



Norwegian  
Meteorological  
Institute

**MET** report

no. 19/2014  
ISSN 2387-4201  
Climate

# **Ekstremverdianalyse av islaster for 420 kV kraftledning Ålfoten – Moskog over Myklebustfjellet og Viksdalsvatn - Høyanger**

Harold Mc Innes  
Bjørn Egil Nygaard (Kjeller Vindteknikk)





Norwegian  
Meteorological  
Institute

# MET report

<b>Title:</b> Ekstremveridianalyse av islaster for 420 kV kraftledning Ålfoten – Moskog over Myklebustfjellet og Viksdalsvatn - Høyanger	<b>Date</b> 2015-01-30
<b>Section:</b> Climate	<b>Report no.</b> no. 19/2014
<b>Author(s):</b> Harold Mc Innes Bjørn Egil 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>
<b>Abstract</b>  <p>I forbindelse med en gjennomgang av tidligere gitte klimalaster ble strekningene Ålfoten – Moskog over Myklebustfjellet og Viksdalsvatn – Høyanger identifisert som utsatte for ising, og det er derfor blitt gjennomført en ekstremveridianalyse av skyising på de mest eksponerte punktene på disse delstrekningene. Mens den tidligere gitte islasten på 16 kg/m over Myklebustfjellet er på den trygge siden, viser det seg at man ligger noe lavt på delstrekningen Viksdalsvatn – Høyanger. Her er dimensjonerende islast satt til 18 kg/m, mens modellanalysen indikerer en 150 års islast på 33 kg/m. Ekstremveridianalysen her er basert på data med 6 km oppløsning, og dermed blir lastene noe høye fordi denne oppløsningen er for grov til å beskrive skjerming fra terrenget omkring ledning. Det er derfor utført modellberegninger med 500 m oppløsning for Viksdalsvatn – Høyanger, noe som gir en 150 års islast på 26 kg/m for det mest utsatte spennet og 20 kg/m for nabospennene. For de øvrige spennene er tidligere gitte islaster tilstrekkelige.</p>	
<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>Innhold</b>	<b>7</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>8</b>
<b>2 Vurdering av islaster ut fra ekstremverdianalyse og sammenstilling med tidligere gitte islaster</b>	<b>11</b>
2.1 Strekningen over Myklebustfjellet på Åfoten – Moskog	11
2.2 Strekningen Viksdalsvatn – Høyanger	12
2.2.1 Forenklet modellanalyse av islaster	12
2.2.2 Islaster for spennene FM60 – FM67 ut fra modellanalyse med høyere oppløsning	12
<b>3 Oppsummering</b>	<b>13</b>
<b>Referanser</b>	<b>14</b>
<b>Vedlegg 1: Kjeller Vindteknikk rapport «Ørskog – Sogndal, Sogn og Fjordane. Islaster for 420 kV kraftledning»</b>	<b>15</b>
<b>Vedlegg 2: Kjeller Vindteknikk rapport «Viksdalsvatnet - Høyanger, Sogn og Fjordane, Analyse av islaster for 420 kV kraftledning»</b>	<b>16</b>



# 1 Innledning

I gjennomgangen av tidligere klimalaster (Mc Innes og Nygaard, 2014) ble de to delstrekningene Ålfoten – Moskog og Moskog – Høyanger i Sogn og Fjordane identifisert som utsatte (Figur 1), og det ble anbefalt å ta en ny vurdering av klimalaster. Det ble foreslått å gjøre en enklere ekstremverdianalyse av islaster på disse to delstrekningene, og resultatene av denne analysen er presentert og vurdert i denne rapporten.

På Ålfoten – Moskog er det strekningen over Myklebustfjellet i grenseområdet mellom Bremanger og Flora kommune som vurderes (Figur 2) mens for Moskog – Høyanger er det strekningen mellom Viksdalsvatnet og Høyanger i Gaular og Høyanger kommune som blir vurdert (Figur 3).

For den mest utsatte delen av strekningen mellom Viksdalsvatnet og Høyanger er det i tillegg til den enklere modellanalysen også utført en mer omfattende modellanalyse med høyere oppløsning for å bedre kunne beskrive skjermingseffekten fra omkringliggende topografi. Dette blir gjort som følge av at de forenklede modellanalysene indikerte at tidligere gitte islast på 18 kg/m over det høyeste punktet var noe lav. Det er spennene mellom mastepunktene FM60 og FM67 som vurderes på grunnlag av den nye modellanalysen.

Det er tatt utgangspunkt i trase og mastepunkter i shapefiler mottatt fra Statnett 15. juli og 4. desember 2014.

Oppdraget er gitt av Statnett etter rammeavtale 2009/75.



Figur 1: Delstrekningene som skal vurderes markert i blått. Ålfoten – Moskog over Myklebustfjellet lengst nord på kartet og strekningen Viksdalsvatn – Høyanger i sør (kartdata er fra Kartverket).



Figur 2: Strekningen over Myklebustfjellet på Ålfoten – Moskog. Det mest utsatt området er markert med rød X (kartdata er fra Kartverket).



Figur 3: Viksdalsvatn – Høyanger. Det mest utsatte området er markert med rød X (kartdata er fra Kartverket).

## 2 Vurdering av islaster ut fra ekstremverdianalyse og sammenstilling med tidligere gitte islaster

Nedenfor følger en vurdering av dimensjonerende islaster i de mest eksponerte områdene på de to delstrekningen på grunnlag av en forenklet ekstremverdianalyse av ising (Vedlegg 1). Med dimensjonerende islast menes islaster som har en returperiode på 150 år. Ekstremverdianalysene er utført for skyising, som forekommer når skyene når helt ned til ledningene ved temperaturer under 0 °C, noe som medfører at ledningene blir eksponert for underkjølte skydråper. Det er denne formen for ising som gir opphav til de største islastene i høyfjellet. Datagrunnlaget for analysene er et datasett med 6 km oppløsning som strekker seg over perioden 1979 – 2014. Dataene er høydekorrigert ettersom 6 km er en noe grov oppløsning for å beskrive topografien. For strekningen Viksdalsvatn – Høyanger er det i tillegg utført modellanalyser med 500 m oppløsning (Vedlegg 2).

### 2.1 Strekningen over Myklebustfjellet på Ålfoten – Moskog

Denne strekningen ligger i Bremanger og Flora kommune (Figur 2), og den delen av strekningen som er mest utsatt ligger ved kommunegrensen på Myklebustfjellet rundt 650 moh. Den tidligere gitte islasten er i dette området 16 kg/m og utfra en vurdering av topografien kan området karakteriseres som høyt eksponert for ising (Mc Innes og Nygaard, 2014). Dimensjonerende vindlast er satt til 48 m/s.

Ekstremverdianalysen av skyising (Vedlegg 1) indikerer en 150 års last på drøyt 5 kg/m for en ledning orientert i nord – sør retning slik ledningen tilnærmet er på denne strekningen. Dimensjonerende islaster i dette området kan med andre ord ikke tilskrives skyis, men ising ved at våt snø fester seg ledningen. En tommelfingerregel sier forholdet mellom 150 års islast fra våt snø og 50 års døggnedbør er 1 til 10. Ser man på 50 års nedbør fra stasjonene Svelgen og Ålfoten, som er henholdsvis rundt 130 og 110 mm tilsier dette en dimensjonerende islast på rundt 12 kg/m. Den tidligere gitte islasten på 16 kg/m var satt som følge av at området var identifisert som eksponert og at det var knyttet stor usikkerhet til islastene.

## 2.2 Strekingen Viksdalsvatn – Høyanger

### 2.2.1 Forenklet modellanalyse av islaster

Delstrekingen ligger mellom Viksdalsvatn i Gaular kommune og Høyanger i Høyanger kommune (Figur 3), og det er området nordøst for Botnafjellet som er mest eksponert for ising, med dimensjonerende islast på 18 kg/m fra tidligere. Dimensjonerende vindlast er satt til 50 m/s. I det mest utsatte området ligger ledningen ca 1100 moh (Figur 3) og er tilnærmet nord – sør orientert. Ekstremverdianalysene for skyis (Vedlegg 1) gir en 150 års islast på vel 33 kg/m for en ledning med denne orienteringen i den aktuelle høyden. Analysen viser at det er store vertikale gradienter i isingsforholdene ettersom en tilsvarende ledning i 1050 moh vil ha en 150 års islast på ca 22 kg/m, mens den ved 1000 moh vil være 13.3 kg/m. Analysen indikerer at den tidligere gitte islasten på 18 kg/m har returperiode på 10 år, og derfor er noe lav.

### 2.2.2 Islaster for spennene FM60 – FM67 ut fra modellanalyse med høyere oppløsning

For å kvantifisere skjermingseffekten fra omkringliggende terreng er atmosfæremodellen WRF kjørt med 500 m oppløsning for episoder med høy isingsintensitet og sammenstilt med tilsvarende data med 6 km oppløsning, som var grunnlaget for forenklet modellanalyse. Dette arbeidet er nærmere beskrevet i Vedlegg 2. Skjermingen fra terrenget rundt traseen er blitt kvantifisert, og når det tas høyde for denne skjermingseffekten blir 150 års islasten ved den mest utsatte delen av traseen noe lavere enn det som kom frem i den forenklede modellanalysen.

Ved 1100 moh, som er høyden ved traseens høyeste punkt, vil en ledning orientert i nord – sør retning få en 150 års islast på 24.8 kg/m, mens en ledning orientert fra sørøst mot nordvest får en 150 års islast på 28.2 kg/m. Den aktuelle traseen er tilnærmet nord – sør orientert på det høyeste punktet med en liten komponent i sørøst – nordvest retning, og modellanalysene gir en 150 års islast på 27.5 kg/m for denne retningen. Spennet BM63 – BM65 når så vidt opp i 1100 moh, men mesteparten ligger litt lavere slik at 150 års islast estimeres til 26 kg/m her. Resultatene fra modellanalysen viser at det er store vertikale gradienter i islasten, og de indikerer at for en ledning i nord – sør retning vil 150 års islast være 16.8 kg/m ved 1050 moh og 10 kg/m 1000 moh. Derfor vil lastene reduseres til 20 kg/m for spennene før og etter BM63 – BM65, og for spennene FM60 – FM62 og BM66 – FM67 beholdes tidligere gitte islaster (Nygaard, 2009).

Tabell 1: Islaster med 150 års returperiode for spennene mellom FM60 og FM67

Mastnummer	Islast (kg/m)
FM60 – BM61	14
BM61 – FM62	18
FM62 – BM63	20
BM63 – BM65	26
BM65 – BM66	20
BM66 – FM67	14

### 3 Oppsummering

Det er utført en modellanalyse for skyising for de mest utsatte områdene på delstrekningene Ålfoten – Moskog og Viksdalsvatn – Høyanger. På Ålfoten – Moskog var ledningens høyeste punkt over Myklebustfjellet (ca 650 moh) identifisert som utsatt, men modellanalysen indikerer at skyising ikke er et stort problem her og at dimensjonerende islast vil være knyttet til våt snø. Den tidligere gitte islasten på 16 kg/m er på den trygge siden.

Delstrekningen Viksdalsvatn – Høyanger er oppe i 1100 moh nord for Høyanger, og modellanalysene gir her 150 års islast på 33 kg/m, mens den fra før er satt til 18 kg/m. Modellanalysen beskrevet her er basert på simuleringer med en oppløsning på 6 km, og det er deretter foretatt høydejusteringer av de variable som brukes til å beregne skyising. En oppløsning på 6 km er imidlertid for grov til å ta høyde for skjerming fra terrenget rundt ledningen, noe som betyr at 33 kg/m er noe høyt. Det er derfor gjennomført en mer omfattende modellanalyse som inkluderer beregninger med høyere oppløsning og dermed også skjermingseffekter fra topografien. Ut fra denne analysen estimeres islast med 150 års returperiode til 26 kg/m for det mest utsatte spennet, og 20 kg/m for nabospennene på begge sider. De øvrige spennene beholder tidligere gitte islaster.

## Referanser

Mc Innes, H., Nygaard, B. E. K., (2014) Gjennomgang av tidligere klimalaster.  
Meteorologisk institutt rapport no. 7/2014

Nygaard, B.E.K. (2009), 420 kV Ørskog – Fardal. Lastrapport for strekningen Moskog –  
Høyanger. Meteorologisk institutt rapport

**Vedlegg 1: Kjeller Vindteknikk rapport «Ørskog – Sogndal, Sogn og Fjordane. Islaster for 420 kV kraftledning»**





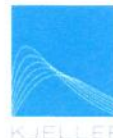
**KJELLER**  
VINDTEKNIKK

# Ørskog - Sogndal, Sogn og Fjordane

Islaster for 420 kV kraftledning

Rapport: KVT/REB/2014/R074





Rapportnummer <b>KVT/REB/2014/R074</b>	Dato 09.10.2014
Rapporttittel <b>Ørskog - Sogndal, Sogn og Fjordane</b> Islaster for 420 kV kraftledning	Klassifisering Begrenset til kunde Utgave nummer 1
Kunde <b>Meteorologisk Institutt</b>	Antall sider 12 + vedlegg
Kundens referanse <b>Harold McInnes</b>	Status Endelig

**Sammendrag**

Rapporten er laget for å gjøre en ny vurdering av islaster for to områder på 420 kV ledningen Ørskog - Sogndal. Analysene er basert på meteorologiske modeller samt norsk elektroteknisk norm (NEK 445:2009).

Omkring ledningstraseens høyeste punkt på 1100 meter over havet forventes høye islaster. Analysene viser at dette området er utsatt for betydelig ising fra skyising med 150-års returverdier opp mot 40 kg/m. De beregnede islastene varierer imidlertid med ledningens orientering. Islaster med returtid 150 år for spennene fra M62 - M66 beregnes til 30 - 35 kg/m. Ved Myklebustfjellet beregnes vesentlig lavere laster med 150-års verdier opp mot 8 kg/m.

Islastene er beregnet for en fritt roterende simplex ledning med diameter 3 cm.

**Forbehold**

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

**Revisjonshistorie**

Utgave	Dato	Antall eksemplarer	Kommentar	Distribusjon
1	09.10.2014	Kun elektronisk		Pdf

	Navn	Dato	Signatur
Utført av	Rolv Erlend Bredesen	09.10.2014	<i>Rolv Erlend Bredesen</i>
	Bjørn Egil Nygaard		<i>Bjørn Egil Nygaard</i>
Kontrollert av	Johannes Lindvall	09.10.2014	<i>Johannes Lindvall</i>
Godkjent av	Lars Tallhaug	09.10.2014	<i>Lars Tallhaug</i>

# Innholdsfortegnelse

---

<b>INNHALDSFORTEGNELSE .....</b>	<b>2</b>
<b>1      INNLEDNING .....</b>	<b>3</b>
<b>2      METODE OG DATA .....</b>	<b>6</b>
2.1   DATA .....	6
2.2   ISINGSBEREGNING .....	6
2.2.1 Skyising.....	6
2.3   EKSTREMVERDIANALYSE .....	7
<b>3      BEREGNING AV KLIMALASTER.....</b>	<b>8</b>
3.1   SKYISING .....	8
3.1.1 Skyising ved BM63 nord for Høyanger 1100 moh.....	9
3.1.2 Skyising ved Myklebustfjellet .....	11
<b>4      REFERANSER.....</b>	<b>12</b>
<b>VEDLEGG A: WRF-MODELLEN .....</b>	<b>13</b>

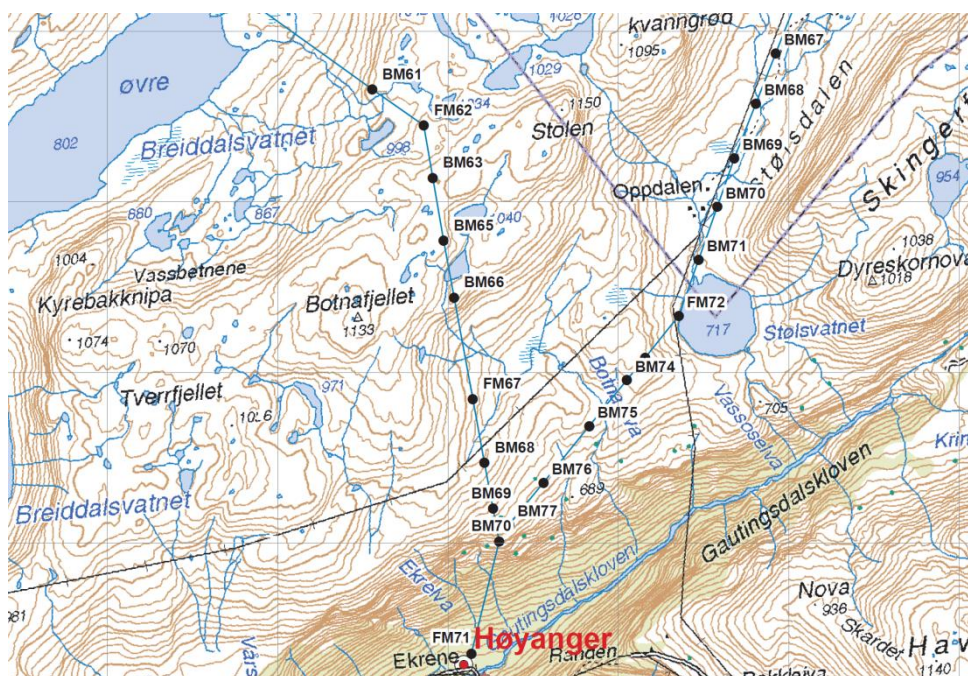
# 1 Innledning

Kjeller vindteknikk har på oppdrag fra Meteorologisk Institutt utført en analyse av islaster i forbindelse med en gjennomgang av de mest utsatte delstrekningene på Statnetts nye ledningsprosjekter. Denne rapporten omhandler to delstrekninger på 420 kV kraftledning fra Ørskog - Sogndal.

Den første strekningen er i området nord for Høyanger hvor ledningstraseen ligger høyt over havet, med høyeste punkt på opp mot 1100 meter over havet (moh.) (Figur 1 og Figur 3). Ledningstraseen er orientert omkring nord-sør i det mest utsatte området, øst av Botnafjellet (mast 62 -66). Videre nordover er ledningen orientert i retning sørøst-nordvest og fremføres i terrenghøyde mellom 900-1000 moh. (i kommunene Høyanger og Gaular).

Den andre strekningen som er analysert er over Myklebustfjellet mellom Flora og Bemanger i Sogn og Fjordane (se figur 2). Her har vi analysert isingsforholdene omkring mast 164 som ligger på ca 650 moh.

Modelldataene som anvendes i analysen har en oppløsning på 6 km x 6 km og dekker perioden 1979 - 2013 med én times tidsoppløsning. For å bedre representere lokale vindvariasjoner så har data fra en ett års lang simulering med oppløsning på 1 km x 1 km blitt benyttet. Basert på samtidige data har vinden i 6 km simuleringen blitt skalert mot vinden i simuleringen med 1 km x 1 km oppløsning.



Figur 1 Oversikt over ledningstrasé ved høyeste punkt nord for Høyanger. I kartet vises 1km grid ruter og høydekoter med ekvidistanse 20 m. Mast BM63 ligger tett opptil 1100 m (1080-1100) med retning nesten nord sør. Øvrige master ligger i sør-øst nord-vest retning i ca 1000 moh. nordvest for kartutsnittet.



Figur 2 Oversikt over ledningstrasé ved kommunegrensene mellom Flora og Bremanger vest for Myklebustfjellet. Mast 164 ligger på ca 650 moh. I kartet vises 1 km ruter og høydekoter med ekvidistanse 20 m. Kartet er orientert 45 grader (med klokken) i forhold til nord.



**Figur 3: Bilde i retning mot vest-nordvest omtrent fra traseens høyeste punkt ved mast BM63, Foto: Bjørn Egil Nygaard.**

## 2 Metode og data

---

### 2.1 Data

Beregningene er basert på meteorologiske data generert med en numerisk værmodell. Modellen heter WRF (Weather Research and Forecasting model) og er beskrevet i Vedlegg A. Modelldataene er fordelt i et horisontalt gitter med gitteravstand på 6 km, og strekker seg over perioden 1979 - 2013. Data er hentet ut for de fire modellpunktene som ligger nærmest mast BM63 og fire punkter som ligger nærmest mast 164 (Myklebustfjellet). Dataene har en tidsoppløsning på 1 time og inneholder alle nødvendige parametere for å beregne vind og islaster.

Modellert vind, temperatur, luftfuktighet, nedbør, snøfuktighet, konsentrasjonen av underkjølt skyvann samt konsentrasjonen av underkjølt yr er hentet ut som tidsserier fra WRF for alle de fire punktene. Det er også hentet ut tidsserier av vind fra simuleringen med 1 km x 1 km oppløsning for de to punktene nærmest mast BM 63 og 164, som benyttes for å korrigere vinden i 6 km dataene. I tillegg til korrigeringen av vinden er det foretatt en høydejustering av temperatur- og skyvariabler til virkelig terrenghøyde før isingen er beregnet.

De vindkorrigererte og høydejusterte modelldataene er brukt som inngangsdata til akkumulasjonsmodeller for skyising og våtsnø.

### 2.2 Isingsberegning

Kraftledningen fremføres i et varierende terreng og vil først og fremst være eksponert for skyising og det er derfor gjort beregninger for denne isingstypen i denne rapporten. Våtsnø vil også forekomme men maksimale laster som følge av våtsnø vil være lavere enn tilsvarende fra skyising.

#### 2.2.1 Skyising

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

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

## 2.3 Ekstremverdianalyse

Det benyttes en statistisk analyse for å bestemme ekstremverdiene i seriene av modellerte is- og vindlaster fra WRF. 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 ekstremverdiberegningen er dokumentert i Coles (2001).



## 3 Beregning av klimalaster

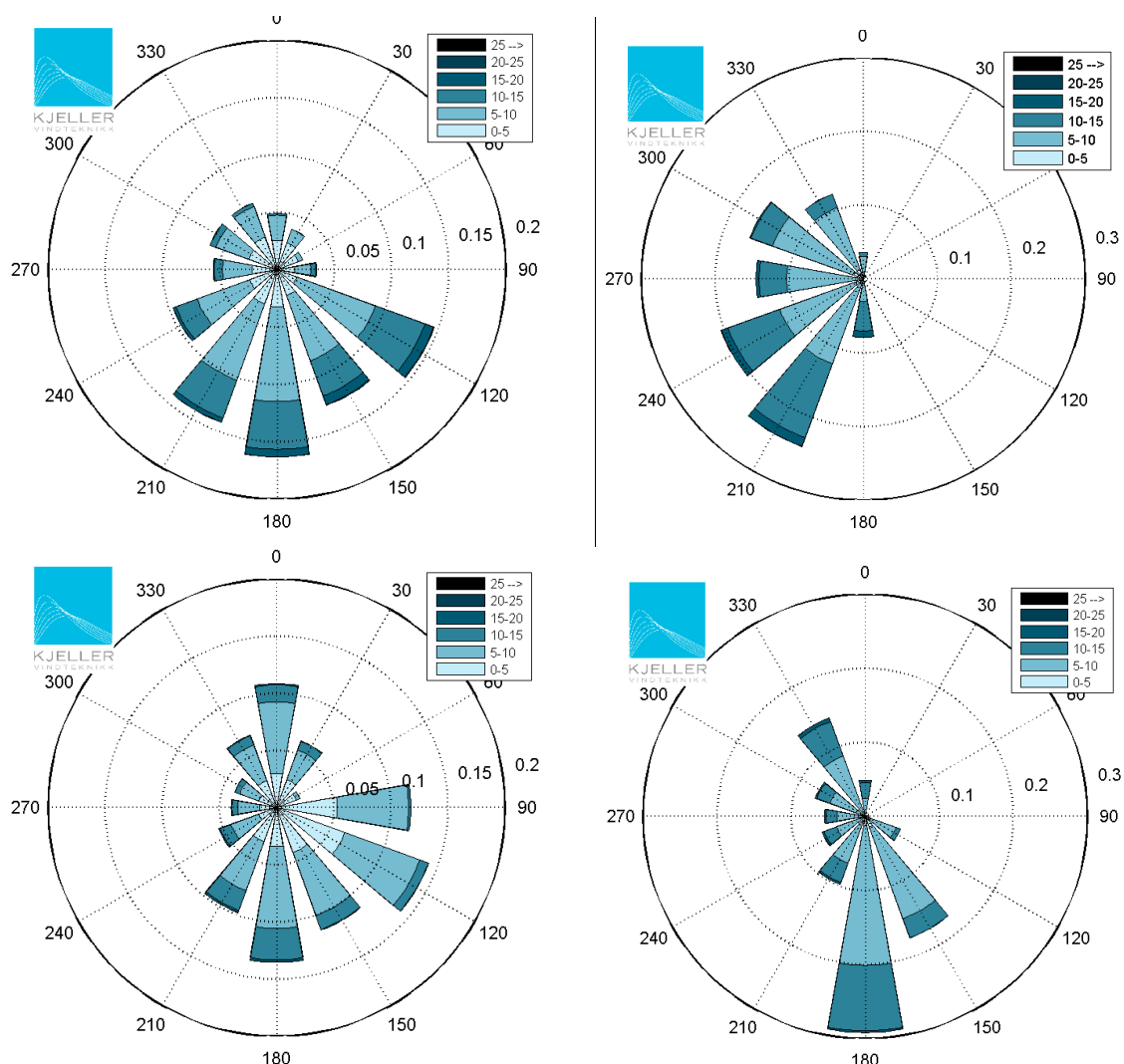
---

### 3.1 Skyising

Skyising er beregnet for traseens høyeste punkt, BM63 hvor terrenghøyden er 1100 moh. samt for mastepunkt 164 med terrenghøyde 650 moh.

Øvre venstre panel i Figur 4 viser vindklimaet under hele simuleringsperioden for gridpunktet som ligger nærmest traseens høyeste punkt, og viser at vind fra øst-sørøst til vest-sørvest er de vanligste vindretningene for mastepunkt BM63 ved Høyanger. Det øvre høyre panelet viser det at skyising i hovedsak forekommer ved vind fra for nord-nordvest til sør-sørvest. Disse sterkeste vindretningene har en høy normalkomponent på ledningstraseen, og gir derfor raskere isavsetning på linene.

For Myklebustfjellet (mastepunkt 164) forekommer ising mest for sørlig men også for nord-nordvest og sør-sørøstlig vind (Figur 4, nedre høyre panel). Vindens normalkomponent på ledningstraseen ved mast 164 ved Myklebustfjellet er svakere enn ved BM63 i Høyanger.



Figur 4: Øverst: mast BM63 1100 moh. ved Høyanger. Under: Mast 164 med Myklebust fjellet 650 moh. Venstre: Vindrose for 10 min middelvind i 20 m høyde for perioden 1979 - 2014. Hentet ut fra modellpunkt i 950 moh. og høydejustert til 1060 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.

### 3.1.1 Skyising ved BM63 nord for Høyanger 1100 moh.

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 1 viser beregnede returverdier for skyising som funksjon av ledningsretningen. Ekstremverdiene er beregnet ved bruk av GEV metoden som beskrevet i Kapittel 2.3. Da dataserien har en begrenset lengde på 35 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.

Fra Tabell 1 ser vi at det er beregnet relativt høye islaster, og at de varierer betydelig med orienteringen til linene. Modellen gir maksimal 150-års islast på 39 kg/m for en ledning i sørøst-nordvest retning og en 150-års islast på 33.7 kg/m for en ledning nord-sør, som er tilnærmet retningen til traseen i dette området. Tabell 2 viser at beregnede islaster øker raskt med høyden. Økningen i islaster fra 1000 moh. til 1100 moh. er omtrent en faktor 2.5 for ledninger i ulike retninger.

Tabell 1: Beregnede returverdier for islast fra skyising (kg/m) i ulike linjeretninger. Tabell viser returverdier 1100 moh. nord for Høyanger ved mast BM63. \*150-års verdier er lik 50-års verdier multiplisert med en overgangsfaktor på 1.25.

Linjeretning	Returverdier skyising (kg/m)						
	2 år	3 år	5 år	10 år	25 år	50 år	150 år
N-S	9.9	12.0	14.5	18.0	22.9	27.0	33.7*
NØ-SV	6.1	7.4	8.9	11.2	14.5	17.4	21.8*
Ø-V	6.2	7.5	9.3	11.9	16.2	20.2	25.2*
SØ-NV	11.1	13.7	16.8	20.9	26.6	31.2	39.0*

Tabell 2: Beregnede 150-års verdier for islast fra skyising (kg/m) i ulike linjeretninger basert på modelldata løftet til ulike høyder over havet.

Linjeretning	150 års returverdier for skyising (kg/m)		
	1000 moh.	1050 moh.	1100 moh.
N-S	13.3	22.2	33.7
NØ-SV	8.6	13.3	21.8
Ø-V	11.1	16.5	25.2
SØ-NV	15.8	25.1	39.0

### 3.1.2 Skyising ved Myklebustfjellet

Fra Tabell 3 ser vi at det er beregnet relativt lave islaster ved mast 164 med Myklebustfjellet. Modellen gir en maksimal 150-års islast på 7.8 kg/m for en ledning i sørøst-nordvest retning og en 150-års islast på 5.1 kg/m for en ledning nord-sør, som er traseens retning i dette området. Tabell 4 viser at beregnede islaster øker raskt med høyden. Økningen i islaster fra 600-650 er omtrent en faktor 2 for en ledning i retning nord-sør.

Tabell 3: Beregnede returverdier for islast fra skyising (kg/m) i ulike linjeretninger. Tabell viser returverdier ved mast 164 i 650 moh. ved Myklebustfjellet vest for Ålfotbreen. \*150-års verdier er lik 50-års verdier multiplisert med en overgangsfaktor på 1.25.

Linjeretning	Returverdier skyising (kg/m)						
	2 år	3 år	5 år	10 år	25 år	50 år	150 år
N-S	1.1	1.4	1.7	2.3	3.2	4.1	5.1*
NØ-SV	1.8	2.1	2.5	3.1	4.0	4.8	6.0*
Ø-V	2.7	3.1	3.7	4.3	5.2	5.9	7.4*
SØ-NV	1.7	2.2	2.8	3.7	5.0	6.3	7.8*

Tabell 4: Beregnede 150-års verdier for islast fra skyising (kg/m) i ulike linjeretninger basert på modelldata løftet til ulike høyder over havet.

Linjeretning	150 års returverdier for skyising (kg/m)		
	550 moh.	600 moh.	650 moh.
N-S	1.1	2.3	5.1
NØ-SV	2.8	4.8	6.0
Ø-V	3.7	6.5	7.4
SØ-NV	2.4	3.8	7.8

## 4 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.

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

# 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)<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 Protection (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 hours. FNL is an operational assimilation model that incorporates all available observation

<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 Zwiefhofer 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>

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 ERA Interim dataset is used as lateral boundary conditions, and 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.

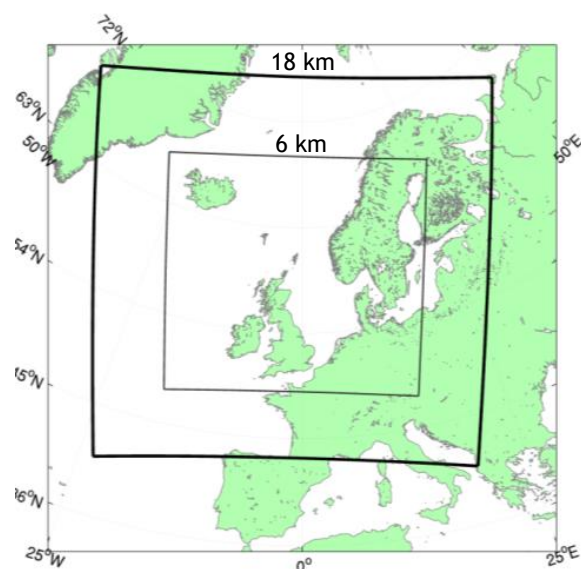


Figure B-1: Model set up for WRF simulations.

<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>

## 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  $a_1$ ,  $a_2$  and  $a_3$  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 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

<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.



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

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>

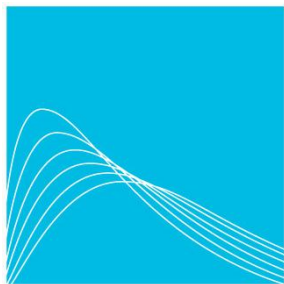
When  $Q$  becomes positive, melting will start. Often during melting episodes, the ice does not melt gradually away such as described by the energy balance model. When the melting is initialized the ice will often be removed more quickly by shedding, particularly from a rotating blade. This ice shedding 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, IWALS, Andermatt 2009.

**Vedlegg 2: Kjeller Vindteknikk rapport «Viksdalsvatnet  
- Høyanger, Sogn og Fjordane, Analyse av islaster for  
420 kV kraftledning»**

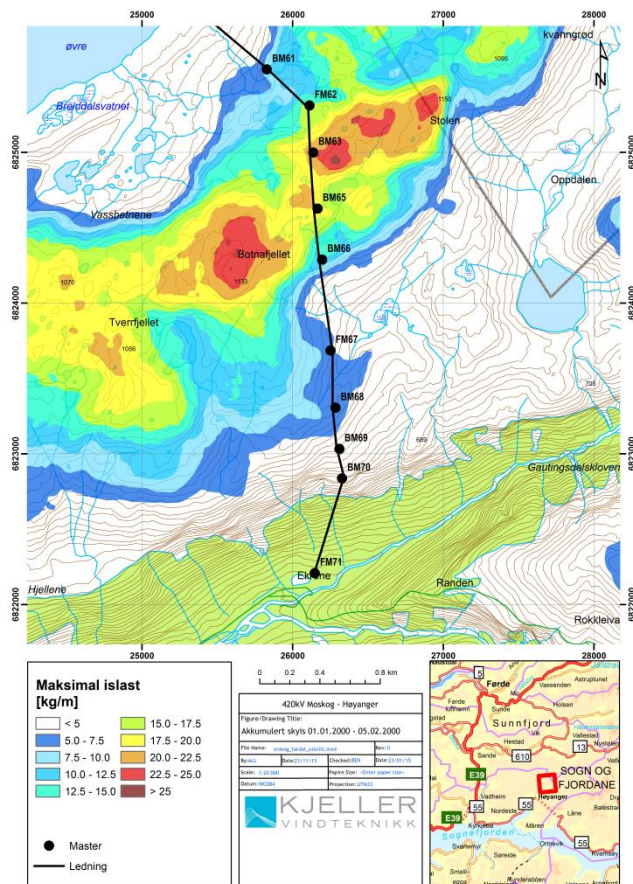


KJELLER  
VINDTEKNIKK

# Viksdalsvatnet - Høyanger, Sogn og Fjordane

Analyse av islaster for 420 kV kraftledning

Rapport: KVT/BEN/2015/R013



Rapportnummer <b>KVT/BEN/2015/R013</b>	Dato 30.1.2015
Rapporttittel <b>Viksdalsvatnet - Høyanger, Sogn og Fjordane</b> Analyse av islaster for 420 kV kraftledning	Klassifisering Begrenset til kunde Utgave nummer 1
Kunde <b>Meteorologisk Institutt</b>	Antall sider 12 + vedlegg
Kundens referanse <b>Harold McInnes</b>	Status Endelig

**Formål**

Rapporten er laget i forbindelse med en ny vurdering av islastene for 420 kV kraftledning over høvfjellsområdet mellom Viksdalsvatnet og Høyanger. Det er tidligere utført en foreløpig analyse av dette området (rapport KVT/REB/2014/R074) som indikerte 150-års islaster betydelig høyere enn det ledningen opprinnelig var dimensjonert for ved traseens høyeste punkt (1100 moh.). Den foreløpige analysen var basert på meteorologiske data med 6 km x 6 km oppløsning.

Hensikten med denne rapporten er å gjøre en mer detaljert studie av islastene ved hjelp av simuleringer med 500 m x 500 m oppløsning. Basert på resultater fra disse simuleringene korrigeres de beregnede returverdiene, og resultatene danner et bedre grunnlag for å bestemme islaster spenn for spenn.

Oppdraget er gitt av Statnett SF til Meteorologisk Institutt, som videre har bestilt denne rapporten fra Kjeller Vindteknikk.




Rapporten er kvalitetssikret og gjennomgått etter Kjeller Vindteknikks kvalitetssikringssystem.

**Forbehold**

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

**Revisjonshistorie**

Utgave	Dato	Antall eksemplarer	Kommentar	Distribusjon
1	30.1.2015	Kun elektronisk		Pdf

	Navn	Dato	Signatur
Utført av	Bjørn Egil Nygaard	30/1-2015	
Kontrollert av	Johannes Lindvall	30/1-2015	
Godkjent av	Lars Tallhaug	30/1-2015	

# 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 .....	5
2.4 EKSTREMVERDIANALYSE .....	6
<b>3 FINSKALA SIMULERINGER .....</b>	<b>7</b>
3.1 FINSKALA ISINGSKART .....	8
<b>4 BEREGNING AV RETURVERDIER .....</b>	<b>10</b>
<b>5 REFERANSER .....</b>	<b>12</b>
<b>VEDLEGG A: JUSTERING AV WRF6KM</b>	
<b>VEDLEGG B: ISINGSKART</b>	
<b>VEDLEGG C: BESKRIVELSE AV WRF-MODELLEN OG ISINGSBEREGNINGENE</b>	

# 1 Sammendrag

420 kV kraftledningen Ørskog - Fardal når sitt høyeste punkt i fjellpartiet mellom Viksdalsvatnet og Høyanger. Ved mast BM63 når traseen en høyde på 1100 moh, og det er tidligere utført en foreløpig analyse av islaster i dette området (rapport KVT/REB/2014/R074) som indikerte betydelig skyising med 150-års islaster omkring 30 - 35 kg/m. Disse analysene var basert på høydejusterte data fra en modell med 6 km x 6 km oppløsning.

I denne rapporten har vi gjort en mer detaljert beregning av skyising for dette området ved hjelp av simuleringer med oppløsning på 500 m x 500 m. De 5 episodene som ga høyest islaster i perioden 1979 - 2014 er identifisert og simulert med 500 m x 500 m modellen.

Resultatene viser at mengden skyvann reduseres som følge av bedre beskrivelse av terrengets skjerming, når modellens oppløsning økes. Dette reduserer islastene betydelig. Samtidig viser 500 m x 500 m modellen at vinden forsterkes noe lokalt over det høyeste partiet, hvilket isolert sett fører til økt ising. Når mengden skyvann og vindhastigheten korrigeres i 6 km x 6 km modellen reduseres islastene med ca 25 %.

Tabell 1-1 viser at beregnede islaster øker raskt med høyden, og at islastene varierer betydelig avhengig av ledningsretningen. Beregnet 150-års islast for den faktiske ledningsretningen i 1100 moh. er 27.5 kg/m.

Tabell 1-1: Beregnede 150-års verdier for islast fra skyising (kg/m) i ulike linjeretninger. Verdiene er skalert fra beregnede 50 års verdier med en overgangsfaktor på 1.25, som er hentet fra NEK445:2009.

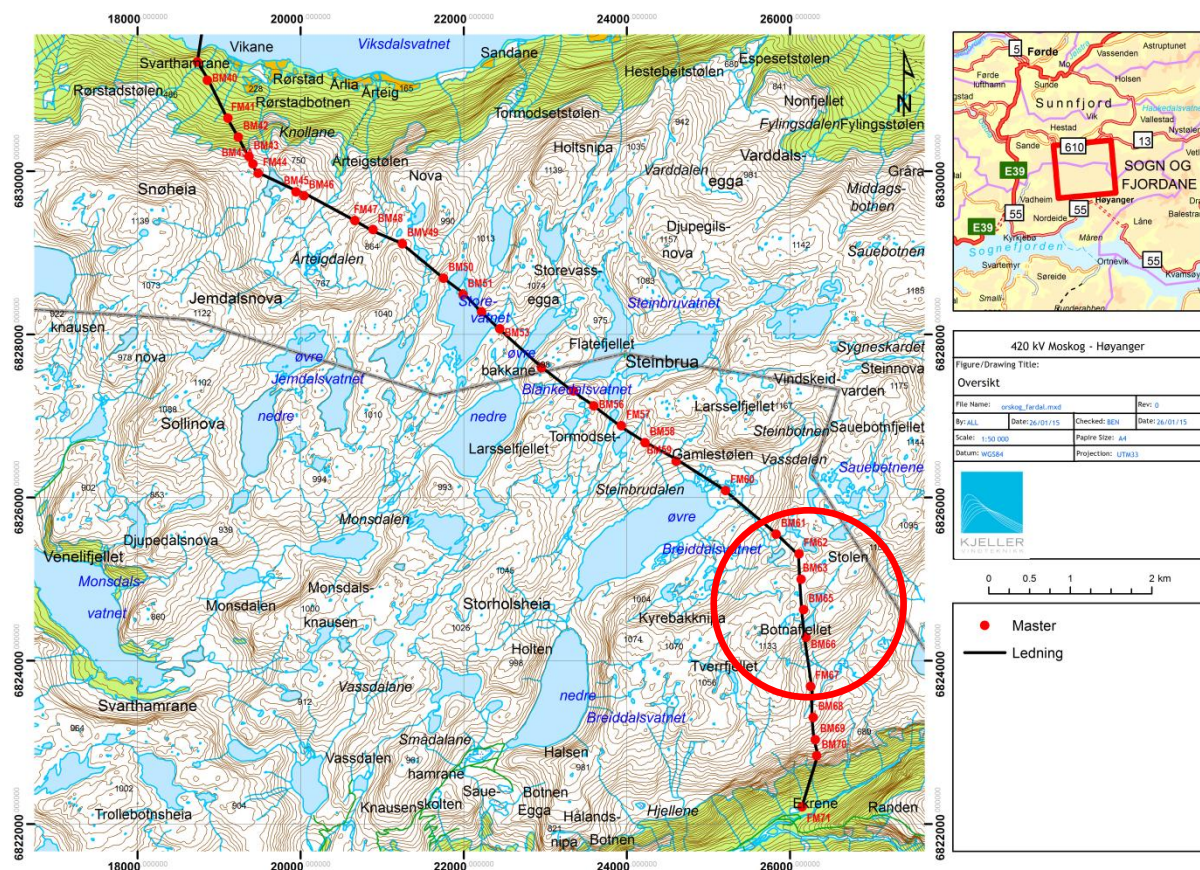
Linjeretning	150 års returverdier for skyising (kg/m)		
	1000 moh.	1050 moh.	1100 moh.
N-S	10.0	16.8	24.8
NØ-SV	6.2	9.7	16.0
Ø-V	8.4	12.3	17.5
SØ-NV	11.9	18.6	28.2

## 2 Metode og data

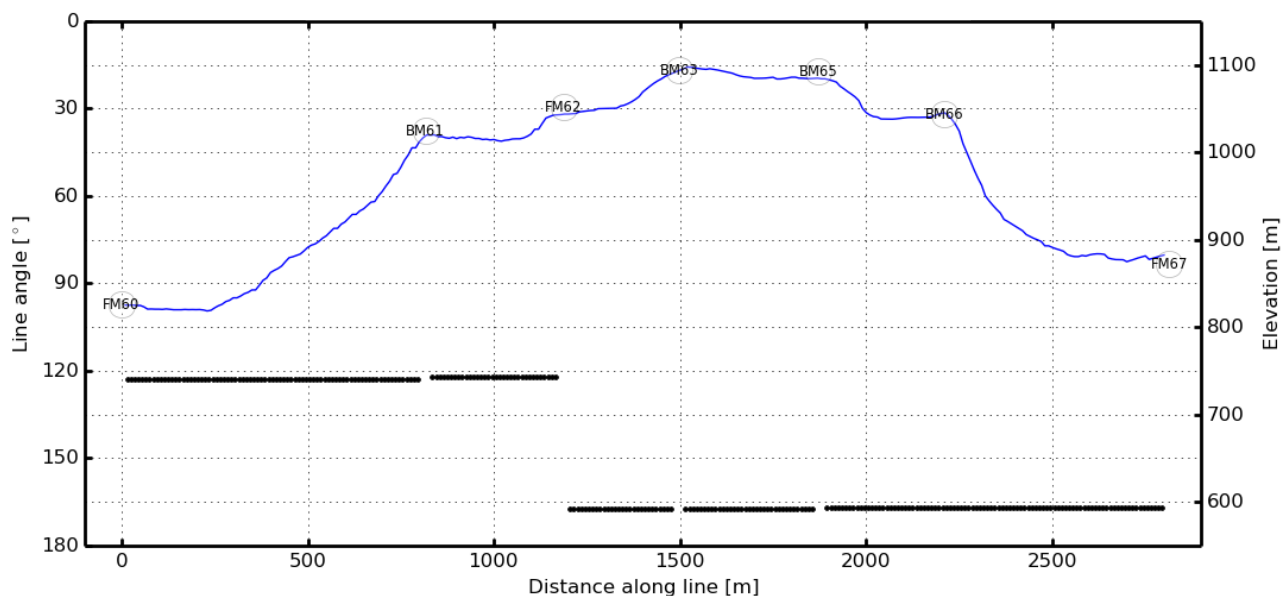
### 2.1 Ledningstrasé

Denne rapporten omhandler et høvfjellsområde mellom Viksdalsvatnet og Høyanger hvor 420 kV kraftledningen Ørskog - Fardal fremføres. Rapporten fokuserer i første rekke på området nær Botnafjellet, ved mastene BM 61 - FM 67, som angitt med rød sirkel på trasekartet i Figur 2-1.

Høydeprofilen i Figur 2-2 viser at MB63 er lokalisert omtrent på 1100 moh. og at MB63 - BM56 er det høyestliggende spennet. Den sorte streken viser at dette spennet er orientert i en retning på 167 grader. Her ligger traseen relativt åpent mot vest og sørvest, men det er en viss lokal skjerming bak Botnafjellet.



Figur 2-1 Oversikt over ledningstraseen over fjellpartiet nord av Høyanger. Rød sirkel markerer området omkring traseens høyeste parti.



Figur 2-2 Høydeprofil for spennene FM60 - FM67. Svart linje angir ledningstraseens orientering relativt til nord-sør.

## 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 C. 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). Disse dataene er de samme som lå til grunn for de foreløpige analysene i rapport KVT/REB/2014/R074.

For å øke detaljnivået i analysene har vi utført simuleringer av et utvalg kortere perioder med en oppløsning på 500 m x 500 m (heretter kalt WRF500m). Resultatene fra WRF500m simuleringene benyttes til å korrigere WRF6km dataene før disse benyttes for å bestemme returverdier for islaster etc. Sammenlikning mellom de to modellsimuleringene er gitt i Vedlegg A.

## 2.3 Isingsberegning

Kraftledningen fremføres her i et eksponert høyfjellsterrang 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 kollidere 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-standarden for atmosfærisk ising på konstruksjoner, ISO 12494, og er beskrevet i Vedlegg C. 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 Ekstremverdianalyse

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 ekstremverdieregningen er dokumentert i Coles (2001).

### 3 Finskala simuleringer

Traseens høyeste punkt ligger på snaue 1100 moh, og er eksponert for ising fra flere retninger. Ved hjelp av finskalasimuleringene studeres i hvor stor grad omkringliggende terreng på nær og fjern skala skjermer og reduserer islastene for ledningen, samt i hvor stor grad vinden forsterkes over toppen. Ved å sammenlikne meteorologiske data fra WRF500m og WRF6km får vi et estimat på en skjermingsfaktor for skyvann, og en forsterkningsfaktor for vindhastighet. Faktorene legges inn i WRF6km dataene før disse benyttes videre til å bestemme returverdier for skyising.

Basert på en analyse av rådataene fra WRF6km er de 5 enkelthendelsene som førte til høyest islaster simulert med høy oppløsning. Disse er listet i Tabell 1.

Tabell 3-1. Isingsepisoder som er simulert med WRF500m. Maksimal isvekt fra WRF6km er beregnet på et referanseobjekt i 1052 moh.

Episode	Fra dato	Til dato	Maks isvekt (kg/m) WRF6km ukorrigert
#1	16.1.2011	10.2.2011	28
#2	15.1.2005	7.2.2005	14.5
#3	1.2.2002	18.2.2002	15
#4	1.1.2000	5.2.2000	34
#5	5.1.1993	29.1.1993	15

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.

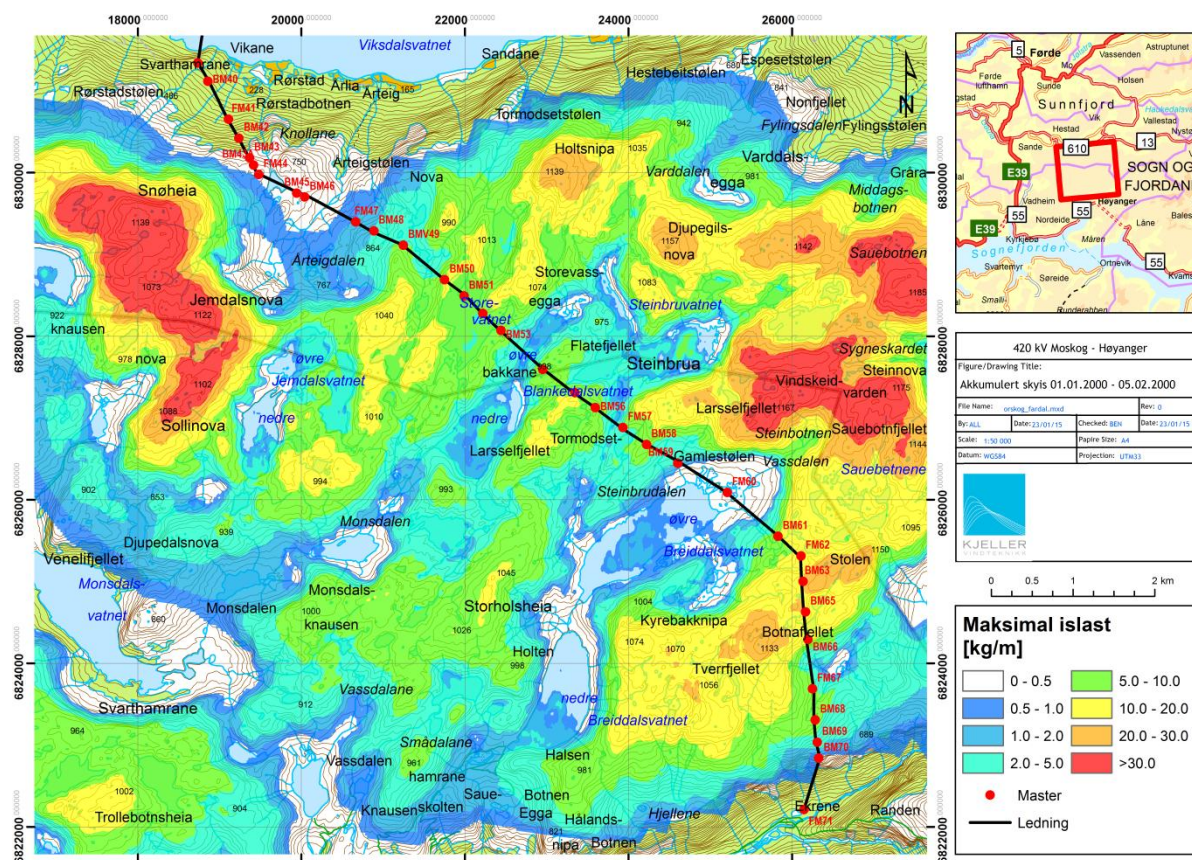
### 3.1 Finskala isingskart

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.

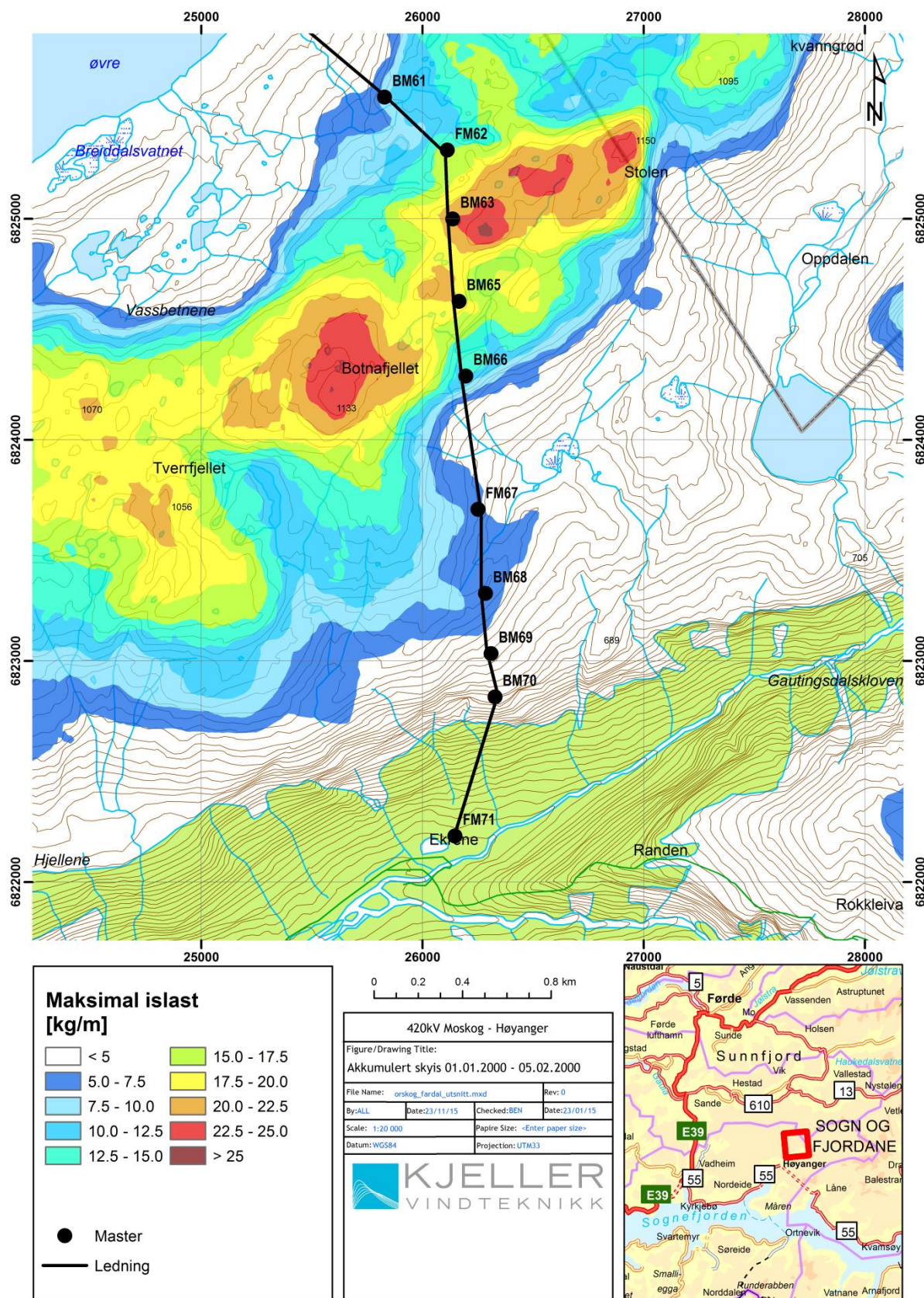
Kartet i Figur 3-1 viser et eksempel på en periode med ising fra sørvest (Episode #4). Vi ser at skyising vil kunne forekomme i hele dette fjellpartiet men at de høyeste lastene langs ledningstraseen forventes i området nær Botnafjellet (BM 61 - FM 67). Utsnittet av dette området i Figur 3-2 viser at det er særlig spennet BM63 - BM 65 som utsettes for høye islaste. Kartet viser imidlertid at det er en viss skjerming bak Botnafjellet, hvor islastene er høyere enn i ledningstraseen.

Tilsvarende isingskart for alle simuleringene finnes i Vedlegg B.

Islastene i kartene representerer enkelthendelser, og kan ikke knyttes til returperioder uten en kobling mot lange dataserier. Dette gjøres i Kapittel 5. 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 01.01.2000 - 05.02.2000.

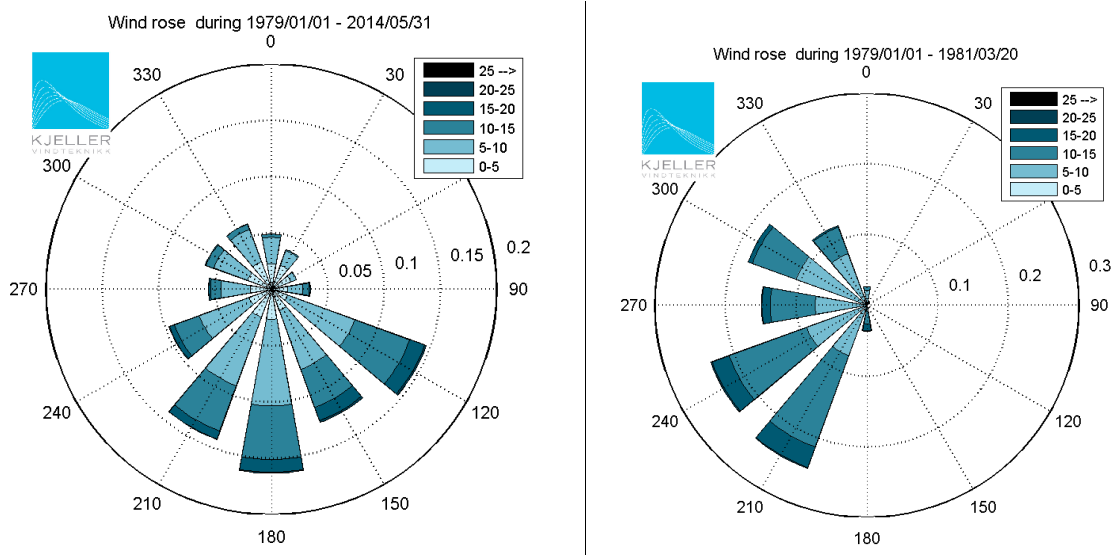


Figur 3-2: Simulert maksimal akkumulert islast (kg/m) på et referanseobjekt for perioden 01.01.2000 - 05.02.2000.

## 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 vindklimaet under hele WRF6km simuleringssperioden for gridpunktet som ligger nærmest traseens høyeste punkt, og viser at vind fra øst-sørøst til vest-sørvest er de vanligste vindretningene ved mastepunkt BM63. Høyre vindrose viser det at skyising i hovedsak forekommer ved vind fra sør-sørvest til nord-nordvest. Figuren viser at ising ofte forekommer ved vind med høy normalkomponent på ledningstraseen.



Figur 4-1: Vindrose for 10 min middelvind i 20 m høyde for perioden 1979 - 2014. Hentet ut fra modellpunkt i 854 moh. og høydejustert til 1100 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 1100 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, og at de varierer betydelig med ledningsretningen. Modellen gir maksimal 150-års islast på 28.2 kg/m for en ledning i sørøst-nordvest retning og en 150-års islast på 24.8 kg/m for en ledning nord-sør. Disse lastene er om lag 25 % lavere enn de foreløpige verdiene som ble gitt i rapport KVT/REB/2014/R074. Beregnet 150-års islast for den faktiske ledningsretningen ved BM63 - BM65 er 27.5 kg/m.

Tabell 4-2 viser at beregnede islaster øker raskt med høyden. Økningen i islaster fra 1000 moh. til 1100 moh. er omtrent en faktor 2.5 for ledninger i ulike retninger. 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 WRF 6 km korrigert mot WRF500m og høydejustert til 1100 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
N-S	7.2	8.7	10.5	13.1	16.8	19.8	24.8
NØ-SV	4.2	5.1	6.2	7.9	10.5	12.8	16.0
Ø-V	4.6	5.6	6.8	8.7	11.5	14.0	17.5
SØ-NV	8.1	10.0	12.2	15.2	19.3	22.6	28.2

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)		
	1000 moh.	1050 moh.	1100 moh.
N-S	10.0	16.8	24.8
NØ-SV	6.2	9.7	16.0
Ø-V	8.4	12.3	17.5
SØ-NV	11.9	18.6	28.2

## 5 Referanser

---

Bredesen, R. (2014). "Ørskog - Sogndal, Sogn og Fjordane. Islaster for 420 kV kraftledning"  
KVT rapport: KVT/REB/2014/R0704.

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.

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

## Vedlegg A: Justering av WRF6km

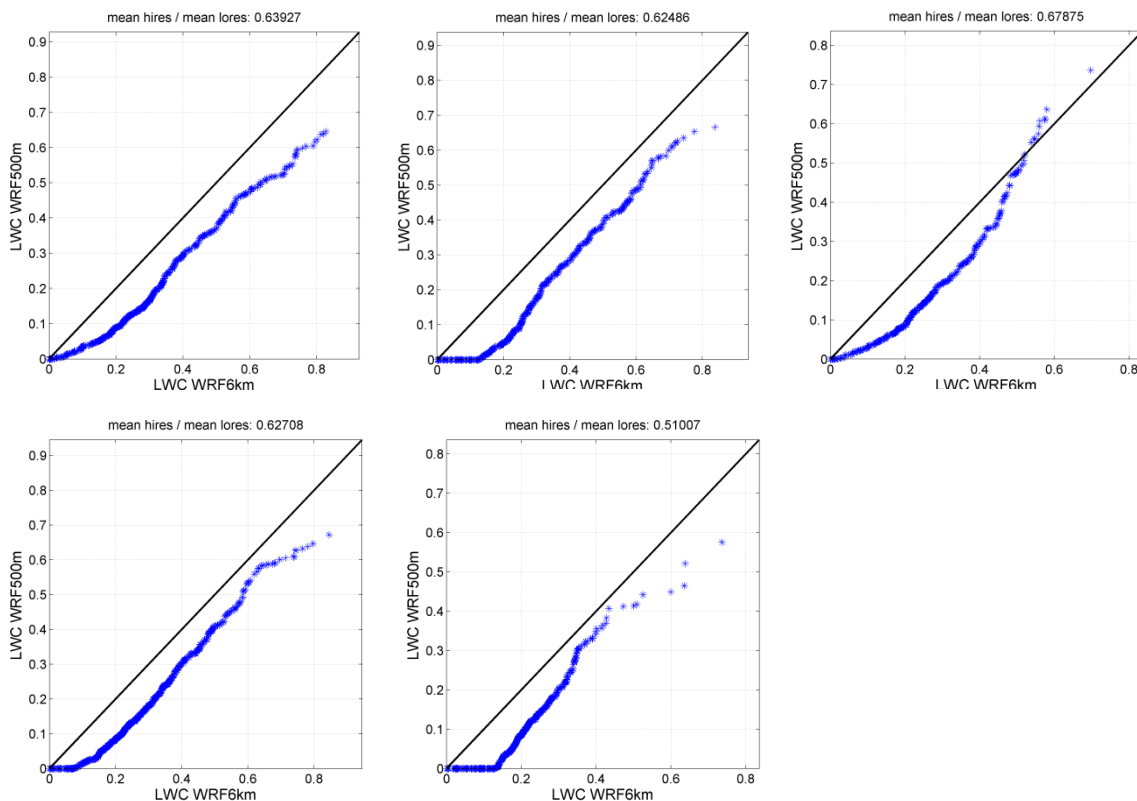
Tabell A-1 nedenfor viser at beregnede islaster avviker betydelig mellom WRF6km og WRF500m for alle episodene. Denne forskjellen skyldes forskjell i skyenes vanninnhold som vist i høyre kolonne, samt i Figur A-1.

Tabell A-1 Sammenlikning av resultater fra WRF500m og WRF6km i 1053 moh. Maksimal isvekt er beregnet for et referanseobjekt. De to kolonnene lengst til høyre er forholdet mellom gjennomsnittlig vindhastighet i WRF500m og WRF6km og forholdet mellom skyenes vanninnhold i WRF500m og WRF6km.

Episode	Fra dato	Til dato	Maks isvekt WRF500m (kg/m)	Maks isvekt WRF6km (kg/m)	FF forhold	LWC forhold
#1	16.1.2011	10.2.2011	20	28	1.10	0.64
#2	15.1.2005	7.2.2005	12	14.5	1.12	0.62
#3	1.2.2002	18.2.2002	11.5	15	1.03	0.68
#4	1.1.2000	5.2.2000	18	34	1.10	0.63
#5	5.1.1993	29.1.1993	10	15	1.09	0.51

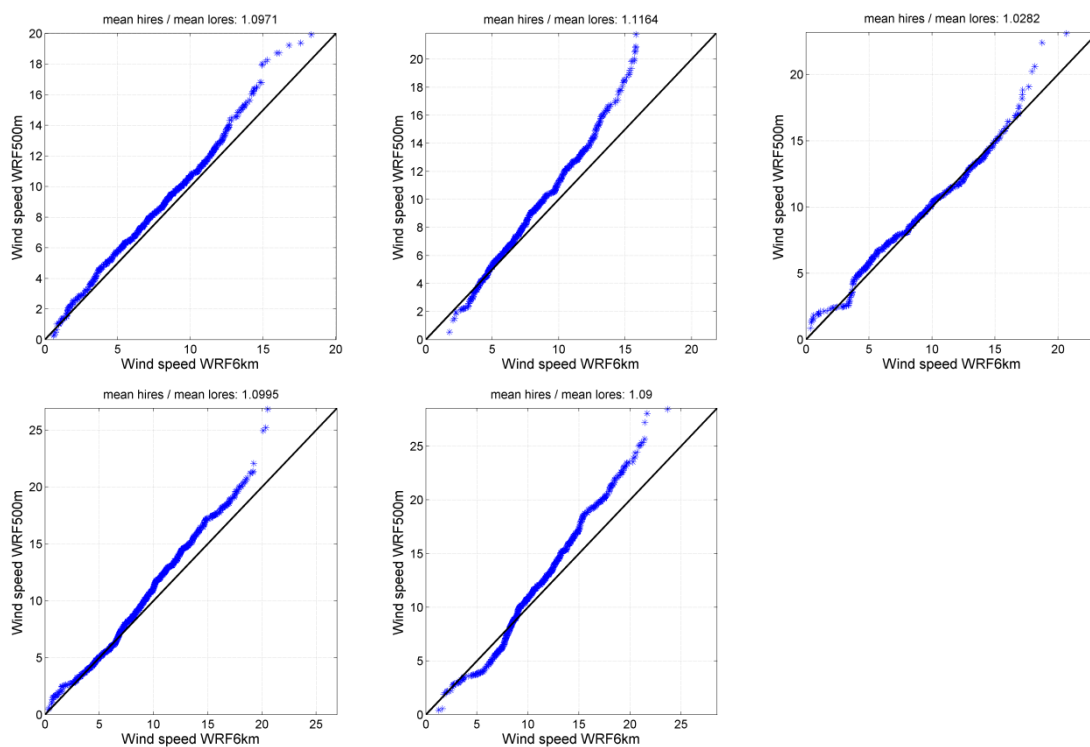
Sammenlikning av skyenes vanninnhold i Figur A-1 viser at det for alle episodene er en systematisk overestimering av vanninnholdet i WRF6km. Gjennomsnittlig er det et LWC-forhold på 0.62. Siden vi kun sammenlikner 5 episoder velger vi å bruke en litt konservativ faktor på 0.7 for korreksjon av vanninnholdet i WRF6km før beregning av islaster.





Figur A-1: Skyenes vanninnhold ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) i WRF6km og WRF500m i sortert scatterplot. Episode #1 øverst til venstre episode #2 øverst i midten, osv.

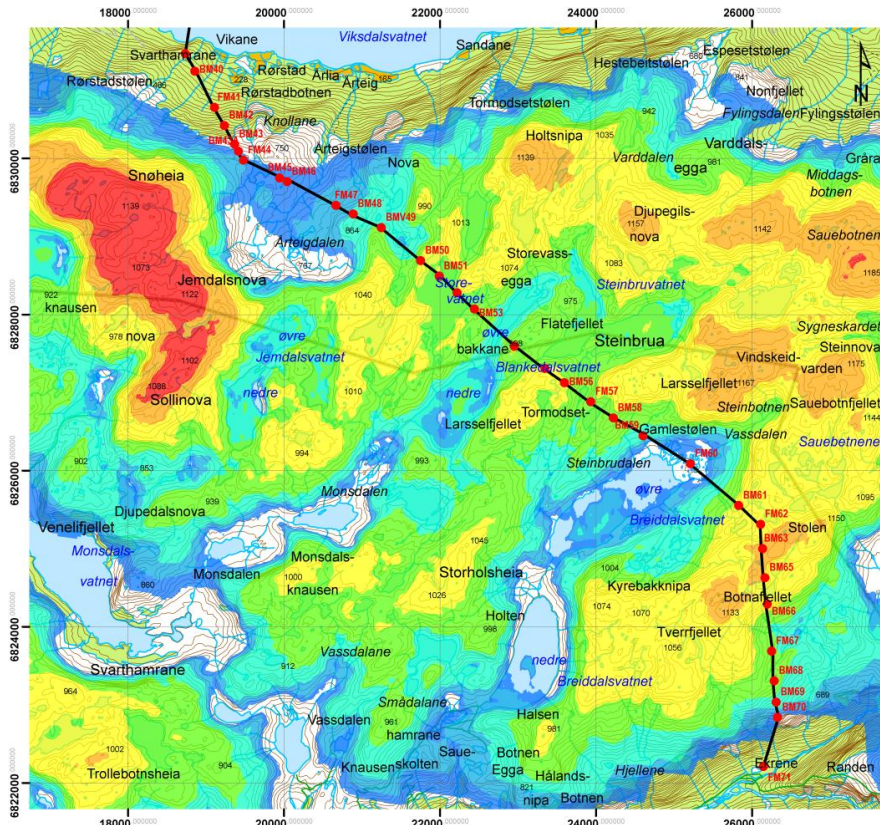
Sammenlikning av vindhastighet i WRF6km og WRF500m vist i Figur A-2 viser at det er en liten systematisk forskjell, med høyere vindhastighet i WRF500m. Dette er trolig en speed-up effekt lokalt over toppen ved traseens høyeste punkt. Isolert sett vil denne forsterkningen av vinden bidra til økt ising. I snitt for de 5 episodene er forholdstallet 1.088. Denne faktoren er benyttet for korreksjon av vinden i WRF6km før beregning av islaster.



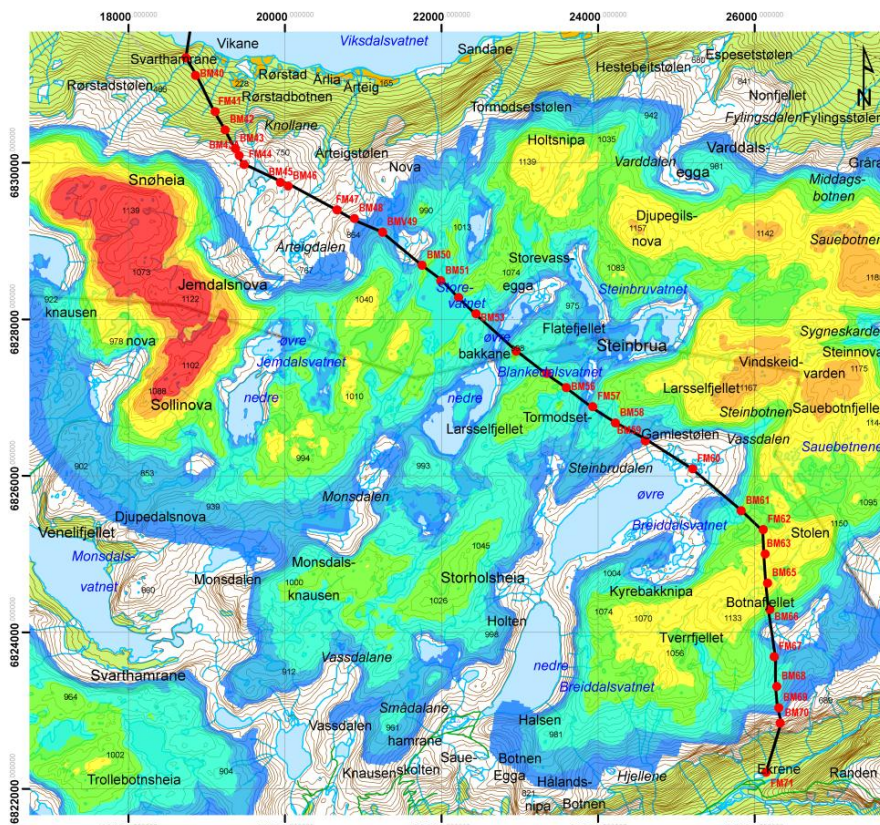
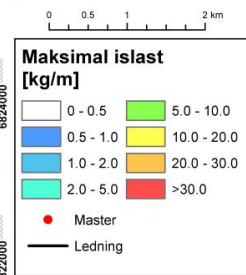
Figur A-2: Vindhastighet i WRF6km og WRF500m i sortert scatterplot. Episode #1 øverst til venstre episode #2 øverst i midten, osv.

# Vedlegg B: Isingskart

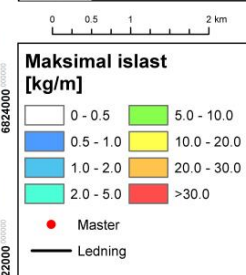
## BM40 - FM71

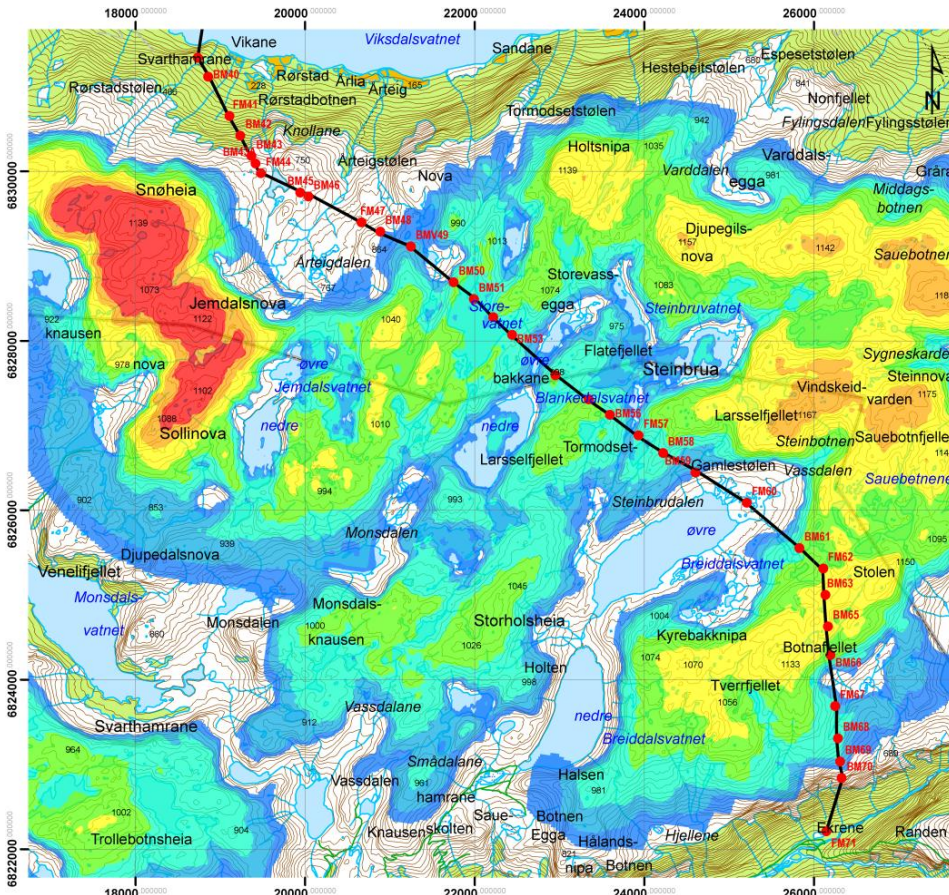


420 kV Moskog - Høyanger	
Figure/Drawing Title: Akkumulert skyis 16.01.2011 - 10.02.2011	
File Name: isings_fjordal.mxd	Rev: 0
Byr: ALL	Dato: 23/01/15
Scale: 1:50 000	Checked: BEN
Datum: wgs84	Projector: utm33



420 kV Moskog - Høyanger	
Figure/Drawing Title: Akkumulert skyis 15.01.2005 - 07.02.2005	
File Name: isings_fjordal.mxd	Rev: 0
Byr: ALL	Dato: 23/01/15
Scale: 1:50 000	Checked: BEN
Datum: wgs84	Projector: utm33





420 kV Moskog - Høyanger

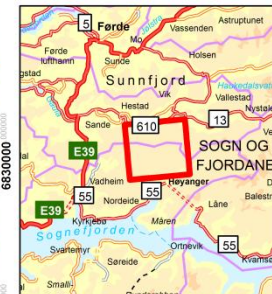
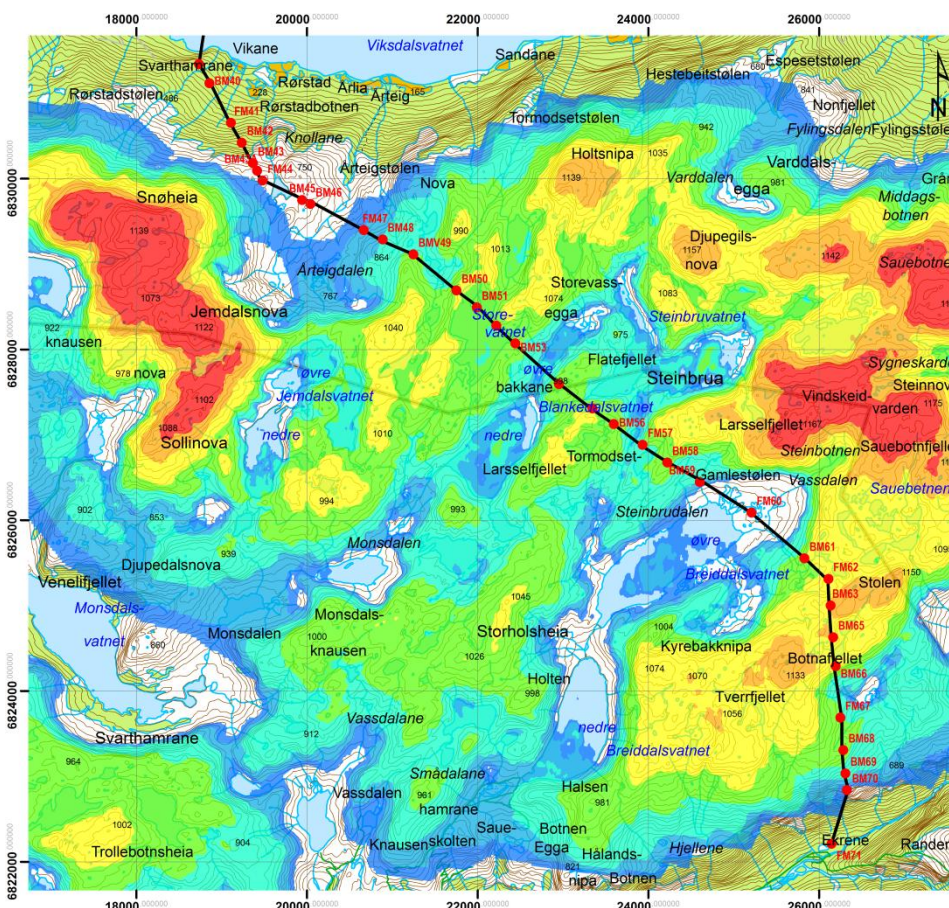
Figure/Drawing Title:  
 Akkumulert skyis 01.02.2002 - 18.02.2002

File Name: orskog\_fardal.mxd Rev: 0

By: ALL Date: 23/01/15 Checked: BEN Date: 23/01/15

Scale: 1:50 000 Paper Size: A4

Datum: WGS84 Projection: UTM33



420 kV Moskog - Høyanger

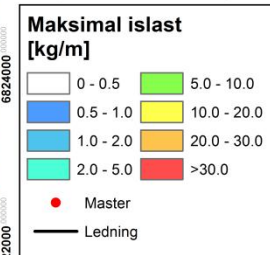
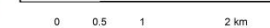
Figure/Drawing Title:  
 Akkumulert skyis 01.01.2000 - 05.02.2000

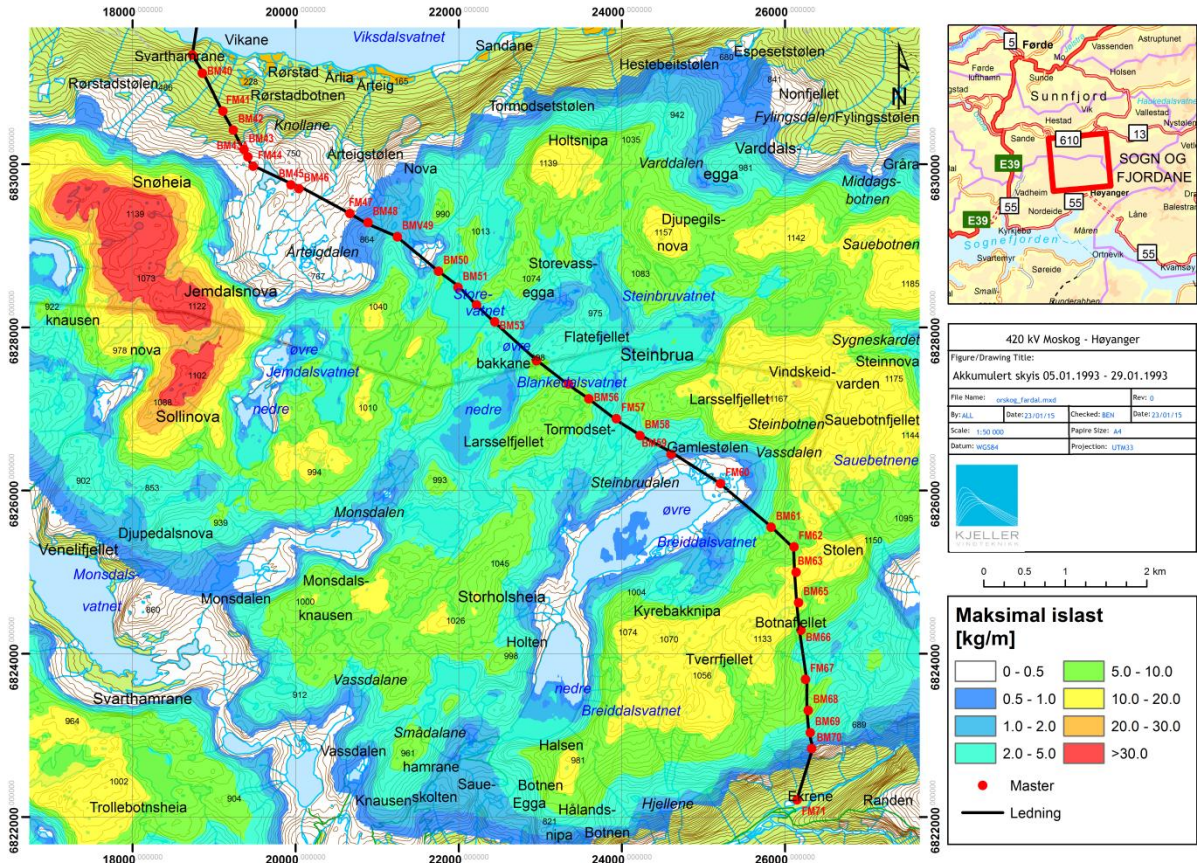
File Name: orskog\_fardal.mxd Rev: 0

By: ALL Date: 23/01/15 Checked: BEN Date: 23/01/15

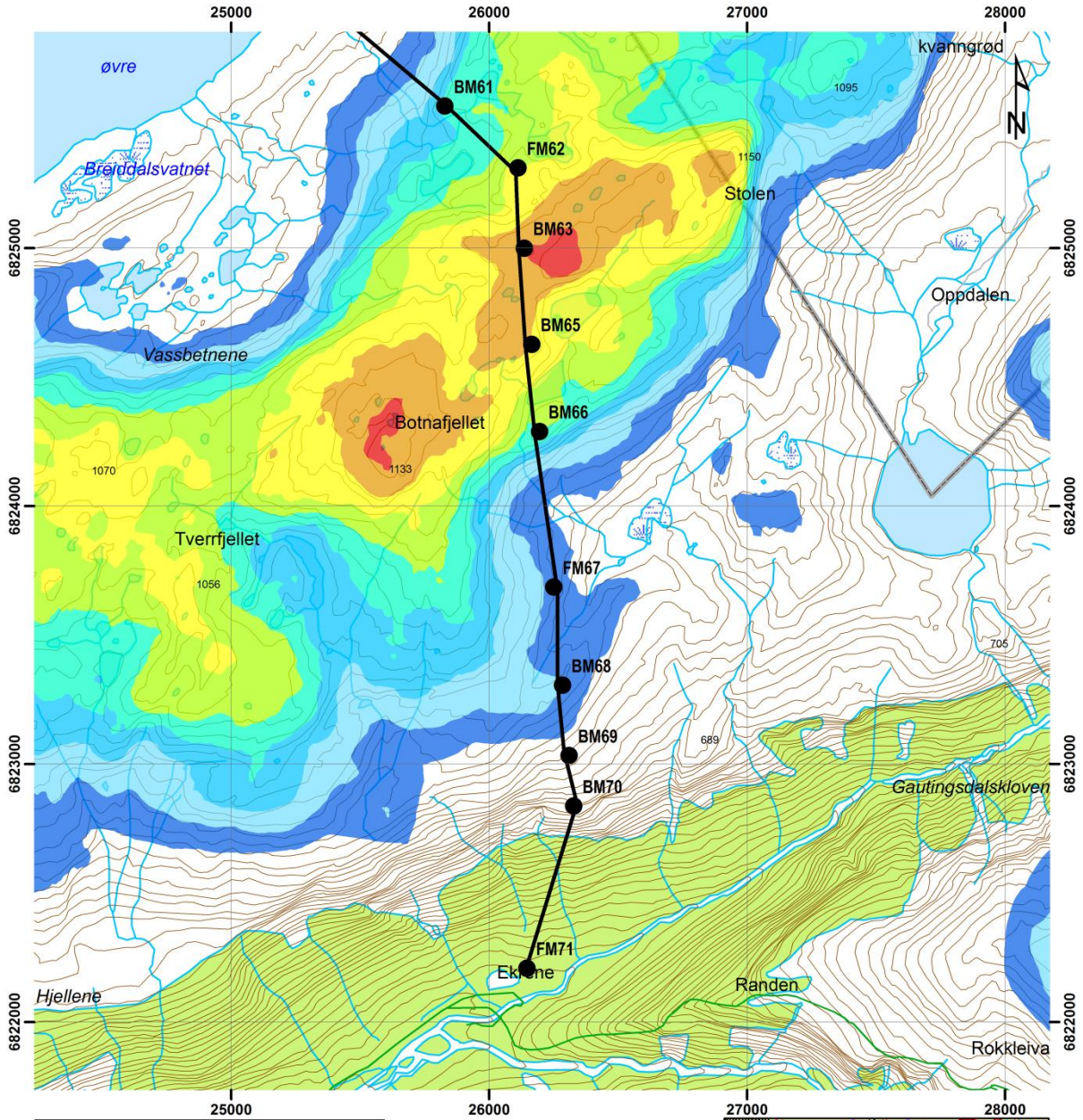
Scale: 1:50 000 Paper Size: A4

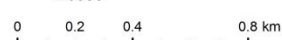
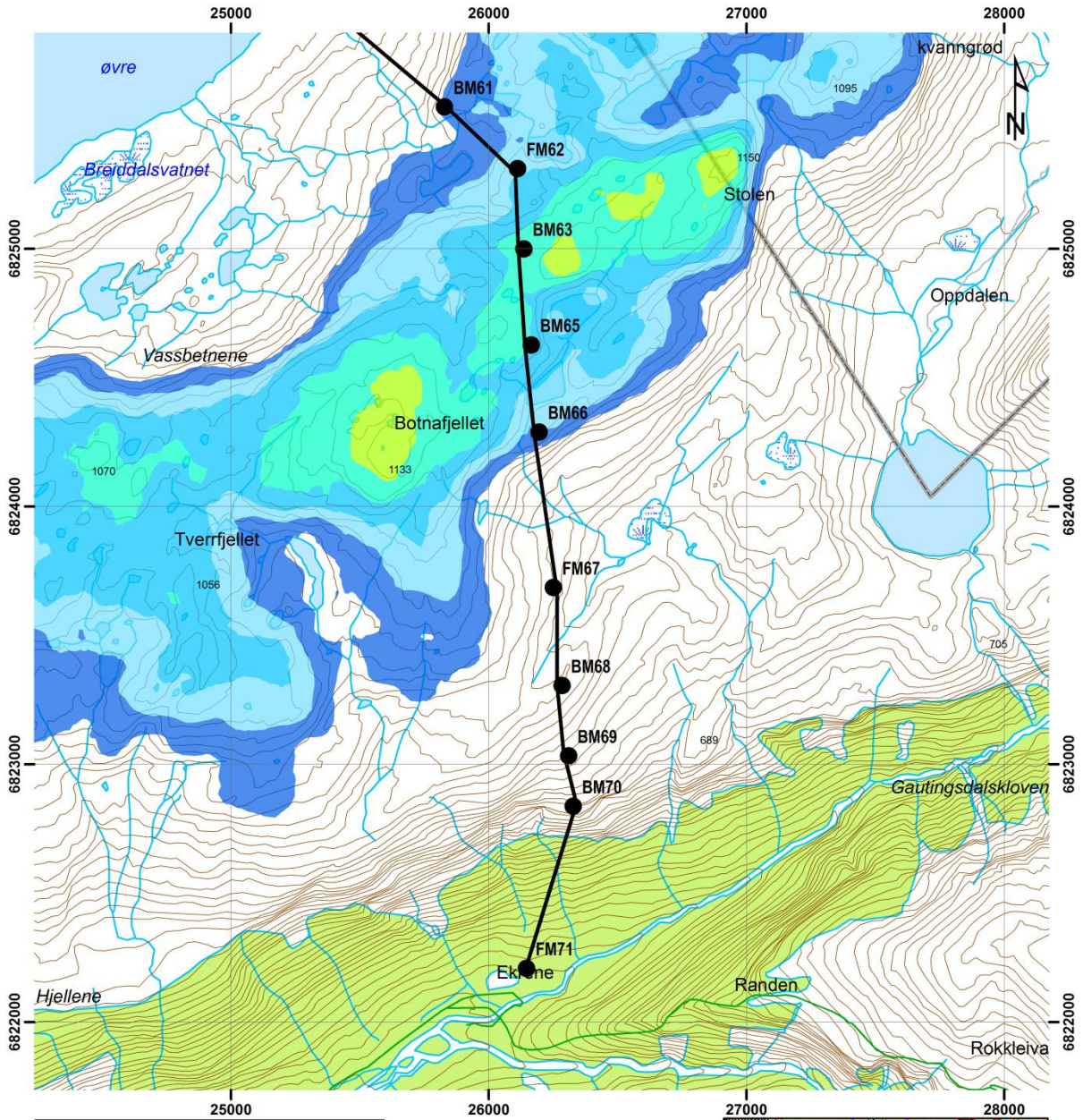
Datum: WGS84 Projection: UTM33





# BM61 - FM71





420kV Moskog - Høyanger

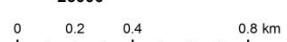
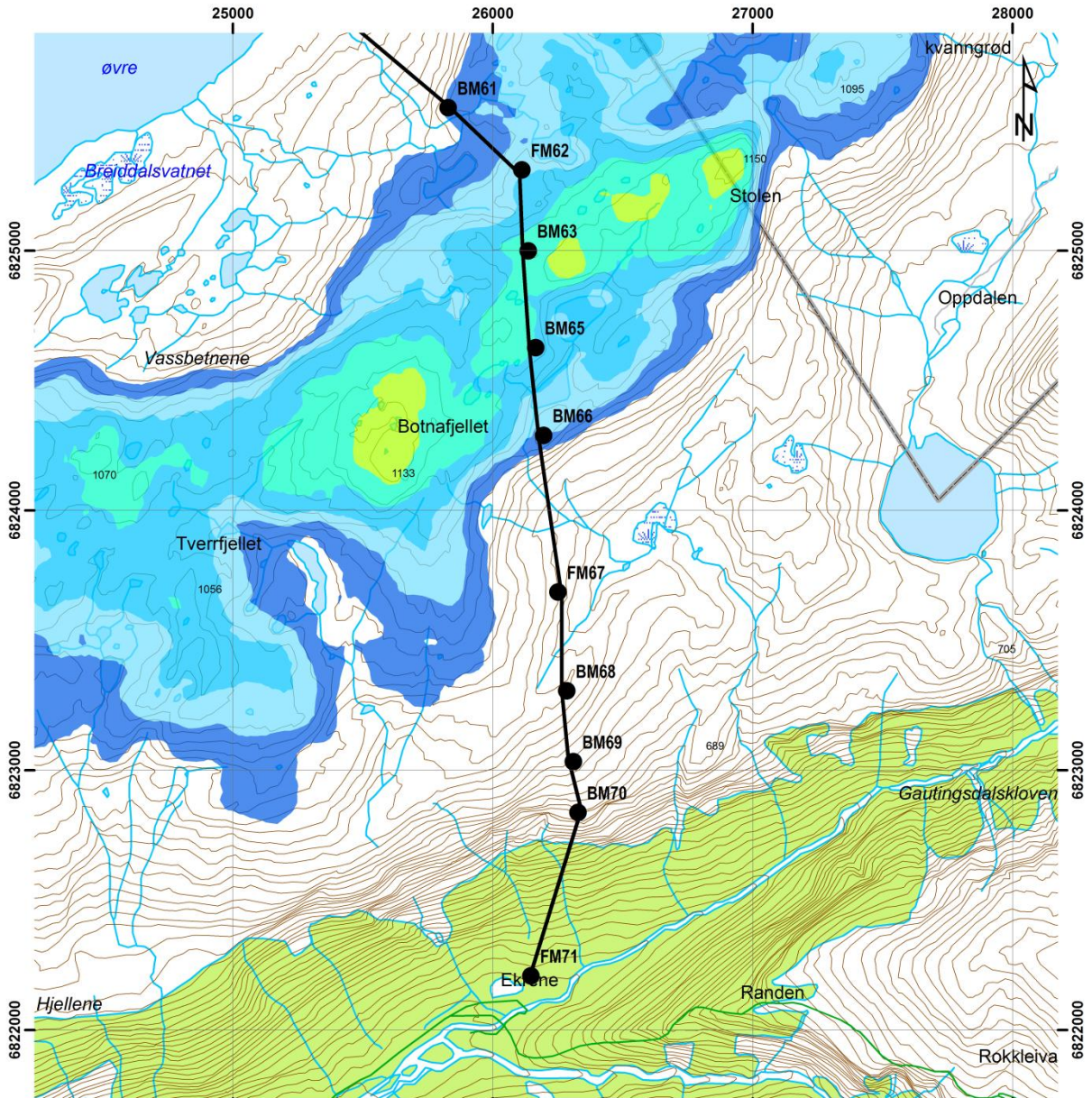
Figure/Drawing Title:  
Akkumulert skyis 15.01.2005 - 07.02.2005

File Name: orskog\_fardal\_utsnitt.mxd Rev: 0

By: ALL	Date: 23/11/15	Checked: BEN	Date: 23/01/15
---------	----------------	--------------	----------------

Scale: 1:20 000  
Papire Size: <Enter paper size>  
Datum: WGS84  
Projection: UTM33





420kV Moskog - Høyanger

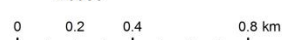
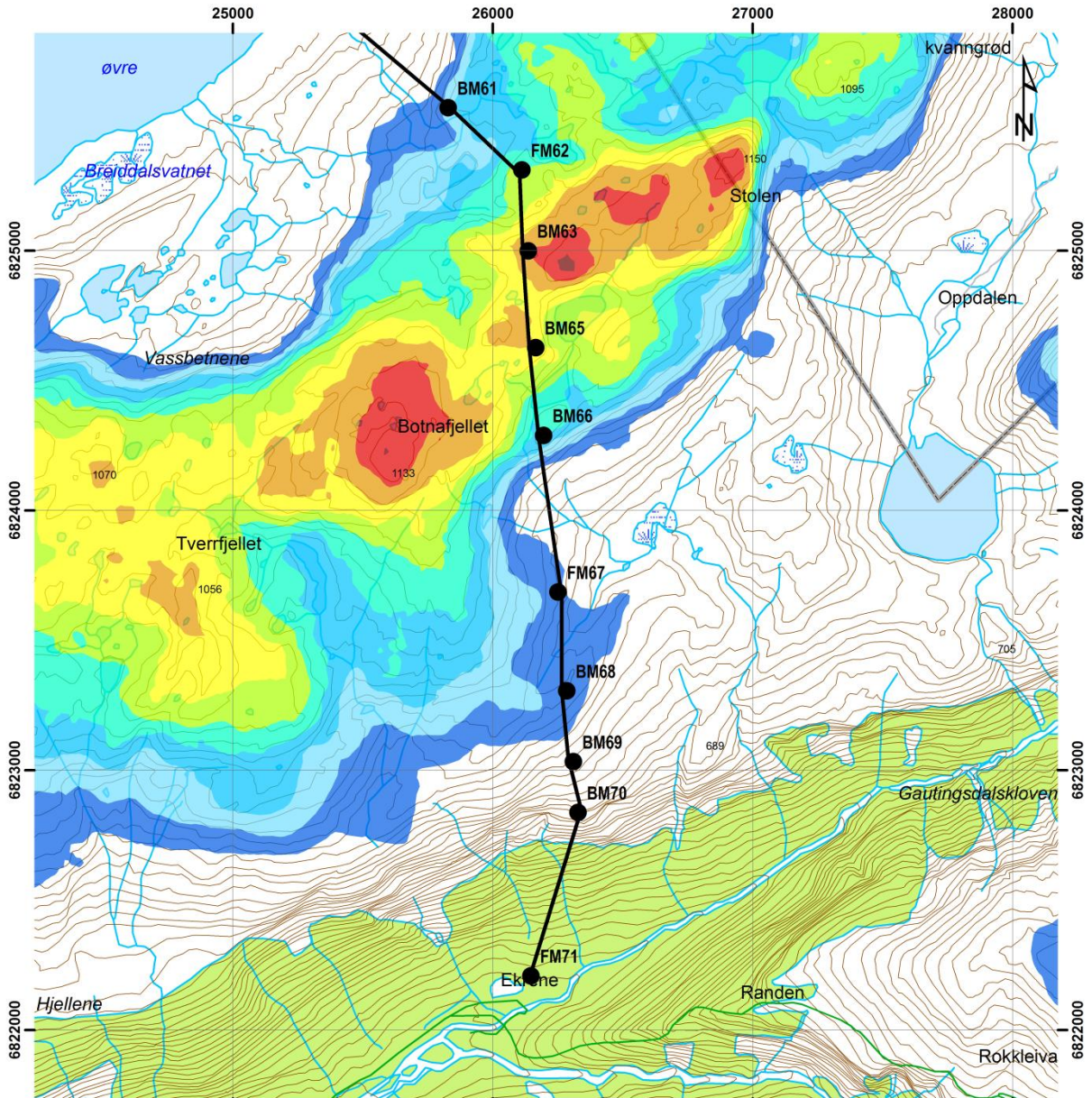
Figure/Drawing Title:  
Akkumulert skyis 01.02.2002 - 18.02.2002

File Name: orskog_fardal_utsnitt.mxd	Rev: 0
By: ALL	Date: 23/11/15
Checked: BEN	Date: 23/01/15
Scale: 1:20 000	Papire Size: <Enter paper size>
Datum: WGS84	Projection: UTM33

**KJELLER**  
VINDTEKNIKK







420kV Moskog - Høyanger

Figure/Drawing Title:  
Akkumulert skyis 01.01.2000 - 05.02.2000

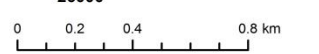
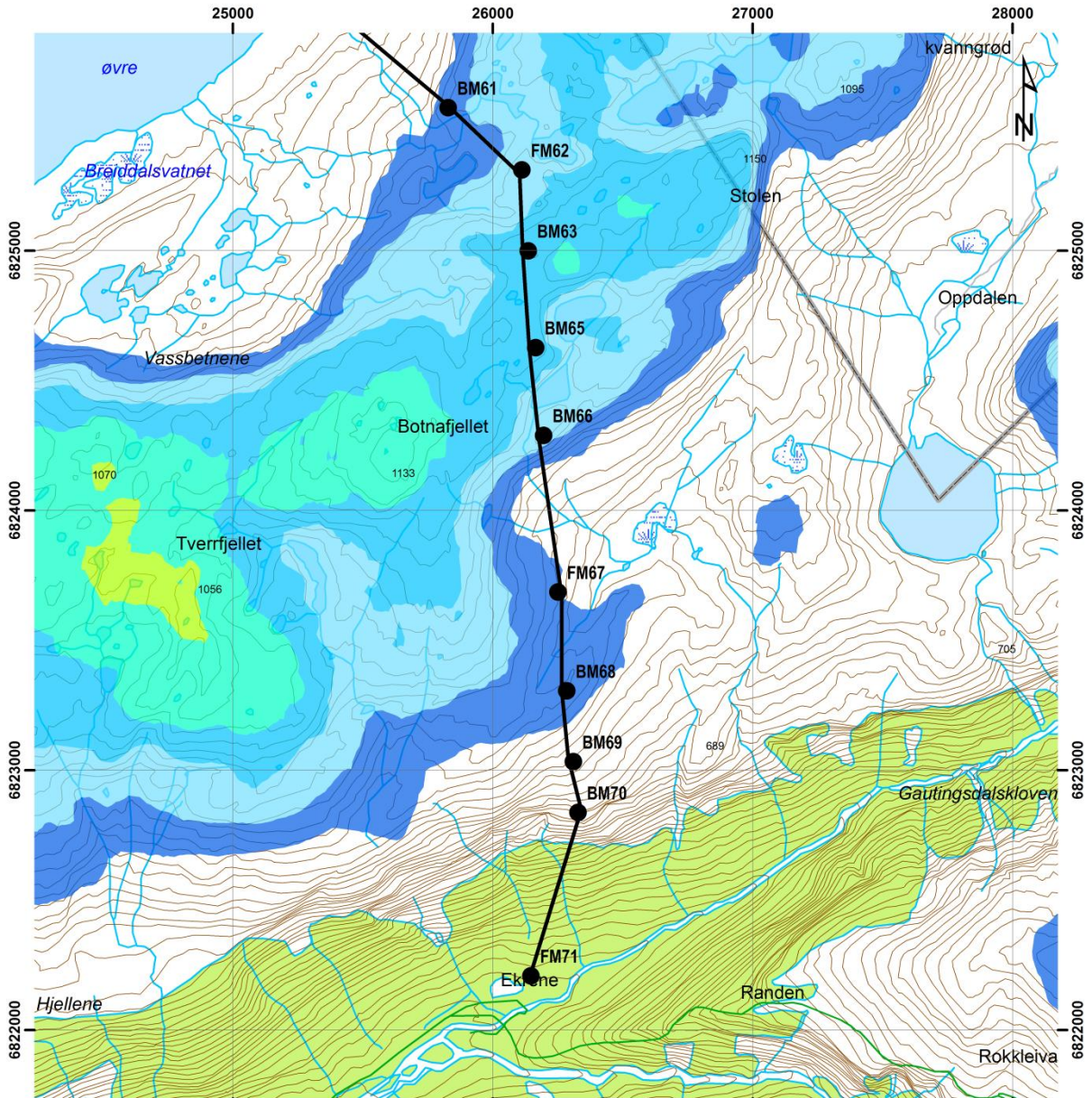
File Name: orskog\_fardal\_utsnitt.mxd Rev: 0

By: ALL Date: 23/11/15 Checked: BEN Date: 23/01/15

Scale: 1:20 000 Papire Size: «Enter paper size»

Datum: WGS84 Projection: UTM33





420kV Moskog - Høyanger

Figure/Drawing Title:  
Akkumulert skyis 05.01.1993 - 29.01.1993

File Name: orskog\_fardal\_utsnitt.mxd Rev: 0

By: ALL	Date: 23/11/15	Checked: BEN	Date: 23/01/15
---------	----------------	--------------	----------------

Scale: 1:20 000  
Papire Size: <Enter paper size>  
Datum: WGS84  
Projection: UTM33



# Vedlegg C: 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 Protection (NCEP). The data originates from the Final Global Data

---

<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/)

Assimilation System (FNL)<sup>6</sup> and is available as global data with 1 degree resolution every 6 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 34 years covering the period of 1979-2013. The model has been set up with 2 nested domains. The horizontal resolutions are 18 km x 18 km and 6 km x 6 km for the longer period. The fine scale simulations are set up with three nested domains with horizontal resolution stepwise increasing from 12.5 km x 12.5 km to 0.5 km x 0.5 km from the outermost to the innermost domains.

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

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

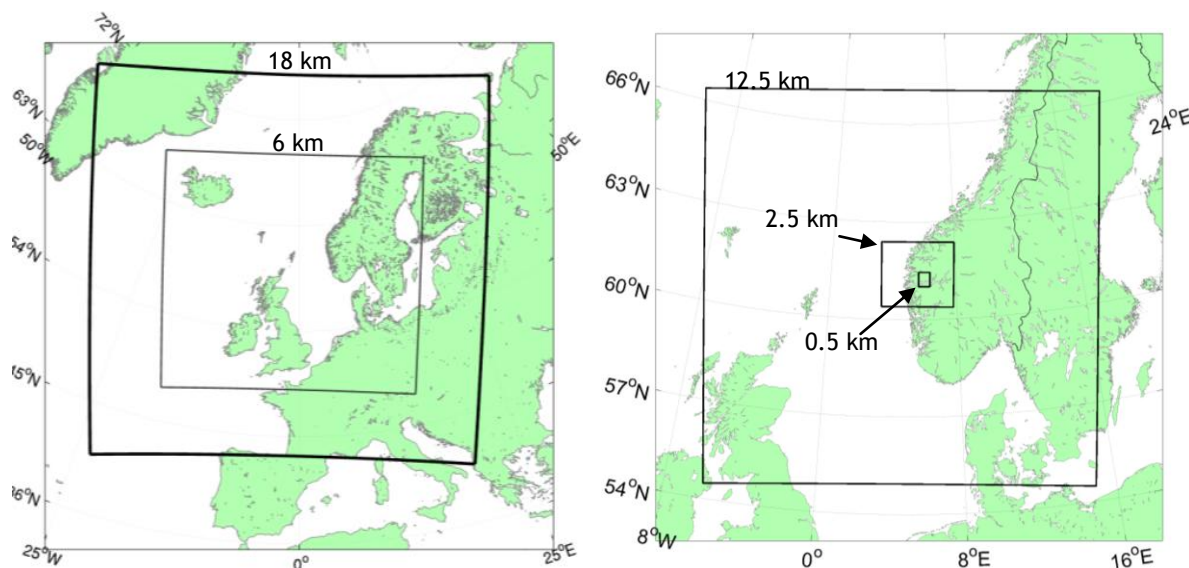
With the current setup, the WRF-model calculates the change in the meteorological fields for each grid-cell for a time step from 2 to 108 seconds in the different domains with increasing time step for lower horizontal resolution. In this way a realistic temporal development of the meteorological variables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

---

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

<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, IWAI, Andermatt 2009.