



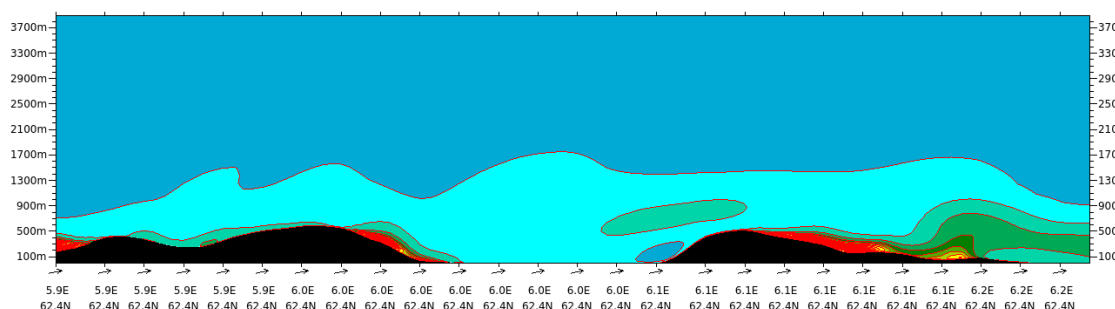
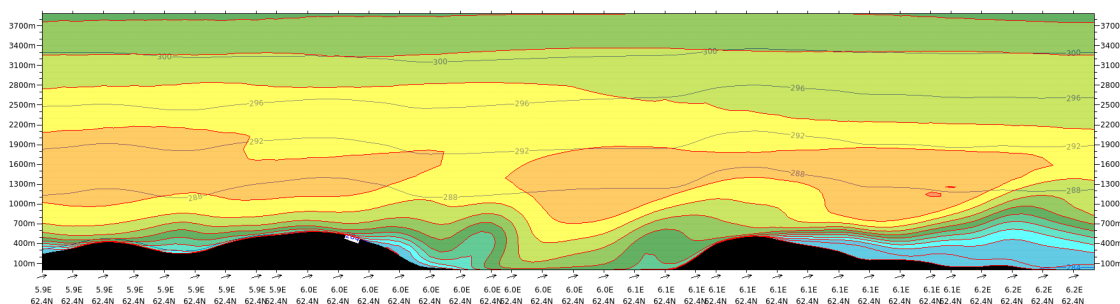
Meteorologisk  
institutt

**MET**report

Nr. 05/2020  
2387-4201  
METEOROLOGI  
Bergen, 11.06.2020

# Finskala modellering av vind i fjorder

Sulafjorden og Vartdalsfjorden 2018  
Knut Helge Midtbø, Birgitte Furevik og Lene Østvand



*Tverrsnitt over Sulaffjorden gjennom jet (vindstyrke normalt på snittet) og tilhørende turbulensintensitet fra SIMRA.*



<b>Tittel</b> Finskala modellering av vind i fjorder. Sulafjorden og Vartdalsfjorden 2018.	<b>Dato</b> 11.06.2020
<b>Avdeling</b> 1) SUV 2) Avdeling for oseanografi og maritim meteorologi	<b>Rapport nr.</b> 05/2020
<b>Forfattere</b> Knut Helge Midtbø <sup>1)</sup> , Birgitte Rugaard Furevik <sup>2)</sup> og Lene Østvand <sup>1)</sup>	<b>Klassifisering</b> <input checked="" type="radio"/> Åpen <input type="radio"/> Begrenset
<b>Oppdragsgiver</b> Statens vegvesen	<b>Oppdragsgivers referanse</b>
<b>Sammendrag</b> Denne rapporten dokumenterer vindmodelleringen med CFD-modellen SIMRA for Sula-fjorden og Vartdalsfjorden for 2018. Hindcastdatasettet og inngangsdata fra den operasjonelle værvarslingsmodellen ved MET, AROME-MEPS, er sammenlignet med vindmålinger fra 6 master. Verifikasjonen viser at SIMRA forbedrer vinden modellert på noen master i forhold til AROME-MEPS, men det er mer entydig klart at høyere romlig oppløsning gir bedre resultat for vindretningsfordelingen. SIMRA sine verdier av turbulensintensitet for hastigheter over 5 m/s samsvarer godt med det som er rapportert fra analyse av måledata fra mastene. Også fordelingen av turbulensintensitet på retninger er rimelig god.	
<b>Nøkkelord</b> vind, turbulens, finskala, sulafjorden, vartdalsfjorden, simra, arome	

## Sammendrag

Denne rapporten dokumenterer vindmodelleringen med CFD-modellen SIMRA for Sulafjorden og Vartdalsfjorden for 2018. Hindcastdatasettet og inngangsdata fra den operasjonelle værvarslingsmodellen ved MET, AROME-MEPS, er sammenlignet med vindmålinger fra 6 master. Verifikasjonen viser at SIMRA forbedrer vinden modellert på noen master i forhold til AROME-MEPS, men det er mer entydig klart at høyere romlig oppløsning gir bedre resultat for vindretningsfordelingen. SIMRA sine verdier av turbulensintensitet for hastigheter over 5 m/s samsvarer godt med det som er rapportert fra analyse av måledata fra mastene. Også fordelingen av turbulensintensitet på retninger er rimelig god.

De høyeste verdier for 98-prosentdelen av turbulensintensitet over hele 2018 finnes på vestsiden av Sulafjorden over kysten av Hareidlandet. Når vi deler opp for vindretninger er det som ventet sterkest turbulens for sørlig vind. Vind fra sørvest gir sterk turbulens i 300 m over Kvitneset og også kraftig økning i turbulensintensitet i lavere høyder ut over fjorden. Det er generelt mer turbulens for alle retninger i området mellom Langeneset og Kårsteinen og for sørvestlig vind på Kvitneset. For de kraftigste situasjonene (vind over 25 m/s) er det store gradienter i vinden på tvers av fjorden langs begge tverrsnitt helt opp til 500 m, med de høyeste verdier av TI mellom Langeneset og Kårsteinen.

Tre tilfeller med storm i løpet av 2018 er analysert for å belyse gevinsten med CFD-modellering og noen typiske vindfenomen i fjordsystemet. Ut fra SIMRA kan vi identifisere forsterkninger i vinden knyttet til topografien og vertikalt skjær i vindhastighet som også gir økt turbulens. SIMRA bidrar dermed godt til forståelsen av vindfenomener i Sulafjorden og kan i flere tilfeller gjenskape de observerte forskjelle mellom mastene.

Det pågående måleprogrammet med LiDARer i Sulafjorden vil etterhvert gi resultater som kan brukes til å vurdere forholdene og kvaliteten på SIMRA-modellen over høyden til mastene og ut over fjorden. En foreløpig sammenligning med rapporterte LiDAR-resultater antyder godt samsvar for det vertikale vindprofil og turbulensintensitet på tvers av fjorden. Sammenligningen av vindroser fra SIMRA og LiDAR i midten av fjorden er mindre god, noe som delvis kan forklares av at datasettene dekker forskjellige perioder.

# Innhold

<b>1</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Målinger</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Modeller</b>	<b>4</b>
3.1	AROME-MEPS 2.5 . . . . .	4
3.2	SIMRA . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Verifikasjon</b>	<b>8</b>
4.1	Verifikasjon mot mastobservasjoner . . . . .	8
4.2	Verifikasjon mot LiDAR . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Midlere vindforhold</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>Ekstremvind</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>Stormer</b>	<b>37</b>
7.1	14. - 15. januar 2018 . . . . .	37
7.2	20.-26. september 2018 . . . . .	42
7.3	27. november - 3. desember 2018 . . . . .	50
<b>8</b>	<b>Oppsummering</b>	<b>55</b>
	<b>Referanser</b>	<b>58</b>
<b>A</b>	<b>Verifikasjonsmål</b>	<b>59</b>
<b>B</b>	<b>Turbulent Kinetisk Energi (TKE)</b>	<b>59</b>

# 1 Introduksjon

Med numeriske modeller kartlegges været slik det observeres og det beregnes prognoser for været framover i tid. Tilgangen på observasjoner er ofte begrenset. Modellene beskriver været konsistent også der det er færre observasjoner å bygge på. Når modeller og observasjoner brukes samlet, får vi bedre muligheter til å si noe om værforholdene også der det ikke er målinger.

Modellene beregner vind og turbulens og andre værelementer i et maskenett som ofte kalles et gitter. For noen formål kreves høy geografisk oppløsning, det vil si et finmasket gitter med kort avstand mellom beregningspunktene. Samtidig er det begrensninger i regneressursene som gjør det vanskelig å regne finmaska på store geografiske områder. For å løse dette, nøstes lokale modeller med høyere oppløsning inn i modeller med dårligere oppløsning. Disse modellene med høyest oppløsning kjøres for et begrenset geografisk område.

Numeriske modeller har en utstrakt bruk som supplement til målinger i forbindelse med undersøkelser av vind- og turbulensforhold. Eksempler er i forbindelse med design av kompliserte bygg, lange broer og andre krevende konstruksjoner. I dette prosjektet modelleres det vind og turbulens for fjorder i midt-Norge i forbindelse med prosjektet Ferjefri E39.

I noen tilfeller kan værvarslingsmodellen på Meteorologisk institutt (MET), AROME MetCoOp Ensemble Prediction System (AROME-MEPS) (*Müller et al., 2017*), brukes direkte for bestemmelse av vindklimaet. AROME-MEPS har en avstand mellom beregningspunktene (gitterpunktene) på 2,5 km horisontalt. I fjordene er 2,5 km romlig oppløsning for grovt til å gi tilstrekkelige detaljer i beskrivelsen av de lokale forholdene. Vi kombinerer derfor bruken AROME-MEPS med bruk av SIMRA (*Utnes and Eidsvik, 1996; Eidsvik, 2005; Rasheed et al., 2014*), med 100 m horisontal oppløsning for å forsøke å modellere detaljene bedre.

SIMRA er en Computational Fluid Dynamics (CFD) modell som er satt opp med bakkestrykk sammen med vind og temperaturfordeling fra bakken opp til ca. 3500 m som inngangsdata og gir beregninger av vind- og turbulensforhold. SIMRA er utviklet ved SINTEF Digital som har rettighetene og setter opp modellen for nye områder med gitter, topografi og tidssteg. MET har videre satt opp modellen slik at den kan kjøres med inngangsdata fra AROME-MEPS. Gjennom dette samarbeidet har SIMRA vært i bruk ved MET i nesten 20 år til tubulensvarsling for rundt 20 norske flyplasser. Samarbeidet ble i 2016 videreført i flyplassutredninger for først Hammerfest, og så Lofoten og for Ferjefri E39 i 2017. Modelloppsettet for disse utredninger er i prinsippet det samme, men i dette prosjektet brukes modellen til å generere et hindcast-datasett for fire områder: Sulafjorden/Vartdalsfjorden, Julsundet, Gjemnessund og Halsafjorden. Denne rapporten omhandler resultatene fra Sula-fjorden/Vartdalsfjorden.

En byggefase med høye brotårn vil kreve dimensjonerende vinddata noen hundre meter opp. Målemastene er plassert på seks steder og gir gode målinger i flere nivåer opp til ca. 100 meters høyde. I denne rapporten har vi sammenlignet SIMRA-modellen med disse målingene. For å vurdere forholdene og kvaliteten på SIMRA-modellen over denne høyden er det heldigvis kommet på plass LiDAR-målinger, først med skanninger fra

LiDAR-par i brohøyde og nå sist med to vertikale LiDARer, en i mastetoppen på Kvitneset og en på en bøye midtveis mellom Kvitneset og Trælbodneset. Dette er høyaktuelle målinger for videre validering av modellen, men arbeidet er i startfasen.

Formålet med arbeidet som er presentert her, er å gi en beskrivelse av modellen og resultatene ved å verifisere mot de tilgjengelige målinger fra mastene og de rapporterte resultater fra LiDAR, samt gi en oversikt over vindforholdene i fjorden basert på modellen.

I kapittel 2 beskrives målingene i Sulafjorden og Vartdalsfjorden, i kapittel 3 beskrives modelloppsettet, i kapittel 4 sammenligner vi modellene mot målinger, og i kapitlene 5, 6 og 7 presenteres resultater fra kjøringene i Sulafjorden/Vartdalsfjorden sammenlignet med den operasjonelle modellen AROME-MEPS 2,5 km og observasjoner. Kapittel 8 gir en oppsummering.

## 2 Målinger

Måleprogrammet i Sulafjorden startet opp med de første mastene høsten 2016. Atmosfæredelen av dette programmet består av 6 master på opptil ca. 100 m i hvert av de røde punktene på land (Figur 2.1). På Kvitneset måles det temperatur, temperaturprofil, lufttrykk, relativ fuktighet. Ellers måles det vind og turbulens i 3-4 høyder for hver mast. Målingene og oppsettet er beskrevet av *Furevik et al. (2020)*. I tillegg var det i 2018 tre bøyer i Sulafjorden og en i Vartdalsfjorden. Data fra master og bøyer er tilgjengelig via [thredds.met.no](https://thredds.met.no) og <https://adc.met.no/datasets/10.21343/z9n1-qw63>. Det er kun brukt vindmålinger fra mastene i denne rapporten.

Høsten 2018 ble det satt igang et måleprogram med 4 skannende LiDARer (*Kjeller Vindteknikk, 2020*). En LiDAR er et laser-instrument som måler Doppler-forskyvningen av lyset når det rammer små partikler/aerosoler i luften. Disse partikler er så små, at det antas at de beveger seg med vinden. Ut fra Dopplerskiftet beregnes hastigheten langs med laserstrålen. Når to LiDARer fokuserer i samme punkt, kan målingene fra dem kombineres til å gi en vindvektor i det punktet. LiDAR-oppsettet er på denne måten fokusert på å måle vind og turbulensparametre i midten av og langs den ytre krysningen mellom Kvitneset og Trælbodneset. Høsten 2019 ble det i tillegg montert en vertikal LiDAR på toppen av masten på Kvitneset som gir målinger opp til ca 300 m samt en vertikal LiDAR montert på bøye kom i mars 2020 ut i midten av fjorden i snitt A. De vertikale LiDARer måler oppover i forskjellige retninger. Vinklen på disse målinger gjør at de kan kombineres til en vindvektor i senter, fordi det antas at vinden er homogen i den keglen det måles i.

Selv om det ikke er direkte overlapp mellom SIMRA-perioden og LiDAR-målingene, vil vi i rapporten referere til resultater fra LiDAR-målingene fra to rapporter (*Kjeller Vindteknikk, 2019b, 2020*).



**Figur 2.1:** Kart med navn og posisjoner på meteorologiske master (røde) og andre punkter (blå) hvor data er tatt ut fra SIMRA. Trælbodneset startet opp 3. januar 2018 og Gjeveneset startet opp 14. mars 2018. De øvrige master ble satt opp i 2016-2017.

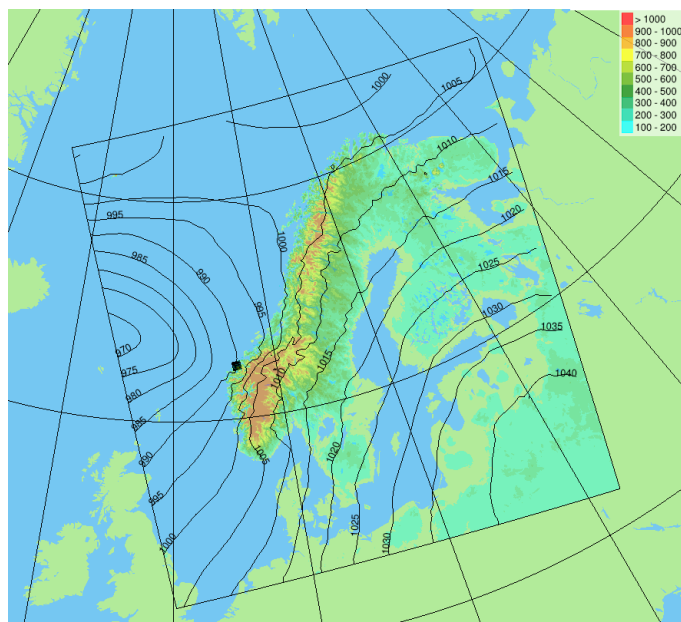
## 3 Modeller

### 3.1 AROME-MEPS 2.5

AROME-MEPS er et ensembleoppsett med 10 medlemmer basert på atmosfæremodellen HARMONIE cycle 40h1.1 med AROME's fysikk og ikke-hydrostatisk dynamikk (Müller *et al.*, 2017). Den horisontale oppløsningen er på et  $2,5 \times 2,5$  km gitter. Dataene og mer informasjon er tilgjengelig på [thredds.met.no](http://thredds.met.no). Kontrollkjøringen, medlem 0, er brukt som inngangsdata til SIMRA og i verifikasjonen.

### 3.2 SIMRA

Modelloppsettet av SIMRA med AROME som inngangsdata bygger på det som brukes daglig i turbulensvarsling for 20 norske flyplasser. Modellsystemet er også brukt tidligere i flere prosjekter i forbindelse med plassering av en ny flyplass i Lofoten. Resultatene er rapportert i *Kjeller Vindteknikk* (2019a). Figur 3.1 viser et kart med AROME-

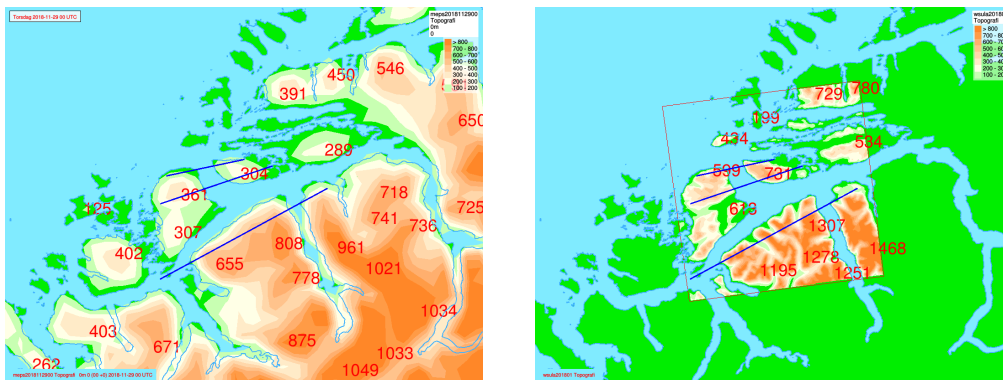


**Figur 3.1:** AROME-MEPS dekningsmråde og topografi (gitteravstand på 2,5 km) der en fargekode angir høyden over havet. Fylt sort boks markerer SIMRA-området (gitteravstand på 100 m) for Sulafjorden. På kartet vises også bakketrykket 29. november 2018 04 UTC fra AROME-MEPS.

MEPS-modellens topografi (gitteravstand på 2,5 km). På kartet vises også bakketrykket 29. november 2018 04 UTC fra AROME-MEPS for en storm som ga svært kraftig vind i Sulafjorden. Figur 3.2 viser forskjellen mellom AROME-MEPS og SIMRA sin topografi i Sulafjorden. Til venstre er topografien for Sulafjorden i AROME-MEPS med 2,5 km gitteravstand og isolinjer for hver 100 m. De høyeste toppene som AROME-MEPS løser opp på Hareidlandet og på Sula er henholdsvis 361 og 304 m. Det området som SIMRA dekker er innenfor den røde firkanten i figuren til høyre. De høyeste toppene SIMRA løser opp på Hareidlandet og på Sula er henholdsvis 613 og 731 m. De høyeste punktene er altså vesentlig høyere i SIMRA enn for AROME-MEPS.

Ved å bruke AROME-MEPS sammen med SIMRA får vi beregnet vind og turbulens i





**Figur 3.2:** Kart over Sulafjorden med topografien fra AROME-MEPS (til venstre) og SIMRA (til høyre) og de største høyder (i meter) angitt i rødt. Den samme fargepaletten som vist i øverste høyre hjørne er brukt sammen med isolinjer for hver 100 m for begge figurene. Linjene angir fra nord til sør snitt A (gjennom Kvitneset og Trælbodneset), B (gjennom Langeneset og Kårsteinen) og C (gjennom Rjåneset og Gjeveneset). Snitt C er ikke brukt i rapporten.

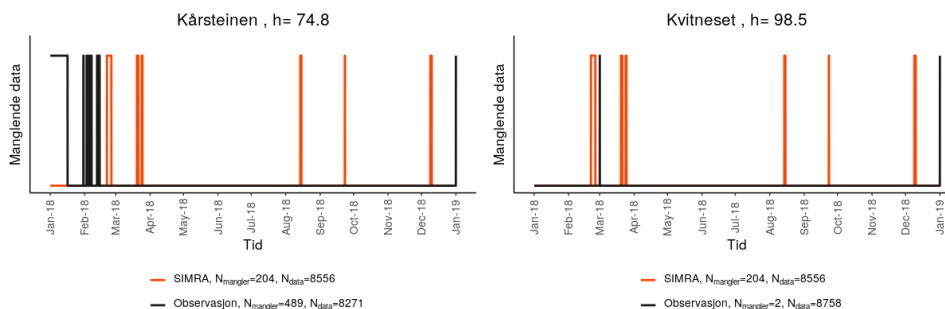
områdene rundt de mulige fjordkryssinger med 100 m horisontal oppløsning. Grunnlaget med en særlig detaljert beskrivelse av de lokale fjellene gir langt bedre muligheter til å beregne vind og turbulens over og rundt disse fjellene.

SIMRA er satt opp med 100 m gitter og er kjørt for hver time hele året 2018, med unntakelse av noen få brudd (beskrevet under). Modellområdet er på  $261 \times 261$  punkter i horisontalen og har 51 vertikallag. Modellen krever vind, temperatur og trykk fra bakken og opp til ca 3500 m fra arkiverte prognoser fra AROME-MEPS (kontrollkjøring, ensemblemedlem 0). Vind og temperatur tas fra AROME-MEPS på rendene og som utgangsverdier (initialverdier) inne i området, mens turbulent kinetisk energi (TKE) utvikles av modellen fra initialverdien 0. SIMRA beregner timesverdier for vind, temperatur og TKE. Selv om modellen starter med vind og temperatur fra AROME-MEPS utvikles det raskt TKE-verdier som er konsistente med modellens andre variable. Modellen integreres framover i tid for hver time med faste randverdier inntil vind og TKE har nådd en stasjonær tilstand.

Filene med inngangsdata fra AROME-MEPS som brukes for å kjøre SIMRA-modellen er store og det er også resultatfilene fra SIMRA. Oppsettet med SIMRA ble derfor tilpasset til å kjøre på vårt Postprosessering Infrastruktur (PPI) for å unngå belastende overføring av filer mellom PPI'et og den operasjonelle High Performance Computer (HPC) som vanligvis brukes til numeriske simuleringer.

Etter avtale har SINTEF Digital laget et oppsett med SIMRA-modellen for hvert av de fire områdene i dette prosjektet. Arbeidet har bestått i å sette opp et modellgitter nøye tilpasset topografien i området med formål å få økt regnenøyaktighet der det er viktig å få gode modelldata. Samtidig settes parametere slik at de regneressursene som er tilgjengelig utnyttes best mulig. Gitteret ledsages av spesifikke parametre for hvert område. Spesielt viktig er tidskrittet, som er satt basert på omfattende testing. For Sulafjord-modellen var det opprinnelig satt til 1 s. Etter kjøring av modellen for hele 2018, viste det seg at det var en del hull i tidsserien. Noen brudd skyldtes at modellen ble ustabil i enkelte situasjoner med sterk vind fra spesielle retninger. Ved å kjøre disse situasjonene om med kortere tidskritt, har vi fylt igjen en del av disse hull.

Gjenstående hull i hindcast-datasettet fra SIMRA er knyttet til feiling av lagringsrutiner for de operasjonelle kjøringene av AROME-MEPS i 2018. I de fleste av de tilfellene hvor historiske varsler fra AROME-MEPS ikke er tilgjengelig har vi kjørt AROME-MEPS om, men det har ikke vært ressurser til å fylle alle disse hullene. Det er ikke grunn til å tro at disse utfallene vil gi opphav til systematiske feil i serien, noe som er viktig når representativiteten til de ekstreme verdier skal vurderes. Figur 3.3 viser en oversikt over manglende data fra SIMRA og fra øverste sensor på mastene Kårsteinen og Kvitneset som eksempel. For en full tidsserie fra 2018 mangler det i alt 204 timer fra SIMRA (ca 2,3 %), 489 timer (ca. 5,6 %) observerte data fra Kårsteinen (startet opp 3. januar 2018), og 2 timer observerte data fra Kvitneset.



**Figur 3.3:** Eksempel på manglende data fra toppsensorene på Kårsteinen og Kvitneset (svart) i 2018 og manglende data fra SIMRA (rød) i samme tidsrom.

Modellen skriver til et fil-format som konverteres til netCDF ved hjelp av rutiner på MET. Fra netCDF-filene har vi brukt parametrene horisontal vind ( $x\_wind\_ml$  og  $y\_wind\_ml$  [m/s]), vertikalvind ( $upward\_air\_velocity\_ml$  [m/s]) og  $turbulence\_index\_ml$  [m/s] i rapporten. Long\_name for  $turbulence\_index\_ml$  er  $Sqrt(Turbulent\_Kinetic\_Energy)$ . Hvis

$$TKE = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2),$$

og vi antar isotrop turbulens, dvs tilnærmet like store fluktuasjoner i alle tre retninger ( $u' = v' = w'$ ), får vi

$$TKE = \frac{3}{2}(u'^2),$$

slik at variabelen fra SIMRA er

$$\sqrt{TKE} = u' \sqrt{\frac{3}{2}} \tag{1}$$

$u'$  kan oppfattes som standardavvik av vindhastighet. Turbulensintensiteten TI er definert som

$$TI = \frac{u'}{\bar{u}}, \tag{2}$$

hvor  $\bar{u}$  er middelverdien av vindhastigheten. For en målt tidsserie vil  $u'$  og  $\bar{u}$  beregnes over en periode på for eksempel 10 minutter og det er den parameter som den horisontale vinden i modellen skal representere. Derfor bruker vi horisontal vindhastighet for hver time til å beregne TI og vi har satt en nedre grense for vindhastigheten på 5 m/s for ikke

å komme til å fokusere på høye turbulensverdier ved svak vind. Figurer med modellens turbulensparameter (formel (1)) er tatt med i appendix B.

I analysen i kapittel 5 og 6 vises det resultater fra tre tverrsnitt som er markert med blå linjer i figur 3.2. Vi refererer til dem som A, B og C. A er snittet lengst mot nord og er trukket gjennom masteposisjonene på Kvitneset og Trælbodneset. B er tilsvarende gjennom posisjonene på Langeneset og Kårsteinen, mens C refererer til snittet lengst sør som er trukket gjennom posisjonene på Rjaaneset og Gjeveneset. Alle er forlenget mot WSW og ENE i forhold til mastposisjonene.

I noen figurer er det vist resultater oppdelt på retningssektorer. Oppdelingen er gjort ut fra midtpunktet i 70 m høyde i snitt A (se også figur 2.1). Enten i fire sektorer: nordøst ( $0 - 90^\circ$ ), sørøst ( $90 - 180^\circ$ ), sørvest ( $180 - 270^\circ$ ) og nordvest ( $270 - 360^\circ$ ), eller i to sektorer: nord ( $-90 - +90^\circ$ ), og sør  $90 - 270^\circ$ .

## 4 Verifikasjon

### 4.1 Verifikasjon mot mastobservasjoner

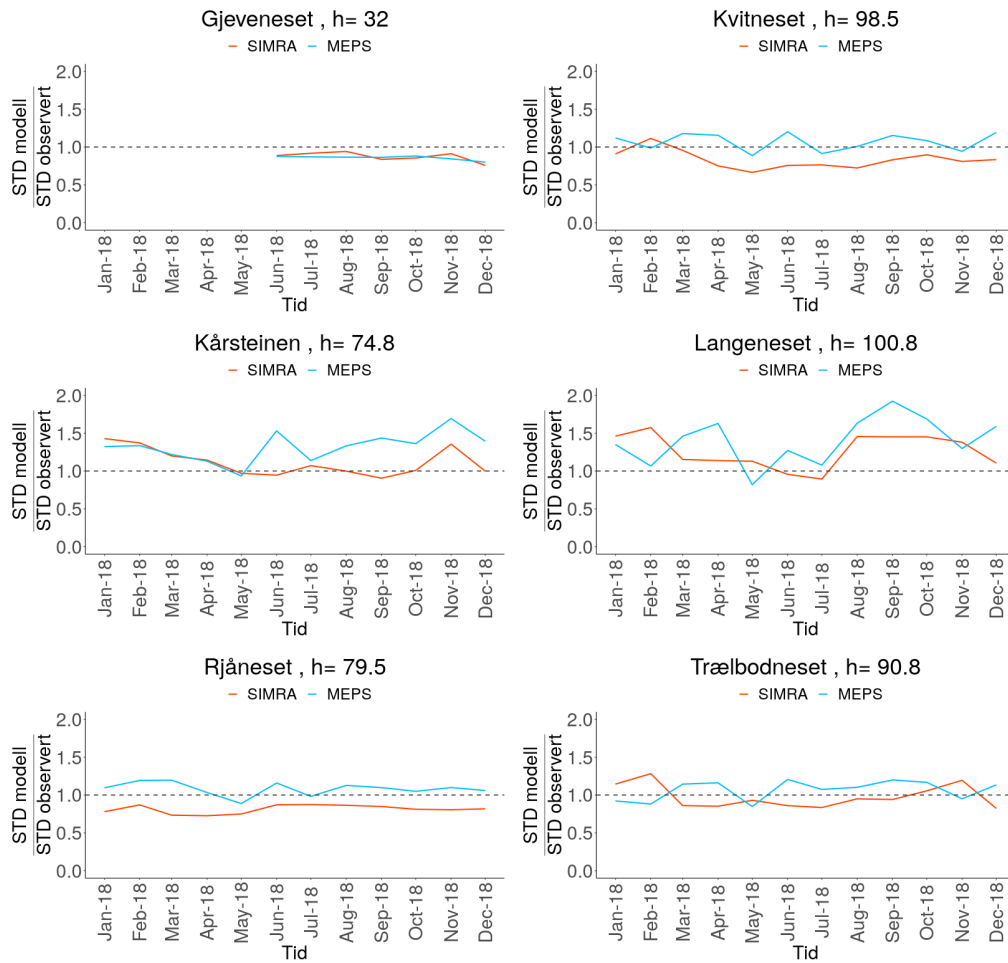
Tabell 1 viser 98-prosentdeler for vindstyrke fra observasjoner og modellene, og standardavvik for observert vindstyrke, mens tabell 2 viser ulike verifikasjonsscore for de to modellene AROME-MEPS og SIMRA. Figur 4.1 viser forholdet mellom standardavvik for modellene og øverste sensor på hver mast for hver måned. Dette verifikasjonsmålet kan tolkes som modellens aktivitet. Det er ikke stor forskjell på SIMRA og AROME-MEPS, begge ligger ganske tett på observasjonene. AROME-MEPS ligger overraskende nok høyest og høyere enn observert på Kårsteinen og Langeneset. Verifikasjonsscorene er nærmere beskrevet i appendix A. Merk at det mangler data fra toppsensor på Trælbodneset og Kårsteinen i forhold til de andre høyder på disse mastene. For SIMRA er det

Mast	Sensorhøyde [m]	98% OBS [m/s]	98% SIMRA [m/s]	98% MEPS [m/s]	STD OBS [m/s]	N
Gjeveneset	32.0	15.7	13.5	13.3	4.0	5051*
Gjeveneset	21.5	15.0	12.7	12.3	3.8	5051
Kårsteinen	74.8	10.0	10.0	13.7	2.4	8018
Kårsteinen	52.0	9.7	9.3	13.7	2.3	8450
Kvitneset	98.5	14.3	11.5	14.2	3.3	8505
Kvitneset	77.5	14.2	11.1	13.5	3.3	8505
Kvitneset	50.5	14.0	10.1	12.5	3.2	8504
Langeneset	100.8	10.7	13.6	14.3	2.5	8500
Langeneset	81.0	10.8	12.9	13.6	2.5	8500
Langeneset	56.0	10.5	11.7	12.7	2.5	8500
Langeneset	33.0	10.1	10.3	11.7	2.4	8500
Rjåneset	79.5	15.7	13.0	17.3	4.0	8429
Rjåneset	59.4	15.8	12.5	16.5	3.9	8429
Rjåneset	36.8	15.7	11.4	15.1	3.9	8429
Trælbodneset	90.8	13.7	14.7	15.2	3.4	8135
Trælbodneset	62.3	14.1	14.4	14.5	3.6	8445
Trælbodneset	41.3	13.7	13.3	13.7	3.4	8445

**Tabell 1:** 98-prosentdelen (98%) og standardavvik (STD) for vindstyrke fra master og modeller i Sulafjorden. MEPS er AROME-MEPS. \*Gjeveneset har færre datapunkter da informasjon fra AROME-MEPS kun var tilgjengelig fra juni 2018 på det tidspunktet vi hentet ut data for denne stasjonen.

gjort horisontal interpolering til mastlokasjonen. For AROME-MEPS brukes det sjø- eller kyst-gitterpunktet blant de 4 nærmeste naboene til masten, som har høyest korrelasjon til observasjonene, se figur 4.2 (det antas at gitterpunkter lenger inn på land vil representere observasjonen dårlig, siden mastene er plassert nært sjøen). Det er ikke valgt horisontal interpolasjon for AROME-MEPS siden denne har en mye grovere romlig oppløsning enn SIMRA, i et område med stor variasjon i topografien. I begge tilfeller er det gjort lineær vertikal interpolasjon til sensorhøyden.

For Gjeveneset, Kårsteinen, Langeneset og de to øverste sensorene på Trælbodneset ligger SIMRA nærmest den observerte 98-prosentdelen for vindstyrke, og AROME-MEPS



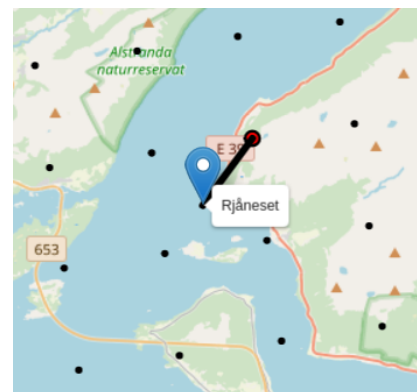
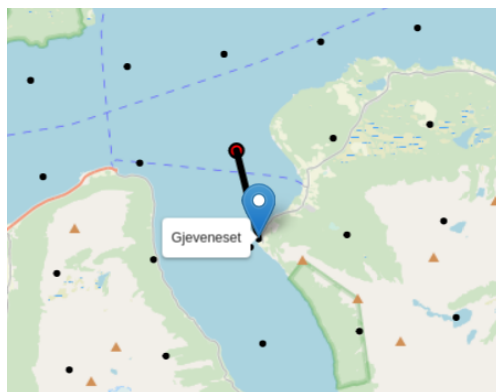
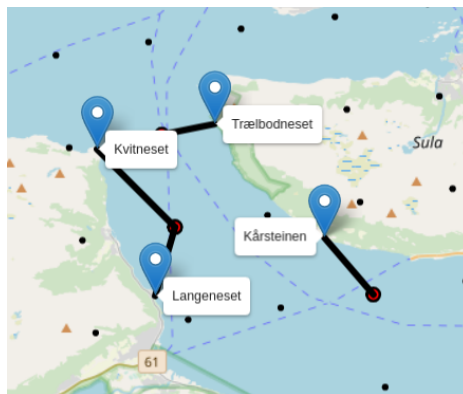
**Figur 4.1:** Månedlig forhold mellom standardavvik for modell og øverste sensor på hver mast, for SIMRA (rød) og AROME-MEPS (blå).

nærmest for de resterende. Figur 4.1 viser at standardavviket for SIMRA stort sett ligger nærmest det som er observert for Kårsteinen, og gjør det også noe bedre for Langeneset, mens AROME-MEPS stort sett ligger nærmest for Kvitneset. For Trælbodneset ligger standardavviket fra begge modeller ganske nært observert standardavvik. Det varierer om modellene ligger litt over eller under observert 98-prosentdel og standardavvik. Tabell 2

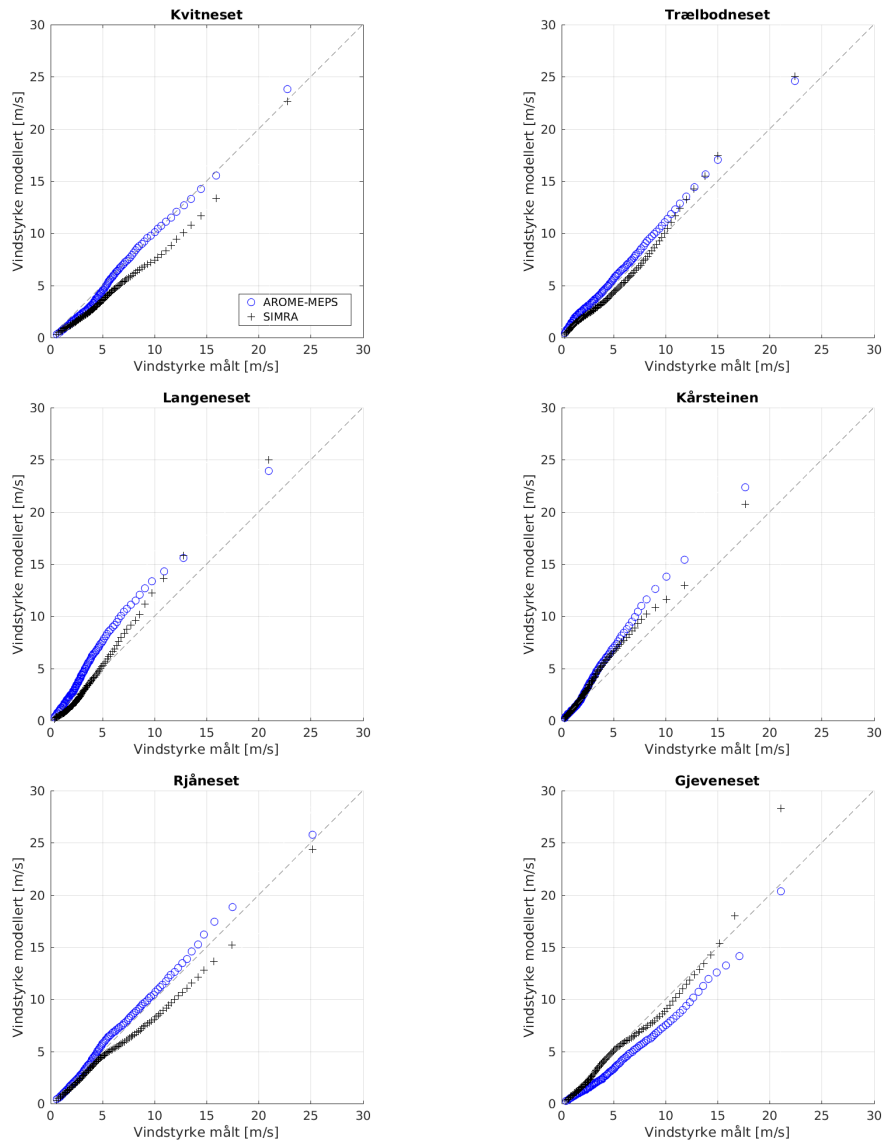
Mast	Sensorhøyde [m]	ME SIMRA [m/s]	ME MEPS [m/s]	RMSE SIMRA [m/s]	RMSE MEPS [m/s]	SDE SIMRA [m/s]	SDE MEPS [m/s]	Kor. SIMRA	Kor. MEPS
Gjeveneset	32.0	-1.2	-1.6	3.1	2.8	2.9	2.3	0.7	0.8
Gjeveneset	21.5	-1.2	-1.7	3.0	2.8	2.7	2.2	0.7	0.8
Kårsteinen	74.8	0.1	0.9	2.1	2.7	2.1	2.5	0.6	0.7
Kårsteinen	52.0	-0.2	1.1	2.2	3.0	2.2	2.8	0.6	0.6
Kvitneset	98.5	-1.4	-0.4	3.1	2.7	2.7	2.7	0.6	0.7
Kvitneset	77.5	-1.6	-0.7	3.1	2.7	2.7	2.6	0.6	0.7
Kvitneset	50.5	-1.8	-1.0	3.2	2.7	2.6	2.5	0.6	0.7
Langeneset	100.8	-0.1	1.4	2.6	3.4	2.6	3.1	0.6	0.5
Langeneset	81.0	-0.3	1.2	2.6	3.2	2.5	2.9	0.6	0.5
Langeneset	56.0	-0.6	0.9	2.5	2.8	2.4	2.6	0.6	0.6
Langeneset	33.0	-0.9	0.5	2.5	2.3	2.3	2.3	0.5	0.6
Rjåneset	79.5	-1.2	0.4	2.9	2.6	2.7	2.5	0.7	0.8
Rjåneset	59.4	-1.5	0.05	3.0	2.5	2.7	2.5	0.7	0.8
Rjåneset	36.8	-1.9	-0.5	3.3	2.5	2.6	2.4	0.7	0.8
Trælbodneset	90.8	-0.4	0.6	2.6	2.4	2.6	2.4	0.7	0.8
Trælbodneset	62.3	-0.7	0.04	2.7	2.3	2.6	2.3	0.7	0.8
Trælbodneset	41.3	-0.9	0.01	2.7	2.3	2.5	2.3	0.7	0.8

**Tabell 2:** Verifikasjonsscore root-mean-square-error (RMSE), standard deviation av feilen (SDE), mean error (ME) og korrelasjon (Kor.) for modellert vindstyrke i Sulaffjorden. MEPS er AROME-MEPS. Mean error er basert på modell-mast, dvs at negative verdier betyr at modellen underestimerer.

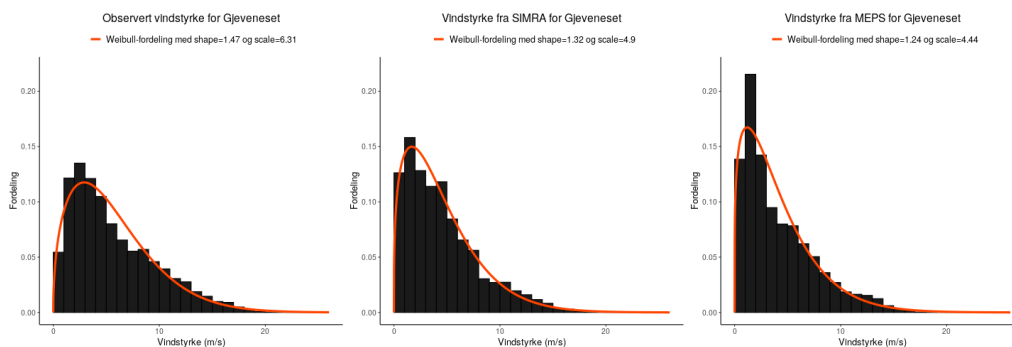
viser at SIMRA stort sett underestimerer vindhastigheten med unntak av den øverste sensoren i masta på Kårsteinen, som har en svakt positiv middelfeil på 0.1 m/s. Den største negative middelfeilen finner vi i den laveste sensoren i masta på Rjåneset, med -1.9 m/s. Her er det også størst RMSE på 3.3 m/s, mens Kårsteinen har lavest RMSE på 2.1-2.2 m/s. SIMRA korrelerer positivt med alle observasjoner, med verdier mellom 0.5 og 0.8. AROME-MEPS underestimerer vindhastighet for Gjeveneset, Kvitneset og den nederste sensoren for Rjåneset, og overestimerer ellers. Gjeveneset har størst middelfeil på -1.6 m/s og -1.7 m/s, mens Langeneset har størst RMSE på 3.4 m/s i øverste sensor. Lavest RMSE for AROME-MEPS er i nederste sensor på Langeneset og på Trælbodneset med verdi på 2.3 m/s. AROME-MEPS korrelerer positivt med alle observasjoner, med verdier mellom 0.5 og 0.8. AROME-MEPS har ofte, men ikke alltid, høyere korrelasjonskoeffisient enn SIMRA, mens det er større variasjon i hvilken modell som scorer best for ME, RMSE og SDE.



**Figur 4.2:** Mastlokasjoner vist som blå markører og gitterpunkter fra AROME-MEPS vist som svarte prikker. De røde prikkene er det gitterpunktet som er valgt for verifikasjon for den aktuelle stasjonen forbundet med svart linje.

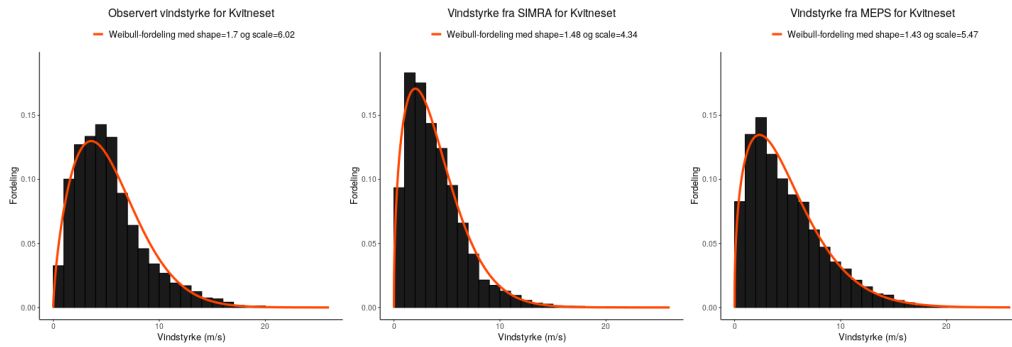


**Figur 4.3:** Kvantil-kvantil-plott av vindstyrke for SIMRA (svarte pluss) og AROME-MEPS (blå sirkler) for hver av de 6 mastene. Hvert punkt representerer 1 % av dataene. Stiplet linje er 1:1-linjen.

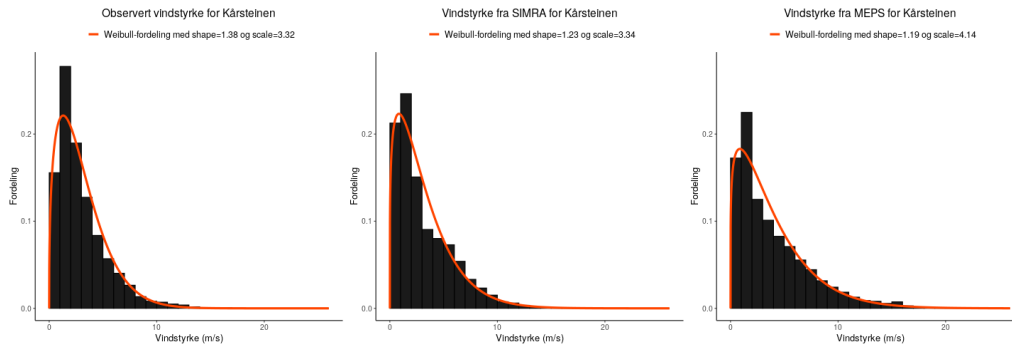


**Figur 4.4:** Histogram og tilpasset Weibull-fordeling for vindstyrke av samtidige data fra øverste sensorhøyde på Gjeveneset med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.

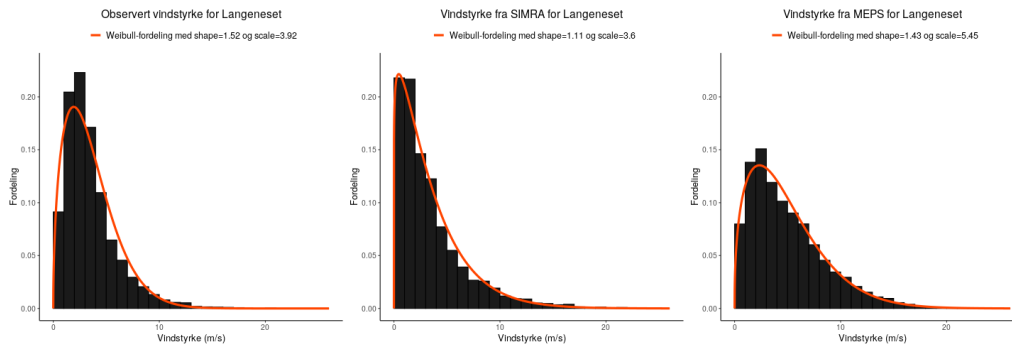




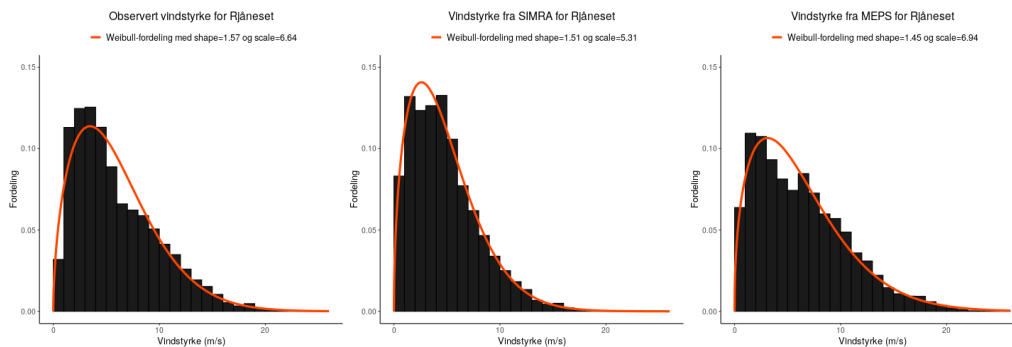
**Figur 4.5:** Histogram og tilpasset Weibull-fordeling for vindstyrke av samtidige data fra øverste sensorhøyde på Kvitneset med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.



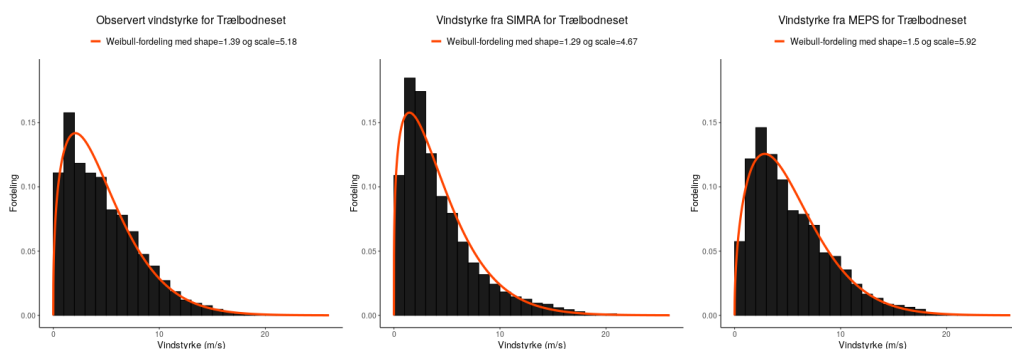
**Figur 4.6:** Histogram og tilpasset Weibull-fordeling for vindstyrke av samtidige data fra øverste sensorhøyde på Kårsteinen med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.



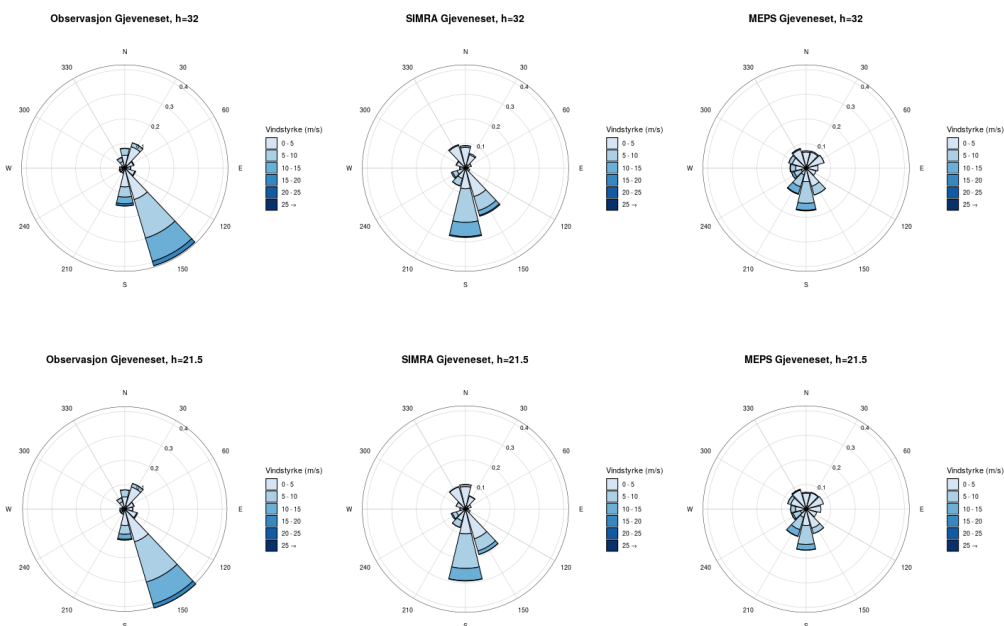
**Figur 4.7:** Histogram og tilpasset Weibull-fordeling for vindstyrke av samtidige data fra øverste sensorhøyde på Langeneset med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.



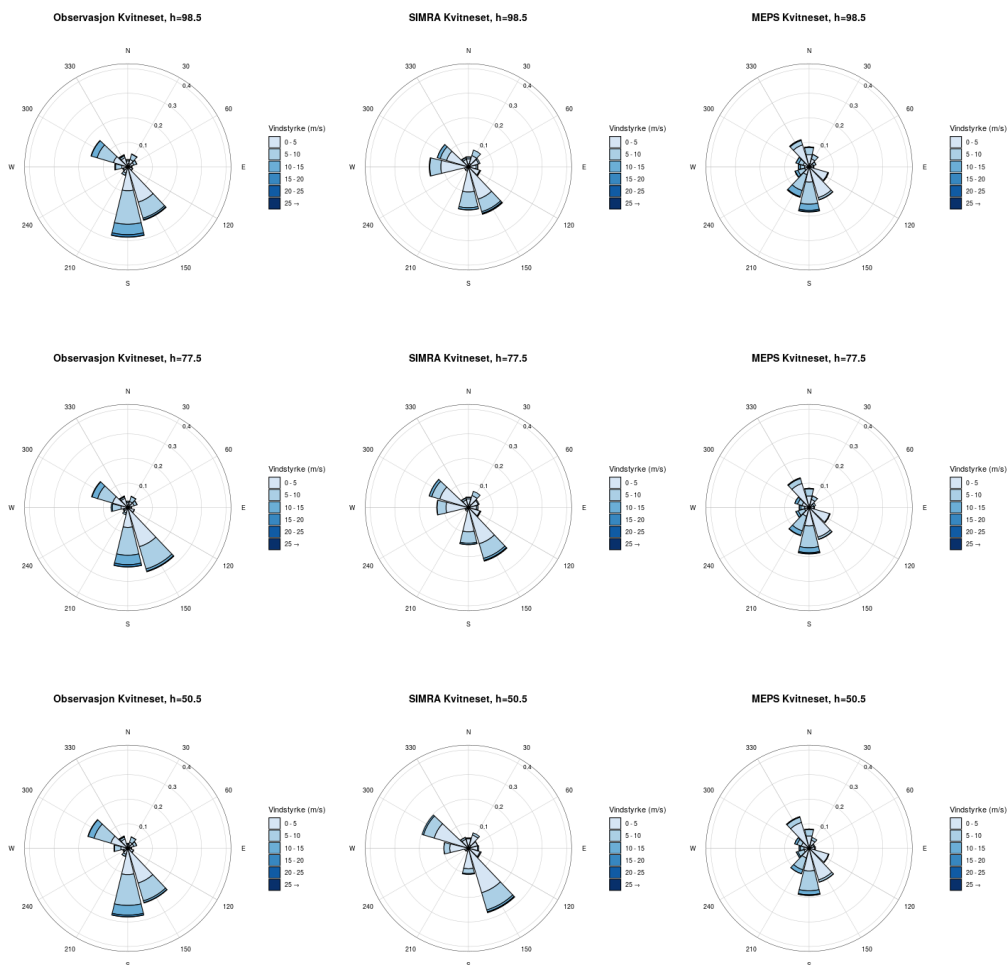
**Figur 4.8:** Histogram og tilpasset Weibull-fordeling for vindstyrke av samtidige data fra øverste sensorhøyde på Rjåneset med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.



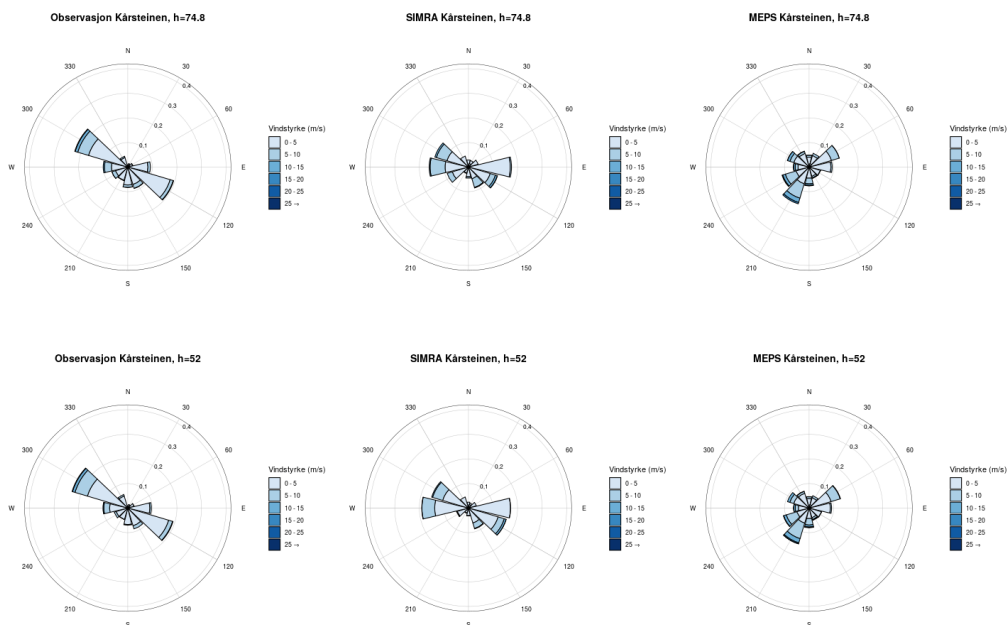
**Figur 4.9:** Histogram og tilpasset Weibull-fordeling for vindstyrke av samtidige data fra øverste sensorhøyde på Trælbodneset med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.



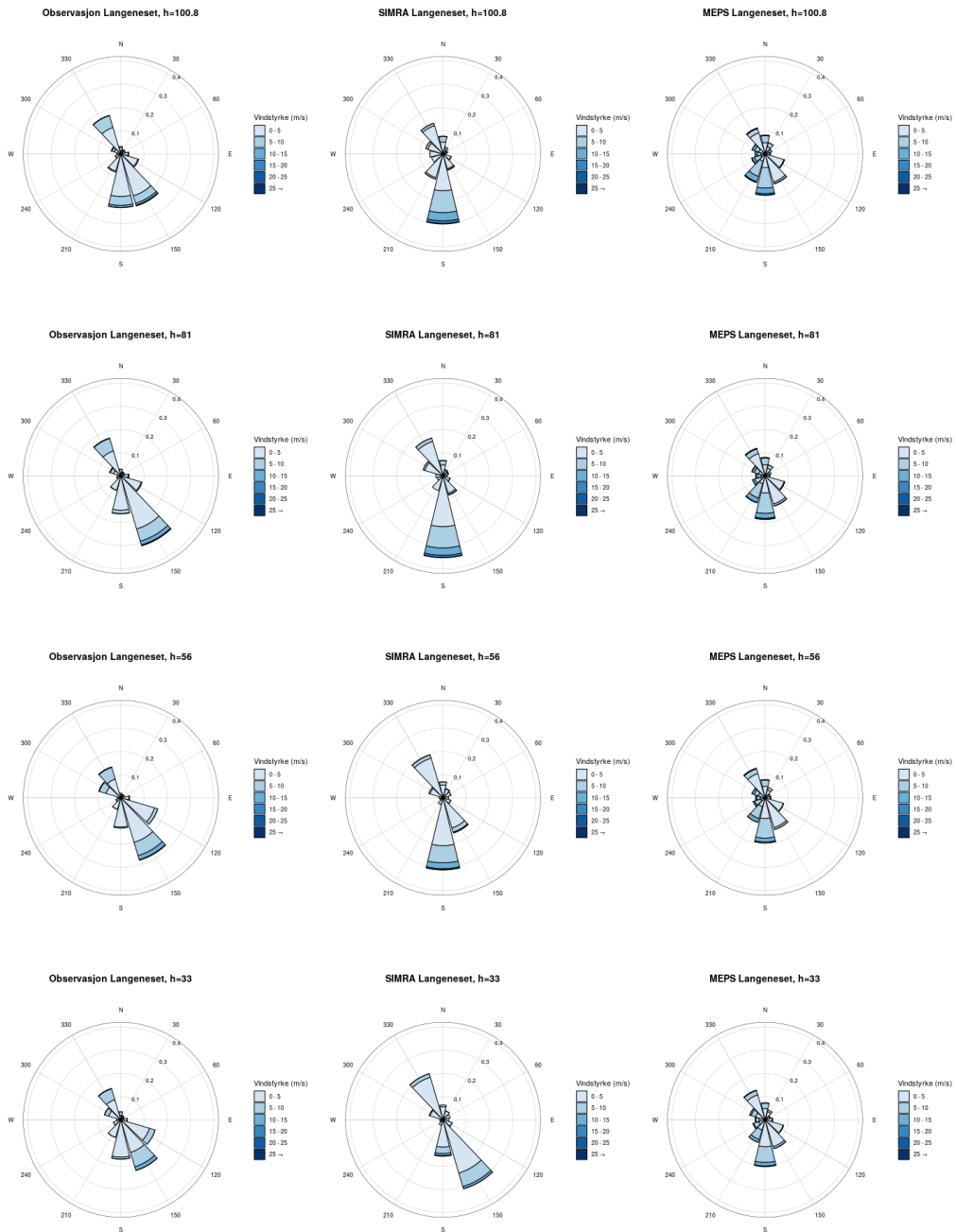
**Figur 4.10:** Vindroser for alle høyder på Gjeveneset, med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.



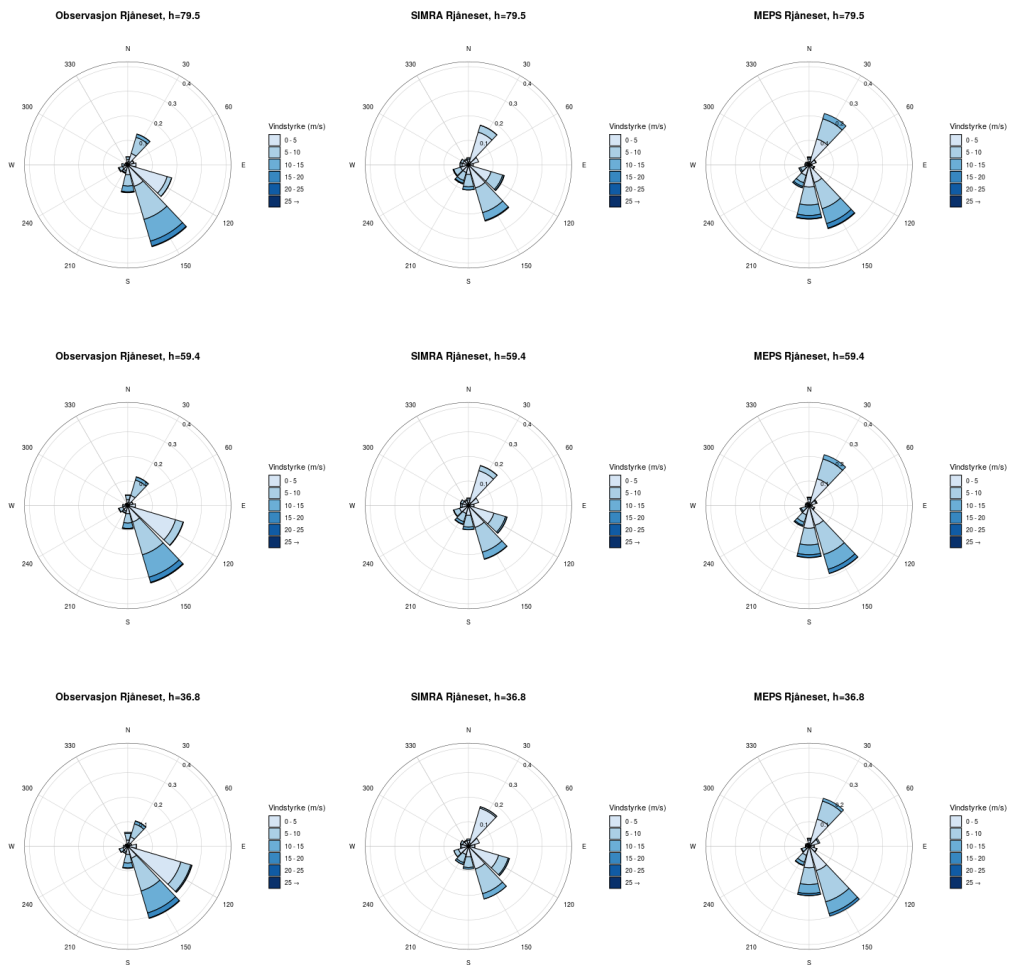
**Figur 4.11:** Vindroser for alle høyder på Kvitneset, med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.



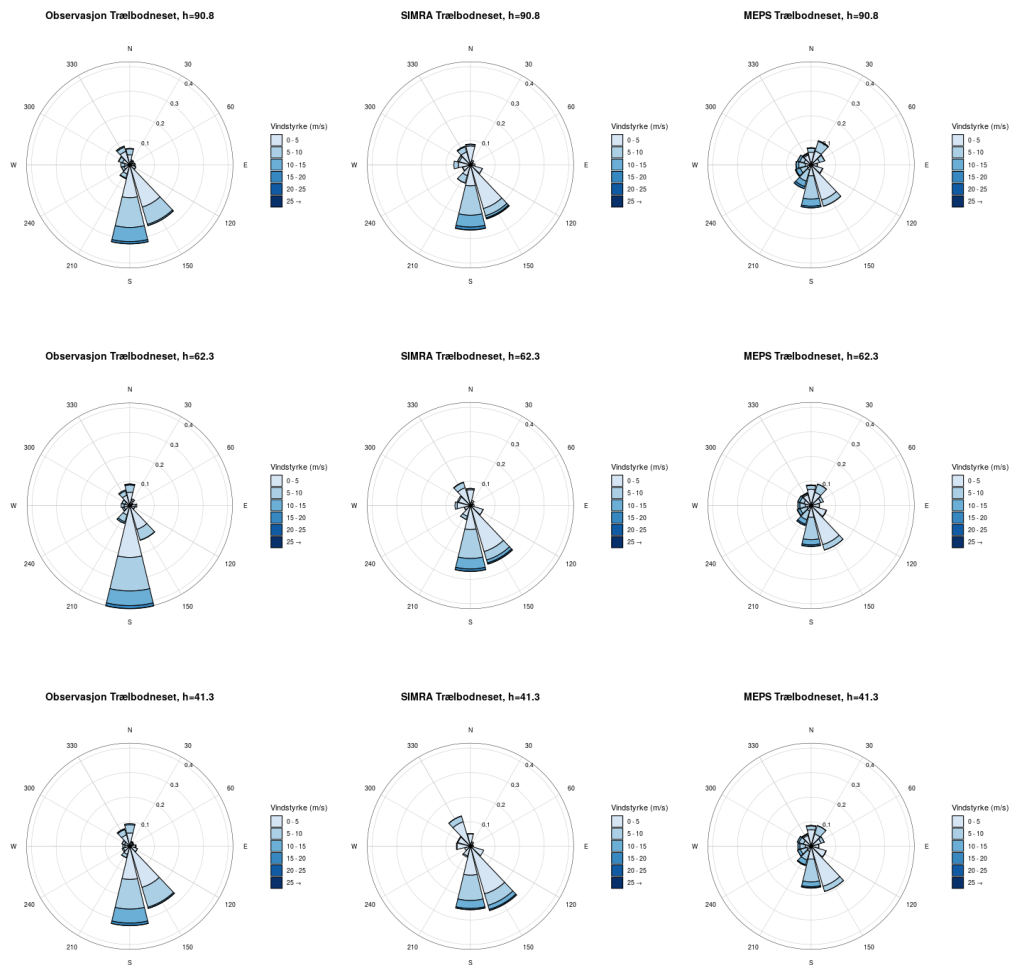
**Figur 4.12:** Vindroser for alle høyder på Kårsteinen, med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.



**Figur 4.13:** Vindroser for alle høyder på Langeneset, med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.



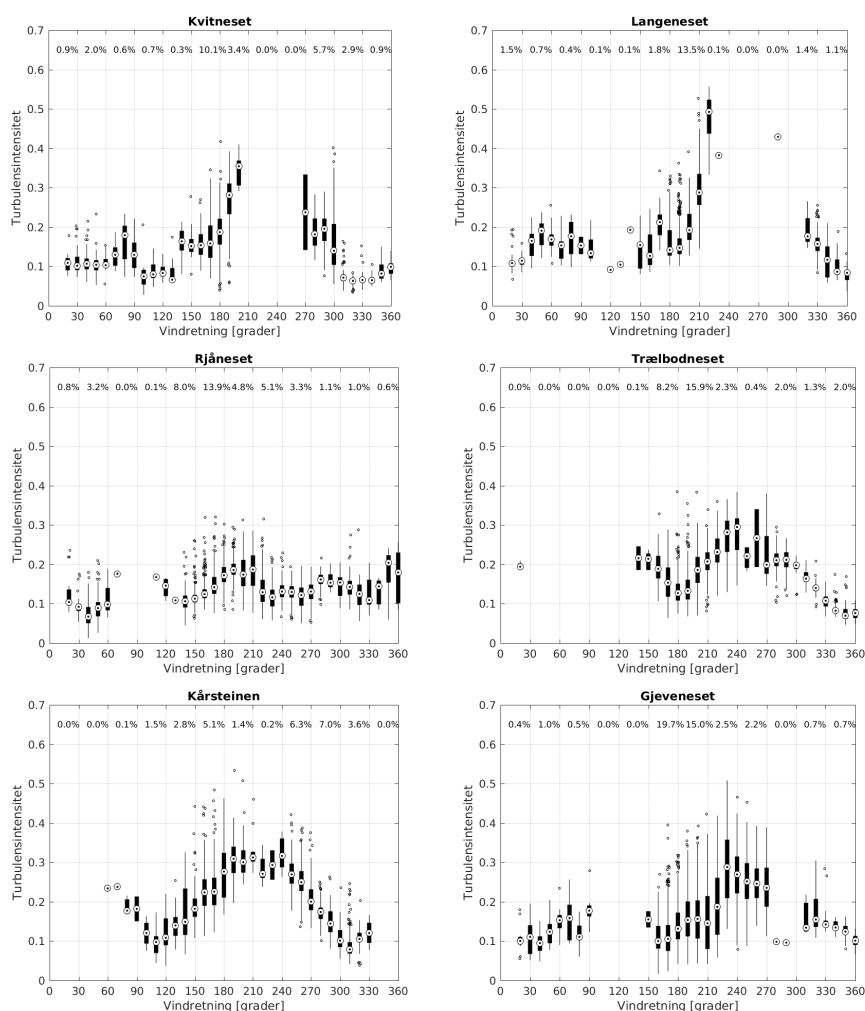
**Figur 4.14:** Vindroser for alle høyder på Rjåneset, med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.



**Figur 4.15:** Vindroser for alle høyder på Trælbodneset, med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.

Verifikasjonsresultatene i tabell 1 og 2 antyder at SIMRA og AROME-MEPS modellerer vindstyrke omtrent like godt når vi bruker disse verifikasjonsmålene, det er i alle fall ikke entydig slik at den ene modellen er bedre enn den andre. Kvantil-kvantil-plottene i figur 4.3 viser heller ikke entydige resultater. AROME-MEPS samsvarer bedre med observasjonene for Kvitneset og Rjåneset, mens SIMRA treffer bedre for Gjeveneset, Langeneset og Trælbodneset. For Kårsteinen er det ganske likt for lave vindstyrker, mens SIMRA treffer noe bedre for vindstyrker over 5 m/s. SIMRA viser histogram/Weibull-fordelinger i noe bedre samsvar med det som er observert for en del av mastene (figur 4.4-4.9), men er heller ikke her entydig bedre enn AROME-MEPS.

Når vi ser på vindrosene i figur 4.10-4.15 derimot, er SIMRA tydelig bedre på å modellere vindretning. AROME-MEPS har generelt stor spredning i vindretningen, mens SIMRA stort sett har en fordeling på vindretningene som samsvarer med det som er observert, og også stemmer overens med topografien i området. SIMRA har et mye finere oppløst gitter og dermed mer realistisk topografi enn AROME-MEPS, og det er mulig at AROME-MEPS hadde fanget opp vindretning bedre med høyere romlig oppløsning.



**Figur 4.16:** Turbulensintensitet i 100 m høyde fra SIMRA for nærmeste punkt til de seks master i Sulafjorden og Vartdalsfjorden med medianen og standardavvik for hver 10 graders retningsintervall og tynne linjer som angir 25 og 75-prosentdelene. Kun situasjoner med vindhastighet over 5 m/s er tatt med. Datadekningen over 30 graders intervaller er vist i prosent øverst i hver figur.

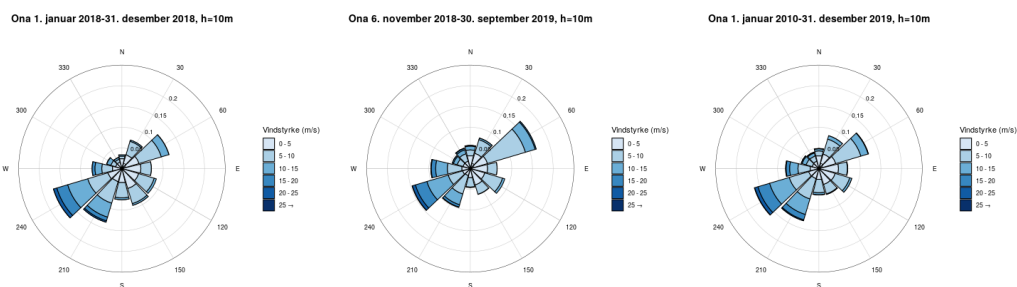
Retningsavhengigheten av turbulensintensiteten på mastlokasjonene for vindhastighet over 5 m/s (figur 4.16) har visuelt store likhetstrekk med tilsvarende analyse fra mastene (*Kjeller Vindteknikk*, 2019c, figur 4-13). Nivået på TI fra SIMRA ser ut til å svare bedre til en midlingsperiode for mastene på 10 minutter enn til en midlingsperiode på en time (*Kjeller Vindteknikk*, 2019c, figur 4-14). Både nivået på TI og variasjonene på retning har godt samsvar med mastene, og avvik ser ut for å være knyttet til vindretninger med liten data-dekning i enten modellen eller fra mastene. I et videre arbeid kan det gjøres en direkte sammenligning av TI fra SIMRA og et uttrekk av målingene for 2018. Det er ikke gjort her.

## 4.2 Verifikasjon mot LiDAR

Kjeller Vindteknikk har ansvaret for LiDAR-målingene i prosjektet og har gjort et stort arbeid med oppsett av LiDARer, innsamling av data og etterprosessering og analyse av målingene. Det finnes i hovedsak disse målingene fra LiDAR-oppsettet i Sulafjorden:

1. Vindmålinger i 70 m høyde; I midten av tverrsnitt A og 75 m fra midten (for koherens-analyser) siden 6. november 2018 (*Kjeller Vindteknikk*, 2020).
2. Radiell vind langs tverrsnitt A fra Kvitneset til Trælbodneset siden 6. november 2018 (*Kjeller Vindteknikk*, 2020).
3. Høydeprofil av vindstyrke og -retning over toppen av masten på Kvitneset siden 24. januar 2019 (*Kjeller Vindteknikk* (2019b))
4. Beskrivende skanninger fra Kvitneset (noen eksempler i *Kjeller Vindteknikk* (2020)).
5. Høydeprofil av vindstyrke og -retning i midten av tverrsnitt A fra LiDAR-bøye siden mars 2020 (foreløpig ikke dokumentert).

I dette avsnittet viser vi resultater fra SIMRA i figurer som kan sammenlignes med figurene fra *Kjeller Vindteknikk* (2019b) og *Kjeller Vindteknikk* (2020) (LiDAR-rapportene). SIMRA er kjørt for 1. januar 2018 - 31. desember 2018, mens måleperioden med skannende LiDAR *Kjeller Vindteknikk* (2020) er fra september 2018 - september 2019. Ona fyr (Ona II, stasjonnummer 62480, [frost.met.no](http://frost.met.no)) er en stasjon med målinger langt tilbake i tid, og vi kan bruke data fra denne stasjonen til å sammenligne vindklimaet i forskjellige perioder. Figur 4.17 viser at perioden med LiDAR-målinger var preget av nordvestlig vind, mens 2018 hadde mer sørvestlig vind. Resultatene, særlig vindrosene, fra SIMRA er derfor ikke helt sammenlignbare med resultater i LiDAR-rapportene, men det er mulig å hente ut samme periode eller korrigere for det i et senere arbeid.



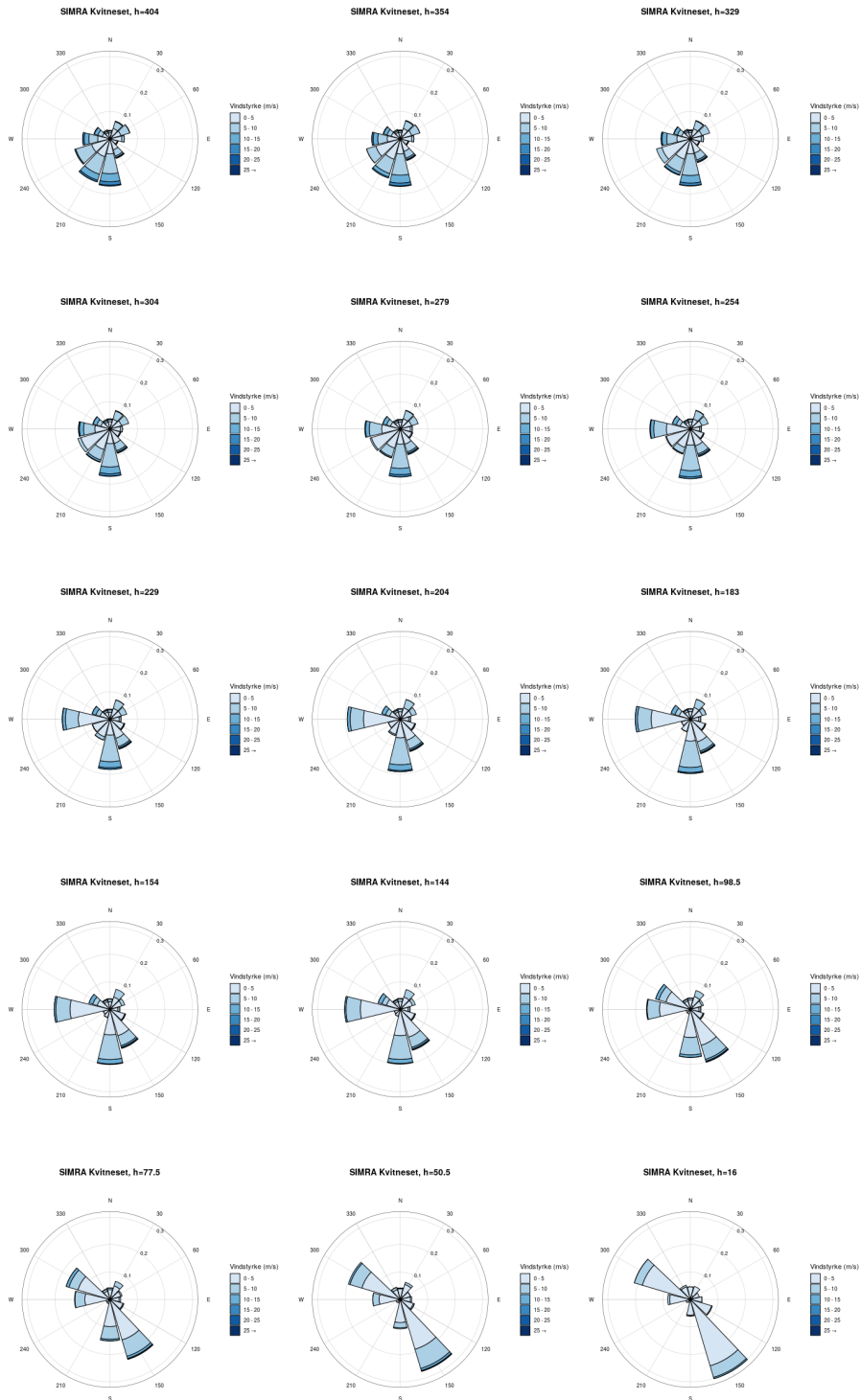
**Figur 4.17:** Vindroser ved Ona (fra venstre til høyre) for periodene 1. januar-31. desember 2018, 15. september 2018-15. september 2019, og 1. januar 2010-31. desember 2019.



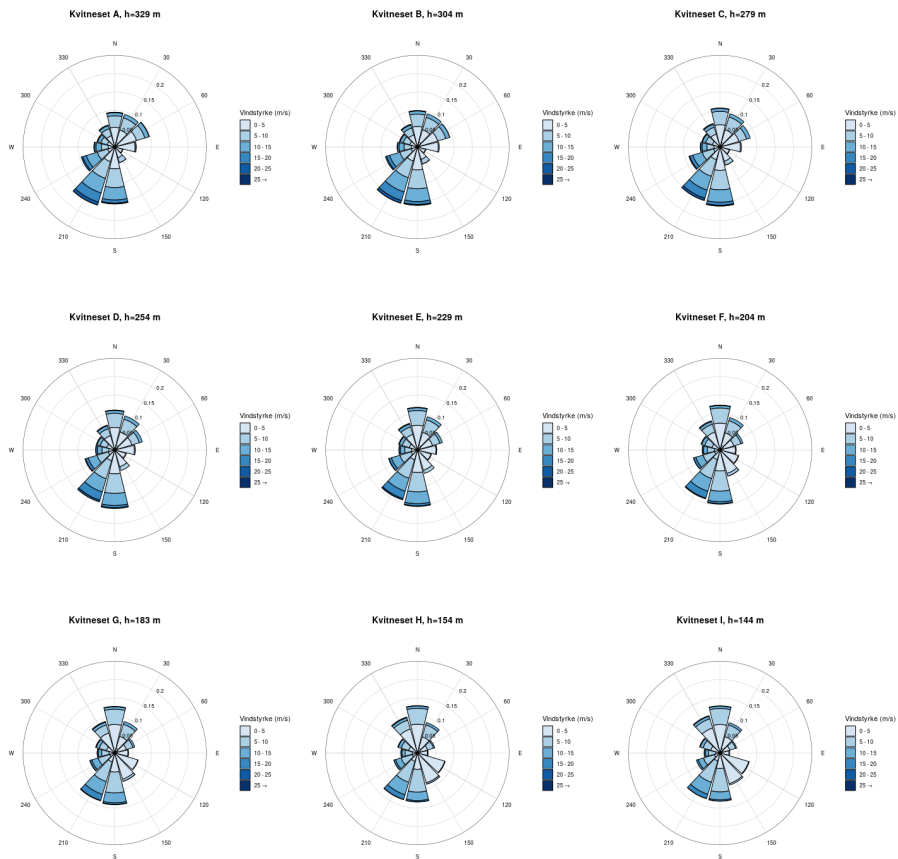
Vindroser i 15 høyder på Kvitneset fra 404 m ned til 16 m viser hvordan vinden gradvis blir mer påvirket av topografien (figur 4.18). Det svarer ganske godt med målingene fra LiDARen i masten på Kvitneset (*Kjeller Vindteknikk*, 2020). Figur 4.19 viser vindroser i høyden fra 144 m til 329 m fra AROME-MEPS, i tilsvarende tidsrom som vist for LiDAR i *Kjeller Vindteknikk* (2019b, figur 4-1). Samme punkt som vist i figur 4.2 er valgt. Det ser ut til at AROME-MEPS har mer sørvestlig og mindre nordvestlig vind enn det LiDARen viser. I kapittel 5 vises høydeprofil av vindhastighet fra SIMRA for Kvitneset sammen med de øvrige stasjoner. Dette kan sammenlignes med figurer i *Kjeller Vindteknikk* (2019b) side 19 som viser kombinert høydeprofil fra masten på Kvitneset og LiDARen i toppen av masten.

Kjeller Vindteknikk har gjort en del analyser av LiDAR-data for koherens mellom de to punktene i midten av tverrsnitt A, noe modellen ikke kan gi resultater for. Det er til gjengjeld mulig å beregne noe som tilsvarer standardavviket til den radielle vindvektor fra LiDAR, som vist i *Kjeller Vindteknikk* (2020, figur 6-10). Antar vi isotrop turbulens kan vi få  $u'$  fra SIMRA (formel 1) slik at det svarer til bare en komponent av turbulensen (figur 4.20). Sammenlignet med den tilsvarende figuren i *Kjeller Vindteknikk* (2020, figur 6-10) basert på den radielle vinden fra LiDARmålingene, ser vi at begge har høyere turbulens nær land på begge sider av fjorden, men turbulensen i SIMRA er relativt sett høyere på Kvitneset i forhold til midten av fjorden, enn det LiDAR-målingene viser. Det ser ut til at 98-99,5-prosentdelene fra SIMRA ligger 0,5 m/s lavere enn målt med LiDARen, men det kan også delvis skyldes forskjellige tidsperioder som forklart over.

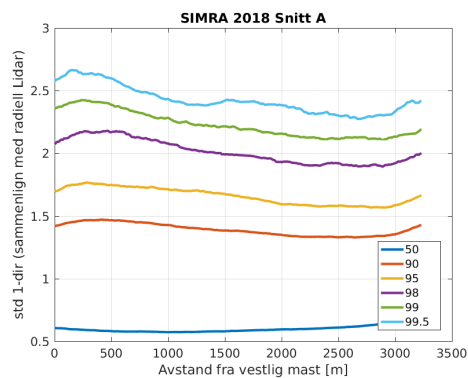
Fordelingen av turbulensintensitet på vindretning fra LiDARene i midten av fjorden på tverrsnitt A (*Kjeller Vindteknikk*, 2020, figur 6-8) har de høyeste verdiene for nordøstlig vind ( $50 - 90^\circ$ ) og noe økt turbulens for vestlig vind. SIMRA har noe av det samme mønster (figur 4.21), men de høyeste TI-verdiene er for vestlig vind. Fordelingen av antall datapunkt på retninger er dog ganske forskjellig og en nøyere sammenligning hvor vi bruker samme tidsperiode må også gjøres her.



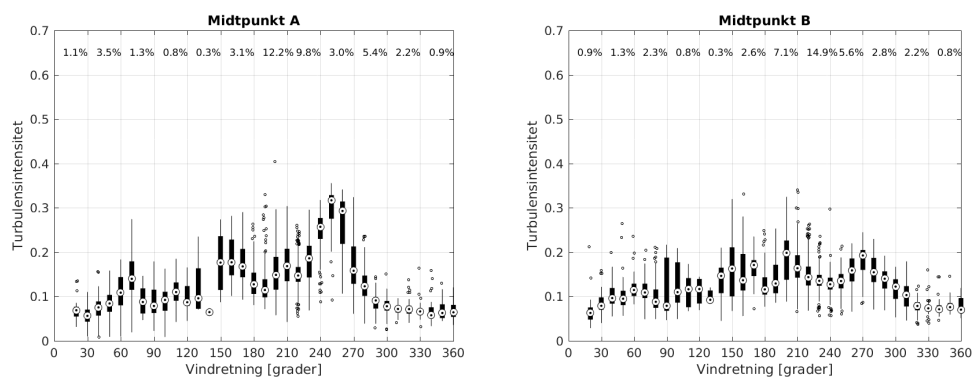
**Figur 4.18:** Vindroser fra SIMRA i 15 ulike høyder fra 16 m opp til 404 m på Kvitneset. Høyeste nivå er oppe til venstre og laveste nivå er nederst til høyre. Figuren kan sammenlignes med Kjeller Vindteknikk (2019b, figur 4-5)



**Figur 4.19:** Vindroser fra AROME-MEPS i 9 ulike høyder fra 144 m opp til 329 m på Kvitneset. Høyeste nivå er oppe til venstre og laveste nivå er nederst til høyre.



**Figur 4.20:** Kvantilplott av standardavviket til en komponent av vinden fra SIMRA på tvers av fjorden over tverrsnitt A fra Kvitneset til Trælbodneset. Linjene viser nivået til prosentdelene 50-99,5 som angitt. Figuren kan sammenlignes med Kjeller Vindteknikk (2020, figur 6-10).



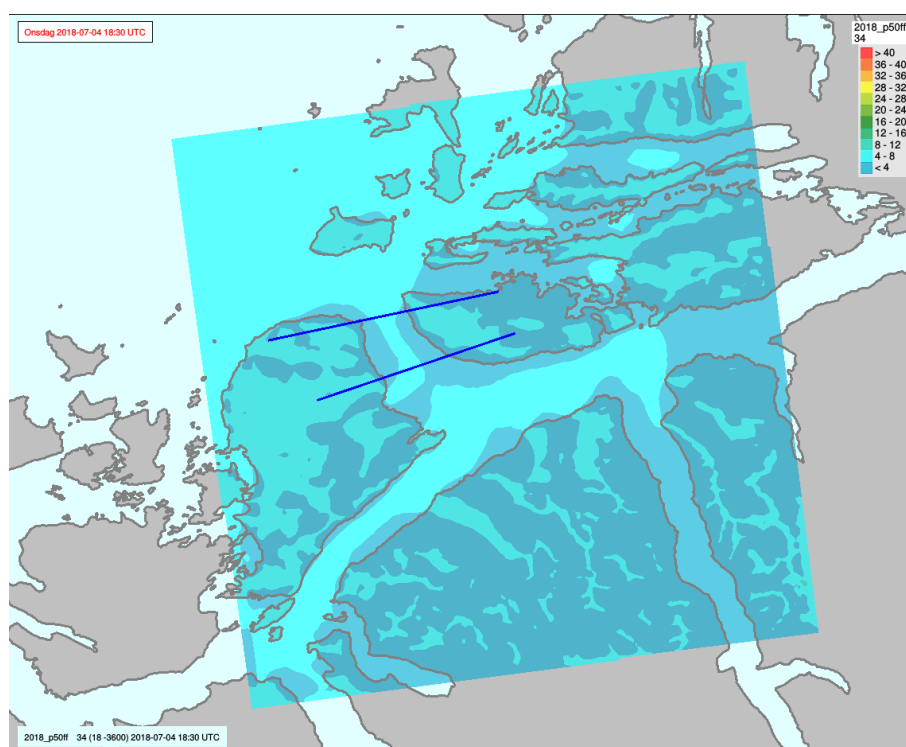
**Figur 4.21:** Turbulensintensitet i 70 m høyde fra SIMRA for midtpunktet i tverrsnitt A og B med medianen og standardavvik for hver 10 graders retningsintervall og tynne linjer som angir 25 og 75-prosentdelene. Kun situasjoner med vindhastighet over 5 m/s er tatt med. Datadekningen over 30 graders intervaller er vist i prosent øverst i hver figur. Figuren til venstre (midt mellom Kvitneset og Trælbodneset) kan sammenlignes med Kjeller Vindteknikk (2020, figur 6-8).

## 5 Midlere vindforhold

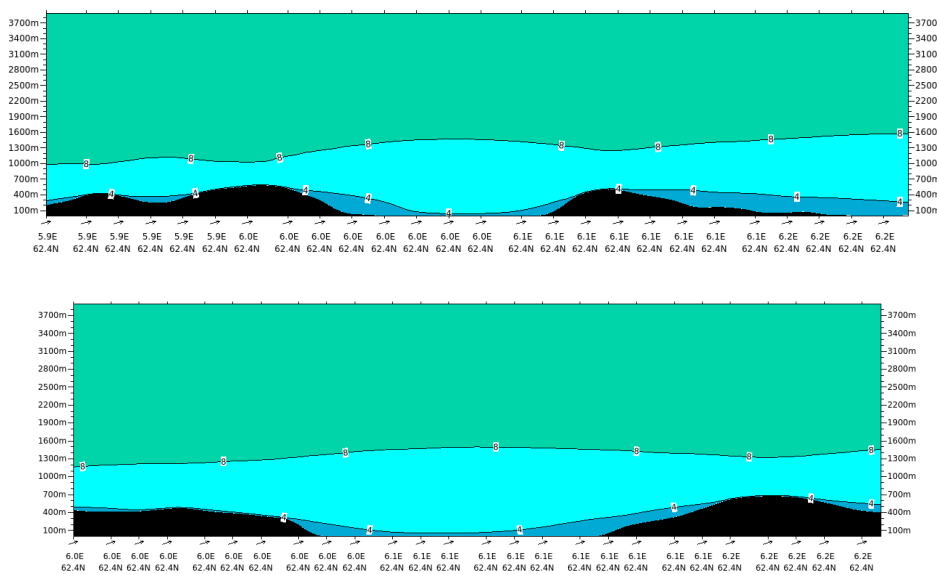
Vindforholdene på kysten av Midt-Norge er preget av lavtrykksaktiviteten med stor variabilitet i vinden som videre er lokalt styrt av topografien i lavere nivå. I Sulafjorden viser vindrosene basert på data fra mastene og SIMRA at vinden følger land, og vind fra sør (ut fjorden) er kraftigst og mest hyppig i 2018. Vindforholdene er beskrevet med vindroser og histogram for vindstyrke med tilpasset Weibullfordeling i kapittel 4 for målepunktene.

I figurene 5.1 og 5.2 viser vi kart i 70 m og tverrsnittene A og B av 50-prosentdelen (medianen) av vindstyrke. Disse viser at det i middel er mest vind midt i fjorden og inne over terrenget. Det er også i middel sterkere vind høyere opp. Vi har også med tilsvarende kart og tverrsnitt til figurene 5.1 og 5.2 i figurene 5.3 og 5.4, men nå for 50-prosentdelen av turbulensintensitet. Vi ser at denne størrelsen er høyest i noen hundre meter over bakken og høyere nær terrenget enn ute i fjorden og at den i middel avtar med høyden.

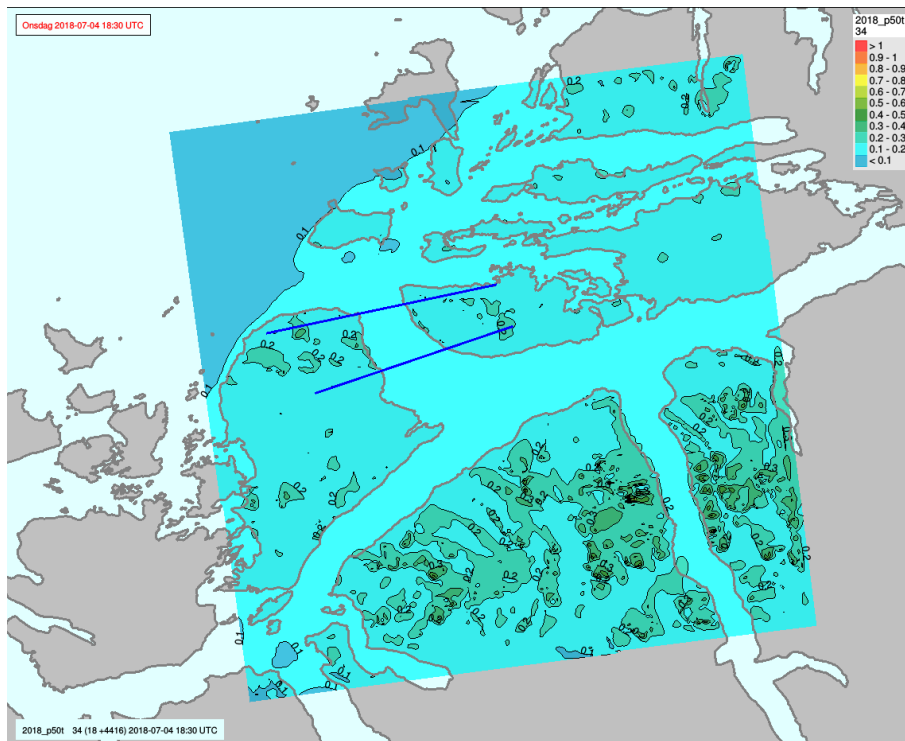
Vi har supplert resultatene i kapittel 4 med figurene 5.5 og 5.6 som viser Weibull-fordeling og vindroser for punktene midt i fjorden. Vinden i midten av fjorden mellom Kvitneset og Trælbodneset er mer fordelt over de tre sørlige sektorer enn vinden på mastene. I tillegg er det en del vind fra vest og fra nord og nordøst. Mellom Langeneset og Kårsteinen er det hovedsaklig vind fra sørvest i modellen. Sammenlignet med målingene på Kvitneset har SIMRA for mye vind fra vest (figur 4.11). Bortsett fra den vestlige vindsektor stemmer vindrosen godt med vindrosen basert på LiDAR-målingene (*Kjeller Vindteknikk*, 2019b, figur 6-1) i midten av fjorden. Disse målingene dekker en annen tidsperiode, men på grunn av topografien, og siden denne sektor heller ikke ses i målingene på Kvitneset, virker det



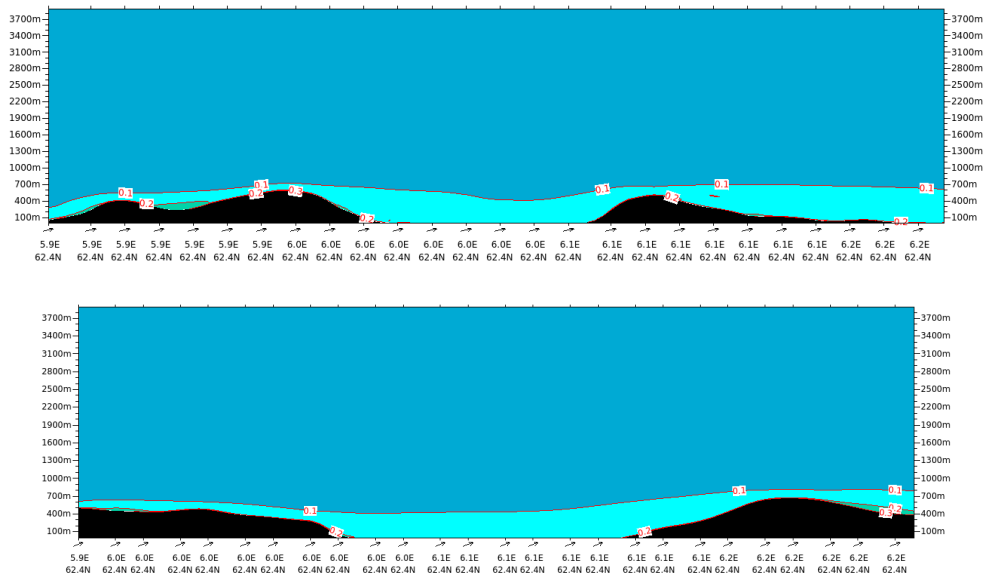
**Figur 5.1:** Kart for Sulafjorden fra SIMRA-modellen med isolinjer for 50-prosentdelen av vindstyrke for 2018 med intervall 4 m/s i 75 meter høyde over modelltopografien. Det er brukt en fargepalett for vindstyrke som vises i øvre høyre hjørne av kartet.



**Figur 5.2:** Vertikale tverrsnitt for Sulafjorden isolinjer for 50-prosentdelen av vindstyrke for 2018 med intervall 4 m/s. Det er brukt en fargepalett for vindstyrke som vises i øvre høyre hjørne av kartet i forrige figur. Dette er vist for tverrsnitt A og B. Posisjonen av snittene er markert med blå linjer i kartene.

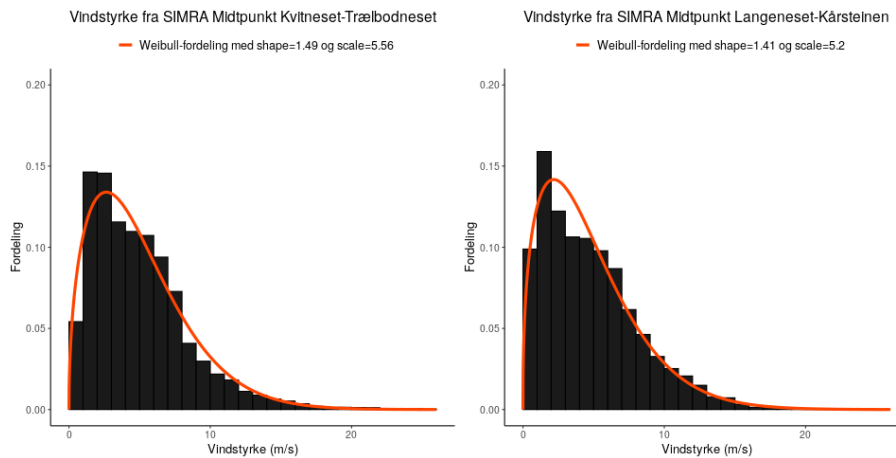


**Figur 5.3:** Kart for Sulafjorden fra SIMRA-modellen med isolinjer for 50-prosentdelen av turbulensintensitet for 2018 med intervall 0,1 i 75 m høyde over modelltopografien. Det er brukt en fargepalett for turbulensintensitet som vises i øvre høyre hjørne av kartet. Det er bare tatt med data der vindstyrken er over 5 m/s i beregningene.



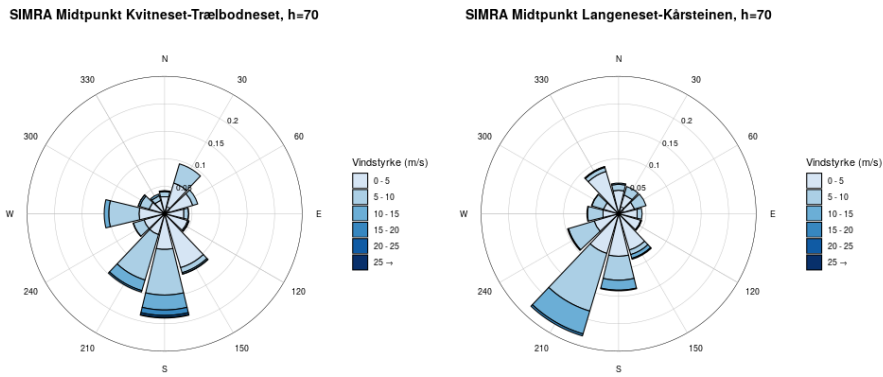
**Figur 5.4:** Vertikale tverrsnitt for Sulafjorden isolinjer for 50-prosentdelen av turbulensintensitet for 2018 med intervall 0.1. Det er brukt en fargepalett for turbulensintensitet som vises i øvre høyre hjørne av kartet i forrige figur. Dette er vist for tverrsnitt A og B. Posisjonen av snittene er markert med blå linjer i kartene.

kanskje ikke rimelig at det er så hyppig vind fra vest i midten av fjorden.



**Figur 5.5:** Histogram og Weibull-fordeling for midtpunkt i tverrsnitt A (til venstre) og B (til høyre) i 70 m høyde fra SIMRA.

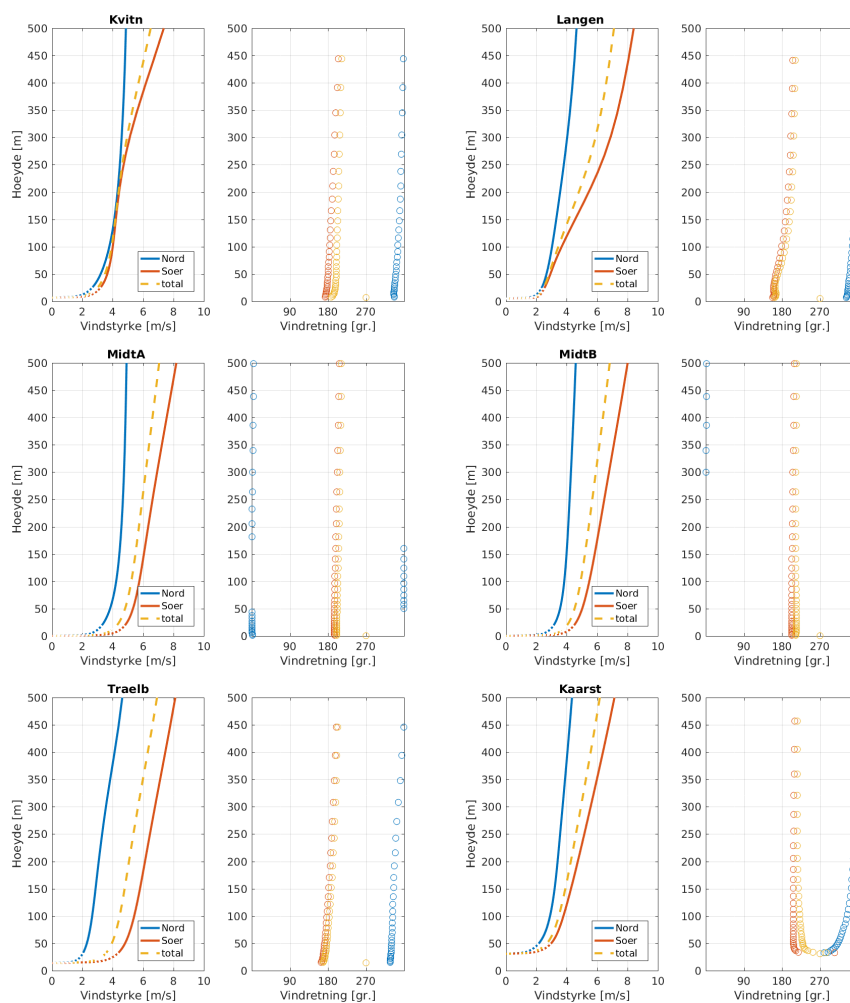
Det midlere, vertikale vindprofilet fra SIMRA kan gi informasjon om vindskjæret opp til høyden av eventuelle brotårn, noe som er vanskelig å ekstrapolere fra målinger i komplekst terreng. Vindhastighet og retning er hentet ut fra SIMRA i punktene i kartet (figur 2.1). Profilene er midlet over sørlig ( $90 - 270^\circ$ ) og nordlig ( $270 - 90^\circ$ ) vind basert på vinden fra modellen i midten av fjorden mellom Kvitneset og Trælbodneset (tverrsnitt A) i ca. 70 m høyde. Vindprofilene (styrke og retning) er vist i figur 5.7 og 5.8. Gul linje er resultatet av å midle over alle situasjoner gjennom hele året, blå er sørlig vind og rød er nordlig vind. Langeneset og særlig Kvitneset ligger i le av Hareidlandet og har relativt svak vind for de lavere høyder og en brå økning til kraftigere vind. For Kvitneset skjer dette ved ca 250 m, men allerede ved ca. 100 m for Langeneset.



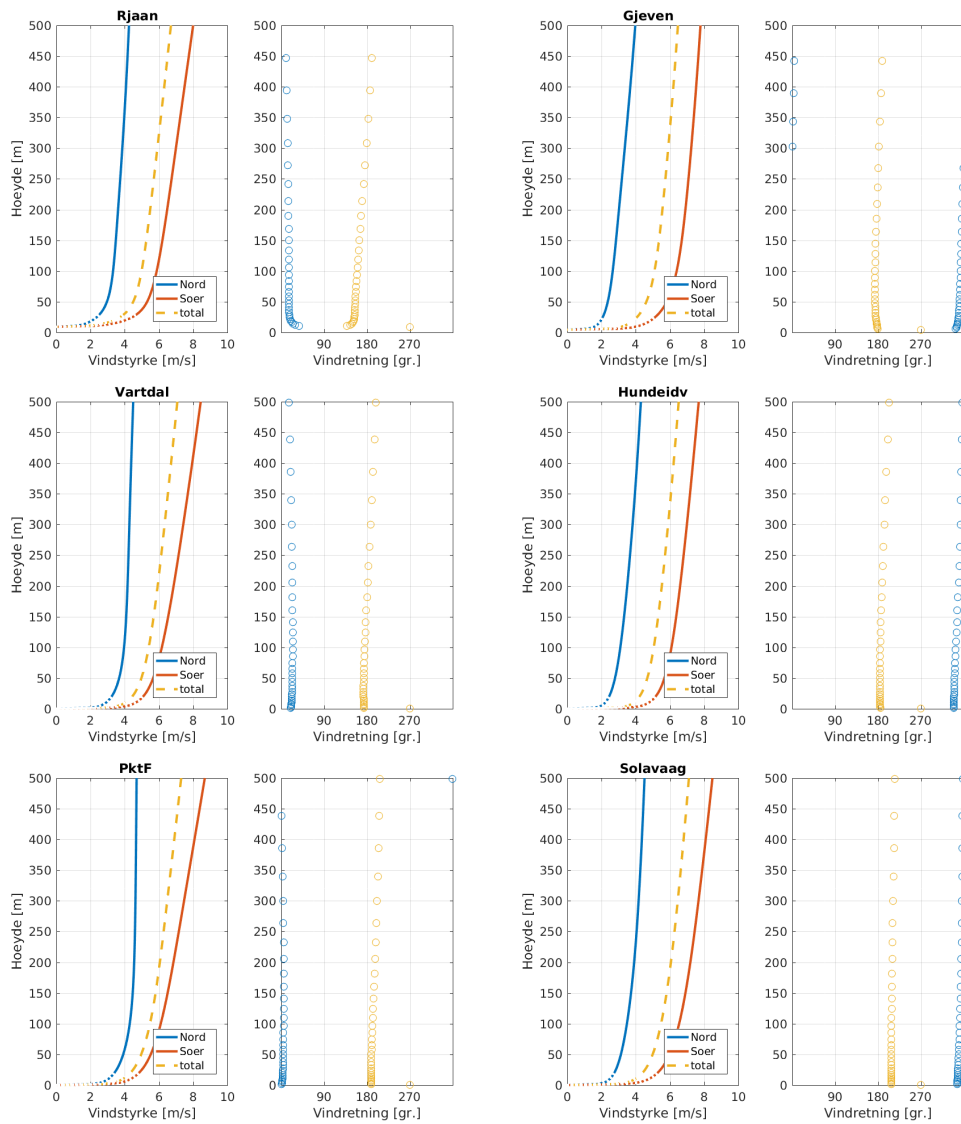
**Figur 5.6:** Vindroser for midtpunkt i tversnitt A (til venstre) og B (til høyre) i 70 m høyde fra SIMRA.

Horisontalt vindprofil i 70 m langs tversnitt A og B i Sulafjorden er vist med piler i figur 5.9. Vindprofilene er beregnet som middel av hver av vindkomponentene for seg for å kunne vise gjennomsnittlig vindretning. Det betyr at lengden på pilene er et mål for vindstyrke kombinert med stasjonaritet i vindretningen. Det er jevn retningsbelastning langs begge tversnitt når vinden kommer fra nordvest. Nordøstlig og sørvestlig vind gir stor dreining av vinden over fjorden. Dette gjelder særlig for tversnitt B hvor dreiningen er nesten  $90^\circ$ .

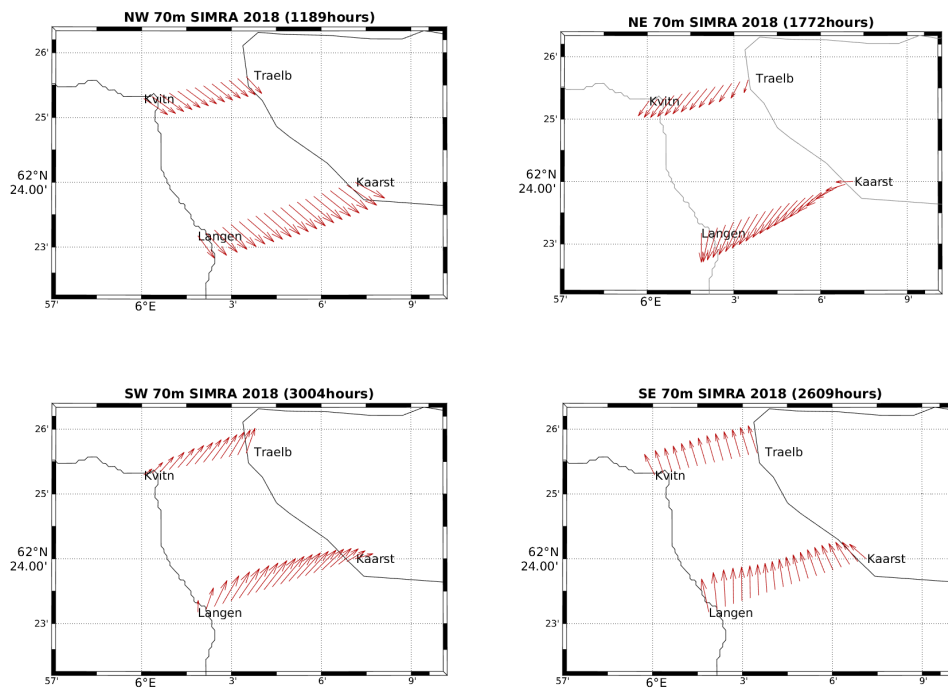




**Figur 5.7:** Til venstre, fra øverst til nederst: Vertikalt vindprofil av vindstyrke og retning fra SIMRA på Kvitneset, midt i fjorden i snitt A og på Trælbodneset, oppdelt i nordlig vind (blå) og sørlig vind (rød). Det totale vindprofilen er vist i stippet gult. Til høyre, fra øverst til nederst: samme for Langeneset, midt i fjorden på snitt B og Kårsteinen. Oppdeling i retninger er etter midtpunktet på snitt A i 70 m høyde for alle plott.



**Figur 5.8:** Vindprofiler med oppdeling i retninger er etter midtpunktet på snitt A i 70 m høyde for alle plott (se figur 4.18). Posisjonene er mastlokalitetene Rjåneset og Gjeveneset (øverst) og fire andre posisjoner som angitt i kartet i figur 2.1.



**Figur 5.9:** Kart over Sulafjorden som viser vindvektorer i 70 m på tvers av fjorden langs tverrsnitt A og B for ulike vindretninger basert på midtpunkt i fjorden mellom Kvitneset og Trælbodneset (NW - nordvest ( $270 - 0^\circ$ ), NE - nordøst ( $0 - 90^\circ$ ), SE - sydøst ( $90 - 180^\circ$ ) og SW - sydvest ( $180 - 270^\circ$ ). Hyppigheten til retningene er gitt ved antall timer i tittel til hver figur.

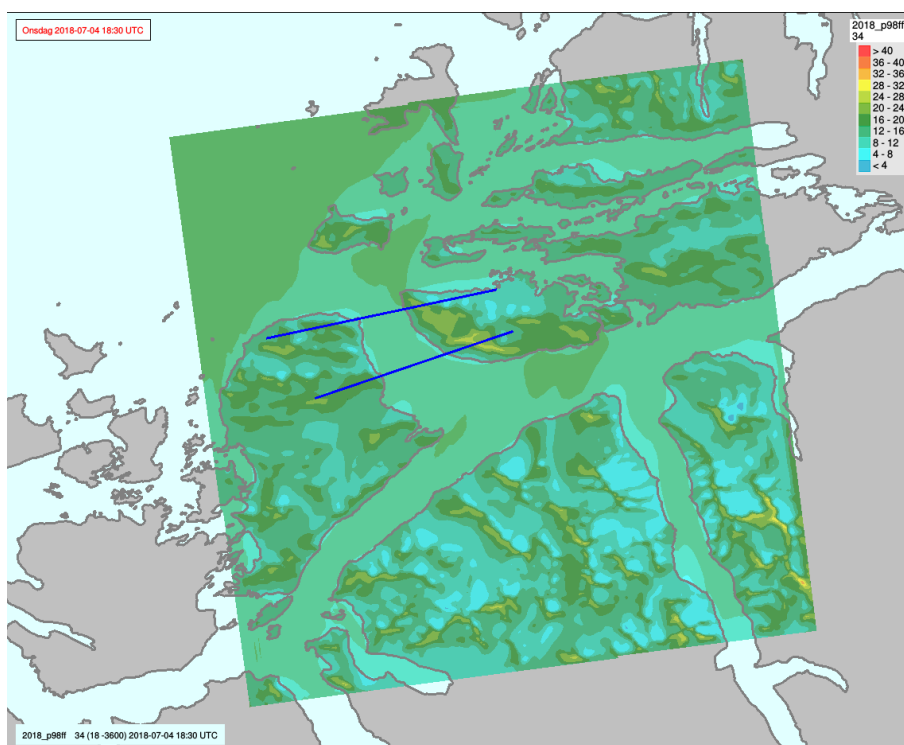
## 6 Ekstremvind

Vi ser først på 98-prosentdelen av vindstyrke og turbulens, dvs turbulensintensitet (TI), fra SIMRA-modellen på kart for hele SIMRA-området og langs tverrsnitt A og B (figur 6.1-6.4). Kartene viser at turbulensen 75 m over modelltopografien ligger mellom 1,5 og 2,5 m/s over Sulafjorden, mens det i denne høyden er langt høyere verdier innover terrenget. Vi får supplert dette ved å se på tverrsnittene som tydelig viser at modellen har vesentlig høyere verdier av turbulens over 75 m. I snitt A ligger maksimalområdene over 3 m/s og og ligger rundt 300 m over modellterrenget mens det i snitt B er verdier over 4,5 m/s som tildels ligger ennå lavere enn dette. For begge tverrsnittene gjelder at det er et maksimumsområde over Hareidlandet og et kraftigere over Sula.

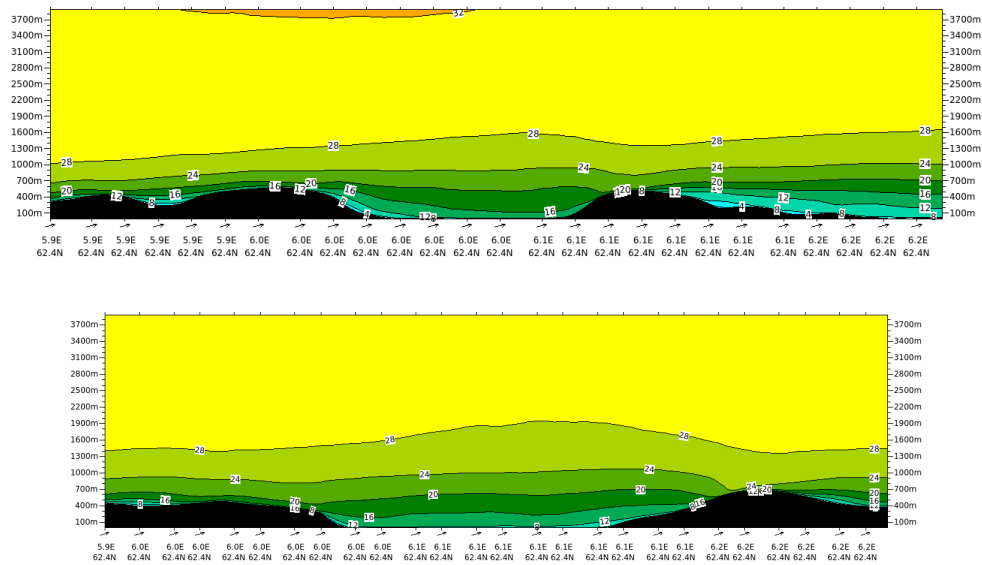
Det er interessant å se på tilsvarende kart og tverrsnitt for vindstyrke. I kartet med 98-prosentdelen av vindstyrken er verdien i 75 m mellom 10 og 15 m/s over fjorden og 20-25 m/s på det meste inn over terrenget. Også her supplerer tverrsnittene bildet. Både tverrsnitt A og tverrsnitt B viser at en verdi på 20 m/s og mer opptrer over ca. 600 m.

De fire mastene og snitt A og B er spesielt interessante siden det er potensielle brotraaser her. Begge snittene er karakterisert av høye verdier for både turbulens og vindstyrke på tvers av fjorden og begge størrelsene øker med høyden i brohøyde. Ser vi nærmere på forholdene inn mot terrenget nær mastene skiller området ved Kvitneset seg ut. Her er det lavere verdier.

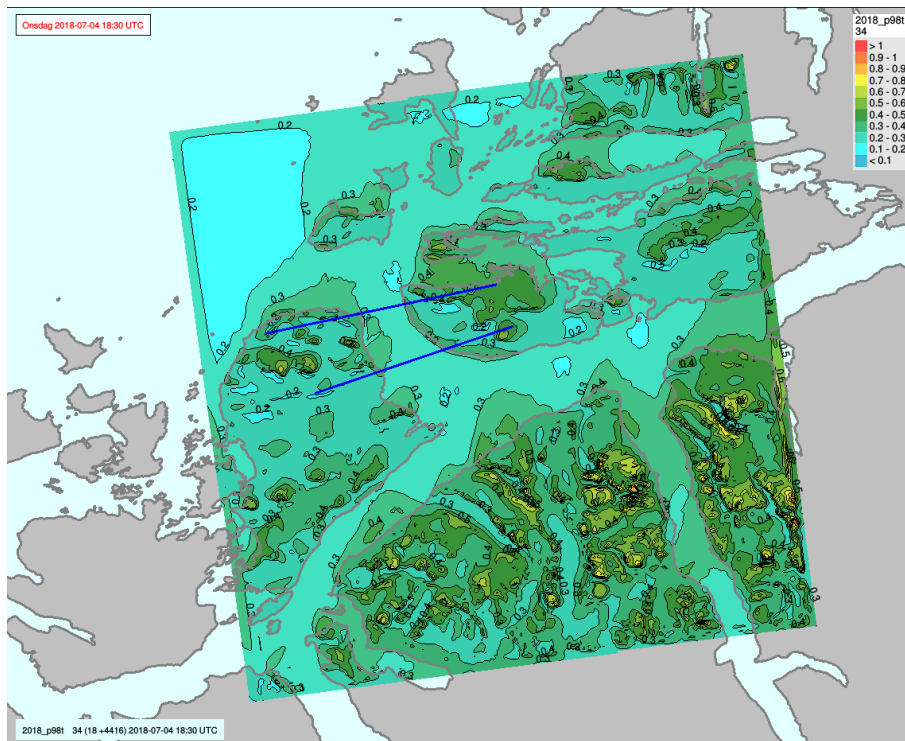
Vi har også sortert dataene basert på vindretningen fra modellen midt i fjorden og be-



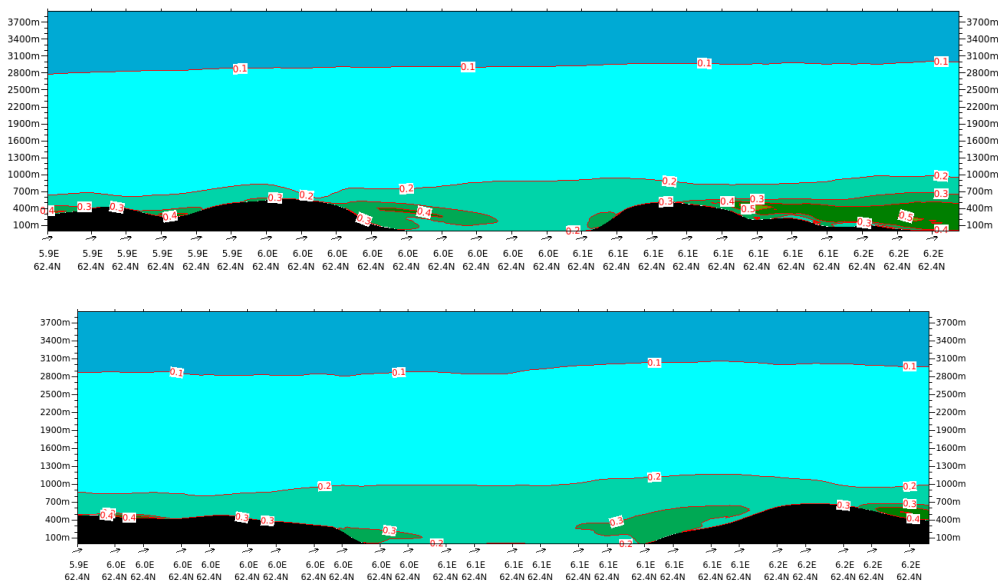
**Figur 6.1:** Kart for Sulafjorden fra SIMRA-modellen med isolinjer for 98-prosentdelen av vindstyrke for 2018 med intervall 4 m/s i 75 m over modelltopografien. Det er brukt en fargepalett for vindstyrke som vises i øvre høyre hjørne av kartet.



**Figur 6.2:** Vertikale tverrsnitt for Sulafjorden isolinjer for 98-prosentdelen av vindstyrke for 2018 med intervall 4 m/s. Det er brukt en fargepalett for vindstyrke som vises i øvre høyre hjørne av kartet i forrige figur. Dette er vist for tverrsnitt A og B. Posisjonen av snittene er markert med blå linjer i kartene.



**Figur 6.3:** Kart for Sulafjorden fra SIMRA-modellen med isolinjer for 98-prosentdelen av turbulensintensitet for 2018 med intervall 0,1 i 75 m over modelltopografien. Det er brukt en fargepalett for turbulensintensitet som vises i øvre høyre hjørne av kartet. Det er bare tatt med data der vindstyrken er over 5 m/s i beregningene.

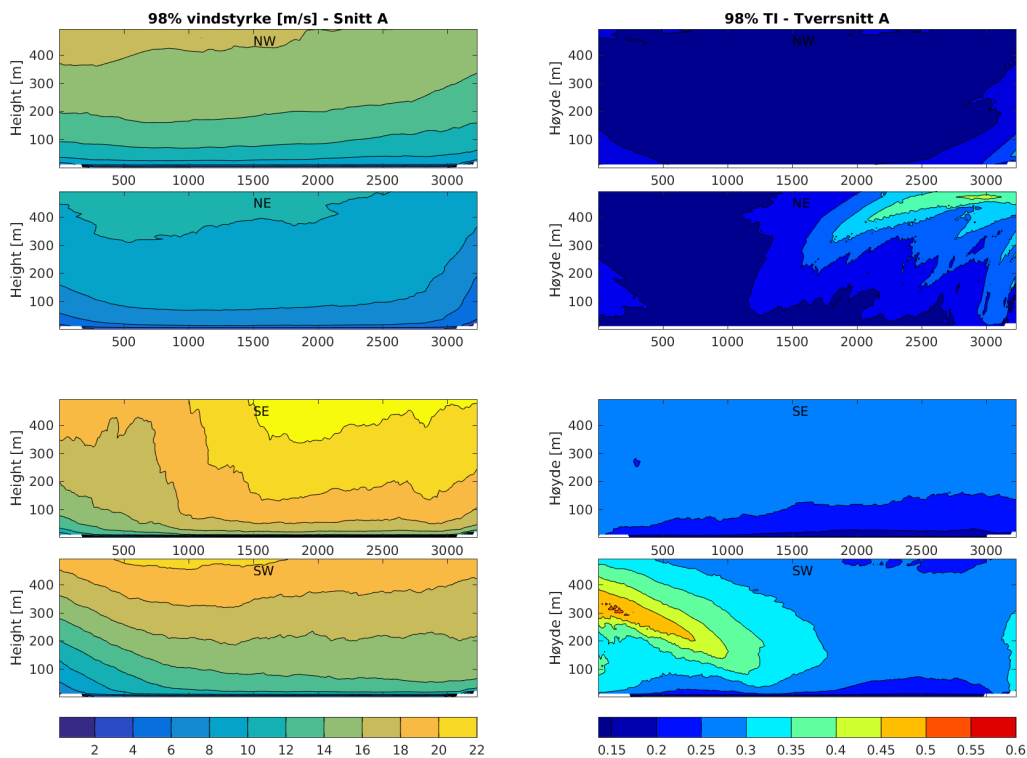


**Figur 6.4:** Vertikale tverrsnitt for Sulaffjorden isolinjer for 98-prosentdelen av turbulensintensitet for 2018 med intervall 0,1. Det er brukt en fargepalett for turbulensintensitet som vises i øvre høyre hjørne av kartet i forrige figur. Dette er vist for tverrsnitt A og B. Posisjonen av snittene er markert med blå linjer i kartene.

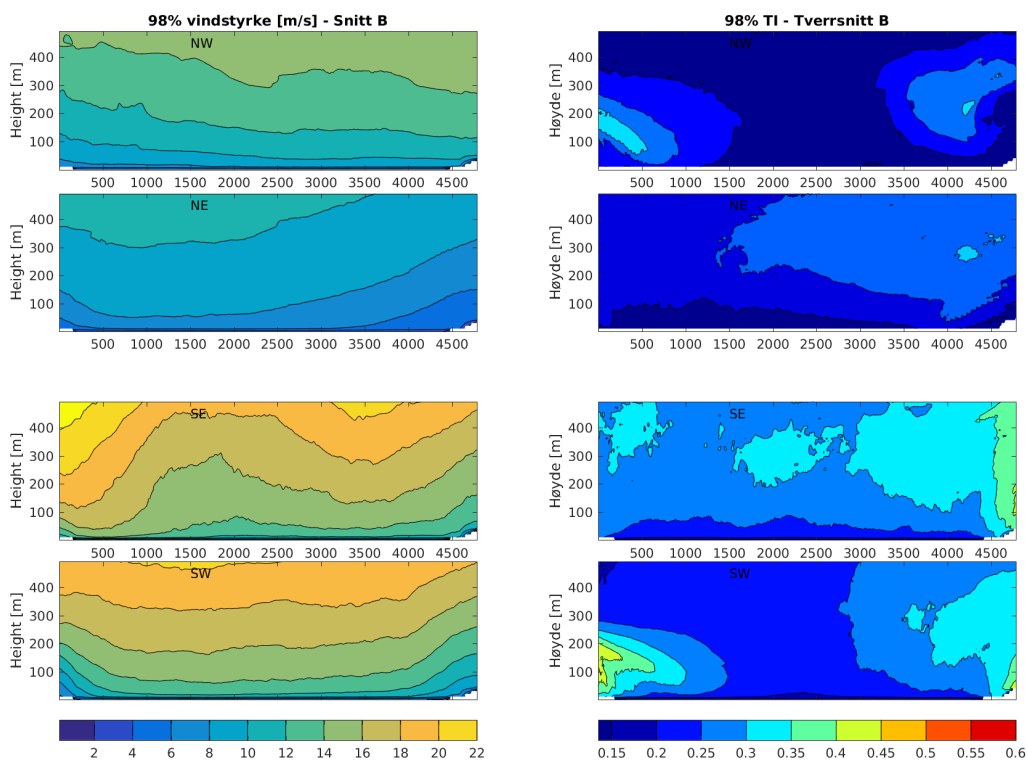
regnet 98-prosentdeler av vindstyrke og turbulens for hver retning i figur 6.5 og 6.6.

Figurene viser to helt tydelig forskjellige regimer om vinden kommer fra havet inn fjorden fra nord (lite variasjon i vind og lav turbulens) eller om den går ut fjorden fra sør hvor det er stor påvirkning fra terrenget. Særlig tverrsnitt A har sterk vind over Trælbodneset og høy turbulens over Kvitneset ved sørlig vind.

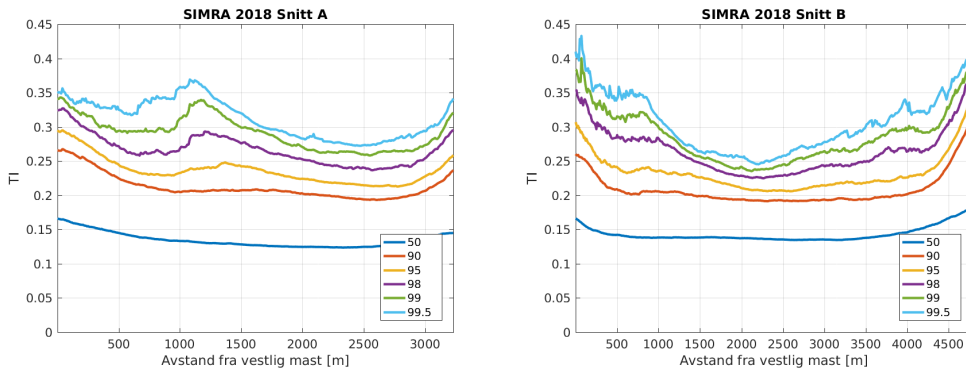
I høyden til en eventuell brobane er det størst turbulens langs snitt B, når man ser alle vindretninger sammen (figur 6.7). 98-prosentdelen av turbulensintensiteten er høyest ved land på begge sider av fjorden, 2,5 m/s for snitt A og ca 3 m/s for snitt B. 2- og 98-prosentdelene av den vertikale vindkomponenten langs snitt A (figur 6.8) viser at de største verdier for oppover og nedadgående vinder i modellen er knyttet til topografien og minsker ut over fjorden. Til slutt har vi i figur 6.9 plottet middelverdien av vindstyrke og TI av de snitt hvor vindhastigheten i midtpunktet av tverrsnitt A er større enn eller lik 25 m/s. Det er betydelige variasjoner i vinden på tvers av fjorden, særlig mellom Langeneset og Kårsteinen hvor det også er kraftigst turbulens.



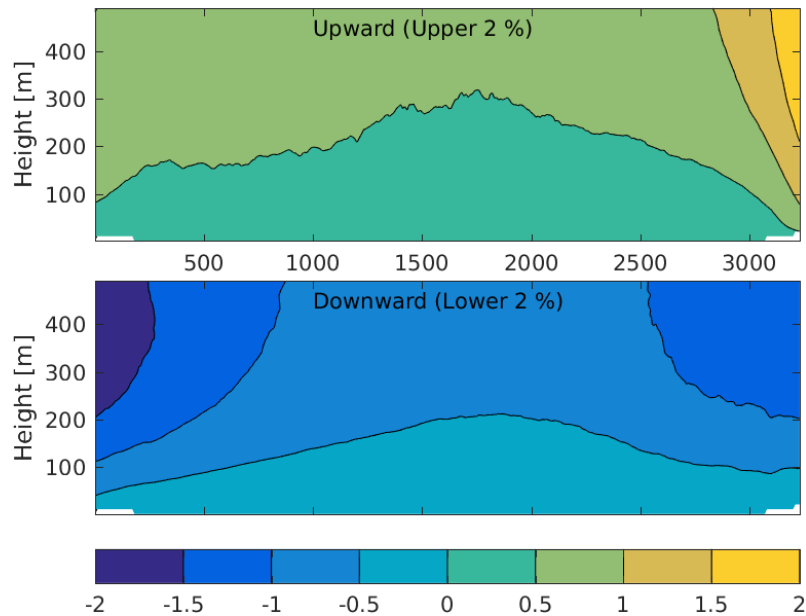
**Figur 6.5:** Tverrsnitt fra Kvitneset til Trælbodneset av 98-prosentdelen av vindstyrke [m/s] (venstre kolonne) og TI (høyre kolonne) for hver av fire vindretninger (øverst til nederst): nordvest (270 – 0 °), nordøst (0 – 90 °), sydøst (90 – 180 °) og sydvest (180 – 270 °). x-aksen angir avstand i km fra Kvitneset.



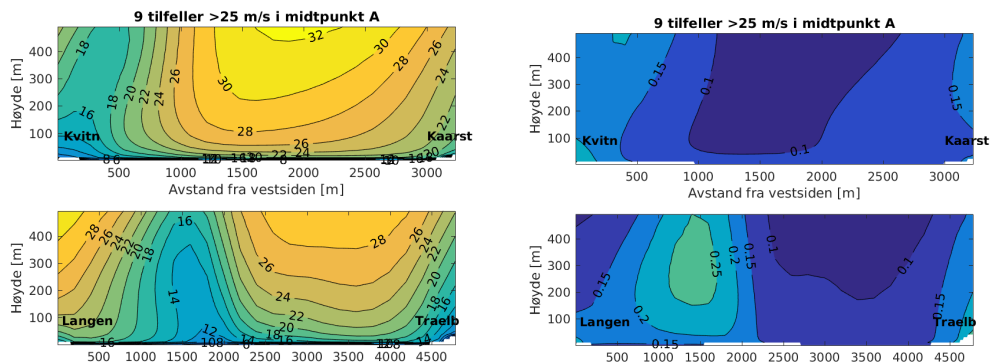
**Figur 6.6:** Tverrsnitt fra Langeneset til Kårsteinen som i figuren over.



**Figur 6.7:** Kvantilplott av TI fra SIMRA på tvers av fjorden over tverrsnitt A fra Kvitneset til Trælbodneset (til venstre) og over tverrsnitt B fra Langeneset til Kårsteinen (til høyre). Linjene viser nivået til prosentdelene 50-99,5 som angitt.



**Figur 6.8:** Verdien av de laveste og høyeste 2% av den vertikale vindkomponenten [m/s] fra SIMRA langs tverrsnitt A fra Kvitneset til Trælbodneset.



**Figur 6.9:** Middelerverdi av vindstyrke [m/s] (til venstre) og TI (til høyre) over snitt A (øverst) og snitt B (nederst) for de 9 situasjoner i 2018 hvor vinden i midtpunktet av snitt A er større enn eller lik 25 m/s.



## 7 Stormer

I dette kapittelet har vi sett etter vær-situasjoner i 2018 med målt sterk vind i mastene. Tilfellene med målt sterk vind har ofte sørlig vind. De tre vi har valgt er to med sørlig vind, og så supplerer vi med et tilfelle der det er ganske sterk vind fra flere retninger i løpet av perioden.

- 14. - 15. januar var en jevnt sør-sørvestlig situasjon hvor vinden i midten av Sula-fjorden var oppe i over 25 m/s i SIMRA, det kraftigste for dette punktet i den modellerte perioden. Vi viser kart og snitt fra SIMRA og sammenligner tidsserier fra mastene med SIMRA og AROME-MEPS.
- 20. - 26. september var ikke så kraftig men langvarig og skiftende. Vinden var først sør-sørvestlig omkring 20 m/s på Kvitneset og Trælbodneset og gikk deretter på nord og nordvest. Det interessante her er å observere samspill mellom vindretning og vindstyrke på mastene. Vi viser kart og snitt fra SIMRA og sammenligner tidsserier fra mastene med SIMRA og AROME-MEPS.
- 29. - 30. november var enda en sørvestlig situasjon, veldig lik 14. - 15. januar, men med noe svakere vind. Denne er tatt med for å kunne sammenligne med resultater fra LiDAR-målingene. Vi viser kart og snitt fra SIMRA og AROME-MEPS og sammenligner tidsserier fra mastene med SIMRA og AROME-MEPS.

### 7.1 14. - 15. januar 2018

I denne situasjonen finner vi et kraftig lavtrykk i Norskehavet og det er kraftig vind fra sør i hele Sør-Norge. Natt til 15. januar ble det målt middelvind godt over 20 m/s på alle mastene som var i drift. Dette gjør denne stormen til en av de kraftigste i 2018. Vi har tatt ut kart og tverrsnitt fra SIMRA 15. januar 07 UTC av vind og turbulent kinetisk energi (7.1-7.3). Kartene sammenholdt med de tre tverrsnittene viser at det ligger et maksimalområde for vind i noen få hundre meters høyde over Sulafjorden. Som man kan se av kartet, er denne forsterkningen knyttet til terrenget og fenomenet kalles derfor for en topografisk forsterkning eller jet. Maksimalverdien for vinden i denne vindforsterkning i snitt A er på 33 m/s og den ligger i 700 meters høyde.

Topografien vises gjennomskåret i snittene, og den konsentrerte jeten vises godt der. Ser vi på potensiell temperatur fra SIMRA i tverrsnittene, ser vi at økningen av denne størrelsen med høyden ikke er jevnt fordelt. Isolinjene ligger tettere i et sjikt rett over jeten vi diskuterte ovenfor. En slik endring av temperaturgradienten med høyden kalles en inversjon. Den demper utveksling av kinetisk energi vertikalt og sørger for den kraftigste vinden holdes i de tyngre lagene under. Inversjon og jeter er vanlig knytta til kraftig vind over komplekst terreng og gir lokalt tøffe forhold nedstrøms av det terrenget strømmen kommer over.

Rundt tidspunktet for kart og tverrsnitt har vi samlet tidsserier av målinger og modellresultater i figur 7.4. Serien begynner 12. januar og dekker seks døgn fram til natt til 18. januar. Både modelldata fra SIMRA og MEPS er med i figuren. Når vi sammenligner vinden målt i mastene med modellene, ser vi at det med noen unntak er ganske godt samsvar mellom målinger og tidspunktet for sterkest vind, 15. januar 07 UTC som er tidspunktet vi har kart og tverrsnitt for. Det er noen viktige unntak som f. eks at SIMRA underestimerer vinden på Kvitneset i perioden før maksimum i vind, mens det er en overestimering

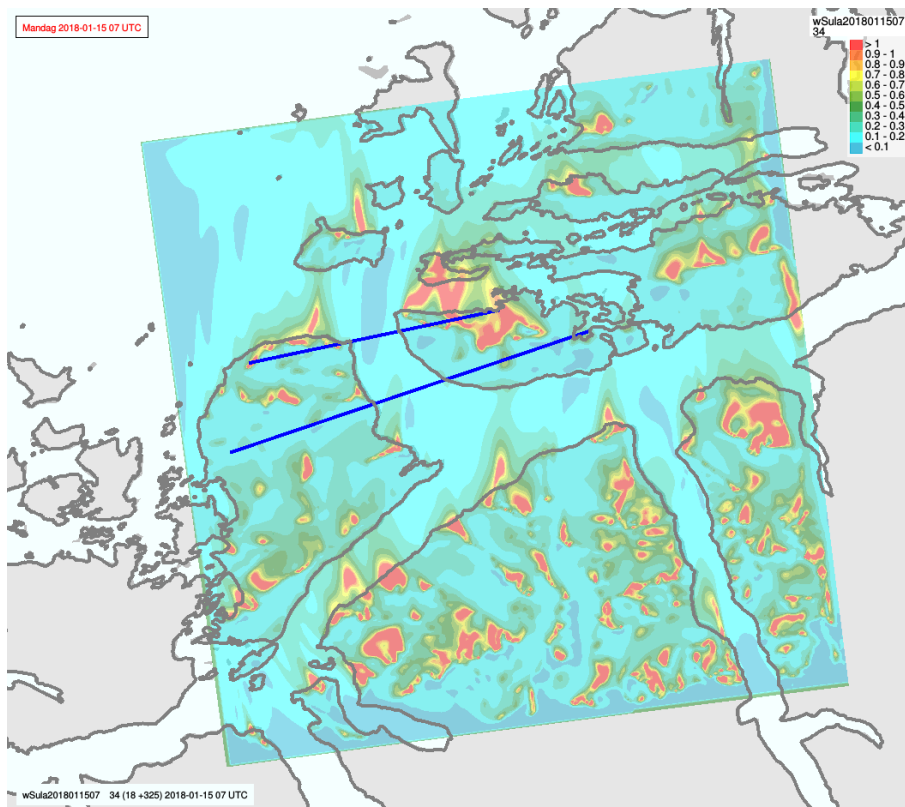
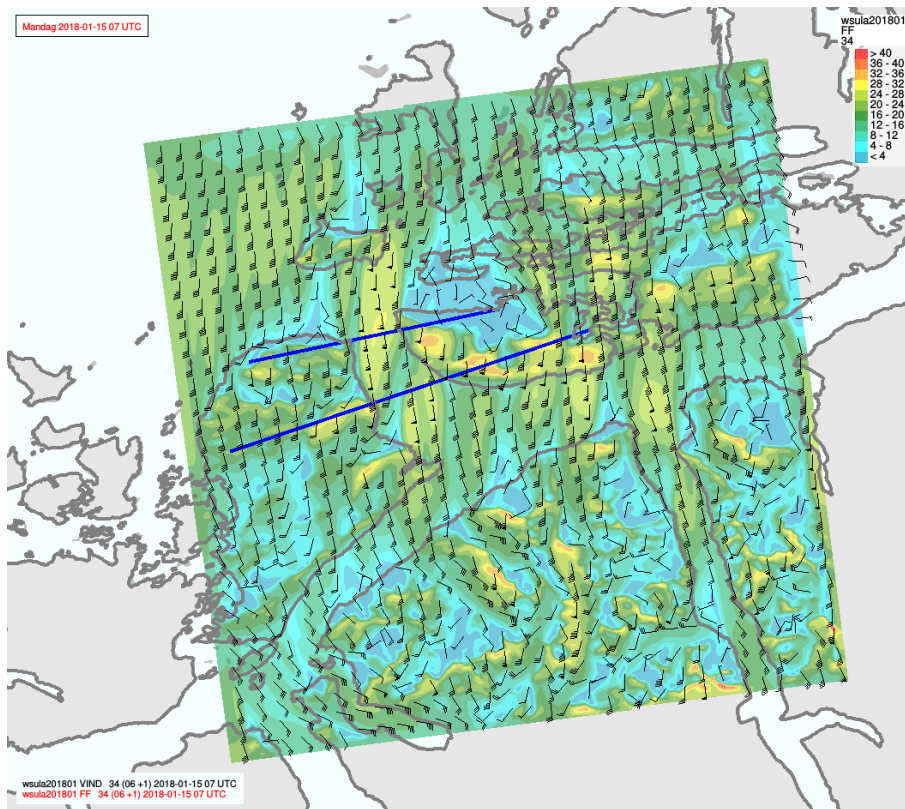
på Langeneset. Det er tydelig at mastene på Kvitneset og Trælbodneset følges ad med omkring 19-20 m/s. 14.-15. januar, har SIMRA noe lavere vind på Kvitneset enn på Trælbodneset. For AROME-MEPS og i observasjonene ser vi ikke dette. Nå var toppsensoren på Trælbodneset ikke kommet i drift og det er dermed mulig at vinden var sterkere på Trælbodneset i denne situasjonen enn vist på figuren.

For å få bedre mål på forskjellen på de to modellene har vi supplert visuell inspeksjon med tabell 3 der vi viser RMS-feil og standardavvik i feilen for SIMRA og AROME-MEPS for de fire mastene i Sulafjorden. Dette er den samme statistikken som vi brukte for hele 2018 (vist i tabell 2 i kapittel 4). For del-perioden vi ser på nå, viser disse statistiske målene at SIMRA er best for Trælbodneset mens AROME-MEPS er bedre for de tre andre mastlokasjonene.

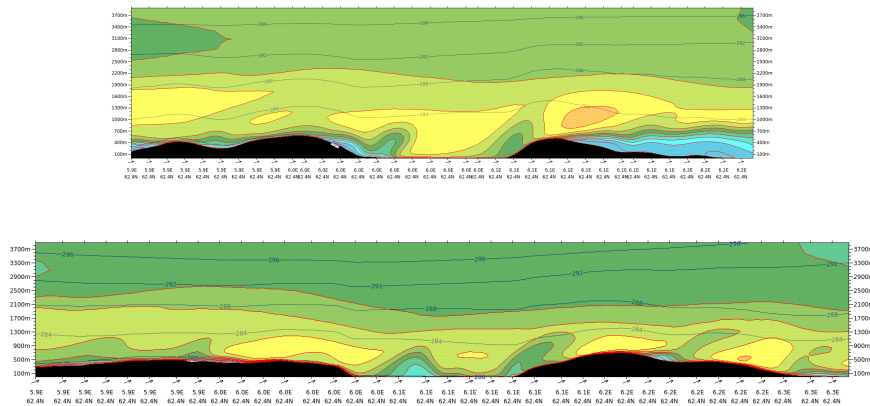
Det var problemer med målingene på Kårsteinen i denne perioden og Gjeveneset var ikke kommet i drift. På Rjåneset er vindstyrken i SIMRA en god del lavere enn målt første del av perioden med sterk vind, men denne underestimeringen blir mindre mot slutten. Sjekker vi utviklingen i vindretning, viser målingen at vinden dreier fra nær sør til litt mer mot SSØ. Vindretningen og utvikling i SIMRA følger målingen godt. Mens retningen i SIMRA er god, ser det ut til at styrken blir bedre når vindretningen er ørlite mer mot øst. For AROME-MEPS på Rjåneset ser det ut til at samsvaret med målingen er bedre enn for SIMRA.

Mast	SDE SIMRA	SDE MEPS	RMSE SIMRA	RMSE MEPS
Kvitneset	2.8	2.7	3.1	2.8
Langeneset	3.8	3.2	4.4	3.6
Rjåneset	3.0	2.6	4.0	2.6
Trælbodneset	2.1	2.3	2.1	2.4

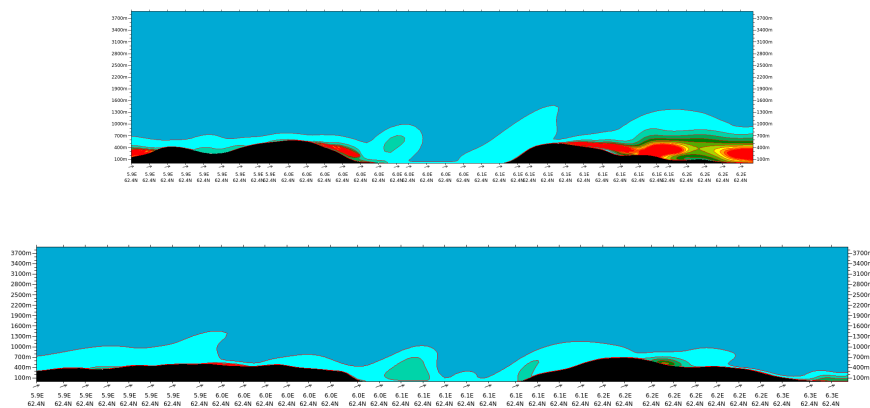
**Tabell 3:** SDE og RMSE for SIMRA og AROME-MEPS under stormen 12.-18. januar 2018.



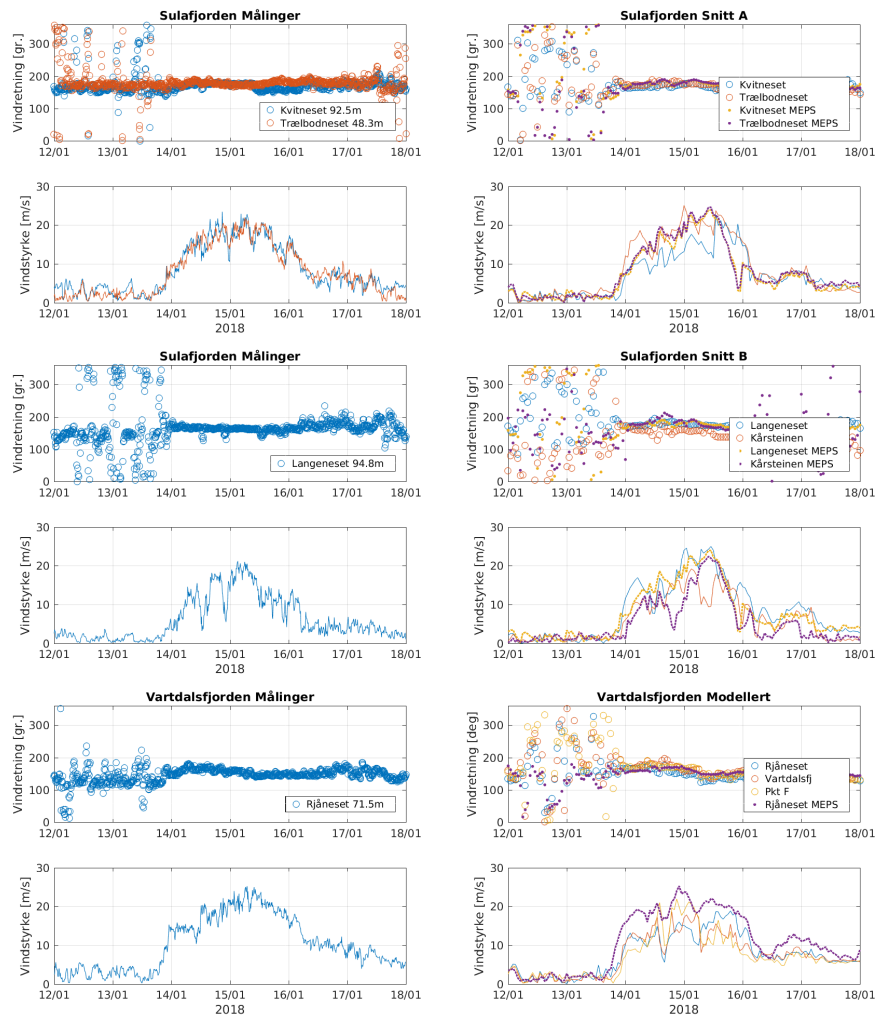
**Figur 7.1:** Figuren viser vindstyrke [m/s] med vindpiler øverst og TI nederst fra SIMRA for Sulafjorden i 75m over modelltopografien for 15. januar 2018 07 UTC. Vindpiler er plottet i hvert åttende gitterpunkt. Det er brukt standard meteorologiske vindpiler der pila peker den veien vinden blåser mot, og en fargepalett for vindstyrke med interval på 4 m/s. Posisjonen for de to snitt er angitt med blå linjer. Vindstyrke og TI er vist med hver sin fargepalett.



**Figur 7.2:** Vertikale tverrsnitt med resultater for Sulaffjorden for 15. januar 2018 07 UTC med SIMRA-modellen. Det som vises i snittene er vindstyrke normalt til tverrsnittene og blå isolinjer for potensiell temperatur. Det er brukt en fargepalett for vindstyrke med interval på 4 m/s, mens intervallet for potensiell temperatur er 2 K. Dette er vist for tverrsnittene A og B (blå linjer i kartene).



**Figur 7.3:** Vertikale tverrsnitt langs A og B av TI for Sulaffjorden for 15. januar 2018 07 UTC med SIMRA. Det er brukt en fargepalett der intervallet er 0.1.



**Figur 7.4:** Tidsserier av vindstyrke og retning fra master (til venstre) og SIMRA og AROME-MEPS i ca 100 m (til høyre). Lokalteter og høyder er angitt i hvert plott.

## 7.2 20.-26. september 2018

I denne perioden var lavtrykksaktiviteten stor i området. 19. september passerte et kraftig lavtrykk over Nordsjøen fra sørvest. 20. september 00 UTC lå dette lavtrykket rett nord for Stad og ga sterk SV-lig vind over Hareidlandet. 21. september passerte et nytt lavtrykk over Sør-Norge, og dette lå med senter over Trøndelag og et sekundært senter nær Oslo 21 UTC denne dagen. Dette lavtrykket satte opp en kraftig NNØ-lig vind i Sulafjorden. I løpet av 22. september fortsatte lavtrykket fra Trøndelag langs Norskekysten og lå 23. september 07 UTC i nærhetene av Tromsø.

Tidsserier fra mastene og modellene er vist i figur 7.5 som dekker perioden fra 19. september til natt til 27. september, i alt åtte døgn. Modelldata fra SIMRA og AROME-MEPS er med i figuren.

Vi har supplert tidsseriene med kart og tverrsnitt for tre tidspunkter. For denne perioden har vi tatt ut kart og tverrsnitt for tre tidspunkter: 20. september 00 UTC, 21. september 21 UTC og 23. september 07 UTC. Den relative vindstyrken målt i mastene er svært følsom for endringer i vindretningen i Sulafjorden. Trælbodneset har mer vind enn Kvitneset når vindretningen er sørlig (på Kvitneset), og omvendt når vindretningen er nordvestlig. SIMRA ser ut til å gjenspeile denne dynamikken bra for denne situasjonen. På Gjeveneset er modellen (100 m høyde) noe svak i forhold til målingene som er tatt i 30 m høyde.

Vi ser nå nærmere på 20. september der vi først ser på vind på Kvitneset og Trælbodneset. På sistnevnte er vinden i masten sørlig med maksimum på ca. 20 m/s først og sist på dagen, mens den på Kvitneset er svakere og nordvest det meste av dagen, med et innslag fra sør om ettermiddagen. Sammenligning med tilsvarende fra SIMRA viser at kvalitativt gir modellen veldig mye av den samme variasjonen og det er ganske stort samsvar. Det gjelder også sammenligningen mellom de to målepunktene. En periode med sørlig vind på Kvitneset er det også i observasjonene. Ser vi på de to mastene på Langeneset og Kårsteinen er det også brukbart samsvar mellom måling og SIMRA for denne dagen, men forskjellen i vindstyrke i modellen mellom de to punktene er for stor først på dagen. Vi presenterer denne situasjonen med kart og tverrsnitt for 00 UTC 20. september. AROME-MEPS fanger dårligere opp forløpet denne dagen.

Vi har også tatt med kart og tverrsnitt for to tidspunkter med nordvest vind. Datoer er 21. september 21 UTC og 23. september 07 UTC. På disse tidspunktene er vinden svake-re og det er mindre turbulens siden vinden kommer fra åpent hav i nordvest.

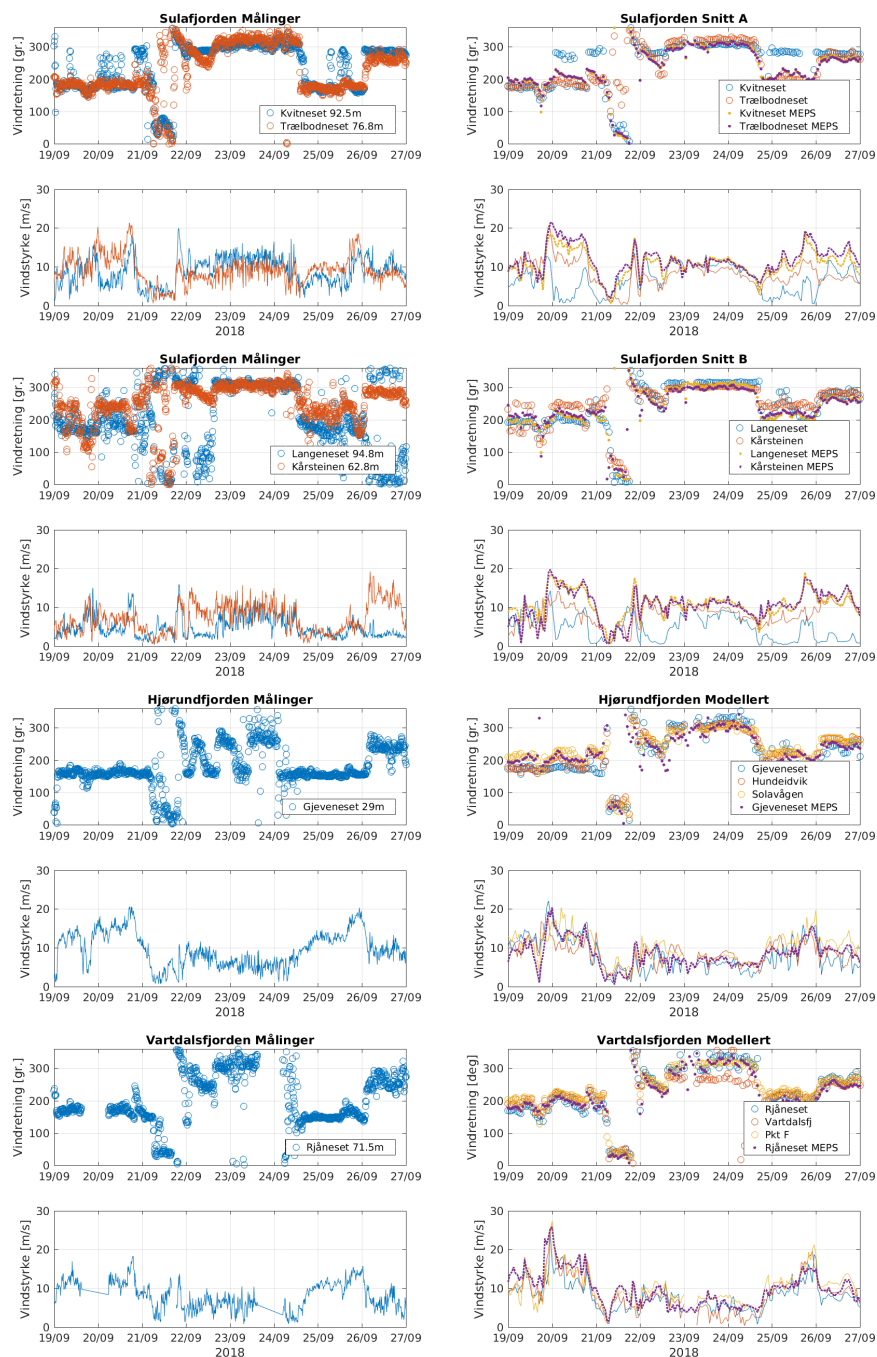
Modellen er ganske god på vindretningen 21. september 21 UTC på Kvitneset og Trælbodneset. Det er på det meste målt 20 m/s på Kvitneset samtidig med 10 m/s på Trælbodneset. SIMRA har rundt 10 m/s begge steder og fanger altså ikke opp dette. Ser vi på mastene på Langeneset og Kårsteinen rundt det samme tidspunktet, er det målt nordvest på Kårsteinen mens vinden målt på Langeneset er mer variabel i retning. SIMRA-modellen gir nordvest begge steder. I dette tidsrommet rundt 21 UTC er det ganske interessant å sammenligne målt og modellert vindstyrke, hvor modellen fanger opp at det er like sterk vind begge steder siste del av dagen. Videre 22. september gir modellen sterkest vind på Kårsteinen i samsvar med observasjonene.

Det siste tidspunktet vi har kart fra er 23. september 07 UTC. Her treffer modellen observasjonene godt for alle de seks mastene.

I tabell 4 har vi igjen regnet ut RMS av feilen og standardavvik av feilen. For fem master med unntak for Gjeveneset har SIMRA for denne perioden bedre resultater enn AROME-MEPS.

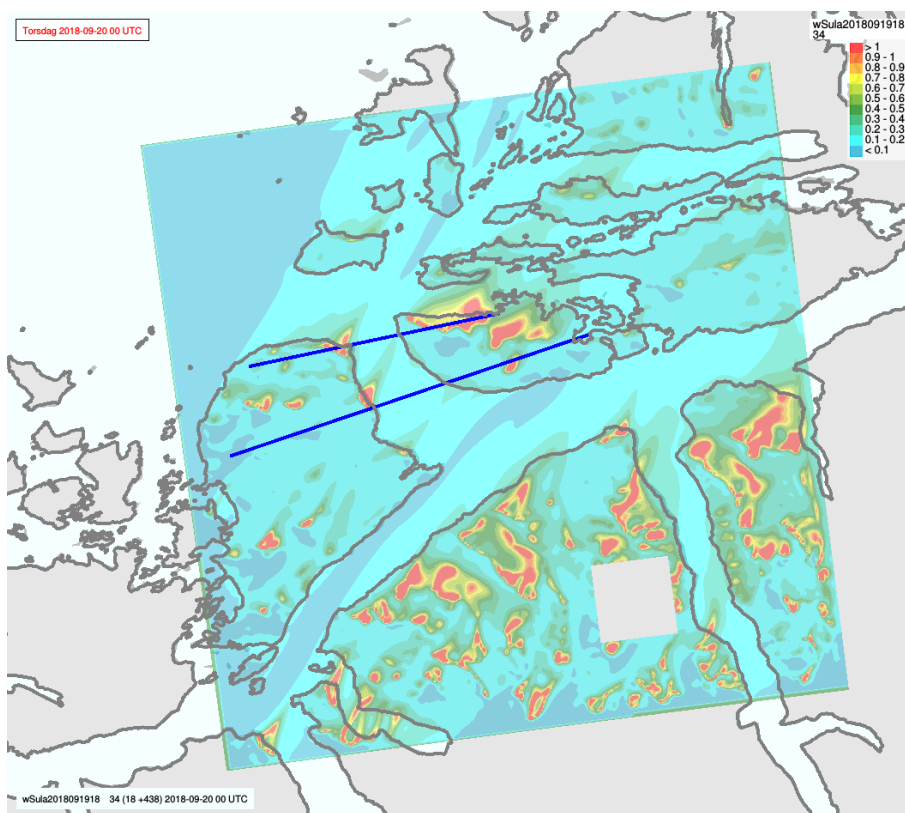
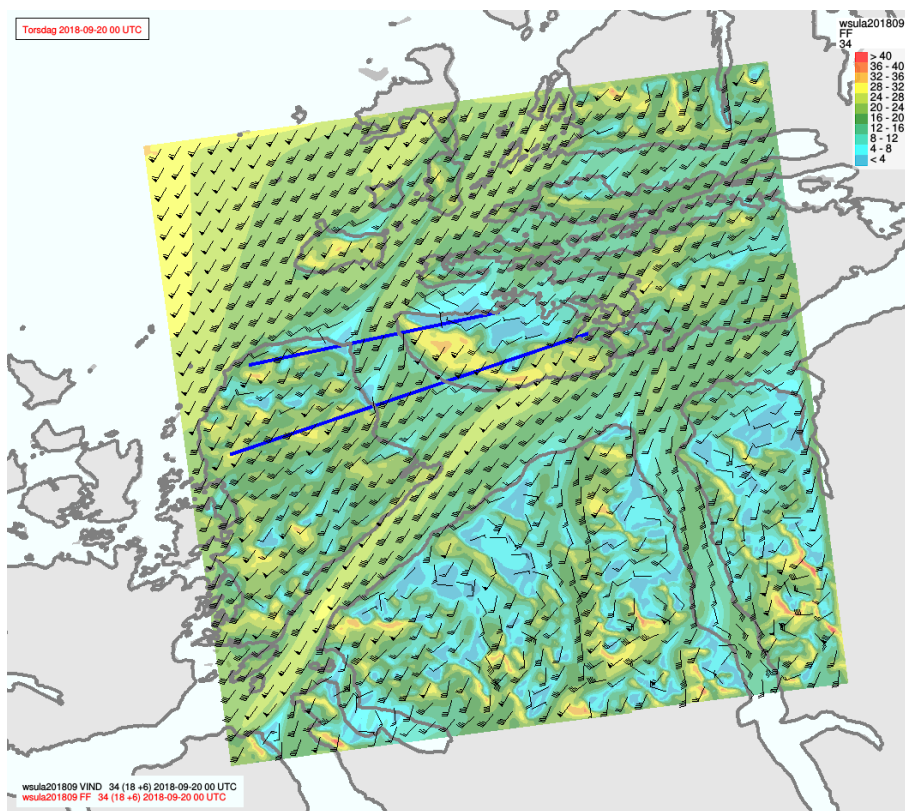
Mast	SDE SIMRA	SDE MEPS	RMSE SIMRA	RMSE MEPS
Gjeveneset	3.3	2.9	3.6	3.0
Kvitneset	3.3	3.8	3.8	3.8
Kårsteinen	2.8	4.3	2.9	5.4
Langeneset	2.8	3.8	2.8	7.0
Rjåneset	2.7	2.5	2.8	2.9
Trælbodneset	2.6	3.0	2.7	3.9

**Tabell 4:** SDE og RMSE for SIMRA og AROME-MEPS under stormen 19.-27. september 2018.

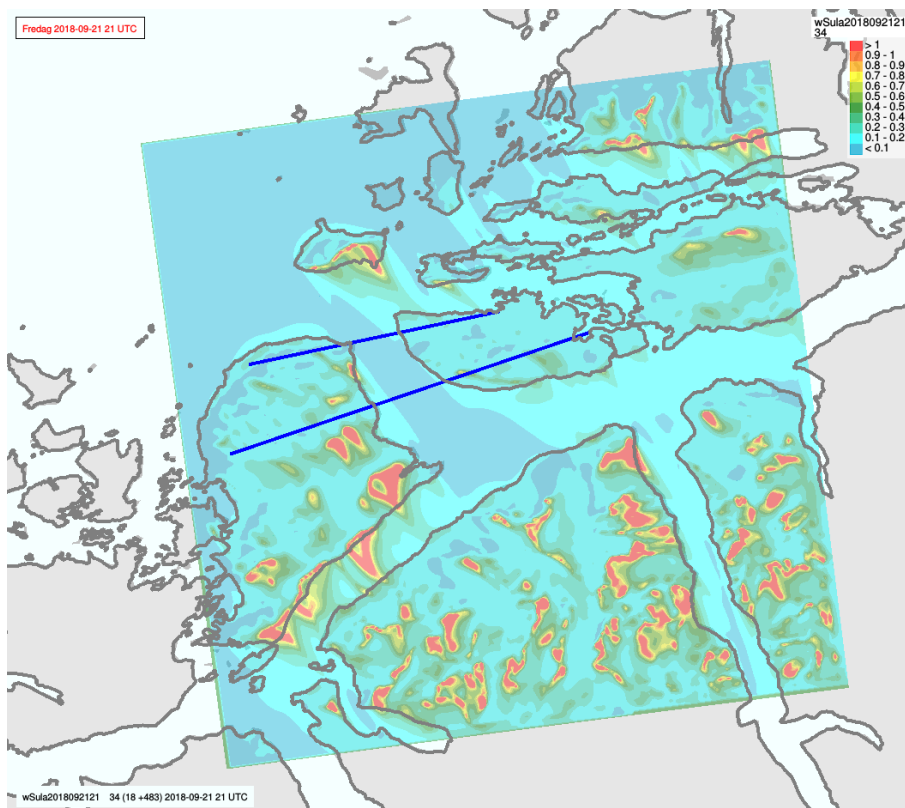
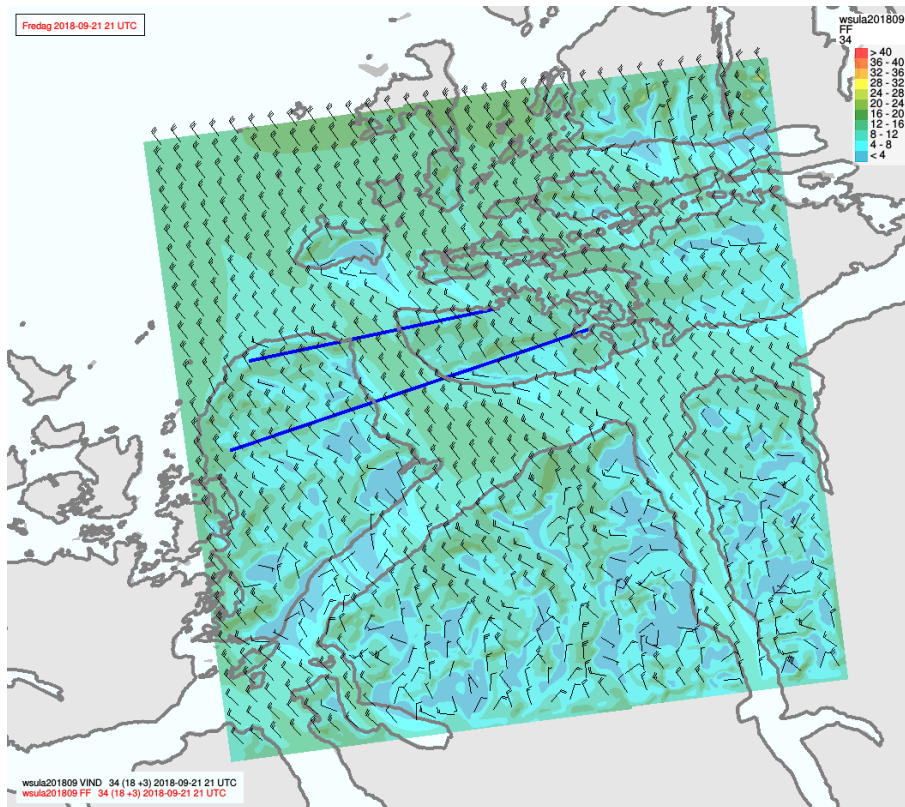


**Figur 7.5:** Tidsserier av vindstyrke og retning fra master (til venstre) og modeller 100 m (til høyre). SIMRA i heltrukne linjer, AROME-MEPS med stiplede linjer. Lokalteter og høyder til observasjoner er angitt i hvert plott.

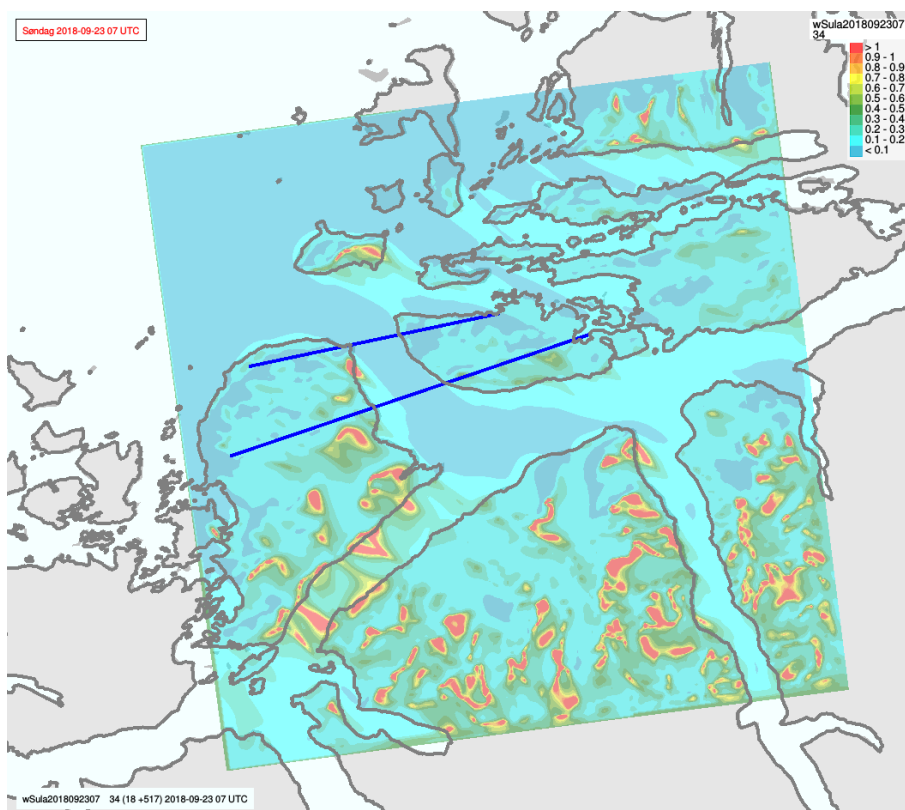
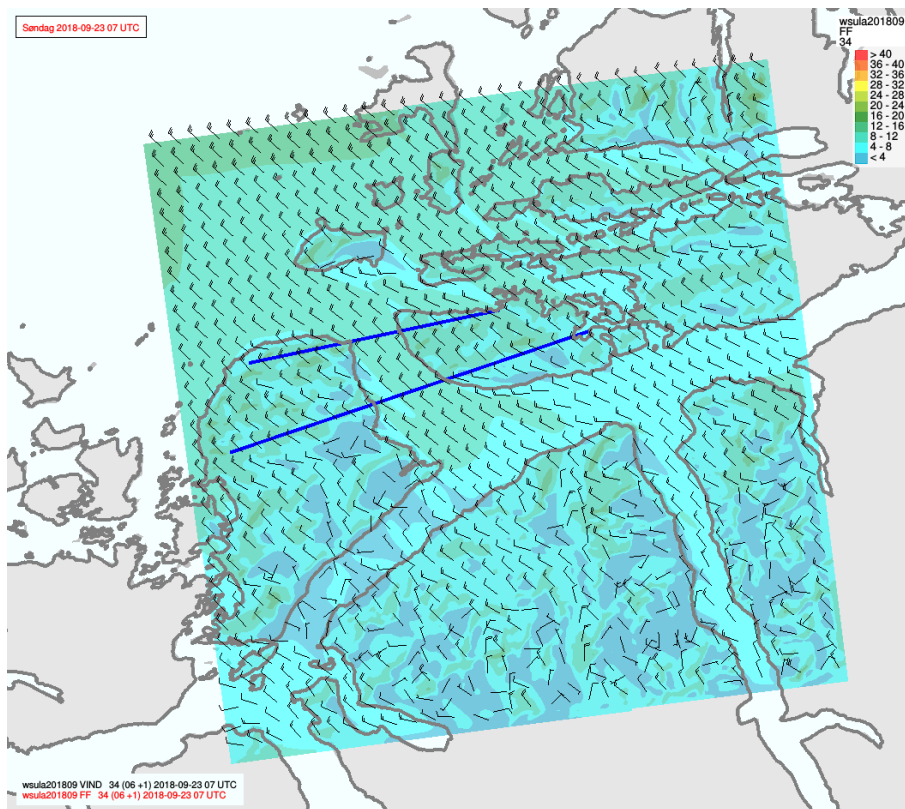




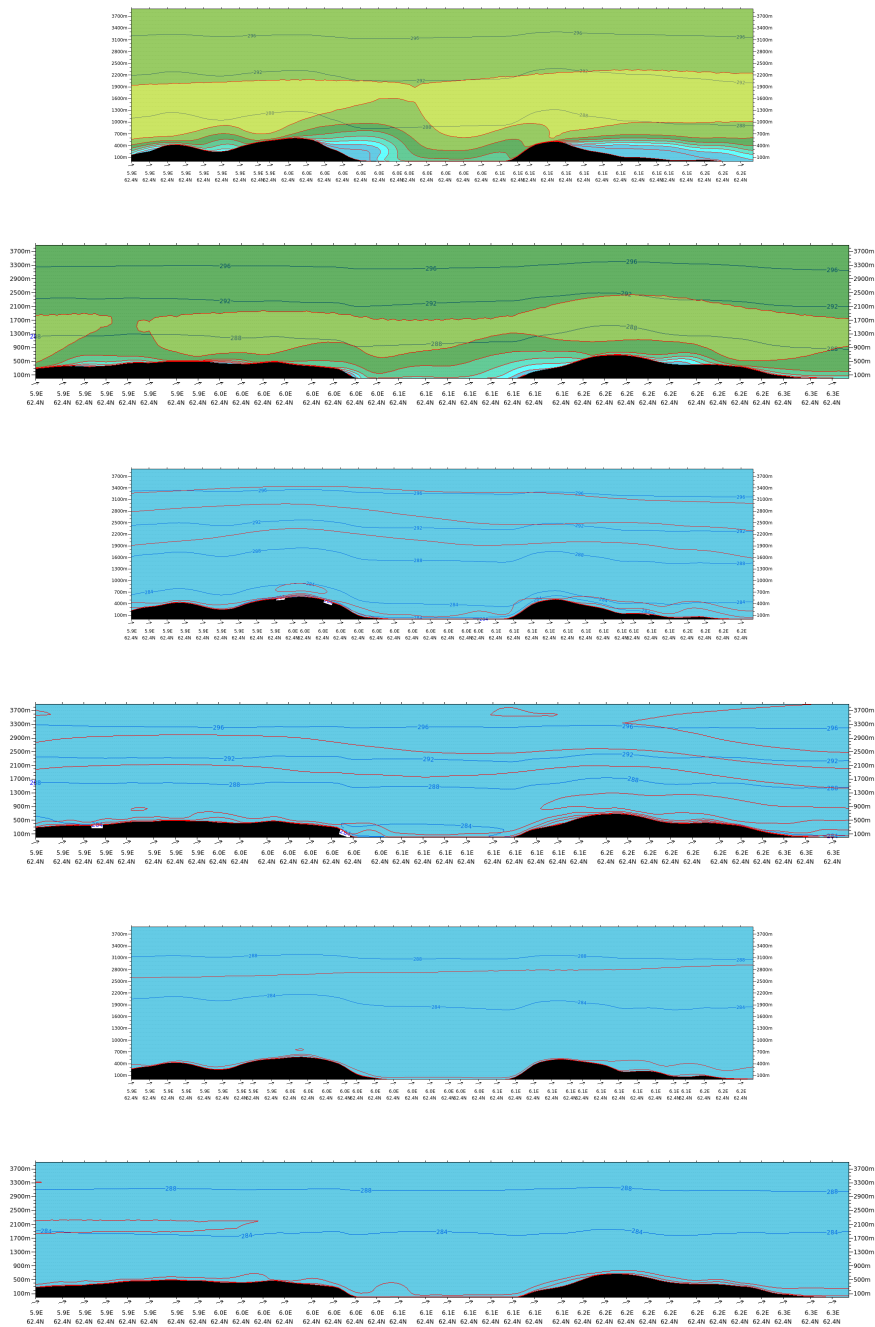
**Figur 7.6:** Vindstyrke [m/s] med vindpiler øverst og TI nederst fra SIMRA-modellen for Sulafjorden for 20. september 2018 00 UTC, tilsvarende figur 7.1.



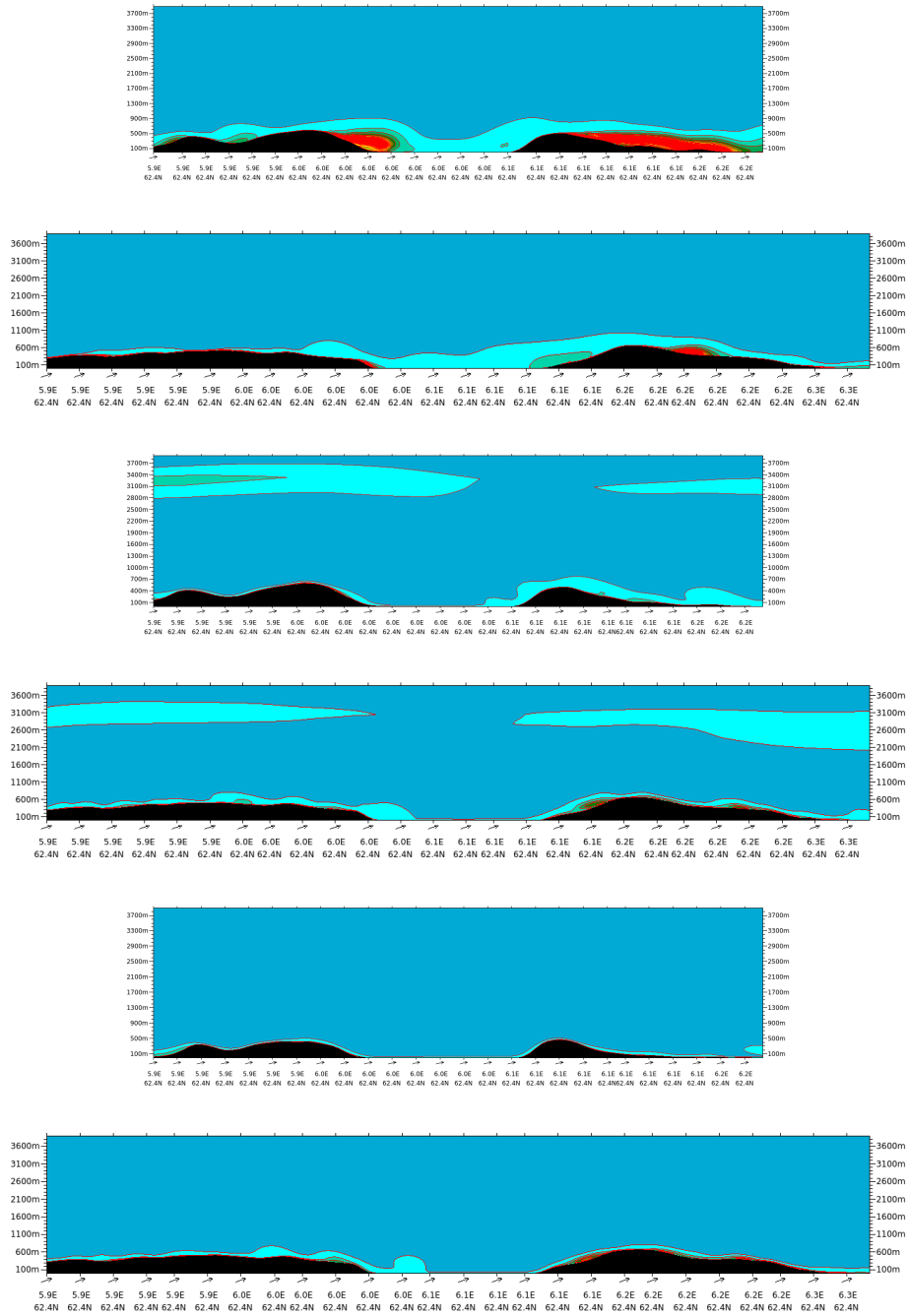
**Figur 7.7:** Vindstyrke [m/s] med vindpiler øverst og TI nederst fra SIMRA-modellen for Sulafjorden 21. september 2018 21 UTC, tilsvarende figur 7.1.



**Figur 7.8:** Vindstyrke [m/s] med vindpiler øverst og TI nederst fra SIMRA-modellen for Sulafjorden 23. september 2018 07 UTC, tilsvarende figur 7.1.



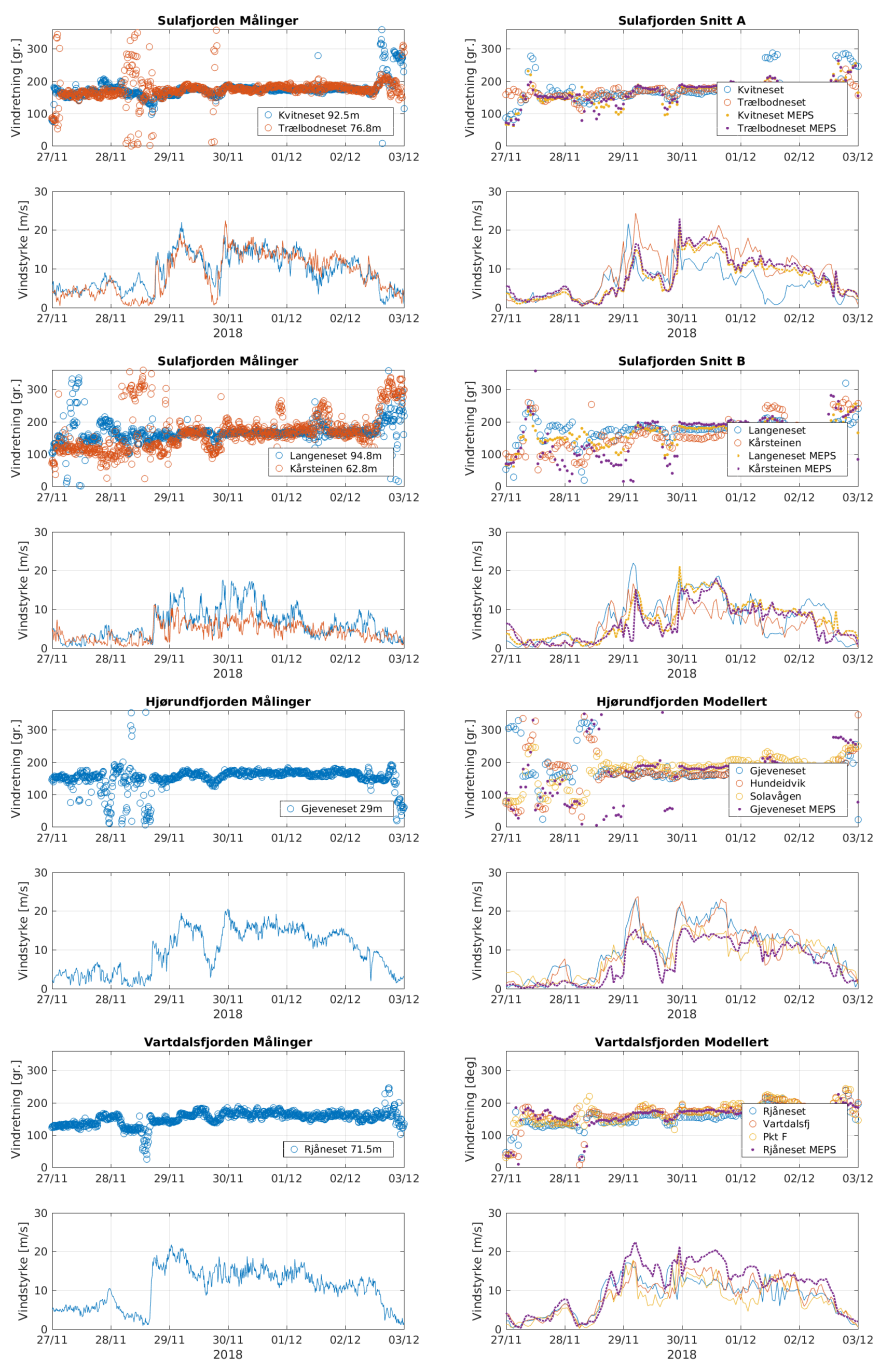
**Figur 7.9:** Vertikale tverrsnitt av potensiell temperatur (blå isolinjer) og vindstyrke normalt på tverrsnittet (farger) for tverrsnitt A og B for tre tidspunkt, først 20. september 2018 00 UTC, 21. september 2018 21 UTC og 23. september 2018 21 UTC med SIMRA, tilsvarende 7.2.



**Figur 7.10:** Vertikale tverrsnitt langs A og B av turbulensintensitet for tre tidspunkt, først 20. september 2018 00 UTC, så 21. september 2018 21 UTC og til sist 23. september 2018 21 UTC med SIMRA, tilsvarende 7.3.

### 7.3 27. november - 3. desember 2018

Den tredje perioden vi skal se på begynner 27. november og varer til natt til 3. desember og dekker seks døgn. Tidsserier fra målinger og modelldata fra SIMRA og AROME-MEPS er vist i figur 7.11.



**Figur 7.11:** Tidsserier fra master (til venstre) og SIMRA og AROME-MEPS i ca. 100 m (til høyre). Lokalteter og høyder til observasjonene er angitt i hvert plott.

I perioden er det kraftig lavtrykksaktivitet og flere lavtrykk som passerer nord i Nord-sjøen. Det er vind omkring sør fra midt på dagen 27. november. Det er sterkest vind med en topp 29. november 04 UTC, og neste topp er ved midnatt natt til 30. november. For å illustrere forskjellen på AROME-MEPS og SIMRA, viser vi kart og tverrsnitt fra begge modellene for den første toppen 27. november 04 UTC. Figurene 7.12 og 7.13 er for

AROME-MEPS, mens figurene 7.14 og 7.15 er fra SIMRA. Kartet som vi brukte for å illustrere AROME-MEPS-modellen i kapittel 3 (figur 3.1) er også fra samme tidspunkt. Vi ønsker å fokusere på forskjellen i detaljer fra de to modellene.

Situasjonen i Sulafjorden har likhetstrekk med stormen fra januar 2018 som vi diskutere først. I denne situasjonen varer den lenger.

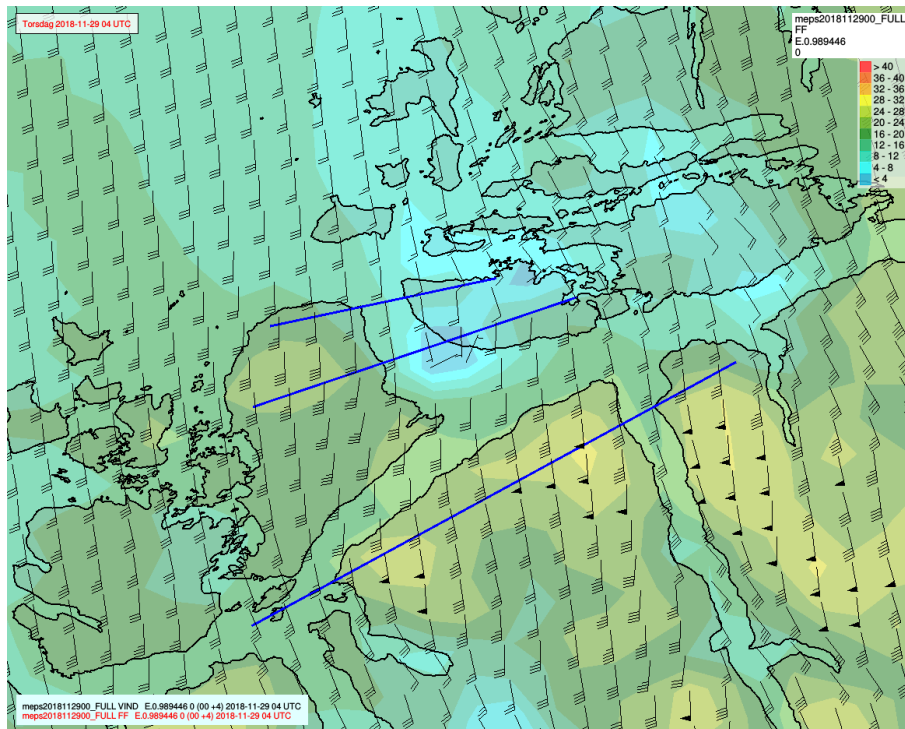
I SIMRA ser vi lignende forsterkninger som vi fant i situasjonen fra januar, men de ligger høyere og har en litt annen plassering. I AROME-MEPS ser vi et svært utjevnet bilde og vi finner bare en bred og mindre markert jetstrøm som dekker det meste av Hareidlandet og en blokkering av vinden foran øyen Sula. Når vi sammenligner kart og vertikalsnitt fra AROME-MEPS med tilsvarende fra SIMRA, ser vi langt flere detaljer i SIMRA. I begge modellene finner vi en jet som ligger over terrenget og ligger under en inversjon høyere oppe. Tverrsnittene demonstrerer veldig tydelig hvor flat og utjevnet topografien i AROME-MEPS er sammenlignet med den mer realistiske topografien i SIMRA.

SIMRA gir her en del høyere vind på Trælbodneset enn på Kvitneset, noe som ikke ses i tidsseriene fra mastene i denne situasjonen (figur 7.11). Til gjengjeld modellerer den godt forholdet mellom Langeneset og Kårsteinen hvor Langeneset har målt høyere vind, kanskje på grunn av den forsterkningen fra Hareidlandet som nevnt tidligere (7.12). Ser vi på vinden fra AROME-MEPS, underestimerer den den første målte toppen der SIMRA treffer bedre, mens begge modellene treffer med den neste toppen.

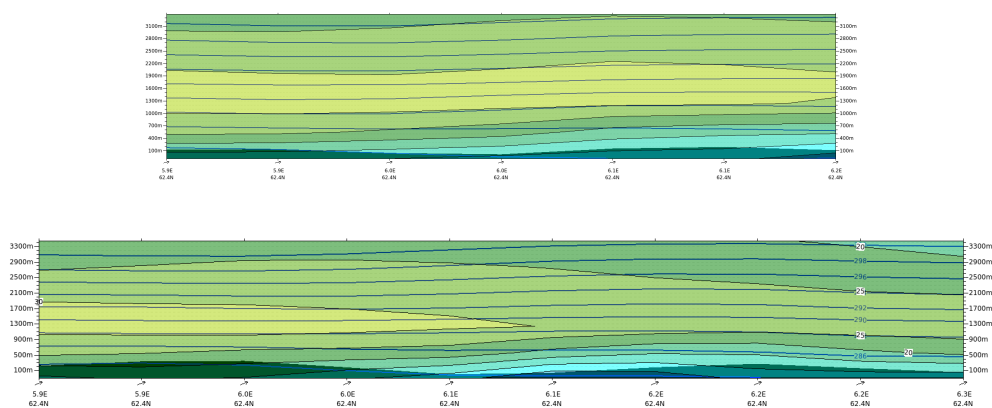
Statistikken for denne korte perioden viser ikke de store forskjeller mellom modellene (tabell 5). Tallene er i favør av SIMRA på Gjeveneset, Langeneset og Kårsteinen, mens det er i favør av AROME-MEPS på Kvitneset, Rjåneset og Kårsteinen.

Mast	SDE	SDE	RMSE	RMSE
	SIMRA	MEPS	SIMRA	MEPS
Gjeveneset	2.8	1.9	2.8	3.4
Kvitneset	3.2	3.1	4.4	3.6
Kårsteinen	2.8	3.7	3.4	4.3
Langeneset	3.2	3.5	3.5	3.7
Rjåneset	2.4	1.9	3.2	3.0
Trælbodneset	2.9	2.4	3.0	2.5

**Tabell 5:** SDE og RMSE for SIMRA og AROME-MEPS under stormen 27. november - 3. desember 2018.

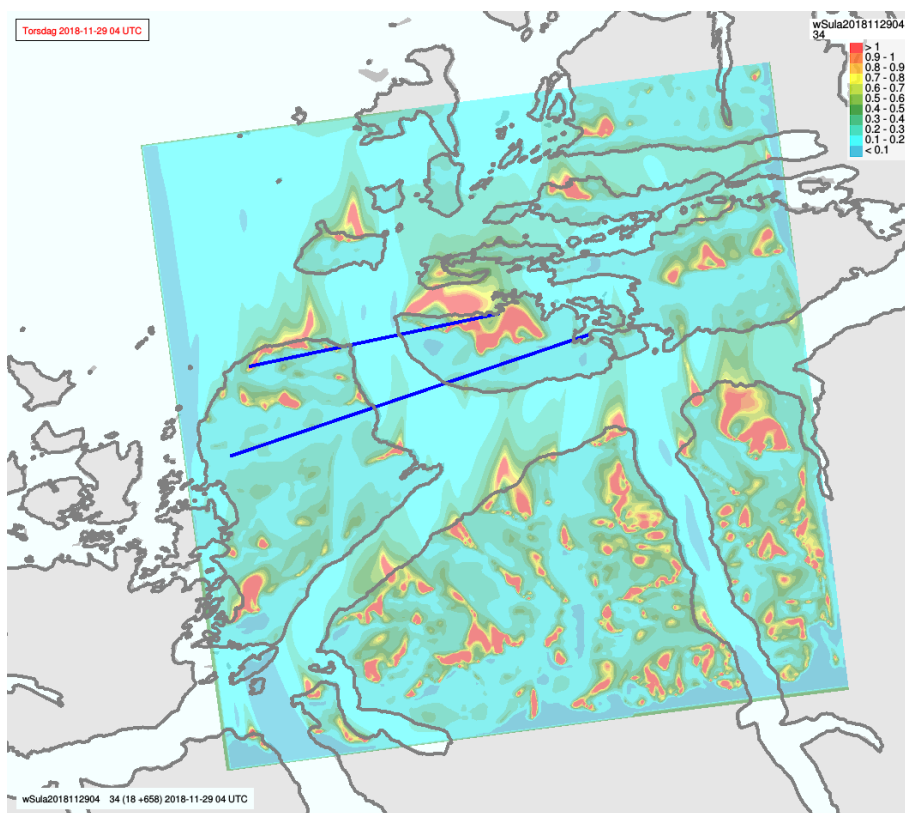
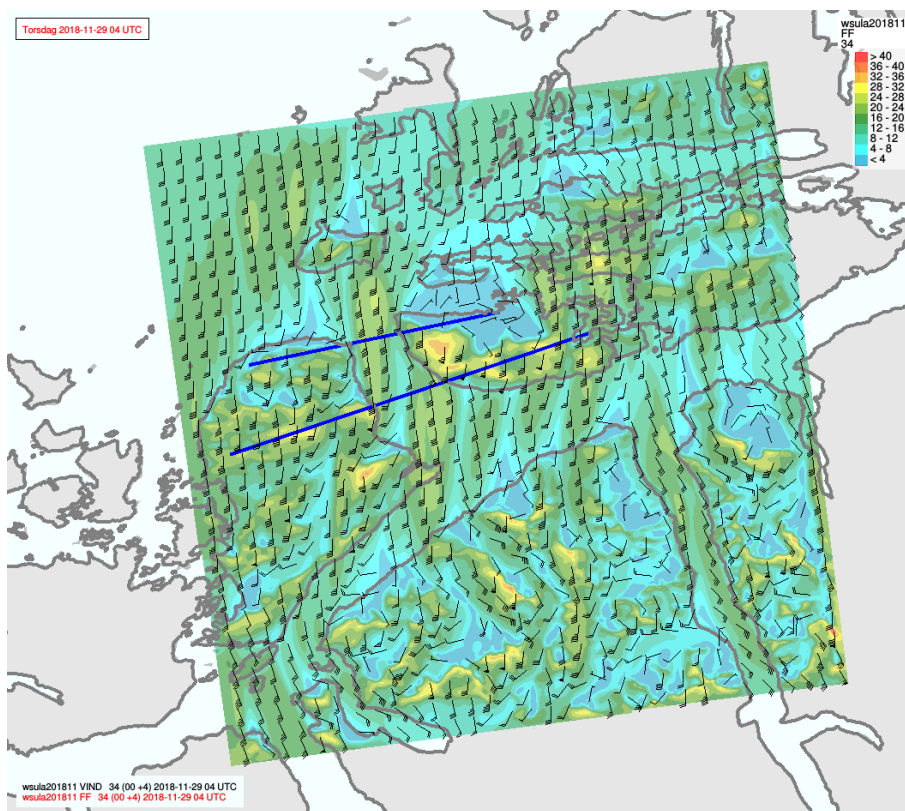


**Figur 7.12:** Vindstyrke (i farger) og vindpiler i hvert gitterpunkt i 70 m over modelltopografien fra AROME-MEPS for Sulafjorden for 29. november 2018 04 UTC. Det er brukt standard meteorologiske vindpiler der fanen peker den veien vinden kommer fra. Fargepalett for vindstyrke med intervall på 4 m/s er vist i øvre høyre hjørne av figuren. Posisjonen for tre snitt er angitt med rette blå linjer. Figur 7.13 viser tverrsnitt langs linje A og B, som er de to nordligste av linjene.

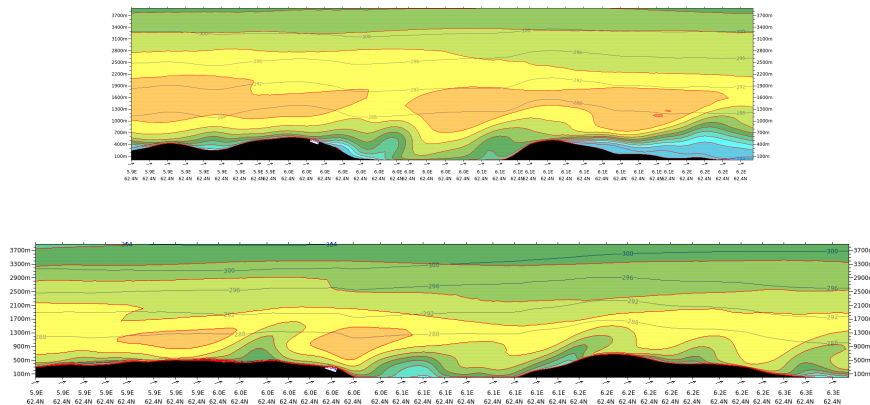


**Figur 7.13:** Vertikale tverrsnitt av potensiell temperatur og vindstyrke normalt på tverrsnittene A og B for Sulafjorden for 29. november 2018 04 UTC med AROME-MEPS. Det er brukt samme fargepalett for vindstyrke som i figur 7.12. Potensiell temperatur er vist med blå isolinger for hver 2 K. Posisjonen av tverrsnittene A og B markert med blå linjer i kartene.

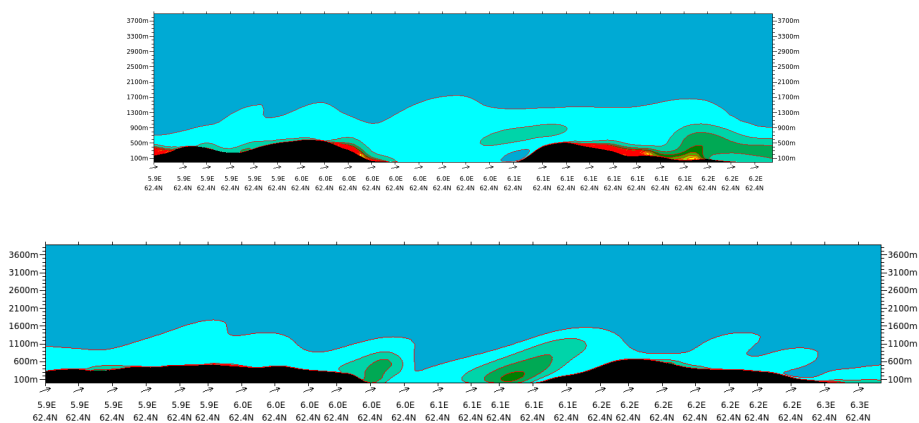




**Figur 7.14:** Vindstyrke [m/s] med vindpiler øverst og TI nederst fra SIMRA-modellen for Sulafjorden 29. november 2018 04 UTC, tilsvarende figur 7.1.



**Figur 7.15:** Vertikale tverrsnitt av potensiell temperatur [K] og vindstyrke [m/s] normalt på tverrsnitt A og B for 29. november 2018 04 UTC med SIMRA, tilsvarende 7.2.



**Figur 7.16:** Vertikale tverrsnitt langs A og B av turbulensintensitet fra SIMRA for 29. november 2018 04 UTC, tilsvarende figur 7.3.

## 8 Oppsummering

CFD-modellen SIMRA er kjørt for et år (2018) for området rundt Sulafjorden i Midt-Norge. SIMRA er en nedskalering til 100 m gitteroppløsning av den operasjonelle værvarslingsmodellen AROME-MEPS, og derfor er det interessant å se på hvordan og hvor mye SIMRA eventuelt forbedrer modelleringen av vinden i forhold til AROME-MEPS. Denne rapporten beskriver SIMRA-oppsettet, validerer parametrene vind og turbulensintensitet og presenterer resultater av vind og turbulensstatistikk.

Det er viktig å understreke at SIMRA gir det som svarer til 10 minutters middelvind sammen med TKE fra den. TKE representerer den kinetiske energien i fluktuationene i vinden slik som modellen beregner den. For å bruke det vi har diskutert ovenfor til dimensjonering er det viktig å huske på at data fra målingene i mastene supplerer dette bilde fra modellen. Det beste eksemplet er kanskje Kvitneset der vi har hatt flere eksempler på vind på rundt 30 m/s av varighet av størrelsesorden sekunder. SIMRA-modellen vil ikke ha dette fenomenet med. Modellen gir likevel et nyttig bidrag som supplement til data fra mastene og LiDAR når estimering av dimensjonerende verdier skal gjøres. Modellen gir et romlig bilde utover målingenes område og utover måleperioden som er nyttig for forståelse av vindforholdene, og som kan være til støtte for ekstrapolering av målingene i tid og rom.

Vindstyrke og -retning modellert med SIMRA og AROME-MEPS for 2018 er validert mot de 6 mastene i Sulafjorden. I SIMRA har vi interpolert data fra de nærmeste punktene til hver mast. For AROME-MEPS har vi valgt det av de nærmeste hav/kyst-punkt som har høyest korrelasjon til masten, siden gitteroppløsningen er 2.5 km og topografien ikke representerer virkeligheten godt på denne skalaen. Vi har ikke brukt vindmålinger fra bøyene, siden output fra SIMRA lavere enn 30 meters høyde ikke bør brukes.

Det er ikke entydig at den ene modellen modellerer vindstyrke bedre enn den andre, hverken når vi sammenligner 98-prosentandelen, STD, korrelasjon, RMSE og SDE eller fordelingen av vindstyrke. Samlet sett ligger SIMRA lavere i vindstyrke enn AROME-MEPS bortsett fra på Gjeveneset. AROME-MEPS har nesten perfekt frekvensfordeling i vindstyrke på Kvitneset, Trælbodneset og Rjåneset. På Kvitneset og Rjåneset er SIMRA for lav, men SIMRA har like god eller bedre frekvensfordeling av vindstyrke på Trælbodneset, Langeneset, Kårsteinen, samt på Gjeveneset bortsett fra den høyeste prosenten av verdiene her som er for høye.

Bedre oppløsning av topografien gjør at SIMRA er klart bedre på å modellere vindretning enn AROME-MEPS. AROME-MEPS har generelt stor spredning i vindretningen, mens SIMRA stort sett har en fordeling på vindretningene som samsvarer med det som er observert, og også stemmer overens med forventet i forhold til topografien i området (figur 4.10-4.15). Det er sannsynlig at AROME-MEPS også hadde fanget opp vindretning bedre med høyere romlig oppløsning.

Selve Sulafjorden ligger i nord-sørlig retning og derfor på tvers av de dominerende vindretningene. De høyeste verdiene for 98-prosentdelen av vindstyrke i observasjonene er derfor på Gjeveneset og Rjåneset ( $> 15$  m/s). Dette klarer ikke modellene riktig å fange opp.

Turbulensintensiteten beregnet fra SIMRA i 100 m for mastlokasjonene samsvarer godt med de tilsvarende analyser fra mastene i *Kjeller Vindteknikk* (2019c) med verdier omkring 0,2-0,4 og for noen retninger opp i 0,5. Midt i fjorden er verdiene basert på LiDAR lavere (0,05-0,2) med noen tilfeller opp i 0,3 for østlig -nordøstlig vind. Her ligger modellen litt høyere. Fordelingen av TI på vindretninger har noen avvik, også midt i fjorden hvor modellen har høyest turbulens ved vind fra sørvest, mens det er vind fra øst som gir de høyeste målte verdier.

Siden mastene står på land og nær bratte fjellsider kan de vanskelig representere vindforholdene over fjorden. Forskjeller mellom master og modell kan også skyldes at noen av mastene står så nær bratte fjellsider at målingene er lite representative for annet enn det nære området. Et stort måleprogram med LiDAR som har pågått siden november 2018 vil bote på dette. De første målingene er beskrevet i flere rapporter (*Kjeller Vindteknikk*, 2019b, 2020). LiDAR-oppsettet gir målinger av vind og turbulens over fjorden i tverrsnitt A og i høyden over Kvitneset. Figurene i avsnitt 4.2 og figur 5.5, 5.6 og 5.7 kan sammenlignes med resultater av LiDAR-målingene. Ved hjelp av vertikal-LiDAR montert på toppen av masten på Kvitneset, har *Kjeller Vindteknikk* (2020) for eksempel vist at vindprofilen på Kvitneset har en forholdsvis svak økning med høyden mellom 50-250 m og deretter antyder målingene en kraftigere økning. Denne formen på vindprofilen kommer også fram av resultatene fra SIMRA. Modellen og LiDAR-målingene bekrefter altså her hverandre i at vinden gradvis øker og blir fri av terrenget i ca 250 m høyde over Kvitneset (figur 5.7) (*Kjeller Vindteknikk*, 2019b). Beskrivende skanninger og tidsserier fra LiDAR kan sammenlignes gjennom stormen 27. november - 3. desember (avsnitt 7.3).

98-prosentdelen av én komponent av turbulensen på tvers av fjorden mellom Kvitneset og Trælbodneset er noe lavere i modellen enn det de radielle målingene fra LiDAR antyder (Figur 4.20). Radielle målinger fra LiDAR gir for eksempel ca 2,7 m/s for 98-prosentdelen av TKE i midten av fjorden, mens tilsvarende verdi fra SIMRA er 2 m/s. Når vi sammenlignet retningsfordelt TI mot master og LiDAR (Figur 4.16 og 4.21) stemte TI-verdiene fra SIMRA godt, eller var kanskje litt for høye. Denne forskjellen kan skyldes at antakelsen om homogen turbulens i Figur 4.20 ikke er korrekt. Både modell og LiDAR antyder mindre turbulens i midten av fjorden enn nær land, noe som er forventet.

For de tre kortere periodene i kapittel 7 har vi sammenlignet kart og tverrsnitt fra modellene og sett på statistikk for feilen av modellene versus målingene for disse tre periodene separat. Statistikken vi presenterte i kapittel 4 er for et helt år og dekker alle vær-situasjonene. Siden vi er spesielt interessert i de situasjonene det observeres sterk vind, har vi også beregnet den samme statistikken for tre perioder på noen dager omkring observert sterk vind på mastene. Dette for å se om bidraget fra disse periodene til statistikken for hele perioden. Periode 2 skiller seg ut ved at statistikken her er bedre for SIMRA enn for AROME-MEPS når vi vurderer målingene samlet. For de to andre situasjonene finner vi litt skuffende at dette målet på kvalitet alene gir omtrent samme kvalitet på SIMRA som på AROME-MEPS. Samtidig ser vi i begge disse situasjonene detaljer i form av topografiske forsterkninger og gradienter i vinden som ser realistiske ut i SIMRA. Sammenligningen vi har gjort med AROME-MEPS med kart og tverrsnitt for periode 3 viser at SIMRA sin beskrivelse har detaljer og forsterkninger i vinden som vi vurderer som realistiske. Statistikken fra dagene rundt denne situasjonen viser at denne perioden likevel samlet sett ikke bidrar positivt til SIMRA sin statistikk sammenlignet med AROME-MEPS. SIMRA har en rekke detaljer som AROME-MEPS ikke har. Det er et veldig flott måleprogram fra mastene, men mye av det vi gjerne skulle validert nærmere i SIMRA ligger høyere opp og

inn over terrenget. Vi forventer at LiDAR-målingene vil gi et langt bedre mål på modellkvalitet siden de dekker volumer rundt brobaner og ikke minst fordi de når høyere opp. Disse nye målingene sammen med modellering med ennå høyere oppløsning vil ventelig gi oss et bedre bilde av hva som skjer i området når det er sterk vind.

Et mål med SIMRA-modelleringen har vært å dekke en såpass lang periode at vi kan si noe om hyppighet av de sjeldne dimensjonerende tilfellene i et større materiale. Et like viktig mål er å bruke modellene i perioder med målt sterk vind for å vurdere dimensjonerende størrelser, også der det ikke er målinger, ved å modellere slike situasjoner nøyere. Denne studien av tre caser er planlagt fulgt opp med modellering med ennå bedre oppløsning av topografien. De statistiske målene er ikke tilfredsstillende med de modellene vi har nå, men vi har god tro på at bedre oppløsning i både SIMRA og AROME-MEPS vil hjelpe. Vi må da ta i bruk andre modeller for simulering av turbulens-elementene, som PALM som er en Large Eddy Simulation (LES)-modell.

Rapporten har tatt for seg å dokumentere SIMRA-datasettet for 2018 for Sulafjorden. Vindklimaet i 2018 hadde hyppigere vind fra sør enn normalt og få situasjoner med kraftig vind fra nordvest. Langtidskorrigerings av datasettet bør derfor gjøres for å oppnå en bedre statistisk representasjon dersom det skal brukes til dimensjonering.

## Referanser

- Eidsvik, K. J. (2005), A system for wind power estimation in mountainous terrain. Prediction of Askervein hill data, *Wind Energy*, 8(2), 237–249.
- Furevik, B., H. Ágústsson, A. Lauen Borg, M. Zakari, F. Nyhamme, and M. Gausen (2020), Meteorological observations in tall masts for mapping of atmospheric flow in norwegian complex terrain, sendt til *Earth System Science Data*.
- Kjeller Vindteknikk (2019a), *Lofoten - Værmessig tilgjengelighet for aktuelle flyplasslokaliteter*, Rapport nr. KVT/HÁ/2019/R049 Rev1.
- Kjeller Vindteknikk (2019b), *E39, Sulaffjorden, Møre og Romsdal, Norway. Analysis of wind measurements from the vertical lidar at Kvitneset.*, Rapport nr. RAP-KVT-LID-103-R1 / KVT/OKE/2019/R139.
- Kjeller Vindteknikk (2019c), *Analysis of wind measurements from 6 masts at Sulaffjorden 24.11.2016-30.09.2019*, Rapport nr. RAP-KVT-L-104-R0 / KVT/ASH/2019/R136.
- Kjeller Vindteknikk (2020), *E39, Sulaffjorden, Møre og Romsdal, Norway. Analysis of LIDAR derived wind measurements. September 2018 – September 2019*, Rapport nr. RAP-KVT-LID-104-R0 / KVT/HÁ/2019/R140.
- Müller, M., M. Homleid, K.-I. Ivarsson, M. A. Ø. Køltzow, M. Lindskog, K. H. Midtbø, U. Andrae, T. Aspelien, L. Berggren, D. Bjørge, P. Dahlgren, J. Kristiansen, R. Randriamampianina, M. Ridal, and O. Vignes (2017), AROME-MetCoOp: A nordic convective-scale operational weather prediction model, *Weather and Forecasting*, 32(2), 609–627, doi:<http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-16-0099.1>.
- Rasheed, A., J. K. Süld, and T. Kvamsdal (2014), A Multiscale Wind and Power Forecast System for Wind Farms, *Energy Procedia*, 53, 290 – 299, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.238>, EERA DeepWind' 2014, 11th Deep Sea Offshore Wind R&D Conference.
- Utnes, T., and K. Eidsvik (1996), Turbulent flows over mountainous terrain modelled by the reynolds equations, *Boundary-Layer Meteorol*, 79, 393–416, doi:10.1007/BF00119406.

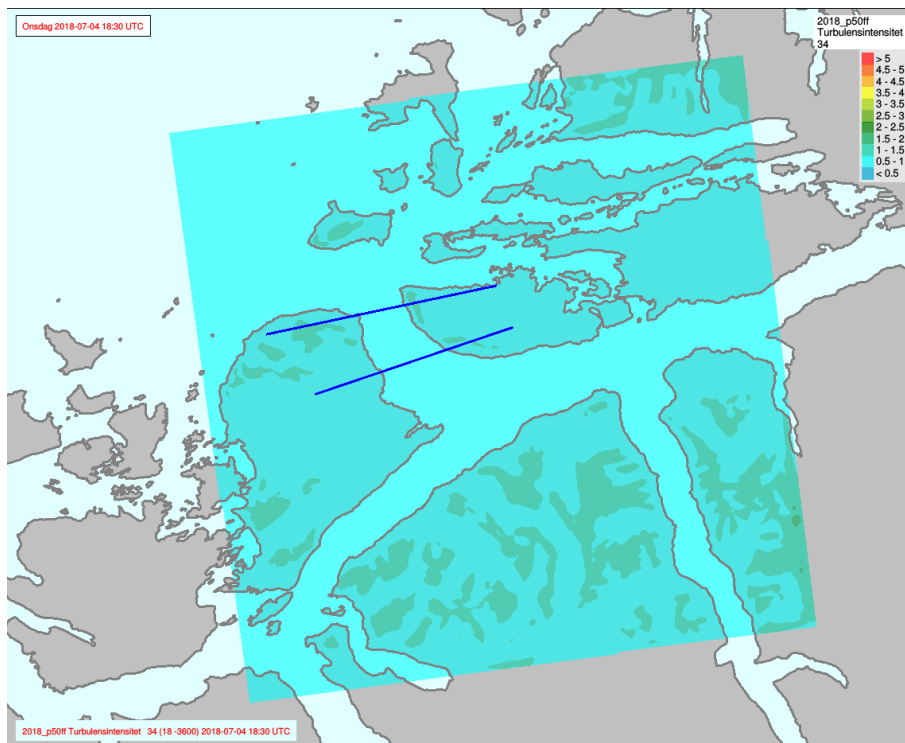
## A Verifikasjonsmål

Statistikk	Akronym	Formel	Spenn	Optimal verdi
Middelfeil/Mean error	ME	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i)$	$\infty$ til $\infty$	0
Root Mean Square Error	RMSE	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i)^2}$	0 til $\infty$	0
Standard Deviation of Error	SDE	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i - ME)^2}$	0 til $\infty$	0
Korrelasjon	Kor.	$\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})(o_i - \bar{o})}{\sigma_f \sigma_o}$	-1 til 1	1

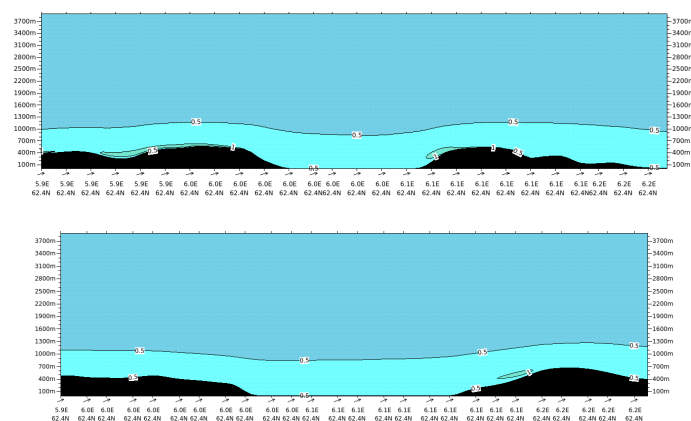
der  $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$  og  $\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$ .

## B Turbulent Kinetisk Energi (TKE)

Figurene under viser resultater for turbulens i form av kvadratroten av turbulent kinetisk energi (TKE), variabelen `turbulence_index_ml` fra SIMRA.

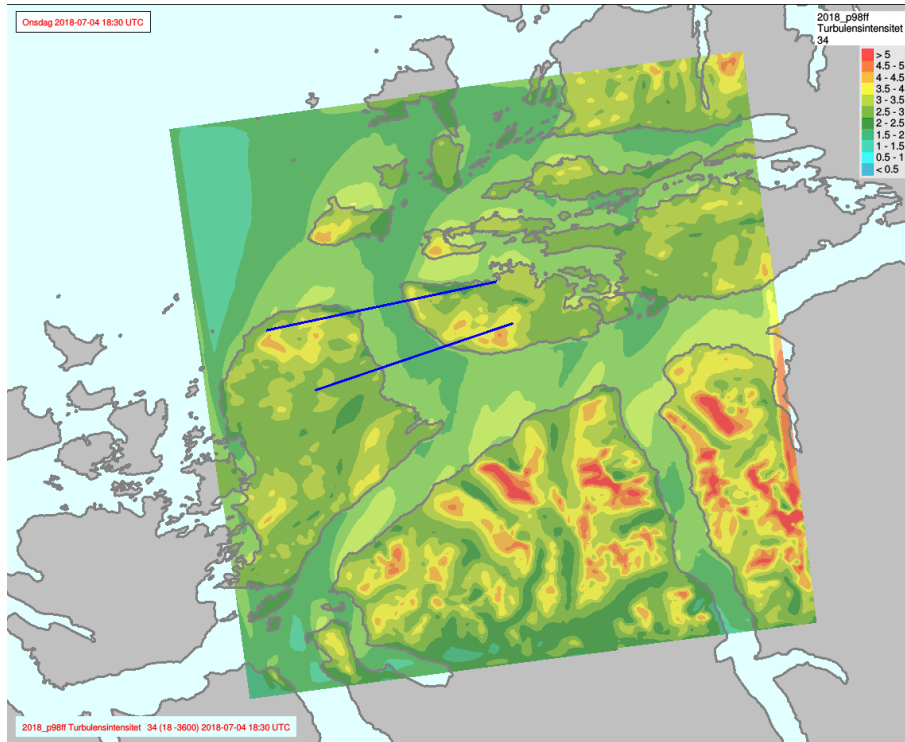


**Figur B.1:** Kart for Sulafjorden fra SIMRA-modellen med isolinjer for 50-prosentdelen av kvadratroten av turbulent kinetisk energi (TKE) med intervall 0.5 m/s i 75 meter høyde over modelltopografien. Det er brukt en fargepalett som vises i øvre høyre hjørne av kartet.

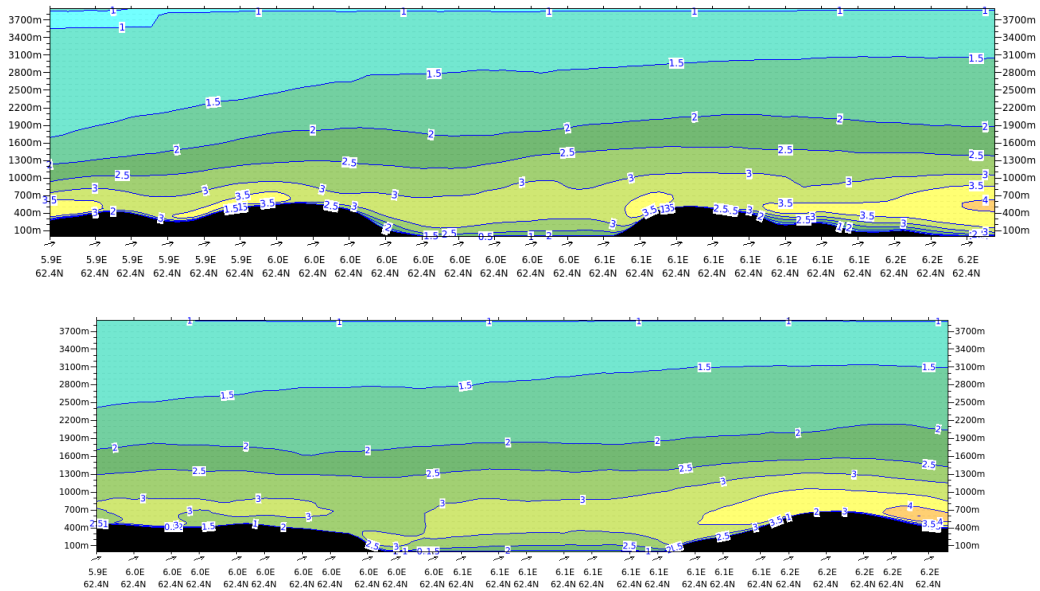


**Figur B.2:** Vertikale tverrsnitt for Sulafjorden isolinjer for 50-prosentdelen av kvadratroten av turbulent kinetisk energi (TKE) med intervall 0.5 m/s Det er brukt en fargepalett som vises i øvre høyre hjørne av kartet i forrige figur. Dette er vist for tverrsnitt A og B som er markert med blå linjer i kartene.

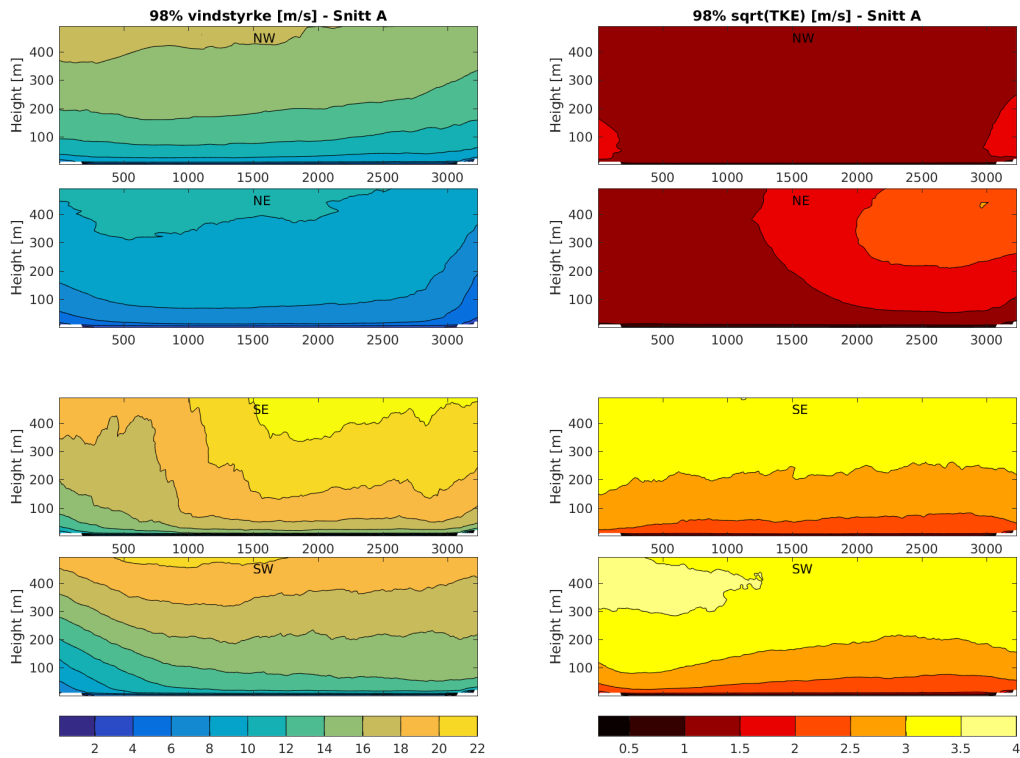




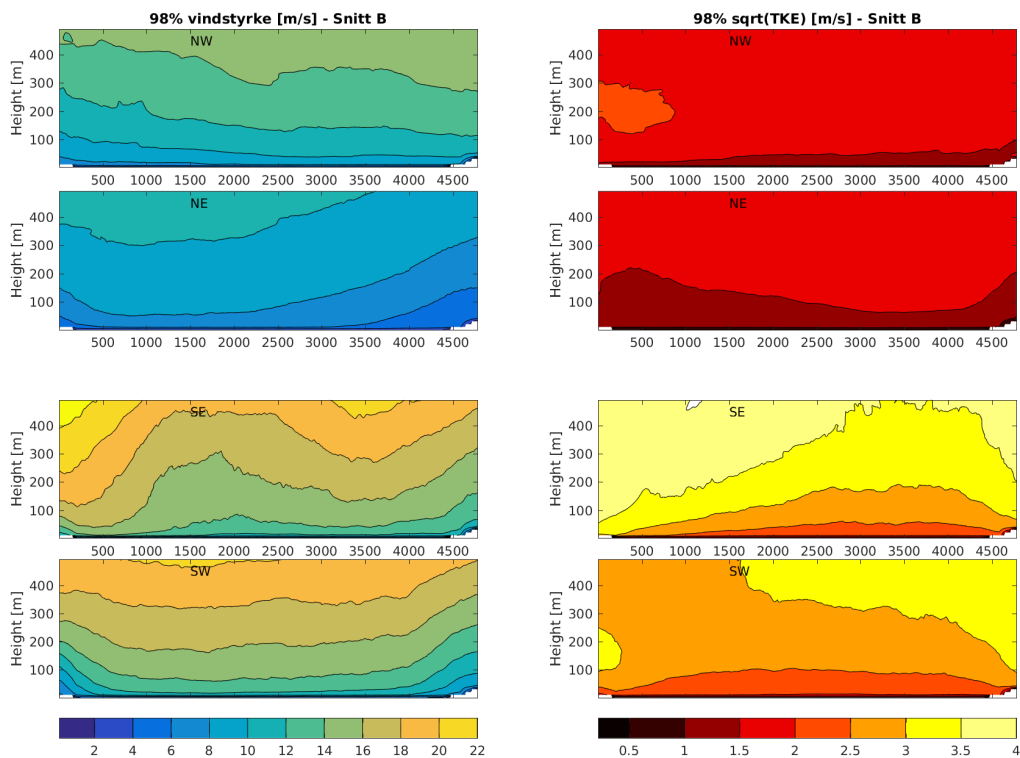
**Figur B.3:** Kart for Sulafjorden fra SIMRA-modellen med isolinjer for 98-prosendedelen av kvadratroten av turbulent kinetisk energi (TKE) med intervall 0.5 m/s i 75 meter høyde over modelltopografien. Det er brukt en fargepalett som vises i øvre høyre hjørne av kartet.



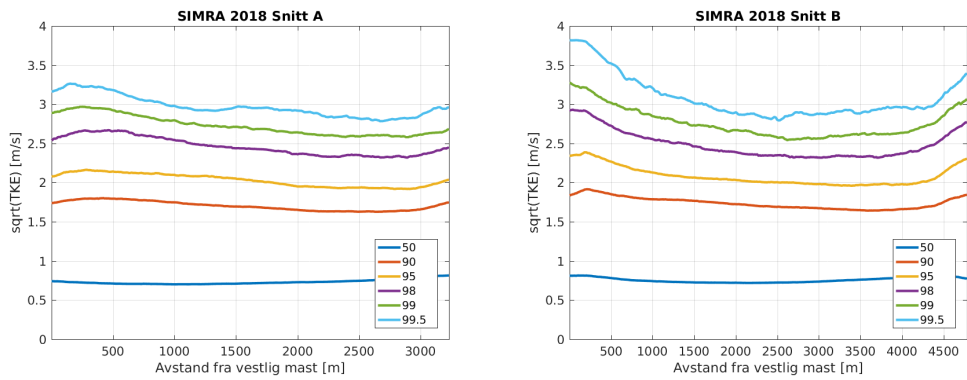
**Figur B.4:** Vertikale tverrsnitt for Sulafjorden isolinjer for 98-prosentedelen av kvadratroten av turbulent kinetisk energi (TKE) med intervall 0.5 m/s Det er brukt en fargepalett som vises i øvre høyre hjørne av kartet i forrige figur. Dette er vist for tverrsnittene A og B, som er markert med blå linjer i kartene.



**Figur B.5:** Tverrsnitt fra Kvitneset til Trælbodneset av 98-prosentdelen av vindstyrke [m/s] (venstre kolonne) og kvadratroten av TKE [m/s] (høyre kolonne) for hver av fire vindretninger (øverst til nederst): nordvest (270-0 grader), nordøst (0 - 90 grader), sydøst (90-180 grader) og sydvest (180-270 grader). x-aksen angir avstand i km fra Kvitneset.



**Figur B.6:** Tverrsnitt fra Langeneset til Kårsteinen som i figuren over.



**Figur B.7:** Kvantilplott av kvadratrotten av TKE fra SIMRA på tvers av fjorden over tverrsnitt A fra Kvitneset til Trælbodneset (til venstre) og over tverrsnitt B fra Langeneset til Kårsteinen (til høyre). Linjene viser nivået til prosentdelene 50-99.5 som angitt.