



Isbildning på konstruktioner: erfarenheter från mätningar och modellutveckling

Jennie Molinder & Christoffer Hallgren

The International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (**IWAIS**) och International Council on Large Electric Systems (**CIGRE**)



Innehåll

- ▶ Kjeller Vindteknikk/Norconsult
- ▶ Varför behövs ismodellering?
- ▶ Mätinstrument för att mäta is på strukturer
- ▶ Validering av vår ismodell: ett exempel från Nordnorge
- ▶ Is på vindkraftverk
 - ▶ Långtidsberäkningar
 - ▶ Prognoser
 - ▶ Framtida klimat
- ▶ Sammanfattning



Vi är Kjeller Vindteknikk



Varför behövs ismodellering?



Vår ismodell

- Input: vädret!
- Output: tidsserie med ismassa
- Rimfrost enligt Makkonen/Finstad, men med hela droppstorleksfördelningen
- Blötsnö enligt Thorsteins (IWAIS 2022), inkl. perturberingar av temperatur
- Torr snö på redan existerande is vid låga vindstyrkor
- Sublimering och smältning enligt energibalansmodellen
- Is som lossnar enligt empiriska koefficienter

$$\begin{array}{c} \text{Processer som tillför is} \qquad \qquad \qquad \text{Processer som avlägsnar is} \\ \hline \left(\frac{dM}{dt} \right)_{Tot} = \left(\frac{dm}{dt} \right)_{Cloud} + \left(\frac{dm}{dt} \right)_{Wet\ snow} + \left(\frac{dm}{dt} \right)_{Dry\ snow} + \left(\frac{dm}{dt} \right)_{Rain} - \left(\frac{dm}{dt} \right)_{Sub} - \left(\frac{dm}{dt} \right)_{Melt} - \left(\frac{dm}{dt} \right)_{Shedding} \end{array}$$

Vår ismodell

- Input: vädret!
- Output: tidsserie med ismassa
- Rimfrost enligt Makkonen/Finstad, men med hela droppstorleksfördelningen
- Blötsnö enligt Thorsteins (IWAIS 2022), inkl. perturberingar av temperatur
- Torr snö på redan existerande is vid låga vindstyrkor
- Sublimering och smältning enligt energibalansmodellen
- Is som lossnar enligt empiriska koefficienter

$$\left(\frac{dM}{dt}\right)_{Tot} = \underbrace{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{Cloud} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Wet\ snow} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Dry\ snow} + \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Rain}}_{\text{Processer som tillför is}} - \underbrace{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{Sub} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Melt} - \left(\frac{dm}{dt}\right)_{Shedding}}_{\text{Processer som avlägsnar is}}$$

Vindkraftverk: + “vinderosion”?

Mätinstrument för isuppbyggnad

- ▶ Kjeller Vindteknikks egne sensor: **IceTroll**
 - ▶ Standardcylinder (ISO-12494) (1 m long, 3 cm diameter)
 - ▶ Roterande lastmätare



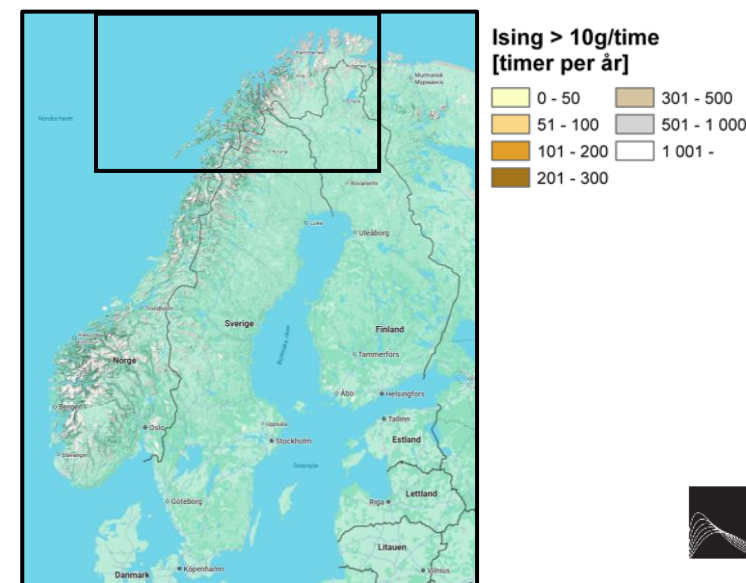
Exempel från Nordnorge

- ▶ Modern teknologi gör att man kan bygga vindkraftverk allt längre norrut
- ▶ Bra vindförhållanden!
- ▶ Men isförhållandena är dåligt dokumenterade

Studien i Nordnorge

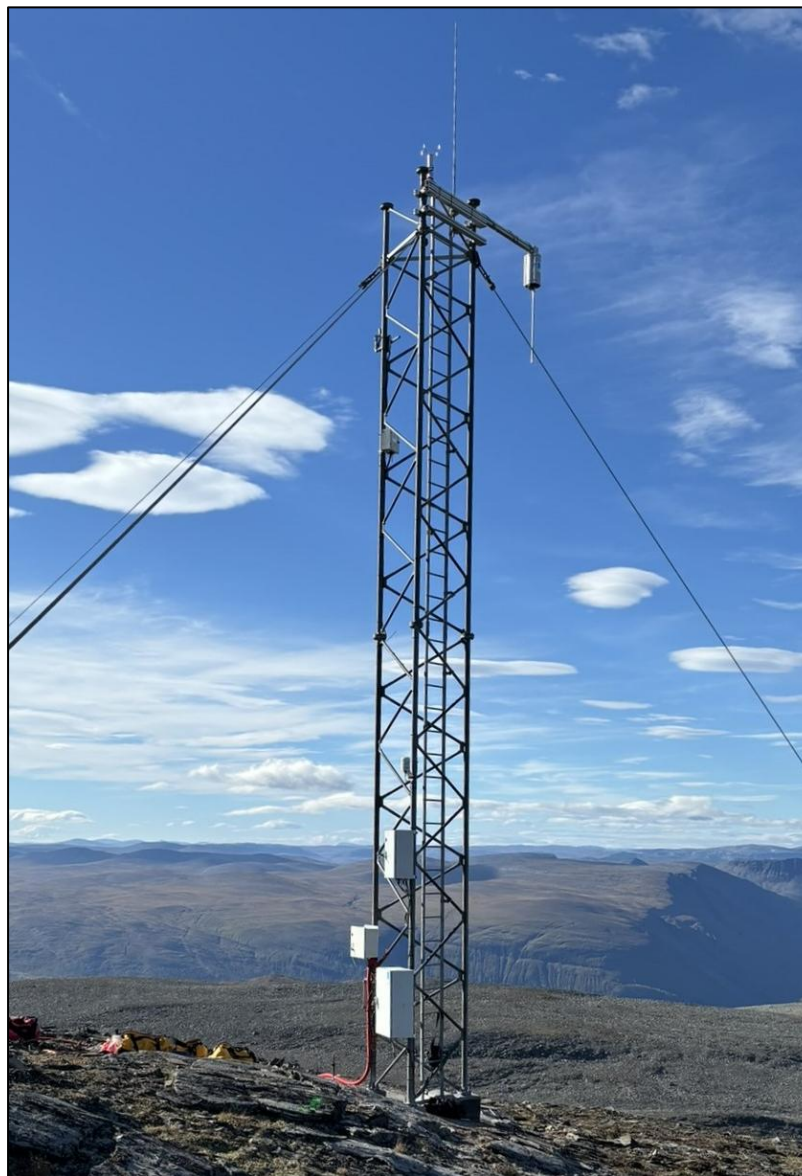
1. Mätningar med IceTroll-sensorn
2. Modellering av vädret med WRF (känslighetsanalys)
3. Beräkning av islaster med vår ismodell

Iskarta



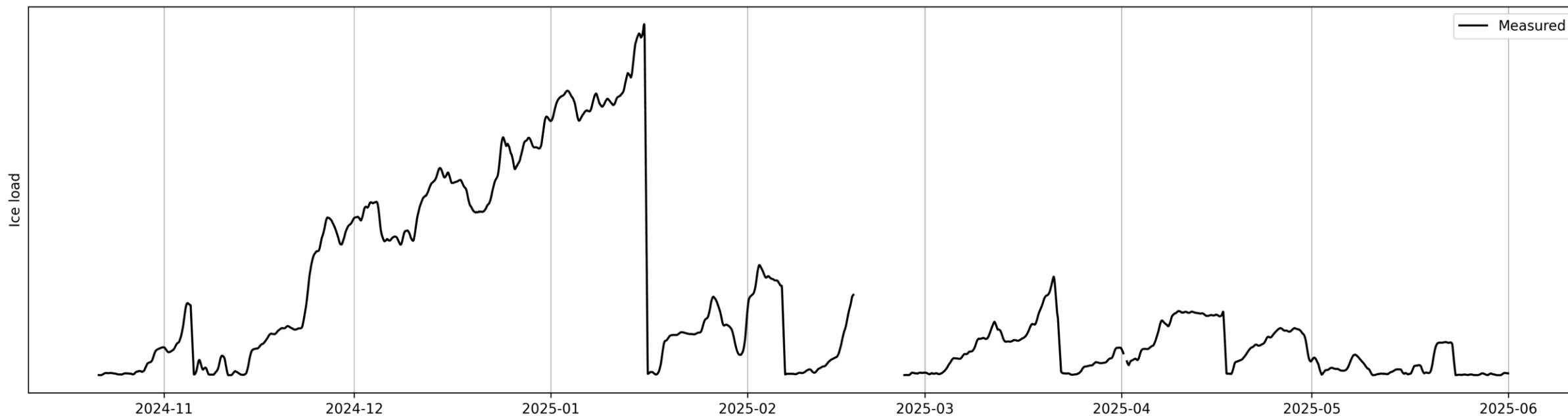
Mätningar

- ▶ Ca 1000 m över havet
- ▶ Komplex terräng
- ▶ Mycket is
- ▶ 12 m mast
 - ▶ Vind
 - ▶ Temperatur
 - ▶ Fuktighet
 - ▶ IceTroll ismätare
 - ▶ Kamera
- ▶ September 2024 till augusti 2025



Mätresultat

- Mycket is från november till maj
- Flera tillfällen när isen faller av sensorn



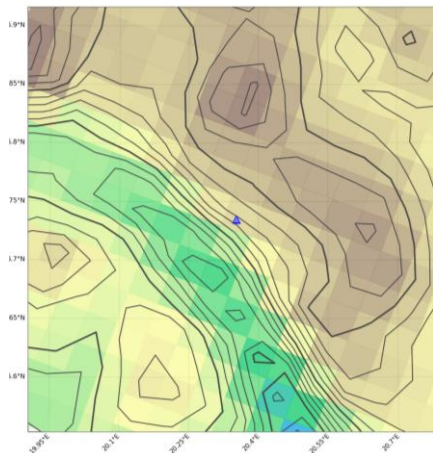
WRF-modellering av isbildning

- ▶ Svårt område att modellera
 - ▶ Tillförsel av fukt både från Bottenviken och Norska havet
 - ▶ Droppstorleksfördelning
 - ▶ Höjd i modellen vs. verkligheten
 - ▶ Skärmning i modellen vs. verkligheten

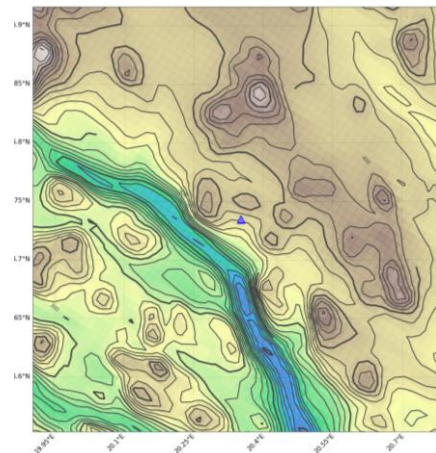
WRF-modellering av isbildning

- ▶ Svårt område att modellera
 - ▶ Tillförsel av fukt både från Bottenviken och Norska havet
 - ▶ Droppstorleksfördelning
 - ▶ Höjd i modellen vs. verkligheten
 - ▶ Skärmning i modellen vs. verkligheten
- ▶ Befintlig modell 3 km x 3 km, **45 år** med data, nedskalering av ERA5
- ▶ Ny WRF-domän med högre upplösning behövs
 - ▶ 750 m x 750 m
 - ▶ 333 m x 333 m
- ▶ Modellerar **1 år** med hög upplösning
- ▶ Långtidskorrigerar med hjälp av 3 km-modellen
 - ▶ Vindstyrka och riktning
 - ▶ Molnvatten (sektorvis)

3 km x 3 km



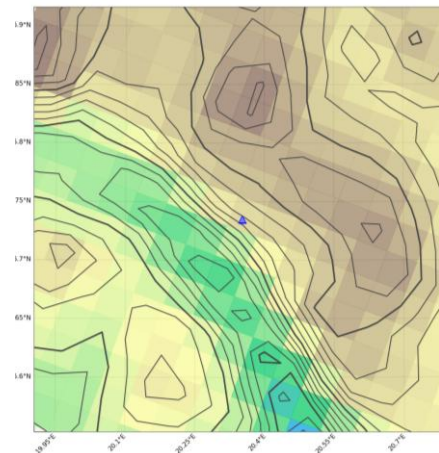
750 m x 750 m



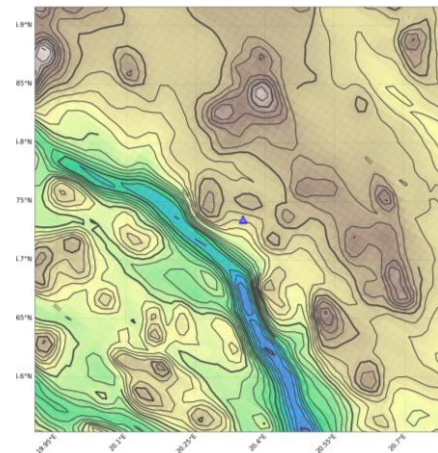
WRF-modellering av isbildning

- ▶ Svårt område att modellera
 - ▶ Tillförsel av fukt både från Bottenviken och Norska havet
 - ▶ Droppstorleksfördelning
 - ▶ Höjd i modellen vs. verkligheten
 - ▶ Skärmning i modellen vs. verkligheten
- ▶ Befintlig modell 3 km x 3 km, **45 år** med data, nedskalering av ERA5
- ▶ Ny WRF-domän med högre upplösning behövs
 - ▶ 750 m x 750 m →
 - ▶ 333 m x 333 m
- ▶ Modellerar **1 år** med hög upplösning
- ▶ Långtidskorrigerar med hjälp av 3 km-modellen
 - ▶ Vindstyrka och riktning
 - ▶ Molnvatten (sektorvis)

3 km x 3 km

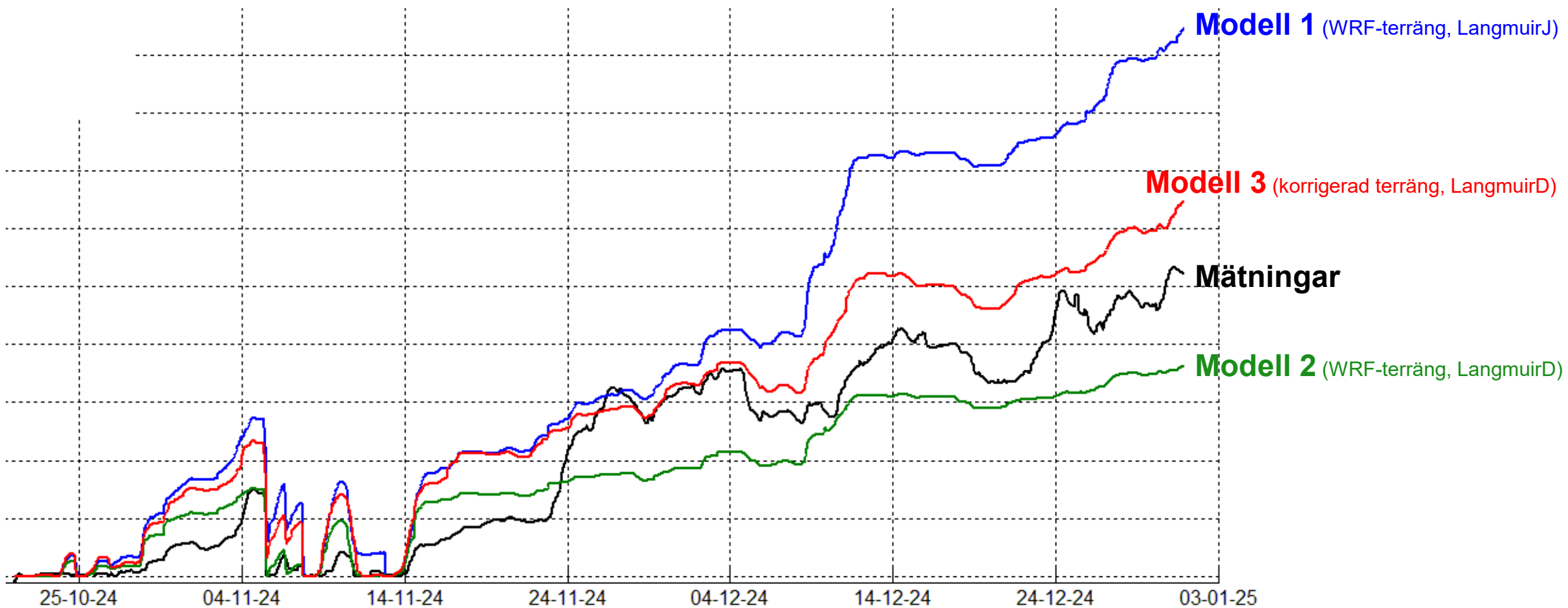


750 m x 750 m



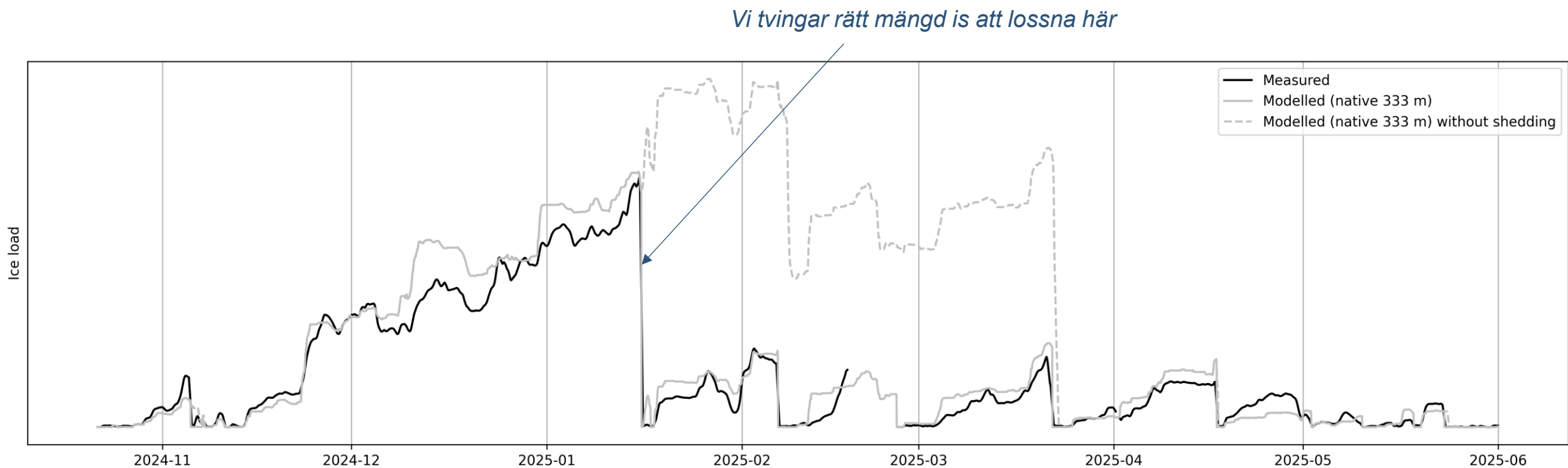
Modell	Höjd	Droppstorleksfördelning
Modell 1	Original WRF	LangmuirJ
Modell 2	Original WRF	LangmuirD
Modell 3	Modellhöjden lyft till verklig höjd	LangmuirD

Modellresultat 750 m-modellen



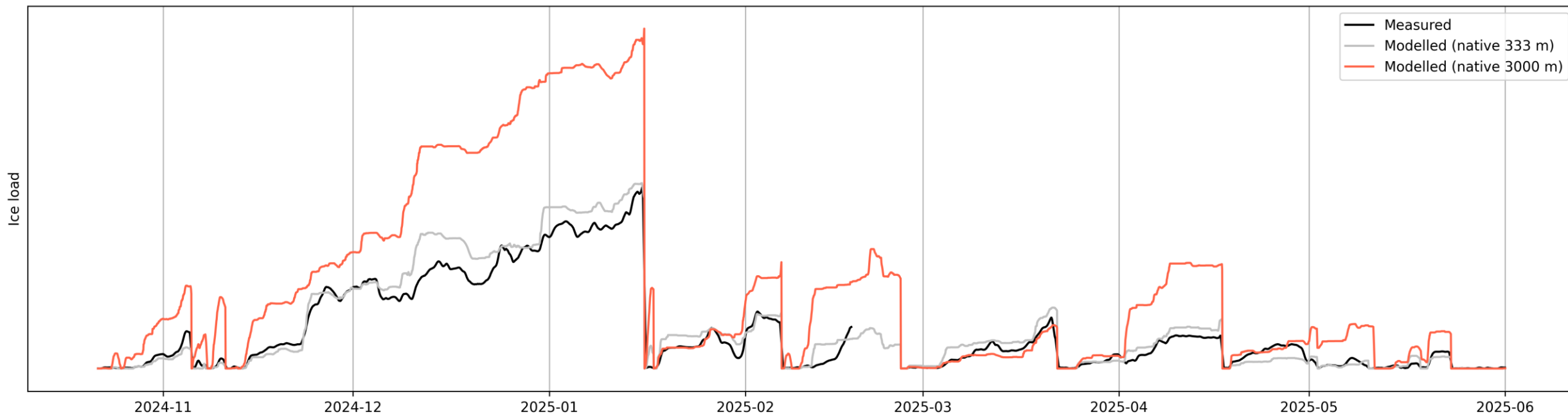
Modellresultat 333 m-modellen

- ▶ Uppbyggnad av is modelleras bra
- ▶ Svårt att få tidpunkter när mycket is lossnar rätt



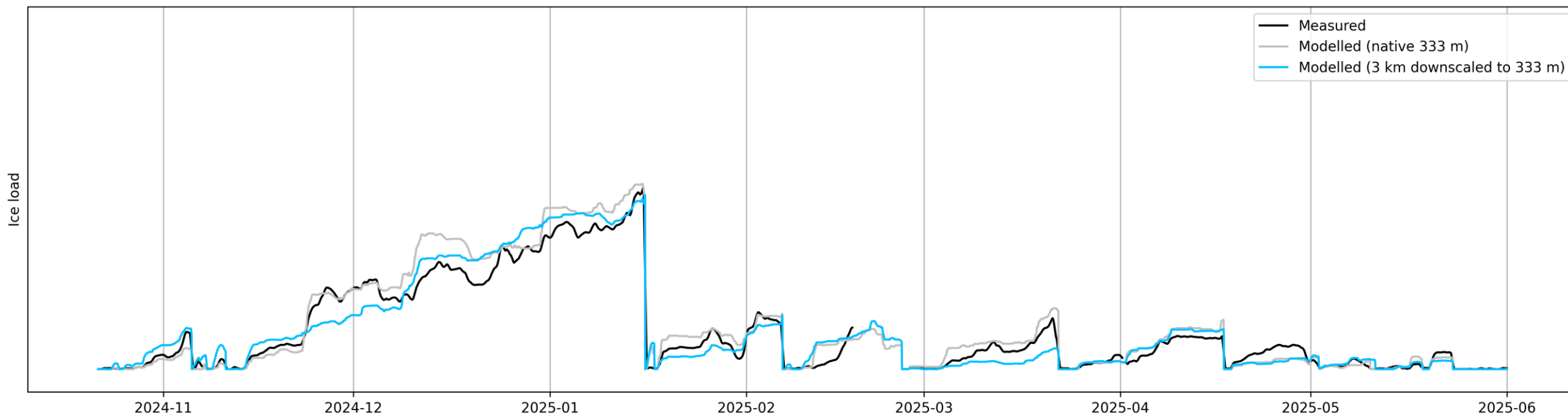
Modellresultat, nedskalering av 3 km-modellen

- 3 km-modellen nedskaleras med hjälp av 333 m-modellen



Modellresultat, nedskalering av 3 km-modellen

- ▶ 3 km-modellen nedskaleras med hjälp av 333 m-modellen
- ▶ Med den tränade 3 km-modellen har vi nu 45 år tidsserie och kan göra en klimatologi av isförhållandena



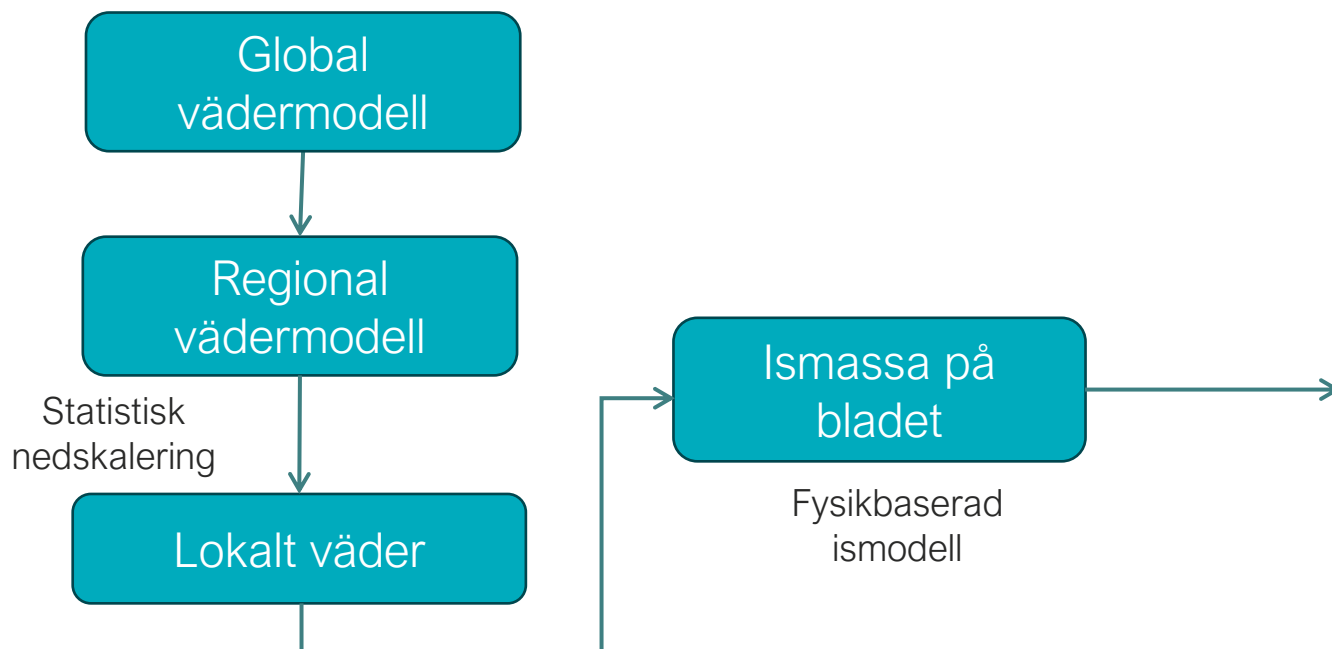
Tillämpningar - vindkraft

- Men... hur går vi från is på en standardcylinder till is på vindkraftverk?



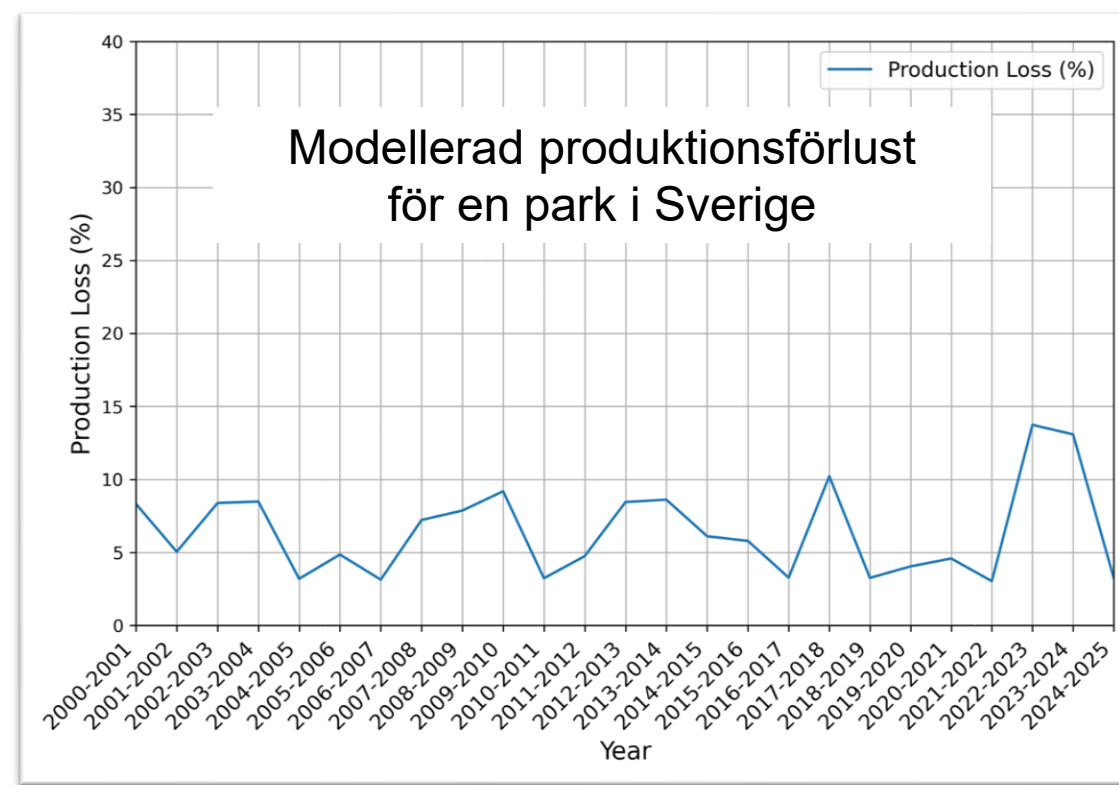
IceLoss

- ▶ Vår ismodell för isberäkningar på vindkraftverk
- ▶ RPM-kurvan är avgörande
- ▶ Is påverkar aerodynamiken och produktionen blir lägre



Tar hänsyn till

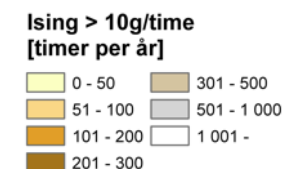
- Navhöjd
- Bladlängd
- RPM-kurva
- Lokal terräng
- Estimerad långtidsvind för varje turbin



IceLoss Nordnorge

- Effekt av droppstorleksfördelning (LangmuirJ vs LangmuirD) samt vinderosion i modelleringen

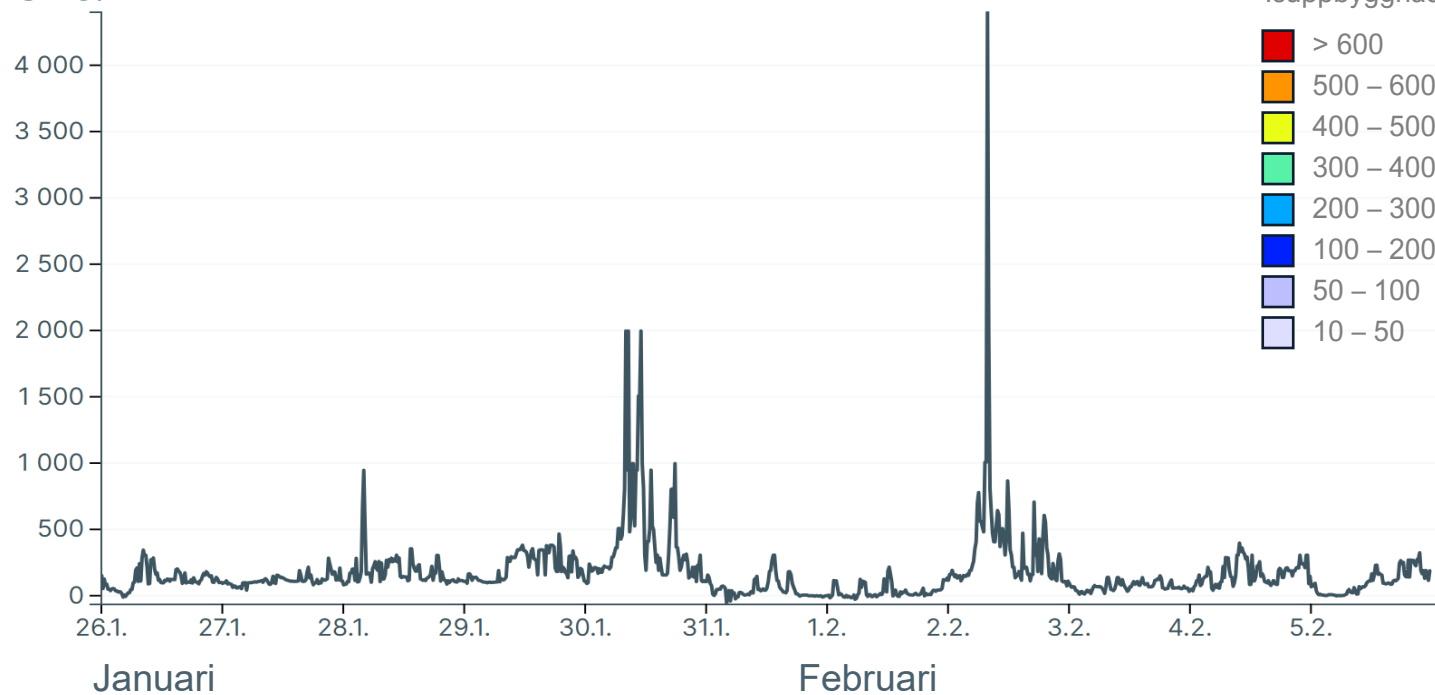
Produktionsförlust i (%)		
Med vinderosion + LangD	Med vinderosion + LangJ	Utan vinderosion + LangJ
12	18	36



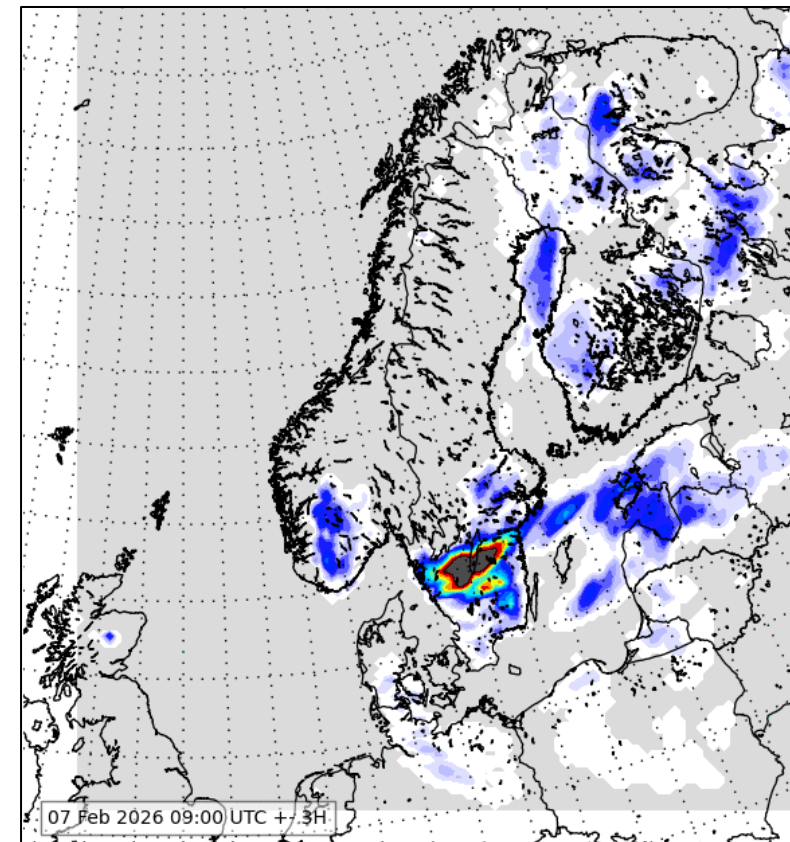
IceLossForecast

- Intradag och nästa-dygns-prognoser för elhandeln

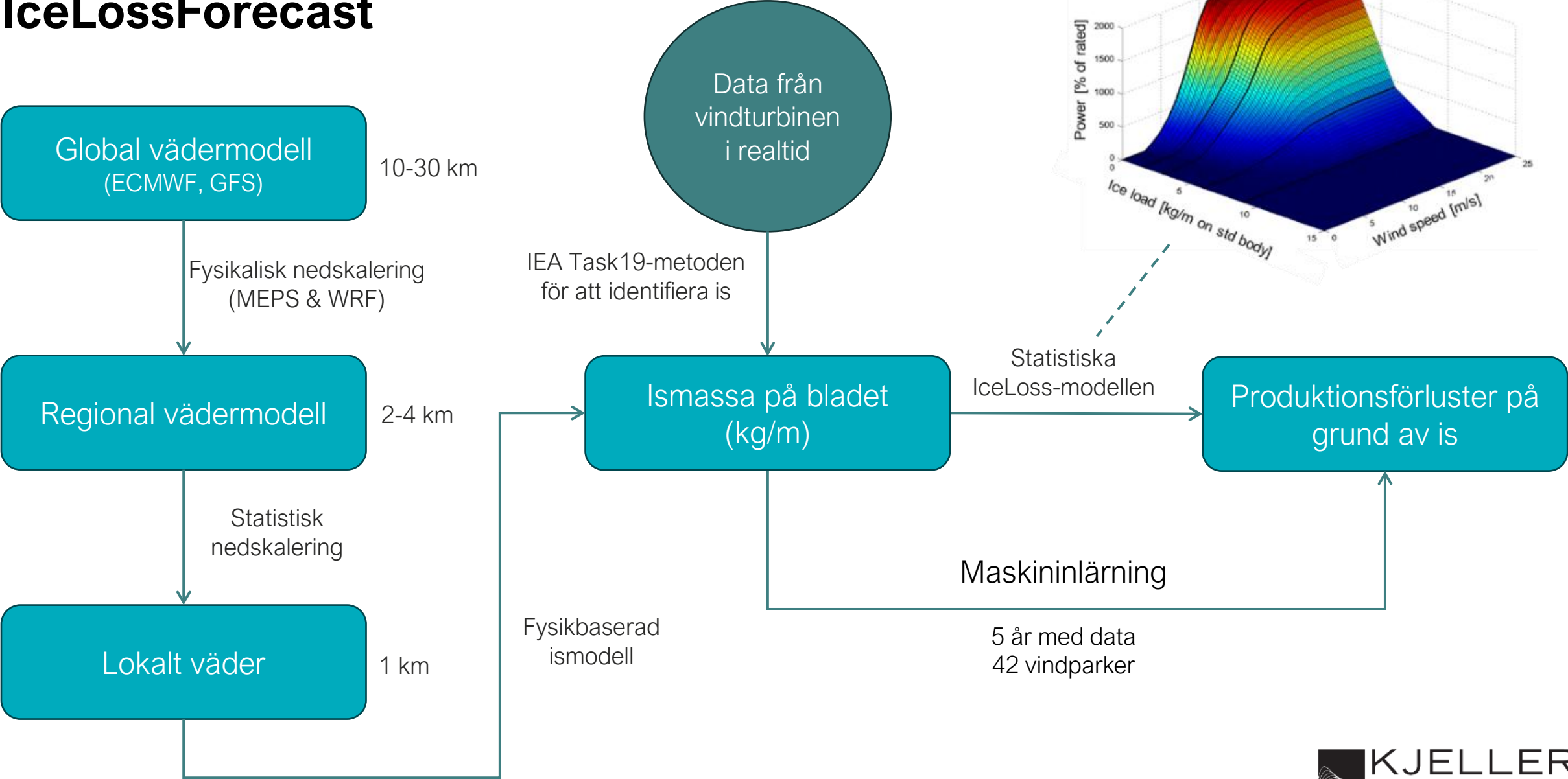
EURO/MWh



Isuppsygnad (g/m/6h)

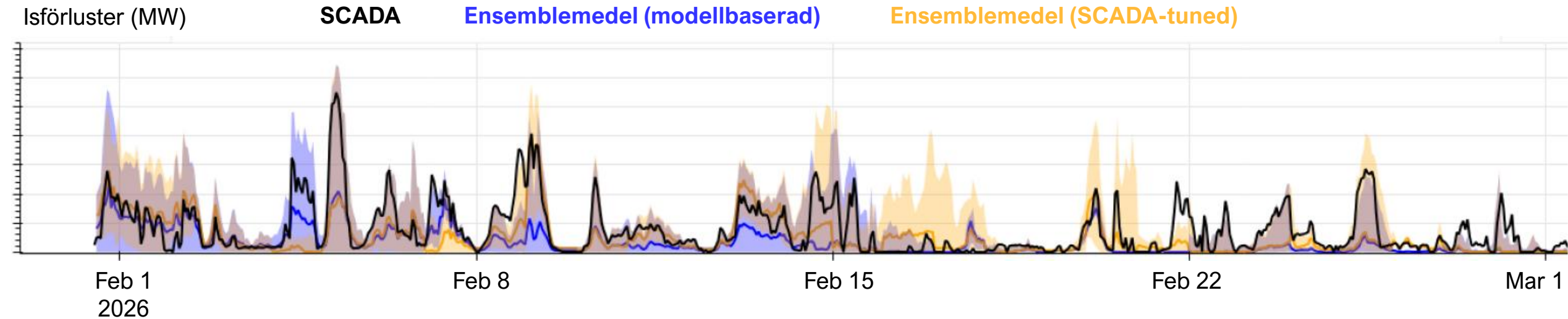


IceLossForecast



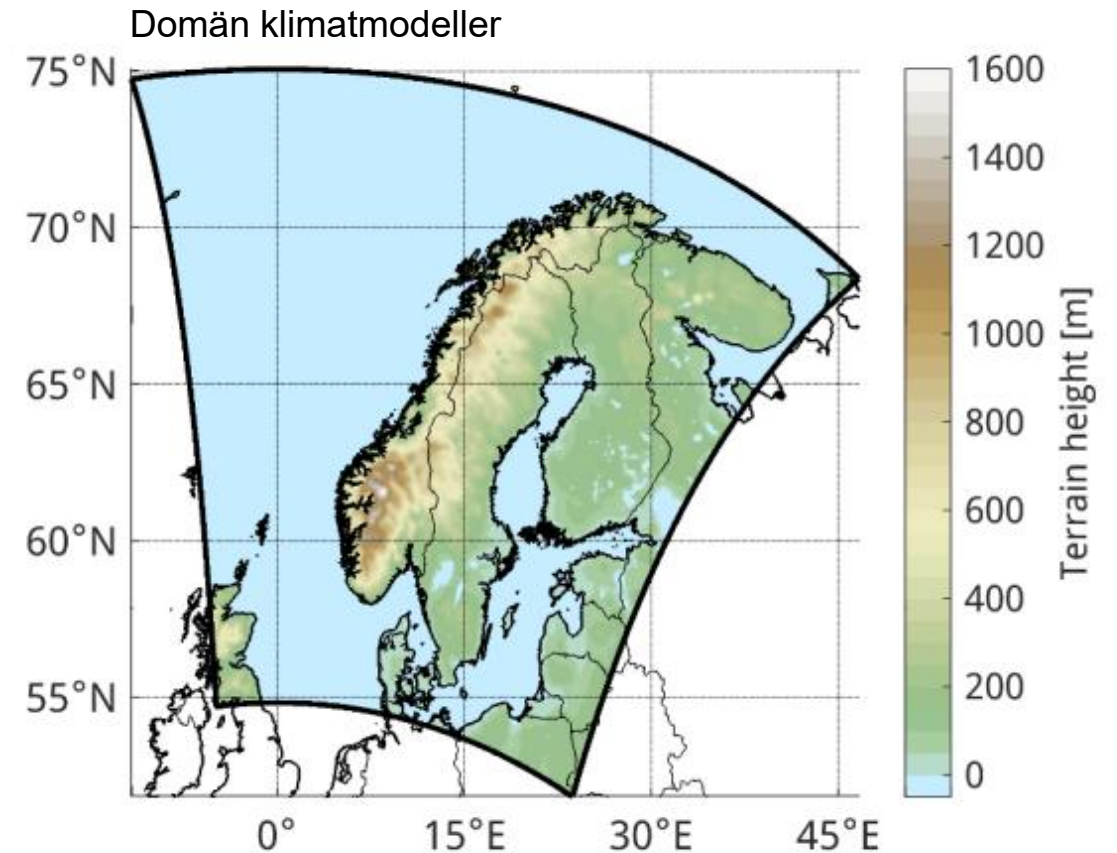
Prognoskvalitet

- ▶ En vindkraftspark i Sverige
- ▶ Februari 2026
- ▶ Prognos 24 – 48 timmar fram



Isförluster i ett framtida klimat

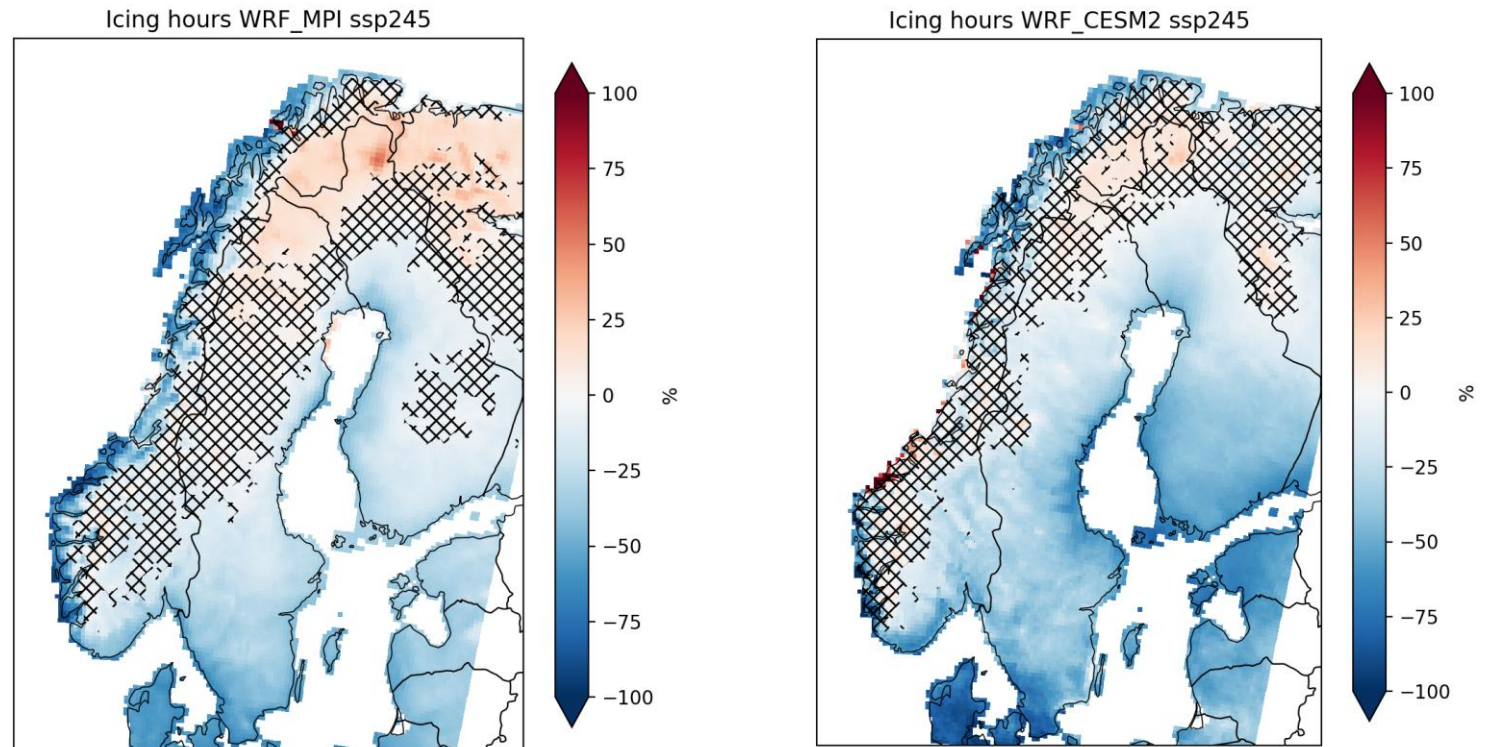
- ▶ Klimatmodeller nedskalerade med WRF
- ▶ 1990 – 2014 modellerat med historiska utsläpp
- ▶ 2015 – 2100 med klimatscenarier
- ▶ Två klimatmodeller
 - ▶ CESM2
 - ▶ MPI-ESM1.2-HR



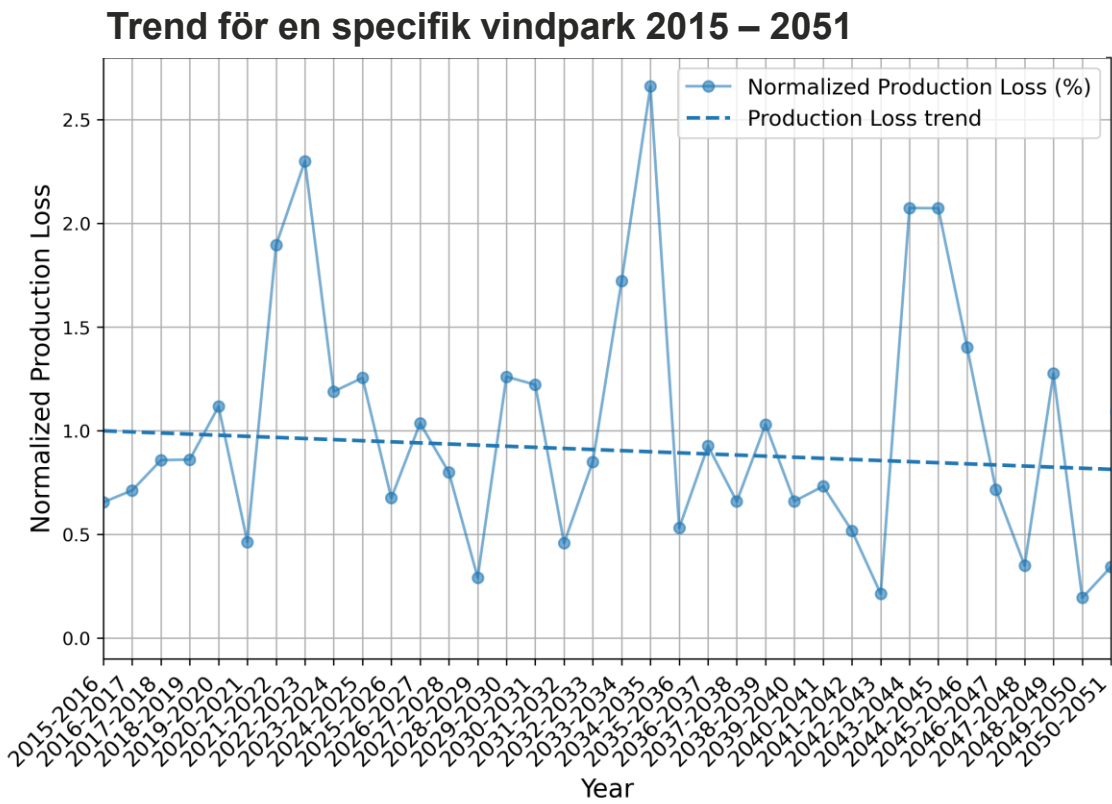
Isförluster i ett framtida klimat

- **Fler timmar** med isuppbyggnad i norr och i högre terräng
- **Färre timmar** med isuppbyggnad i söder och i lägre terräng

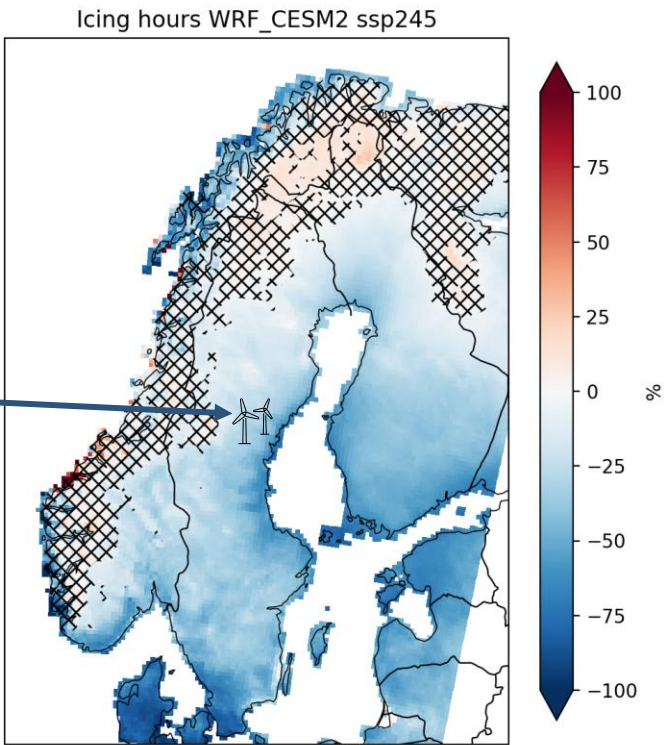
Modellerad ändring i istimmar
(2040 – 2065 vs. 1990 – 2015)



Isförluster i ett framtida klimat



Ändring i istimmar
(2040 – 2065 vs. 1990 – 2015)



Sammanfattning

- ▶ Isbildning på strukturer är ett stort problem i norra Skandinavien
- ▶ Mätningar av is värdefulla
- ▶ Modellering är utmanande!
 - ▶ Dropstorleksfördelning
 - ▶ När lossnar isen?
 - ▶ Statistisk nedskalering kan vara beräkningseffektivt för att ta fram långa tidsserier med hög kvalitet
- ▶ IceLoss: utifrån ismängd (kg/m) kan vi beräkna isförluster (%) för vindkraften
 - ▶ Nuvarande klimat, prognoser, framtida klimat



Tack för oss!