse med tidligere oppdrag (f.eks. Mc Innes og Nygaard (2014) og Tajet m.fl. (2014)) viser at intensiteten av skyising er svært følsom for skjerming fra omkringliggende terreng og har meget store vertikale gradienter. Derfor estimeres islaster på grunnlag av modellberegninger (Vedlegg 1) som sammenstilles med vurderinger av skjermingseffekter fra terrenget rundt ledningen.

Data fra den numeriske atmosfæremodellen WRF er blitt brukt til å beregne islastene på ledningen ved havartidspunktet i tillegg til islaster med 150 års returperiode for dimensjonering. Sammenstilling av observasjoner og data fra WRF er gjort i forbindelse med tidligere oppdrag for Statnett (f.eks. Mc Innes og Nygaard, 2014 og Tajet m.fl., 2014), og indikerer at WRF gir realistiske simuleringer av parametere som vind og temperatur.

Tidligere dimensjonerende laster fra oversiktsprofilen av 300 kV Songa – Vemork i Råstad Meteorologisk rapport, 1-12-1967, er vist i tabell 2. Vi har ikke tilgjengelig vindlastene i m/s, men i oversiktsprofilen er vindtrykket i kg/m angitt. Dette er antakelig en kombinasjonslast av vind og is på linene, hvor det kan være flere ukjente faktorer, slik at det ikke er mulig å regne tilbake til vindlast i m/s.



Tabell 2: Islaster og vindlaster fra oversiktsprofil i Råstad Meteorologisk rapport, 1-12-1967.

Mastnummer	Islast (kg/m)	Vindlast (kg/m)
34 – 35	15	4,5
35 – 36	30	14
36 – 38	15	10
38 – 40	30	14
40 – 42	10	4,5

### 3.1 Befaring

Torsdag 12. mars 2015 ble området befart med helikopter sammen med Trygve Jonskås fra Statnett. Han fortalte at området har mye vind, ofte ligger godt inni skydekket og det pakker seg på store mengder is om vinteren. Alle ganger det har vært registrert problemer har det vært vind fra østlig retning. Vi fløy langs traseen og landet ved mast 40 og mast 38. Ved mast 40 la vi spesielt merke til terrengformasjonene østover ned Hillejuv og nedover Bitdalsvannet, Figur 9. Ved vind fra øst vil denne trolig dreies lokalt å følge Hillejuv, og blåse mer i retning fra nordøst mot sydvest. Dette utgjør en høy normalkomponent på linene mellom mast 40 – 41. Ved vind fra sørøst ligger dette området mer skjermet bak Bæjuvnuten og ved vind fra sektoren sør til vest er det mer åpent igjen. Ved mast 38 er det ganske åpent i alle retninger. Traseen ligger litt innpå platået, og ved vind fra sektoren sør til vest vil dette medføre innholdet av skyvann reduseres før luften når frem til ledningen. Platået gir med andre ord en skjermingseffekt ved vind fra denne sektoren.

I tillegg til mastehavariene som er omtalt her kunne Statnett ved Trygve Jonskås informere om brudd på topplene ved to anledninger noe lengre vest, henholdsvis omkring mast 32-34 og ved mast 12-13. Tidspunktet for linebruddene er sammenfallende med tidsperiodene som førte til havari på 420 kV Kvilldal Rjukan i mars 2014 (Mc Innes og Nygaard, 2014) og mastehavariet på 300 kV Songa - Vemorktoppen i november 2014 (omtalt i denne rapporten). Linebruddene tyder på at det også her er ising fra øst som har forårsaket de høye islastene.



Figur 9: Fra befaring 12. mars 2015. Bilde fra mast 40 og retning øst mot mast 41 over Hillejuv. Gaustatoppen i bakgrunn. Foto: Helga Therese Tilley Tajet

### 3.2 Is- og vindlaster ved utfallet

For vurdering av vindlaster ved utfallstidspunktet er observasjoner fra Møsstrand benyttet. Denne stasjonen anses å være mest representativ for området som skal vurderes. Den 15. november varierte vinden mellom 1,2 - 4,5 m/s, og med en retning fra øst som dreier mer til nordøst utover dagen (Figur 5). Maksimale vindkast rundt utfallstidspunktet, mellom kl. 12-13 7,1 m/s og kl. 15-16 6,5 m/s. Havaristedet ligger ca. 400 m høyere enn værstasjonen og vindhastigheten var antakelig en god del høyere der. Likevel ikke så høye vindkast at det er sannsynlig at havariet er utløst av vind.

Observasjonene fra Møsstrand viser at temperaturen svingte rundt null på dagen og dagene forut for havariet. Dette indikerer at temperaturen 400 m høyere oppe var under 0 °C, og tyder på at isingen på linene kan tilskrives underkjølt skyvann. Dette underbygges av modellresultater (Vedlegg 1) og befaring Statnett hadde av området 5 dager etter havariet (figur 2-2 i vedlegg 1). Figurene i vedlegget fra KVT rapporten viser at havariet skjedde midt i en isingsperiode som varte til 17. november 2014. Høyeste islast var 14 kg/m på slutten av perioden. Ved tidspunktet for havariet var islasten sannsynligvis 9 kg/m ved mast nr. 40. Disse beregningene gjelder for linene i toppen av spennet nær mast 40. Her er det lagt til grunn en linevinkel på 18 grader. Lenger ned i spennet har islasten på linene trolig vært noe lavere, slik at islasten for spennet som helhet har trolig vært noe lavere enn disse beregningene.

Isingen er beregnet til en returperiode på ca. 15 år. Likevel var dette et mer sjeldent tilfelle, fordi isingen forekom ved vind fra øst. Ser en bare på tilfeller med ising fra øst, har november 2014 den desidert høyeste islasten, og en returperiode på minst 50 år i følge modellberegningene. Fordi spennet fra mast 40 til mast 41 krysser et dalføre vil vind fra øst trolig dreies lokalt til nordøst, og dermed få en noe større komponent på tvers av linene. Denne effekten kan bidra til at nettopp dette spennet er noe mer utsatt ved ising fra øst, selv om dette i utgangspunktet ikke er den verste isingsretningen.

### 3.3 Dimensjonerende is- og vindlaster

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 ligger betydelig lavere i terrenget enn den aktuelle delstrekningen, og 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 Vinje 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 1300-1400 moh. og at linenes gjennomsnittlige høyde over bakken er 15 m. Dette gir i følge vindstandarden vindkast med 50 års returperiode på ca. 49 – 50,5 m/s, noe som vi har tatt utgangspunkt i når vindlaster på spennene er satt i Tabell 3.

Tabell 3 viser også dimensjonerende islaster, det vil si islaster 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 vurdering av skjermingseffekter gjort under befaring. Islastene beregnes ved hjelp av ekstremverdianalyse av 36 år med WRF-data. Analysene av WRF data viser at ising vil kunne forkomme fra ulike retninger, men er fraværende fra nordvest til nord-nordøst. Tabell 4-1 i vedlegg 1 viser at det er beregnet relativt høye islaster for alle ledningsretninger. For en ledningsretning på 115 ° gir modellberegninger 150 års islast på 35 kg/m 1385 moh. og 30.8 kg/m 1365 moh. Tar man høyde for skjermingseffekter som ble vurdert ved befaringen (Kapittel 3.1) estimeres islaster på de høyestliggende spennene til å være opp i 30 kg/m. De reduseres imidlertid betydelig når man kommer lavere ned, slik det fremgår av Tabell 4-2 i vedlegg 1.

Tabell 3: Islaster med 150 års returperiode og vindkast med 50 års returperiode for strekningen mellom mastene 34 - 41.

Mastenummer	Islast (kg/m)	Maks vind (m/s)	Normalkomponent (m/s)
34 – 35	22	49	49
35 – 36	27	50	50
36 – 37	30	50	50
37 – 38	30	50	50
38 – 39	30	50	50
39 – 40	30	50	50
40 – 41	20	46	46

## 4 Oppsummering

I forbindelse med mastehavari 15. november 2014 på delstrekning Songa – Vemorktoppen er sannsynlige vind- og islaste på havaritidspunktet og dimensjonerende vind- og islaste vurdert. Analyse av data fra den numeriske værmodellen WRF indikerer at ledningen har vært eksponert for skyising over perioden 12. – 17. november 2014. Vindretningen var fra øst, og isen som la seg på linene resulterte i et havari 15. november. For øvre del av spenn 40 – 41 gir modellen 9 kg/m ved havaritidspunktet, og senere økende til 14 kg/m. Denne islasten knyttes til en returperiode på ca. 15 år. Isingsepisoden var allikevel svært sjelden, da den førte til så høye islaste i en situasjon med vind fra øst. For denne vindretningen isolert sett har hendelsen en returperiode på minst 50 år.

For strekningen mellom mastene 34 og 41 er nye dimensjonerende islaste estimert til 20 – 30 kg/m og vindlaste til 46 – 50 m/s.

## Referanser

Mc Innes, H. og Nygaard, B. E. (2014) *Vurdering av sannsynlige vind og islaster i forbindelse med havari samt oppdaterte klimalaster for delstrekning på 420 kV Kvilldal – Rjukan* MET report 13/2014

Norges vassdrags- og energidirektorat (2012) *Isstorm, Ising på kraftforsyningsnettet* NVE rapport 44 2012

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

Tajet, H.T.T., Ødemark, K. og Nygaard, B.E.K. (2014) *Klimalaster for 420 kV Lyse – Stølaheia* MET report 6/2014

**Vedlegg 1: Kjeller Vindteknikk rapport «Songa –  
Vemorktoppen, Telemark Analyse av islaster etter  
mastehavari»**

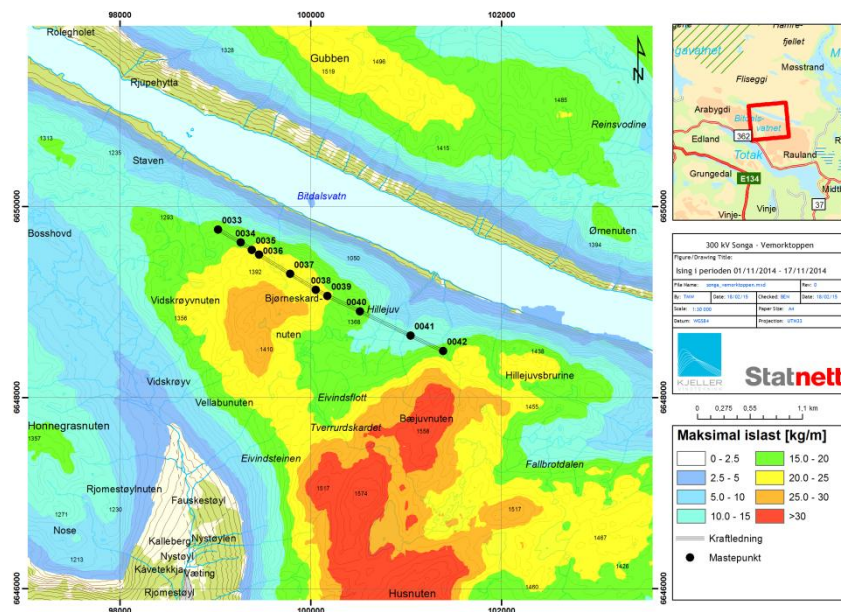


KJELLER  
VINDTEKNIKK

# Songa - Vemorktoppen, Telemark




Analyse av islaster etter mastehavari

Rapport: KVT/BEN/2015/R019



Rapportnummer <b>KVT/BEN/2015/R019</b>	Dato 24.2.2015
Rapporttittel <b>Songa - Vemorktoppen, Telemark</b> Analyse av islaster etter mastehavari	Klassifisering Begrenset til kunde Utgave nummer 1
Kunde <b>Meteorologisk Institutt</b>	Antall sider 13 + vedlegg
Kundens referanse <b>Harold McInnes</b>	Status Endelig
<b>Formål</b> <p>Den 15. november 2014 havarerte en mast på 300 kV kraftledningen fra Songa i Vinje kommune til Vemorktoppen i Tinn kommune, Telemark fylke.</p> <p>Formålet med denne rapporten er:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Å gjøre en detaljert analyse av isingsforholdene som førte til mastehavariet</li> <li>2. Gjøre en ny beregning av islaster med returperiode 150 år for dette høyfjellspartiet</li> </ol> <p>Oppdraget er gitt av Statnett SF til Meteorologisk Institutt, som videre har bestilt denne rapporten fra Kjeller Vindteknikk.</p> <p>Rapporten er kvalitetssikret og gjennomgått etter Kjeller Vindteknikks kvalitetssikringssystem.</p>	
<b>Forbehold</b> <p>Selv om det i arbeidet med denne rapporten, så langt vi kjenner til, er benyttet oppdaterte analysemetoder, og vi i vårt arbeid forsøker å gi et så godt resultat som mulig, kan Kjeller vindteknikk AS ikke holdes ansvarlig for resultatene i rapporten eller for framtidig bruk av denne, og heller ikke for eventuelle direkte eller indirekte tap som skyldes eventuelle feil i rapporten.</p>	

Revisjonshistorie				
Utgave	Dato	Antall eksemplarer	Kommentar	Distribusjon
1	24.2.2015	Kun elektronisk		Pdf

	Navn	Dato	Signatur
Utført av	Bjørn Egil Nygaard	24/2-2015	
Kontrollert av	Johannes Lindvall	24/2-2015	
Godkjent av	Knut Harstveit	24/2-2015	



# Innholdsfortegnelse

---

<b>INNHALDSFORTEGNELSE .....</b>	<b>2</b>
<b>1 SAMMENDRAG .....</b>	<b>3</b>
<b>2 METODE OG DATA .....</b>	<b>4</b>
2.1 LEDNINGSTRASÉ .....	4
2.2 DATA .....	5
2.3 ISINGSBEREGNING .....	5
2.3.1 Skyising .....	6
2.4 EKSTREMVERDIANALYSE .....	6
<b>3 FINSKALA SIMULERINGER .....</b>	<b>7</b>
3.1 FINSKALA ISINGSKART .....	7
3.2 MODELLERT TIDSSERIE .....	9
<b>4 BEREGNING AV RETURVERDIER .....</b>	<b>10</b>
<b>5 REFERANSER .....</b>	<b>13</b>
<b>VEDLEGG A: JUSTERING AV WRF6KM .....</b>	<b>14</b>
<b>VEDLEGG B: BESKRIVELSE AV WRF-MODELLEN OG ISINGSBEREGNINGENE .....</b>	<b>16</b>

# 1 Sammendrag

Den 15. november 2014 havarerte mast 40 på 300 kV kraftledningen Songa - Vemorktoppen i Telemark fylke. Mastehavariet skjedde i høyfjellspartiet sør av Bitdalsvatn i ca 1365 moh.

Simulering med en meteorologisk modell med oppløsning 500 m x 500 m viser at isingen som førte til havariet trolig startet den 12. november, og at vinden blåste fra øst under hele isingsperioden. Beregnet ismengde på kraftledningen er ca 9 kg/m ved havaritidspunktet og senere økende til ca 14 kg/m. På master og andre komponenter som har frontareal mot øst forventes betydelig ising i denne perioden. Ising på et referanseobjekt beregnes til drøyt 20 kg/m for denne episoden.

Isingsberegning basert på en modell med 6 km x 6 km oppløsning for perioden 1979 - 2014 er gjennomført etter en korreksjon av skyenes vanninnhold og vind i henhold til modellen med 500 m x 500 m. Beregningen viser at isingen i november 2014 er en relativt sjelden hendelse, med estimert returperiode på 15 år for gitt ledningsretning. For ising kun fra østlig retning har hendelsen en estimert returperiode på over 50 år.

Beregninger av returverdier gir islaster med 150 års returperiode på 20 - 30 kg/m for dette høyfjellspartiet, som vist i tabellen nedenfor. Omkring traseens høyeste punkt ved mast 38 (385 moh.) er beregnet 150-års islast opp mot 35 kg/m.

Tabell 1-1 Returverdier for skyising for ledninger i ulike retninger. Beregnet fra WRF6km korrigert mot WRF500m og høydejustert til 1365 moh. \*150-års laster er ikke beregnet direkte men skalert fra 50 års verdiene med en overgangsfaktor på 1.25, som er hentet fra NEK445:2009.

Linjeretning	Returverdier skyising (kg/m)						
	2 år	3 år	5 år	10 år	25 år	50 år	150 år
0°	6.0	7.8	10.2	14.1	20.6	27.2	34.0
90°	5.1	6.7	8.8	12.0	17.2	22.0	27.5
115°	4.4	5.7	7.6	11.0	17.5	24.7	30.8
135°	5.1	6.4	8.0	10.3	13.7	16.7	20.9
Retningsuavhengig	9.5	12.1	15.6	20.9	29.6	37.8	47.3

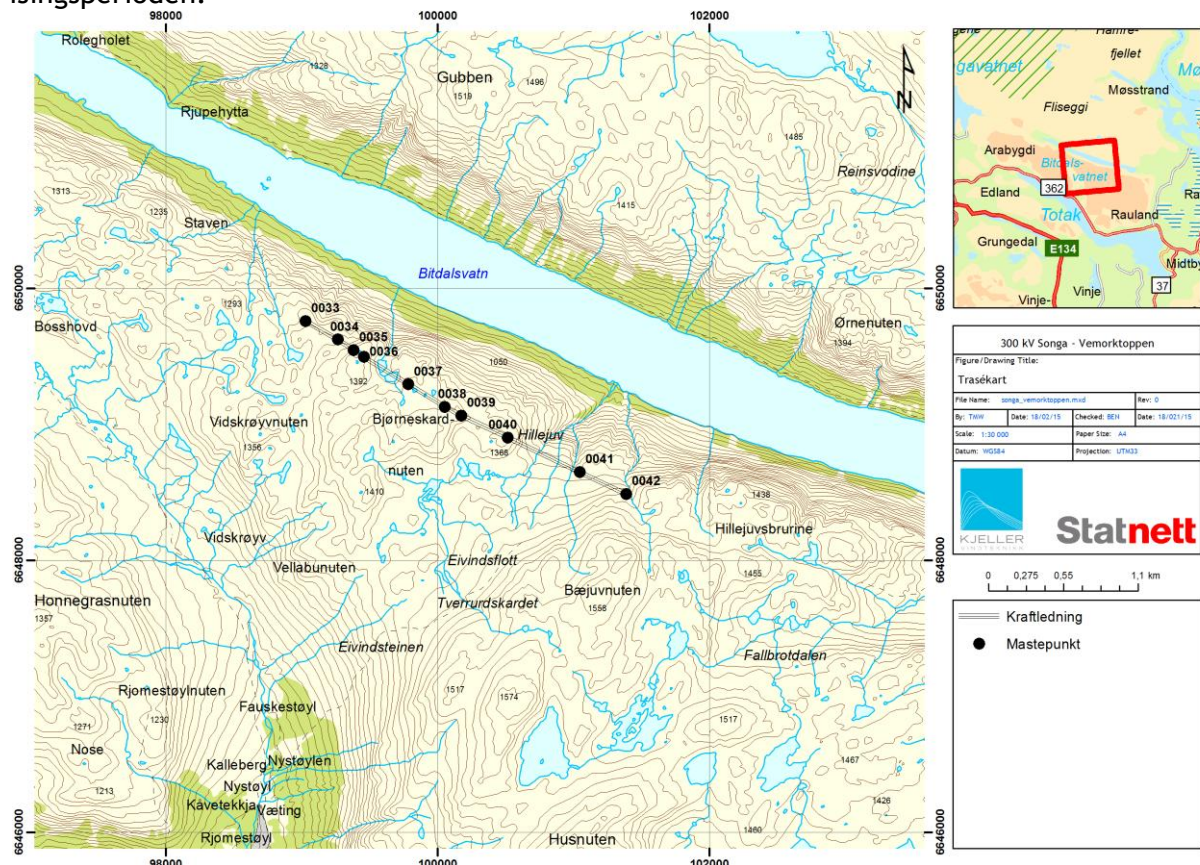
## 2 Metode og data

### 2.1 Ledningstrasé

Denne rapporten omhandler et høyfjellsområde i Vinje kommune hvor 300 kV kraftledningen Songa - Vemorktoppen fremføres. Rapporten fokuserer på området rett sør av Bitdalsvatn, ved mastene 33 - 42, som angitt på trasékartet i Figur 2-1.

Delstrekningen har sitt høyeste punkt ved mast 38 på ca 1385 moh. Mast 40 som havarerte står på ca 1365 moh. og spennet videre krysser et dalføre (Gygregråten) ned til mast 41 på ca 1285 moh. Ledningstraseen er orientert ca 115 grader i forhold til nord-sør. Ved mast 40 har linene en vinkel på 18 grader i forhold til horisontalplanet. Denne vinkelen vil ha betydning for islastene i den øvre delen av spennet 40 - 41.

Bildene i Figur 2-2 er tatt den 20. november 2014, dvs. 5 dager etter mastehavariet den 15. november, og viser mast 40 i retning mot mast 41 (øst). Isens form, struktur og farge viser at dette er ising fra underkjølte sky- eller tåkedråper (skyising). Bildet til høyre viser at isen har bygget seg opp på østsiden av masten. Dette tyder på vind fra øst under isingsperioden.



Figur 2-1 Oversikt over ledningstraseen til 300 kV Songa - Vemorktoppen mellom mast 33 og mast 42.



Figur 2-2 Bilder fra mast 40, tatt under befaring den 20.11.2014. Isens form på bildet til høyre viser at isen har bygget seg på ved vind fra øst. Begge bildene er tatt i retning øst (mot høyere mastenummer). Foto: Statnett.

## 2.2 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 B. Til beregning av ekstremverdier med tilhørende returperioder benyttes modelldata med en oppløsning på 6 km x 6 km for perioden 1979 - 2014 (heretter kalt WRF6km). Data er hentet ut for de fire modellpunktene som ligger nærmest mast 40. Dataene har en tidsoppløsning på 1 time og inneholder alle nødvendige parametere for å beregne vind- og islaster.

For å øke detaljnivået i analysene har vi utført simuleringer av perioden i forkant av havariet med en oppløsning på 500 m x 500 m (heretter kalt WRF500m). Simuleringen dekker tidsperioden 01.11.2014 - 17.11.2014. Resultatene fra WRF500m benyttes i første rekke til å danne et detaljert bilde av de meteorologiske forholdene under isingsperioden i forkant av mastehavariet. I tillegg benyttes resultatene fra WRF500m til å korrigere WRF6km dataene før disse benyttes for å bestemme returverdier for islaster etc. Til denne korreksjonen benytter vi også data fra simuleringen som ble utført i forbindelse med havari på 420 kV Kvilldal - Rjukan (KVT-rapport: KVT/BEN/2014/R059). Disse dataene er generert med WRF500m og dekker perioden 12.12.2013 - 31.03.2014. Sammenlikning mellom modellsimuleringer på grov og fin skala er gitt i Vedlegg A.

## 2.3 Isingsberegning

Kraftledningen fremføres her i et eksponert høyfjellsterreng og vil være eksponert for skyising. Ising fra våt snø vil også kunne forekomme, men skyising vil være den dominante isingstypen, og rapporten fokuserer derfor på skyising.

### 2.3.1 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-simuleringene anvendes for å beregne akkumulert skyis på et standardlegeme, etter formelverket gitt i ISO-standard for atmosfærisk ising på konstruksjoner, ISO 12494, og er beskrevet i Vedlegg B. I tillegg er akkumulerte laster beregnet for horisontale ledninger orientert i ulike retninger. I disse beregningene er samme isingsmodell benyttet, men det er kun vindens komponent normalt på ledningen som inngår i isingsmodellen.

## 2.4 Ekstremver dianalyse

Det benyttes en statistisk analyse for å bestemme ekstremverdiene i seriene av modellerte is- og vindlaster fra WRF. Ekstremverdimetoden heter GEV (Generalized Extreme Value distribution) og går ut på å tilpasse fordelingen av årlige maksimale islaster med en teoretisk sannsynlighetsfordeling. 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. Etter at fordelingen er tilpasset dataene på beste måte kan returperioder bestemmes, med tilhørende returverdier. Modellen som er brukt i ekstremverdi beregningen er dokumentert i Coles (2001).

## 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 denne delstrekningen samt omkringliggende terreng. 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 og på 420 kV Kvilldal Rjukan vinteren 2013/2014.

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):

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

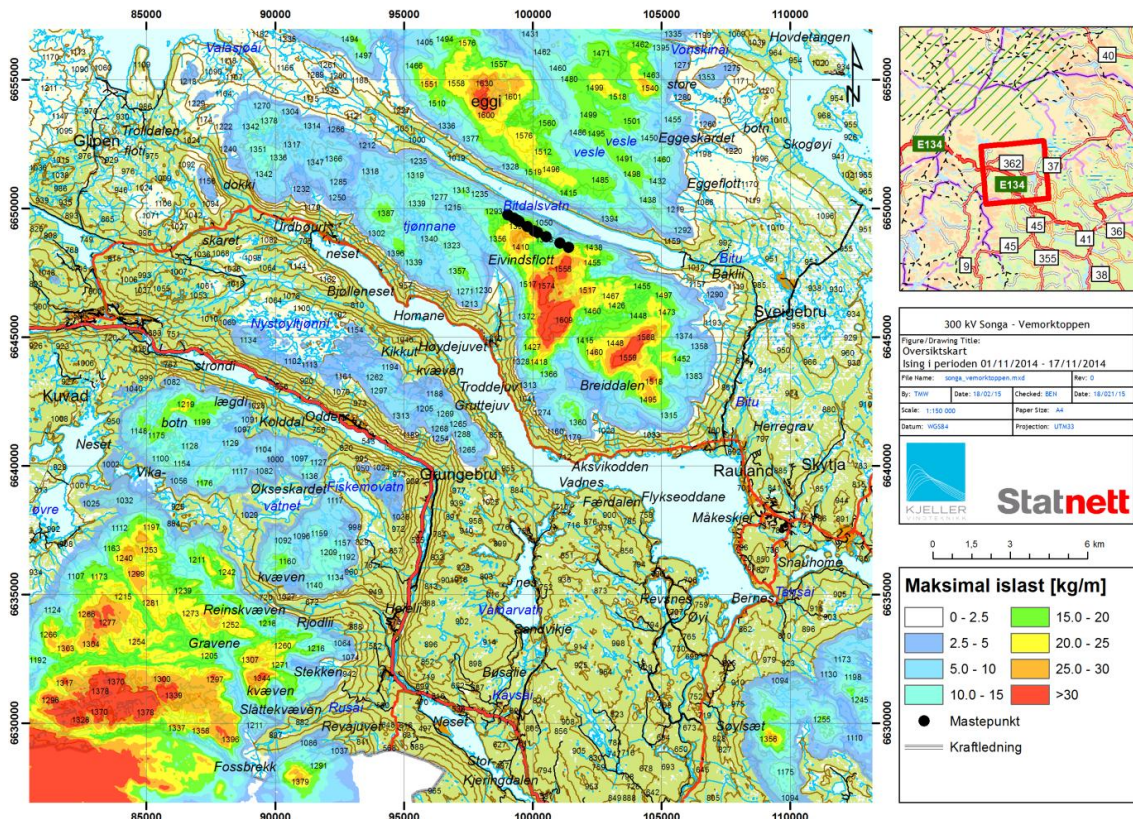
Her er  $M_{30}$  islasten for et punkt i 30 m dataene,  $M_{WRF}$  er islasten fra nærmeste punkt i WRF dataene,  $dM_{WRF}/dz_{WRF}$  er høydegradienten innenfor et område med radius på  $r$  gridpunkter, mens  $Z_{30} - Z_{WRF}$  representerer forskjellen i terrenghøyde mellom WRF og 30 m terrengdata.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

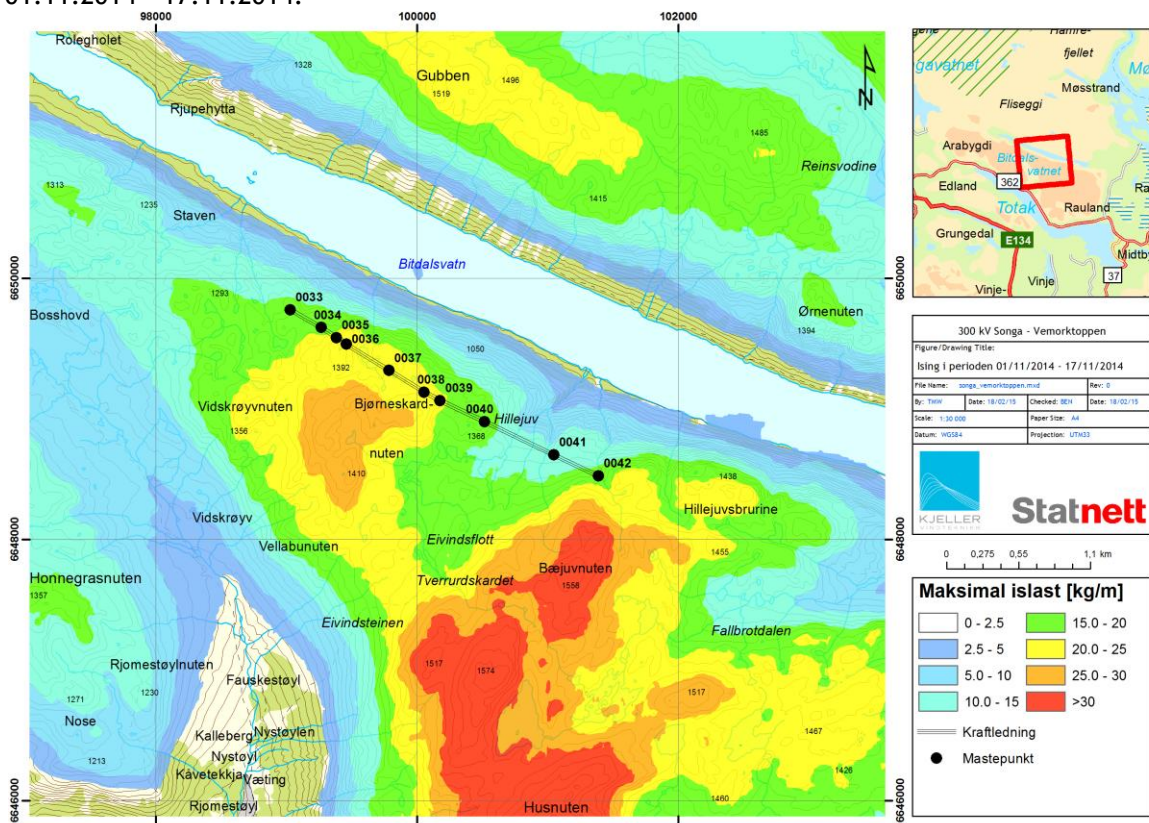
Isingskartene i Figur 3-1 og Figur 3-2 er basert på WRF modellens laveste modellflate, som er sentrert ca 20 m over bakken. Islastene er modellert på et referanseobjekt (ISO 12494). Fordi referanseobjektet er vertikalt orientert vil is akkumuleres effektivt fra alle vindretninger. Total ismengde på et referanseobjekt er derfor å anse som et konservativt estimat, og en øvre grense for ising. I praksis er ikke isførende vindretning alltid orientert normalt på ledningsretningen. Derfor forventes lavere laster på en horisontalt orientert ledning enn på et referanseobjekt.

Kartet i Figur 3-1 viser betydelig ising i hele fjellpartiet mellom Bitdalsvatn og Totak. Kartet viser også at det hovedsakelig er områder over 1200 moh. at det er islaster av betydning. Figur 3-2 viser samme resultater i et utsnitt over det aktuelle området

Islastene i kartene representerer en enkelthendelse, og kan ikke knyttes til returperioder uten en kobling mot lange dataserier. Dette gjøres i Kapittel 4. En mer detaljert sammenlikning med WRF6km er presentert i Vedlegg A.



Figur 3-1: Simulert maksimal akkumulert islast (kg/m) på et referanseobjekt for perioden 01.11.2014 - 17.11.2014.



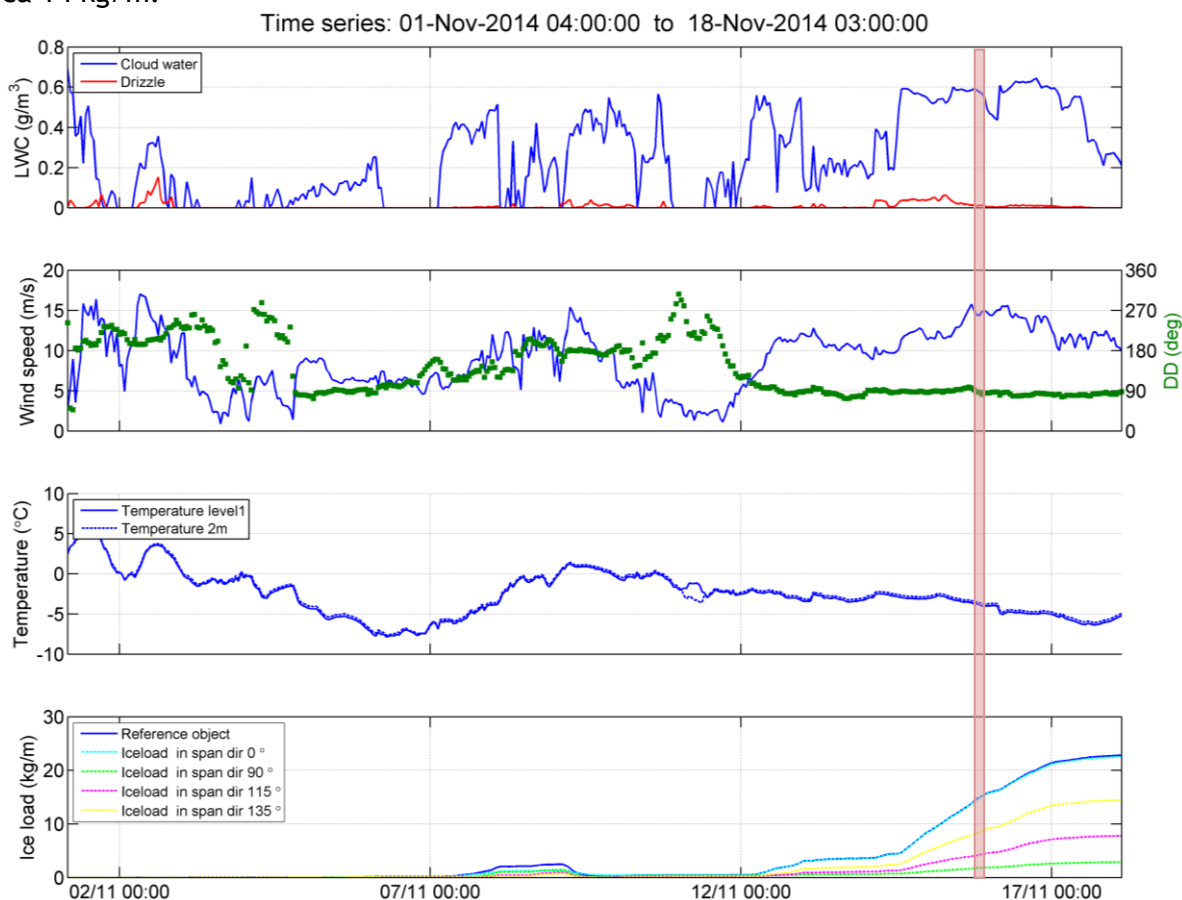
Figur 3-2: Simulert maksimal akkumulert islast (kg/m) på et referanseobjekt for perioden 01.11.2014 - 17.11.2014.

### 3.2 Modellert tidsserie

Tidsseriene i Figur 3-3 viser at perioden startet med temperatur omkring + 5 °C rundt 1. november og 2. november, og at isingen som førte til havari må ha forekommet etter dette. Den 8. november gir modellen en liten isingsperiode ved vind omkring sørøst, men isen smelter i løpet av 9. november. 12. november dreier vinden på øst og det iser sammenhengende ut simuleringsperioden. Det er sannsynlig at isingen som førte til havariet startet den 12. november.

For å beregne akkumulert ismengde på kraftledningen har vi lagt inn ledningsretningen, som er ca 115 grader ved mast 40, i tillegg til en linevinkel på 18 grader. Linevinkelen er linenes vinkel i forhold til horisontalplanet. Jo større denne vinkelen er, jo mer is vil feste seg på ledningene (særlig nær masten). Modellert ismengde på ledning med retning 115 grader ligger omkring 5 kg/m på havaritidspunktet, men øker senere til ca 8 kg/m.

For spennet 40 - 41 vil imidlertid vinden trolig styres noe mer på tvers av ledningene enn det som kommer frem i WRF500m. Dersom vi antar en vinkel på 45 grader vil ismengden på ledningen tilsvare beregningen for en ledning orientert i 135 grader (45 grader vinkel mot vind fra øst). Dette gir da en islast på ca 9 kg/m ved havaritidspunktet, som senere øker til ca 14 kg/m.



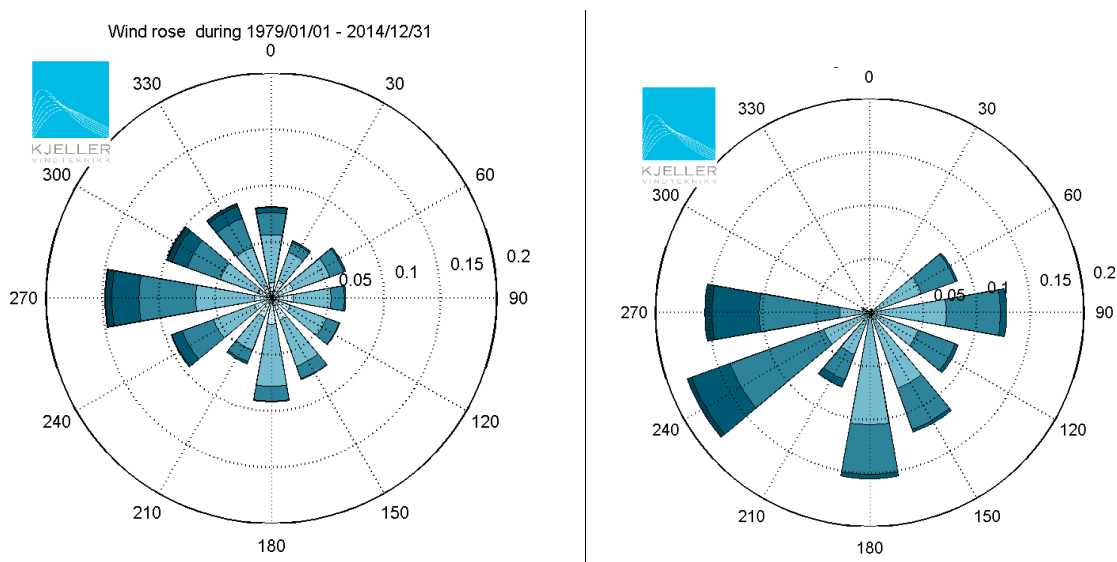
Figur 3-3: Tidsserier av meteorologiske variabler samt modellert islast, for gridpunktet nærmest mast 40 i 20 m høyde over bakken. Øverst: luftens vanninnhold i form av skydråper og yrdråper. Nest øverst: Vindhastighet og vindretning. Nest nederst: Temperatur i laveste modellnivå og ved 2 m. Nederst: Modellert islast for referanseobjekt og ledning orientert i ulike retninger. Det er lagt inn en linevinkel på 18° i beregningene.



## 4 Beregning av returverdier

Før WRF6km benyttes for å bestemme returverdier for islaster er dataene sammenliknet med og korrigert i henhold til resultatene fra simuleringene med WRF500m. Korreksjonen er i første rekke en justering av skyenes vanninnhold og en justering av vindhastigheten. Detaljer omkring sammenlikningen og korreksjonen finnes i Vedlegg A.

Resultatene som presenteres her er basert på WRF6km korrigert mot WRF500m og høydejustert til gitt høyde over havet. Venstre vindrose i Figur 4-1 viser vindklimaet under hele WRF6km simuleringsperioden for gridpunktet som ligger nærmest mast 40. Vindrosen er relativt jevnt fordelt, men med en overvekt av vind fra vestlig retning. Det er også fra vest og nordvest at vinden er sterkst. Høyre vindrose viser det at skyising forekommer fra ulike retninger, men er fraværende fra nordvest til nordøst.



Figur 4-1: Vindrose for 10 min middelvind i 20 m høyde for perioden 1979 - 2014. Hentet ut fra modellpunkt i 1297 moh. og høydejustert til 1365 moh. Fargekoden på vindrosen indikerer vindhastighet (m/s) mens utstrekningen viser andelen av tiden det vil blåse fra en gitt retningssektor. Høyre: Vindrose for samme periode men kun for tidspunkter med isingsintensitet over 20 g/m per time.

Den retningsvise fordelingen av ising har stor betydning for akkumulerte laster på en horisontal ledning. Når vindretningen er parallell med ledningen vil det akkumuleres minimalt med is på liner, mens isingen når sitt maksimum når vindretningen er normalt på ledningen. Tabell 4-1 viser beregnede returverdier for skyising som funksjon av ledningsretning i 1365 moh. Ekstremverdiene er beregnet ved bruk av GEV metoden som beskrevet i Kapittel 2.3. Da dataserien har en begrenset lengde på 36 år er 150 års verdiene ikke beregnet direkte men skalert fra 50 års verdiene med en overgangsfaktor på 1.25, som er hentet fra NEK445:2009.

Tabell 4-1 viser at det er beregnet relativt høye islaster for alle ledningsretninger. Modellen gir maksimal 150-års islast på 30.8 kg/m for en ledning orientert i 115°, som tilsvarer retningen på ledningen i dette partiet. Tilsvarende beregning for en ledning i 90°

og i 135° er henholdsvis 27.5 kg/m og 20.9 kg/m. Beregnet 150-års islast er dermed svært sensitiv til nøyaktig ledningsretning, og vindretning.

Tabell 4-2 viser at beregnede islaster øker raskt med høyden. Disse høydegradientene kan benyttes til å bestemme islasten spenn for spenn innenfor dette høydeintervallet.

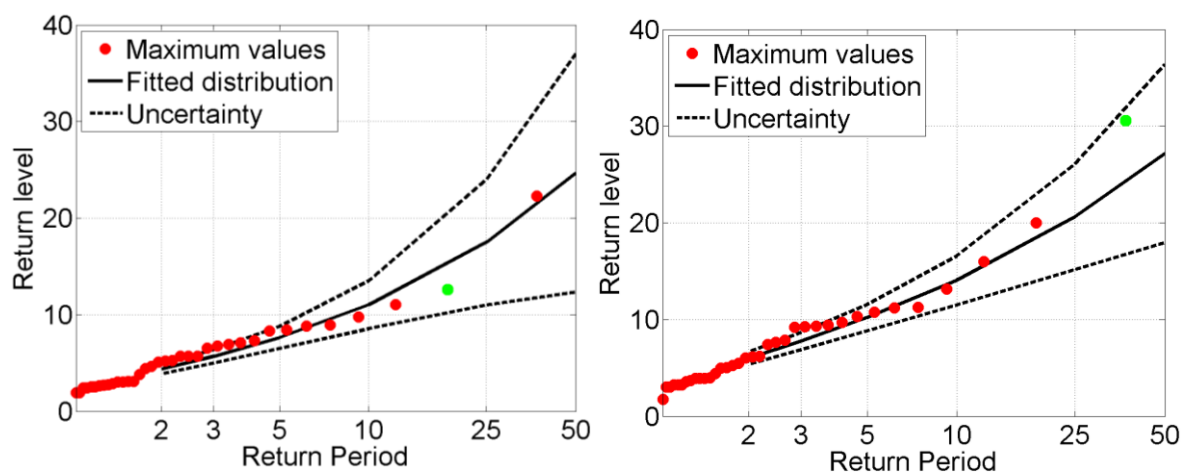
Tabell 4-1 Returverdier for skyising for ledninger i ulike retninger. Beregnet fra WRF6km korrigert mot WRF500m og høydejustert til 1365 moh. \*150-års laster er ikke beregnet direkte men skalert fra 50 års verdiene med en overgangsfaktor på 1.25, som er hentet fra NEK445:2009.

Linjeretning	Returverdier skyising (kg/m)						
	2 år	3 år	5 år	10 år	25 år	50 år	150 år
0°	6.0	7.8	10.2	14.1	20.6	27.2	34.0
90°	5.1	6.7	8.8	12.0	17.2	22.0	27.5
115°	4.4	5.7	7.6	11.0	17.5	24.7	30.8
135°	5.1	6.4	8.0	10.3	13.7	16.7	20.9
Retningsuavhengig	9.5	12.1	15.6	20.9	29.6	37.8	47.3

Tabell 4-2: Beregnede 150-års verdier for islast fra skyising (kg/m) i ulike linjeretninger basert på modelldata løftet til ulike høyder over havet. Verdiene er skalert fra 50 års verdier med en overgangsfaktor på 1.25, som er hentet fra NEK445:2009.

Linjeretning	150 års returverdier for skyising (kg/m)		
	1300 moh.	1365 moh.	1385 moh.
0°	20.0	34.0	36.6
90°	12.1	27.5	32.8
115°	14.1	30.8	35.0
135°	13.5	20.9	23.7
Retningsuavhengig	22.3	47.3	57.3

For å se islasten i november 2014 i et lengre perspektiv, og vurdere dens returperiode har vi plottet maksimal islast hver vinter sammen med en tilpasset ekstremverdifordeling. Figur 4-2 (venstre) viser at islasten for november 2014 beregnet på en ledning i 115° er den nest høyeste i hele beregningsperioden, og returperioden estimeres til ca 15 år. Figuren til høyre viser beregnet islast på en ledning i nord-sør retning. I praksis representerer dette ising ved vind fra øst. Her ser vi at november 2014 skiller seg ut som den høyeste lasten i serien, og returperioden estimeres til mer enn 50 år. Det forventes altså mer enn 50 år mellom hver gang det forekommer tilsvarende eller høyere islaster ved vind fra øst. Tar en hensyn til andre vindretninger, forventer tilsvarende eller høyere islast noe oftere, ca hvert 15. år i snitt.



Figur 4-2: Årlige (per vinter) maksimale islaster i 1365 moh, med tilpasset ekstremverdifordeling. Grønn sirkel viser maksimal islast i november 2014. Venstre: beregnet på en ledning orientert i 115°. Høyre: Beregnet på en ledning orientert i 0°.

## 5 Referanser

---

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

ISO 12494, 2001. ISO (the International Organization for Standardization) 12494 - Atmospheric icing of structures.

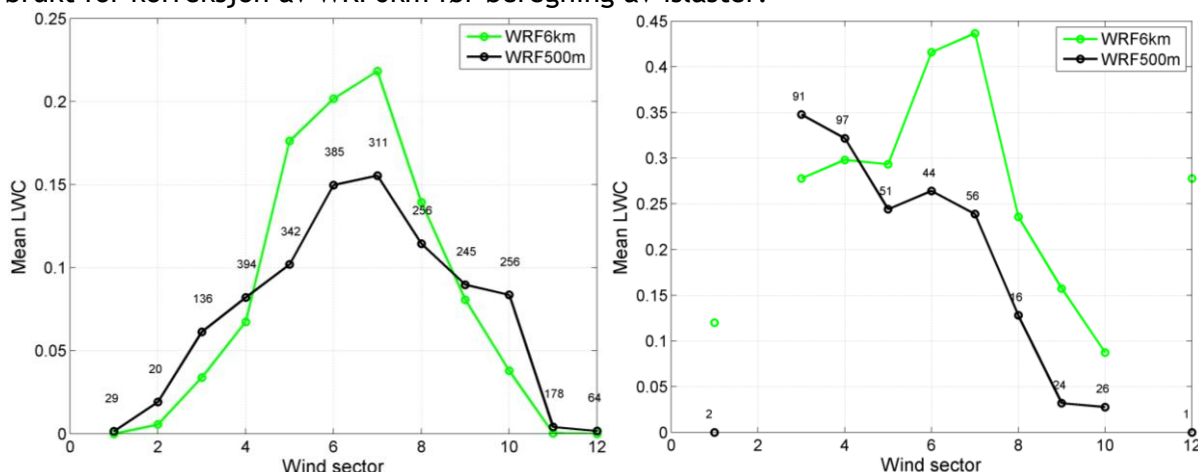
KVT/BEN/2014/R059. Nygaard, B.E. (2014). "Kvilldal - Rjukan, Tinn kommune, Telemark Analyse av islaster i forbindelse med mastehavari på 420 kV kraftledning." KVT rapport.

NEK445:2009. Norsk Elektroteknisk Komite. Oversettelse av NEK EN 50341 og NEK EN 50423 samt norske tilpasninger.

## Vedlegg A: Justering av WRF6km

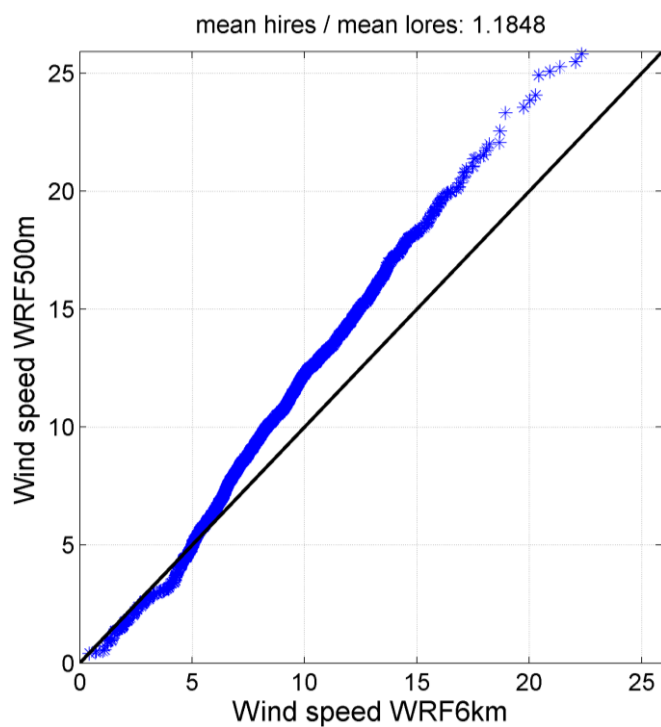
Til justeringen av WRF6km benytter vi i hovedsak simuleringen som ble utført i forbindelse med havari på 420 kV Kvilldal - Rjukan (KVT-rapport: KVT/BEN/2014/R059). Disse dataene er generert med WRF500m og dekker en vesentlig lengre periode (12.12.2013 - 31.03.2014) enn simuleringen i denne rapporten.

Figur A-1 viser at det er en systematisk forskjell i skyenes vanninnhold i WRF6km og i WRF500m. Forskjellen er sektoravhengig. Dette henger sammen med at WRF500m løser opp terrenget som gir skjerming ved vind fra sørøst til sørvest, mens skyvannet øker noe ved vind omkring øst. For sektor 5-8 finner vi et gjennomsnittlig forhold mellom WRF500m og WRF6km på 0.71. Tilsvarende forhold for sektor 3-4 er ca 1.2. Disse forholdstallene er brukt for korreksjon av WRF6km før beregning av islaster.



Figur A-1: Skyenes Sammenlikning av skyenes vanninnhold (LWC) i WRF6km og WRF500m for hver vindretning (sektor 1:12) Sektor 1 er vind fra nord +/- 15 ° mens sektor 7 er vind fra sør +/- 15 ° osv. Venstre: For perioden 12.12.2013 - 31.3.2014. Høyre: For perioden 1.11.2014 - 17.11.2014. Tallene på grafen angir antall tidspunkter i hver sektor.

Sammenlikning av vindhastighet i WRF6km og WRF500m vist i Figur A-2 viser at det er en liten systematisk forskjell, med høyere vindhastighet i WRF500m. Dette er trolig en speed-up effekt lokalt over toppen ved mast 38 - 40. Isolert sett vil denne forsterkningen av vinden bidra til økt ising. I snitt for hele perioden er forholdstallet 1.18. Denne faktoren er benyttet for korreksjon av vinden i WRF6km før beregning av islaster.



Figur A-2: Sortert scatter-plot av vindhastighet fra WRF6km og WRF500m. Basert på tidsperioden 12.12.2013 - 31.3.2014.

# Vedlegg B: Beskrivelse av WRF-Modellen og isingsberegningene

---

## 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)<sup>1</sup>. Details about the modelling structure, numerical routines and physical packages available can be found in for example Klemp et al. (2000)<sup>2</sup> and Michalakes et al. (2001)<sup>3</sup>. 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 project<sup>4</sup>. For Norway, the model input uses the N50 land use data provided by the Norwegian Mapping Authority<sup>5</sup>.

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)<sup>6</sup> and is available as global data with 1 degree resolution every 6

---

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 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/>)

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

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

<sup>5</sup> [http://www.kartverket.no/eng/Norwegian\\_Mapping\\_Authority/](http://www.kartverket.no/eng/Norwegian_Mapping_Authority/)

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

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

Similar lateral boundary data is also available from the European Center for Medium range Weather Forecasting (ECMWF). The reanalysis data ERA Interim<sup>7,8</sup> 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 36 years covering the period of 1979-2014. 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).

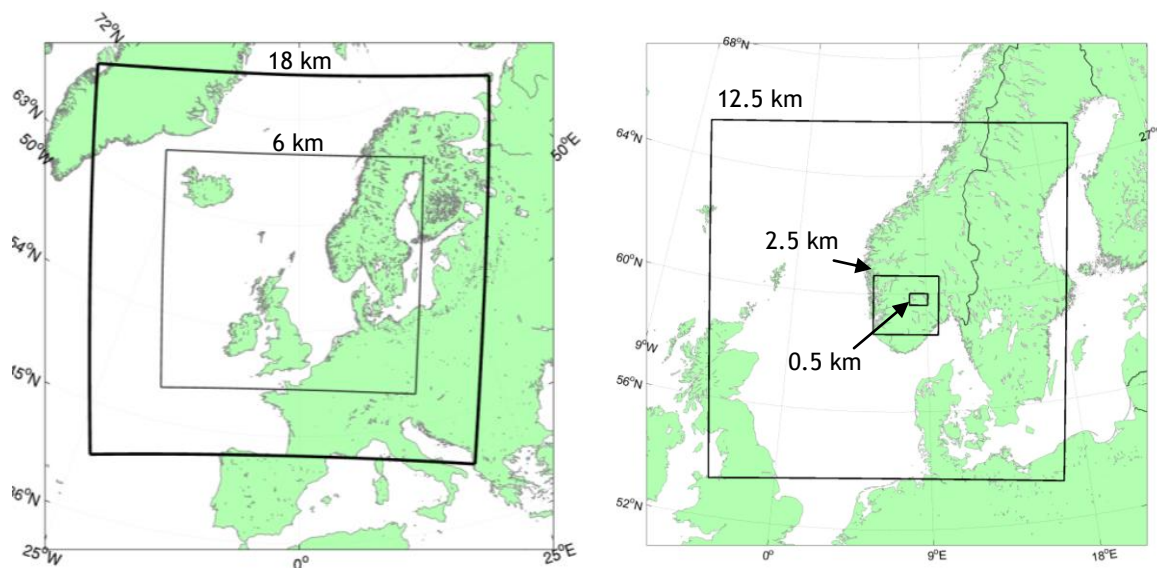
With the current setup, the WRF-model calculates the change in the meteorological fields for each grid-cell for a time step from 2 to 108 seconds in the different domains with increasing time step for lower horizontal resolution. In this way a realistic temporal development of the meteorological variables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

---

<sup>7</sup> 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

<sup>8</sup> <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)<sup>9</sup> 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  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  and  $\alpha_3$  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.<sup>10</sup> This is the scheme that gives the most accurate calculations of liquid water content<sup>11</sup> and is thus recommended for icing calculations. Uncertainties are also related to

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

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

<sup>11</sup> 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).<sup>12</sup>

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.

---

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