



Meteorologisk
institutt

METreport

Tittel Finskala modellering av vind i fjorder. Gjemnessundet 2018.	Dato 20.12.2021
Avdeling 1) SUV 2) Avdeling for oseanografi og maritim meteorologi	Rapport nr. 20/2021
Forfattere Lene Østvand ¹⁾ , Knut Helge Midtbø ¹⁾ og Birgitte Rugaard Furevik ²⁾	Klassifisering <input checked="" type="radio"/> Åpen <input type="radio"/> Begrenset
Oppdragsgiver Statens vegvesen	Oppdragsgivers referanse
Sammendrag Denne rapporten dokumenterer vindmodelleringen med CFD-modellen SIMRA for Gjemnessundet for 2018. Hindcastdatasettet og inngangsdata fra den operasjonelle værvarslings-modellen ved MET, AROME-MEPS, er sammenlignet med vindmålinger fra en måler plassert på siden av brobanen.	
Nøkkelord vind, turbulens, finskala, gjemnessundet, simra, arome, CFD	

Faglig ansvarlig

Administrativt ansvarlig

Sammendrag

Denne rapporten dokumenterer vindmodelleringen med CFD-modellen SIMRA for Gjemnessundet for 2018. Hindcastdatasettet og inngangsdata fra den operasjonelle værvarslingsmodellen ved MET, AROME-MEPS, er sammenlignet med vindmålinger fra en måler plassert på siden av brobanen.

Verifikasjonen viser at SIMRA i noen grad forbedrer vinden modellert på vindmåleren i forhold til AROME-MEPS. Det er en mer realistisk retningsfordeling og SIMRA klarer i større grad å kanalisere vinden ut sundet. SIMRA sine verdier av turbulensintensitet er beregnet, og vi ser et mønster vi kjenner igjen fra de andre fjordene. Når vi ser på det romlige bildet SIMRA gir på tvers av sundet, finner vi gradienter. Dette så vi også i resultatene fra Sulafjorden, der midlere vind varierte langs brobanen. For Halsafjorden og Julsundet var denne variasjonen mindre.

Tre tilfeller med storm i løpet av 2018 er analysert for å belyse gevinsten med CFD-modellering med høy oppløsning for noen typiske vindfenomen i sundet. Vi ser at det er forskjeller mellom modellene, uten at det er entydig bedre resultater med SIMRA for det siste tilfellet fra november. Studiet av caser bør følges opp med modellering med enda bedre oppløsning av topografien og dette er planlagt. Vi har som hypotese at det fortsatt er for dårlig oppløsning i modellene til å løse opp alle de viktige detaljene i den lokale topografiene og tror det da skal være mulig å forbedre samsvaret med målingene på denne måten.

Innhold

1	Introduksjon	1
2	Målinger	2
3	Modeller	3
3.1	AROME-MEPS 2.5	3
3.2	SIMRA	3
4	Verifikasjon	6
4.1	Verifikasjon mot bruobservasjoner	6
5	Generelle vindforhold	9
6	Ekstremvind	13
7	Stormer	18
7.1	18.-19. mars	18
7.2	12.-15. oktober	22
7.3	27.-30. november	26
8	Oppsummering	30
	Referanser	31
A	Verifikasjonsmål	32

1 Introduksjon

Det er et langsiktig mål for Stortinget å bygge en ferjefri veiforbindelse mellom Kristiansand og Trondheim. Statens Vegvesen (SVV) har ansvar for utbyggingen gjennom prosjektet Ferjefri E39. Prosjektet innebærer å krysse flere fjorder med faste forbindelser, som vi her vil referere til som broer.

Gjemnessundet ligger sør for Kristiansund, og her er det allerede en bro, Gjemnessundbrua, som er en del av E39. Denne krysser Gjemnessundet mellom Gjemnes på fastlandet og Bergsøya i Møre og Romsdal, og sørger for fastlandsforbindelse med Kristiansund. Vi har tidligere publisert rapporter tilsvarende denne for Sulafjorden og Vartdalsfjorden (*Midtbø et al.*, 2020a), Halsafjorden (*Midtbø et al.*, 2020b) og Julsundet (*Østvand et al.*, 2021).

I et statlig samarbeid (etter reglene for samarbeid mellom statlige etater) med SVV har Meteorologisk Institutt (MET) simulert vindforholdene i Gjemnessundet. Det er brukt en Computational Fluid Dynamics (CFD) model, SIMRA. Modellen er detaljert med en gitteravstand på 100 m og 51 vertikale lag opp til ca 3500 m høyde. Den er kjørt for et år (2018) med inngangsdata fra den operasjonelle værvarslingsmodellen på MET, AROME-MEPS med 2,5 km oppløsning. SIMRA henter bakketrykk sammen med vind og temperaturfordeling fra bakken opp til øverste SIMRA-nivå fra AROME-MEPS og beregner vind- og turbulensforhold med 100 m oppløsning.

SIMRA er utviklet ved SINTEF Digital som har rettighetene og setter opp modellen for nye områder med gitter, topografi og tidssteg. MET har så satt opp modellen slik at den kan kjøres med inngangsdata fra AROME-MEPS. Gjennom dette samarbeidet mellom SINTEF Digital og MET har SIMRA vært i bruk i nesten 20 år til operasjonell turbulensvarsling for rundt 20 norske flyplasser. Samarbeidet ble fra 2016 videreført i prosjekter for lokalisering av ny Hammerfest flyplass, ny storflyplass i Lofoten og fra 2017 også for Ferjefri E39.

Modelloppsettet for disse utredningene er i prinsippet det samme som vi bruker i operasjonell daglig turbulensvarsling, men i disse prosjektene brukes modellen til å generere hindcast-datasett. I prosjektet Ferjefri E39 er det modellert slike datasett for alle de fire områdene Sulafjorden/Vartdalsfjorden, Julsundet, Gjemnessundet og Halsafjorden.

Denne rapporten bygger på datasettet for Gjemnessundet. Vi sammenligner målinger fra en værstasjon på Gjemnessundbrua med vind og turbulens fra modellen. Vi beskriver også nærmere observasjoner og modell for noen tilfeller med sterk vind i 2018.

I kapittel 2 beskrives målingene i Gjemnessundet, i kapittel 3 beskrives modelloppsettet. Verifikasjon av AROME-MEPS og SIMRA mot observasjonene er gitt i kapittel 4, de midlere og de ekstreme vindforholdene er presentert i henholdsvis kapittel 5 og 6. Tre stormer er presentert i kapittel 7. Kapittel 8 gir en oppsummering.

2 Målinger

Siden det ikke er satt opp dedikerte meteorologiske master i Gjemnessundet, har vi i stedet brukt observasjoner fra målestasjon E39 Gjemnessundbrua med stasjonsnr SN62950, som ligger på (lon,lat) (7.7793, 62.9712), og høyde 43 m.a.s.l. Denne eies av Statens Vegvesen og har observasjoner fra og med 2016-11-16. Figur 2.1 viser måleren sett med Google Street view.



Figur 2.1: Street view fra Google maps i posisjon til måler.

3 Modeller

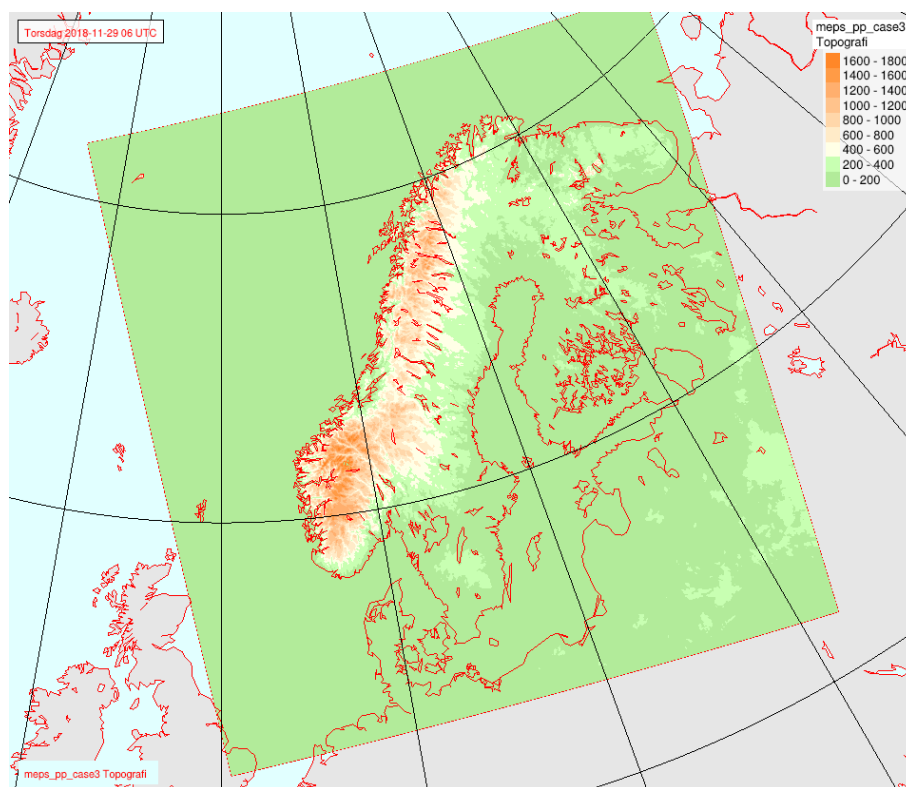
3.1 AROME-MEPS 2.5

Versjonen av AROME-MEPS som er brukt 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 $2,5 \text{ km} \times 2,5 \text{ km}$ gitter. Dataene og mer informasjon er tilgjengelig på thredds.met.no. Kontrollkjøringen, medlem 0, er brukt som inngangsdata til SIMRA og i verifikasjonen.

3.2 SIMRA

SIMRA er satt opp med 100 m gitter i et modellområde på 261×261 punkter i horisontalen med 51 vertikallag. SIMRA-modellen mottar vind, temperatur og trykk fra bakken og opp til ca 3500 m fra arkiverte prognoser fra AROME-MEPS (kontrollkjøring, ensemblemedlem 0). For nærmere beskrivelse av modelloppsettet, se Midtbø *et al.* (2020a).

Figur 3.1 viser et kart med AROME-MEPS-modellens topografi (gitteravstand på 2,5 km). Modelloppsettet for Gjemnessundet er kjørt for hver time hele året 2018, med unntak av noen få brudd som skyldes manglende inngangsdata fra AROME-MEPS (figur 3.3). Vi har brukt SIMRA-modellens resultater av vind og turbulent kinetisk energi, TKE, i denne rapporten og beregnet turbulensintensitet, TI, for tilfeller med vind over 5 m/s som beskrevet i Midtbø *et al.* (2020a). Resultatene av vind og TI sammenlignes med resultatene av vind fra AROME-MEPS.



Figur 3.1: AROME-MEPS dekningsområde og topografi (gitteravstand på 2,5 km) der en fargekode angir høyden over havet med intervall 200 m.

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

$$TKE = 1/2(u'^2 + v'^2 + w'^2),$$

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

$$TKE = 3/2(u'^2),$$

slik at variabelen fra SIMRA, `rTKE`, er

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

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

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

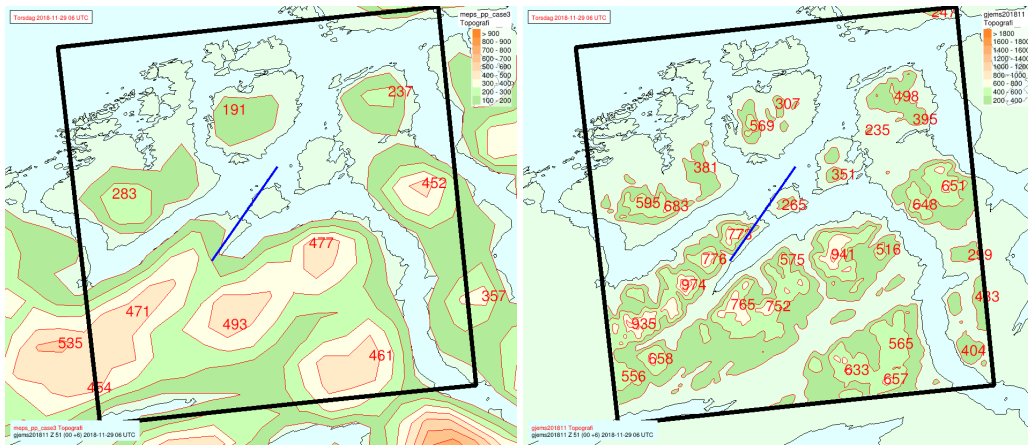
hvor \bar{u} er middelverdien av vindhastigheten. For en målt tidsserie vil u' og \bar{u} beregnes over en periode på for eksempel 10 minutter og det er denne parameteren som den horisontale vinden i modellen skal representere. Derfor bruker vi horisontal vindhastighet for hver time til å beregne `TI`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

Figur 3.2 viser kart over Gjemnessundet med topografien fra AROME-MEPS (til venstre) og SIMRA (til høyre), og de største høydene (i meter) angitt i rødt. Fargepaletten som vist i øverste høyre hjørne er brukt sammen med isolinjer for hver 100 m for begge figurene. Linjen angir et snitt langs brobanen til Gjemnessundbrua som er forlenget i begge retninger.

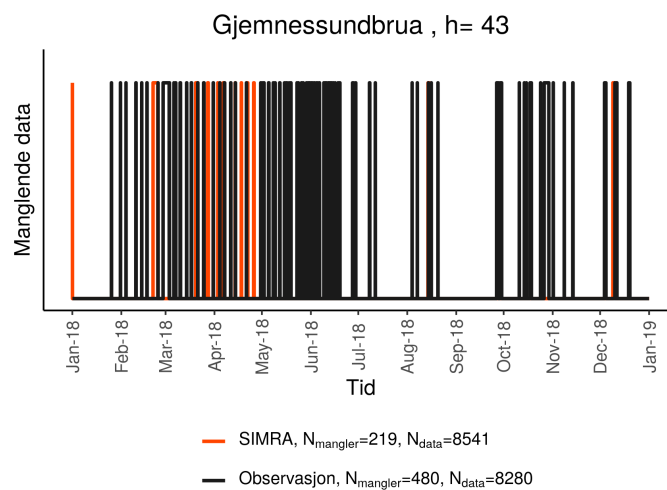
Figur 3.3 viser en oversikt over manglende data fra SIMRA og observasjonen på Gjemnessundbrua. For en full tidsserie fra 2018 mangler det i alt 219 timer fra SIMRA (ca 2,3 %) og 480 timer (ca. 5,5 %) observerte data. Tabell 1 viser manglende data fordelt på månedene i 2018.

Tabell 1: Oversikt over prosentvis manglende data fra observasjoner og SIMRA fordelt på måneder i 2018.

	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Des
Obs	0.4	7.0	12.5	3.2	8.9	6.4	0.9	0.7	7.2	13.0	1.0	4.6
SIMRA	0.1	10.7	5.4	4.7	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0	6.5



Figur 3.2: Kart over Gjemnessundet med topografien fra AROME-MEPS (til venstre) og SIMRA (til høyre) og de største høyder (i meter) angitt i rødt. Fargepaletten som vist i øverste høyre hjørne er brukt sammen med isolinjer for hver 100 m for begge figurene. Den blå linjen angir posisjonen for et snitt langs brobanen til Gjemnessundbrua som er forlenget i begge retninger.

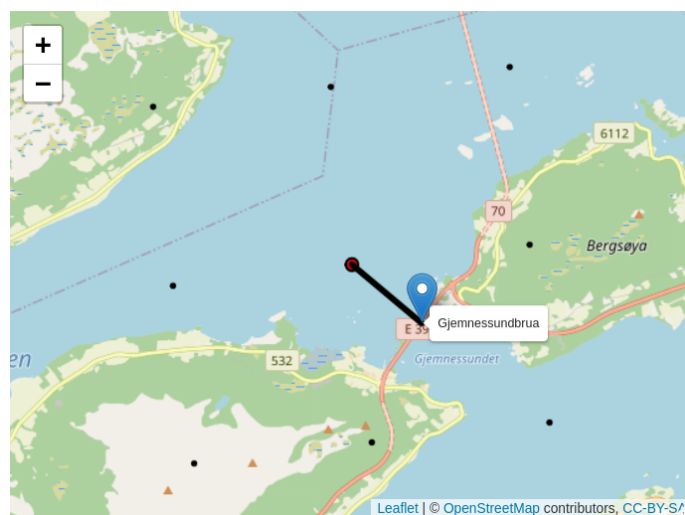


Figur 3.3: Manglende data fra Gjemnessundbrua (svart) i 2018 og manglende data fra SIMRA (rød) i samme tidsrom.

4 Verifikasjon

4.1 Verifikasjon mot bruobservasjoner

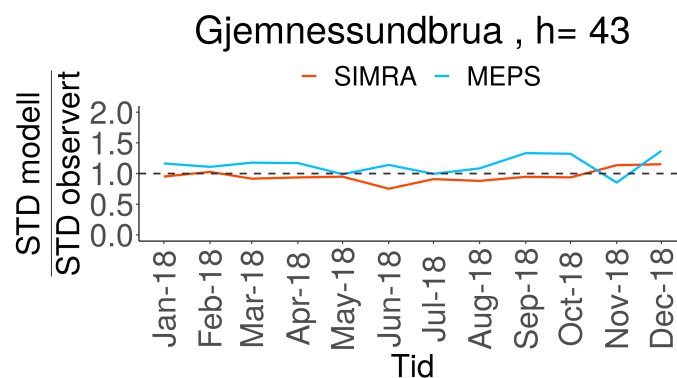
Vindstyrke og vindretning modellert for 2018 er validert mot observasjonene fra målestasjonen på Gjemnessundbrua. I SIMRA har vi interpolert modelldata fra de nærmeste gitterpunkt til observasjonspunktet. For AROME-MEPS har vi valgt data fra det punktet i modellen som er nærmest observasjonen, illustrert i figur 4.1. Dette er valgt siden gitter-



Figur 4.1: I kartet er målestasjonen på Gjemnessundbrua vist som en blå markør og gitterpunkter fra AROME-MEPS vist som svarte prikker. Den røde prikken er det gitterpunktet som er valgt for verifikasjon for den aktuelle stasjonen forbundet med svart linje.

oppløsningen på 2,5 km ikke representerer topografien godt nok på denne skalaen.

For å gjøre en reell sammenligning, er det bare brukt tidspunkter der både observasjoner og begge modellene har data tilgjengelig. Som vist i tabell 1, mangler det en del data for enkelte måneder. For observasjonene peker mars, mai og oktober seg ut med henholdsvis 12.5%, 8.9% og 13.0% manglende data, mens for SIMRA er det primært i februar med 10.7% det mangler mye data. Dette påvirker verifikasjonsresultatene, og særlig månedlig forhold mellom standardavvik for modell og observasjon i figur 4.2, så ikke altfor stor vekt bør legges på disse månedene.



Figur 4.2: Månedlig forhold mellom standardavvik for modell og observasjon, for SIMRA (rød) og AROME-MEPS (blå).

Tabell 2 viser 98-prosentdeler for vindstyrke fra observasjoner og modellene, og standardavvik for observert vindstyrke, mens tabell 3 viser ulike verifikasjonsscore for de to modellene AROME-MEPS og SIMRA. Figur 4.2 viser forholdet mellom standardavvik for modellene og observasjonene for hver måned. Dette verifikasjonsmålet kan tolkes som modellens aktivitet. Verifikasjonsscorene er nærmere beskrevet i appendix A.

AROME-MEPS viser noe høyere 98-prosentdel vindstyrke enn det som er observert, mens SIMRA ligger litt under, men nærmere observasjonen enn det AROME-MEPS gjør. Figur 4.2 viser at standardavviket i vindstyrken fra SIMRA stort sett er nærmere det som er observert enn standardavviket fra AROME-MEPS.

Tabell 2: 98-prosentdelen (98%) og standardavvik (STD) for vindstyrke fra master og modeller i Gjennessundet. MEPS er AROME-MEPS.

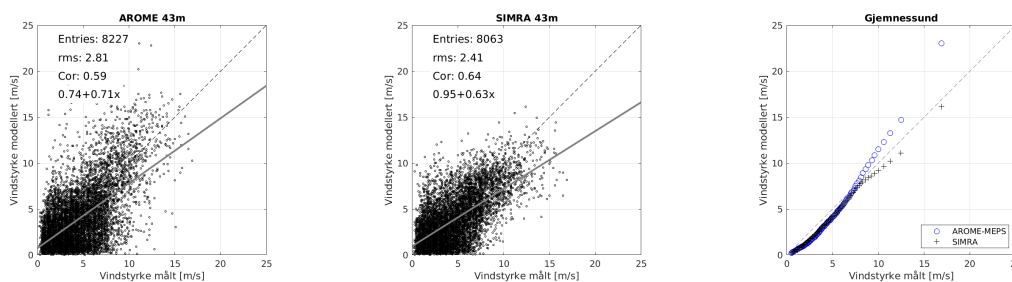
Observasjon	Høyde [m]	98% OBS [m/s]	98% SIMRA [m/s]	98% MEPS [m/s]	STD OBS [m/s]	N
Gjennessundbrua	43	11,3	10,1	13,3	2,7	8011

Tabell 3: Verifikasjonsscore root-mean-square-error (RMSE), standard deviation av feilen (SDE), mean error (ME) og korrelasjon (Kor.) for modellert vindstyrke i Gjennessundet. MEPS er AROME-MEPS. Mean error er basert på modell-observasjon, dvs at negative verdier betyr at modellen underestimerer.

Observasjon	Høyde [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
Gjennessundbrua	43	-0,7	-0,6	2,4	2,8	2,3	2,8	0,6	0,6

Tabell 3 viser ulike feil og korrelasjon mellom modell og observasjon. Gjennomsnittsfeilen (ME) viser at både SIMRA og AROME-MEPS underestimerer vindstyrke. Ser vi på RMSE og SDE, har AROME-MEPS noe større feil enn SIMRA. Korrelasjonen er den samme for SIMRA og AROME-MEPS.

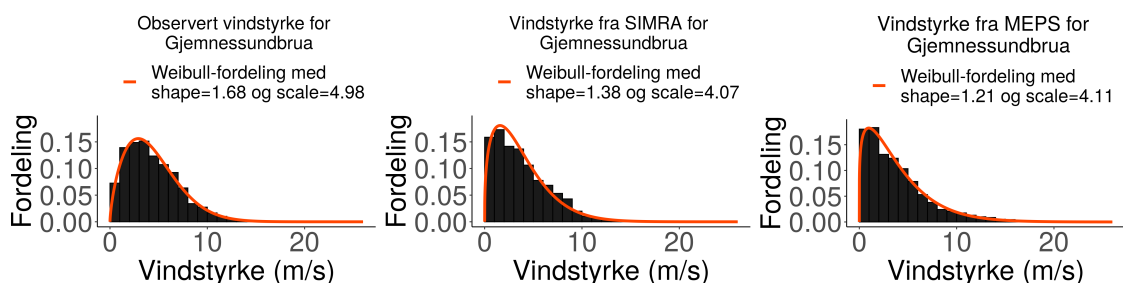
Figur 4.3 viser scatter plot for AROME-MEPS og SIMRA henholdsvis til venstre og i midten, og sammenligner frekvensfordelingene av vindstyrke fra AROME-MEPS og



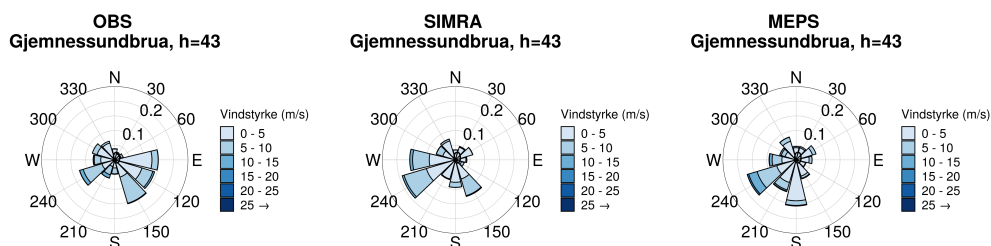
Figur 4.3: Scatter plot for AROME-MEPS til venstre, for SIMRA i midten, og kvantil-kvantil-plott til av vindstyrke for SIMRA (svarte pluss) og AROME-MEPS (blå sirkler) for Gjennessundet til høyre. Hvert punkt representerer 1 % av dataene. Stiplet linje er 1:1-linjen.

SIMRA mot observasjoner i et kvantil-kvantilplott til høyre. Begge modeller tenderer å underestimere vindstyrke, men kvantil-kvantilplottet indikerer at AROME-MEPS overestimerer vindstyrken for høye verdier. Dette er i tråd med det vi ser i tabell 2 og 3: Det er generell underestimering, men for høy 98-prosentdel i AROME-MEPS.

Figur 4.4 viser histogram og tilpasset Weibull-fordeling for vindstyrke for observasjon og modelldata fra Gjemnessundbrua. SIMRA har en fordeling som ligner noe mer på den som er observert. Vindrosene i figur 4.5 viser at både SIMRA og AROME-MEPS har mer vind fra sørvest og mindre fra øst enn observasjonen viser. SIMRA har sørøstlig vind noe mer i samsvar med det som er observert enn det AROME-MEPS har. Fordelingen av vindstyrke i SIMRA er altså bedre for de høyere verdiene enn i AROME-MEPS. Selv om retningsfordelingen avviker en del fra det observerte, så er som nevnt også denne noe bedre i samsvar med det observerte. For denne fjorden ser vi dermed at SIMRA lykkes i å nedskalere vinden fra AROME-MEPS slik at vi kommer noe nærmere den svakere og terrengstyrte vinden i fjorden som observasjonen avdekker.



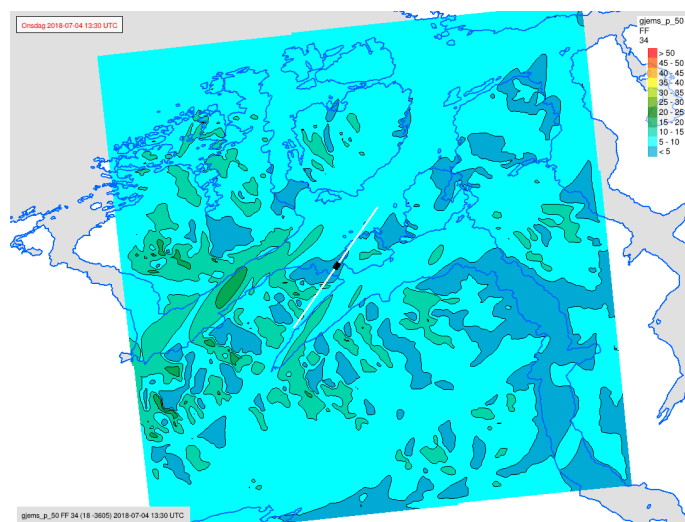
Figur 4.4: Histogram og tilpasset Weibull-fordeling for vindstyrke av samtidige data for Gjemnessundbrua med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.



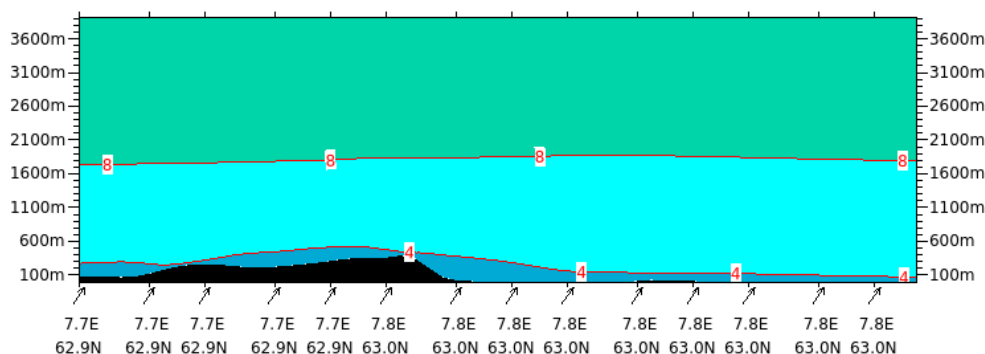
Figur 4.5: Vindroser for Gjemnessundbrua, med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.

5 Generelle vindforhold

Vindforholdene på kysten av Midt-Norge er preget av lavtrykksaktivitet med stor variabilitet i vinden, som videre er lokalt styrt av topografien i lavere nivå. Dette gjelder for Sulafjorden, Halsafjorden, Julsundet og også for Gjemnessundet som vi studerer nærmere her. Sterke vinder fra sektoren SW til NW er typisk for området samtidig som vind ut fjorden også blir sterk. Observasjonen fra broa har sterk vind fra sektorene SW, W og NW, men har hyppig vind i sektorene rundt SØ. Det er i målepunktet sørvestlig vind som blir sterkest, men også vestlig og nordvestlig vind kan bli sterk. De sterkeste vindene er allikevel noe lavere enn for de andre områdene. Når vi sammenligner med modellene for det samme punktet ser vi at de ikke løser opp skikkelig effekten av lokale forhold i sundet og modellene har for hyppig vind fra SW, W og NW. Vindforholdene er beskrevet med vindroser og histogram for vindstyrke med tilpasset Weibullfordeling i kapittel 4 for målepunktene.



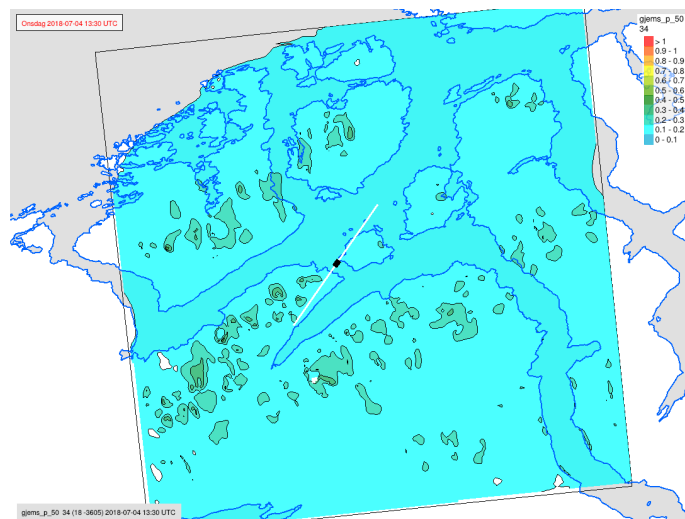
Figur 5.1: Kart for Gjemnessundet fra SIMRA-modellen med isolinjer for 50-prosentdelen av vindstyrke i 70 m over modelltopografien.



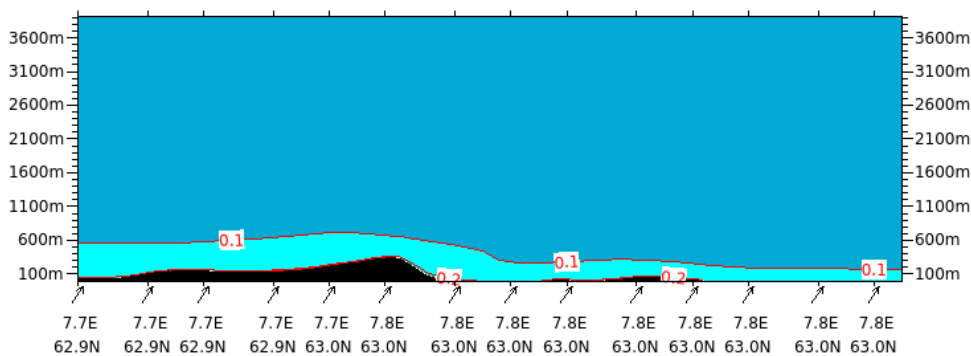
Figur 5.2: Vertikalt tverrsnitt for Gjemnessundet med isolinjer for 50-prosentdelen av vindstyrke. Posisjonen av snittet er vist med en hvit linje på kartet i figur 5.1 sammen med fargepaletten. Linjen går langs brotraseen med posisjonen for målestasjonen markert i sort.

I figurene 5.1 og 5.2 viser vi kart (i 70 m nivå over modellterrenget) og tverrsnitt av 50-prosentdelen (medianen) av vindstyrke. Posisjonen av tverrsnittet er vist med en hvit linje i kartet.

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.

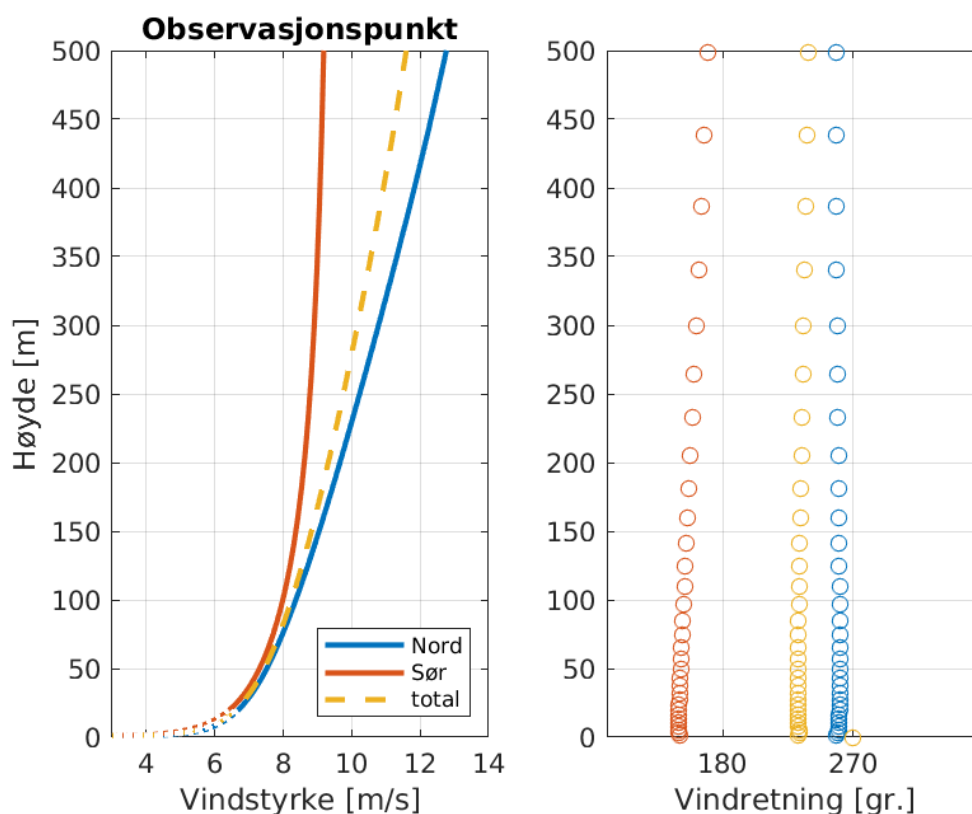


Figur 5.3: 50-prosentdelen av turbulensintensitet fra SIMRA i 70 m høyde over modelltopografien. Kun tidspunkter der vindstyrken er over 5 m/s er inkludert i beregningene.



Figur 5.4: Vertikalt tverrsnitt med isolinjer for 50-prosentdelen av turbulensintensitet. Posisjonen av snittet er vist med en hvit linje på kartet i figur 5.3 sammen med fargepaletten. Linjen går langs brotraseen med posisjonen for målestasjonen markert i sort.

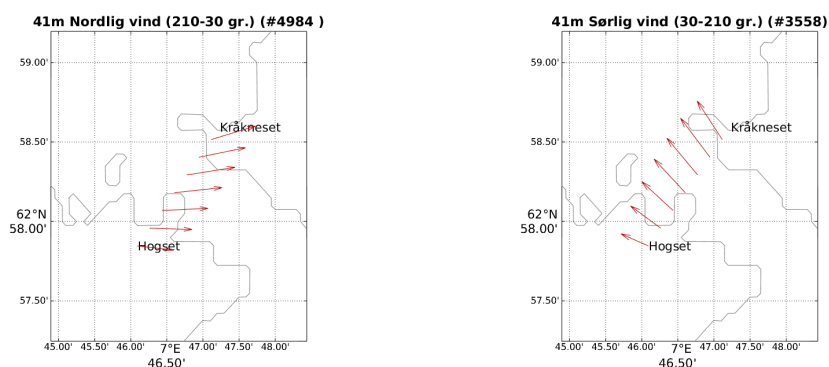
Vertikale profiler av vindstyrke og vindretning mellom 0-500 m er beregnet fra modellen i målepunktet på broen (figur 5.5). Profilene er midlet over sørlig ($30^\circ - 210^\circ$) og nordlig ($210^\circ - 30^\circ$) vind i forhold til brotraseen, basert på vindretning fra modellen i midten av sundet i 40 m. I denne figuren er det også kun tatt med situasjoner hvor vindstyrken i dette punktet er over 5 m/s. Gul linje er resultatet av å midle over alle situasjoner (2437 profiler) gjennom hele året. Vi ser at modellen har svakere vind i høyden ved sørlig vind enn situasjonene fra nord-nordvest.



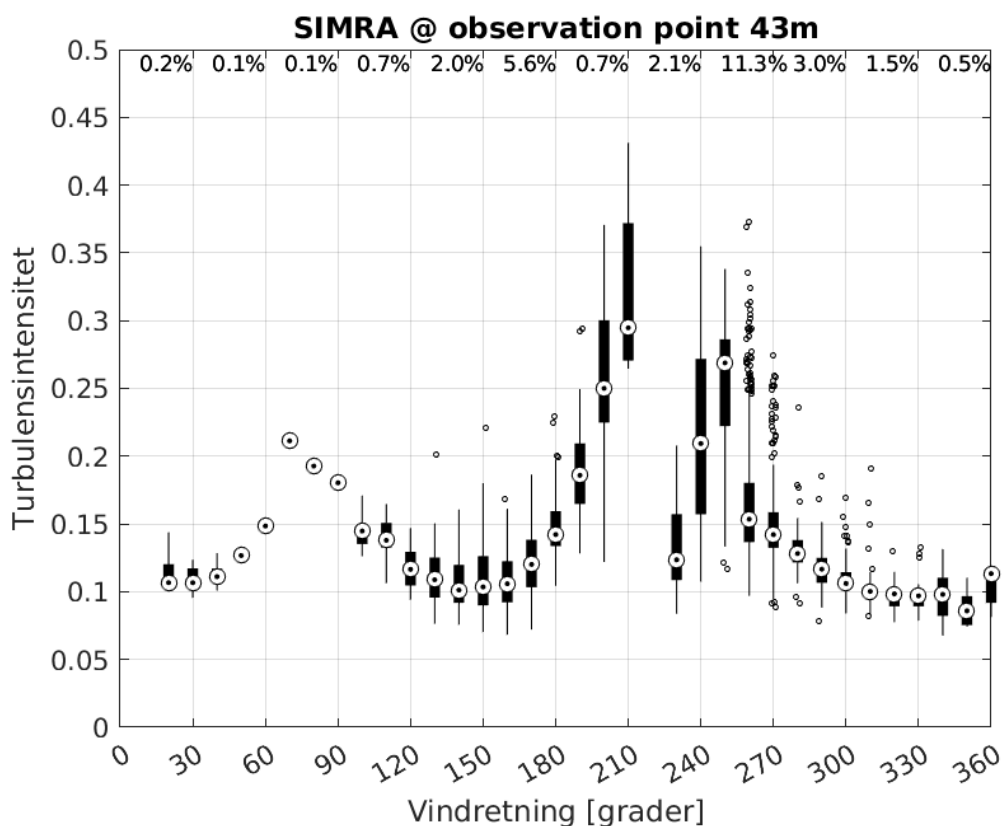
Figur 5.5: Vertikalt vindprofil av vindstyrke og vindretning fra SIMRA på Gjemnessundbrua, oppdelt i nordlig vind (blå, 1640 profiler) og sørlig vind (rød, 797 profiler). Det totale midlere vindprofilet er vist i stiplet gult. Oppdeling i retninger er basert på et punkt midt i sundet i 40 m høyde. Kun situasjoner med vind over 5 m/s i dette punktet er inkludert.

Horisontalt vindprofil i 40 m høyde langs broen er vist med piler i figur 5.6. Vindprofilet 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. Som vi så av vindrosene, inkluderer den valgte nordlige/nordvestlige sektoren en stor andel vestlig vind i modellen. Vinden er derfor ganske vestlig for den nordlige sektor, med dreining helt til sørvest ved Kråkneset. Sørlig vind er mer retningshomogen over sundet.

Turbulensintensiteten langs brobanen er beregnet over 30 graders sektorer og vist i figur 5.7. Vind gjennom sundet er lite påvirket av terreng og har lave verdier på 0,1-0,15. Sørvestlig vind, som passerer over og rundt fjellene i sørvest, har de høyeste verdiene av TI på 0,3 - 0,35. Sørøstlig vind er den mest hyppige vindretning i følge målingene på broen, men modellene har de aller fleste situasjoner fra sørvest. Selv om SIMRA har feil retningsfordeling, kan det likevel antas at verdiene for turbulensintensitet i de forskjellige retninger er rimelige.



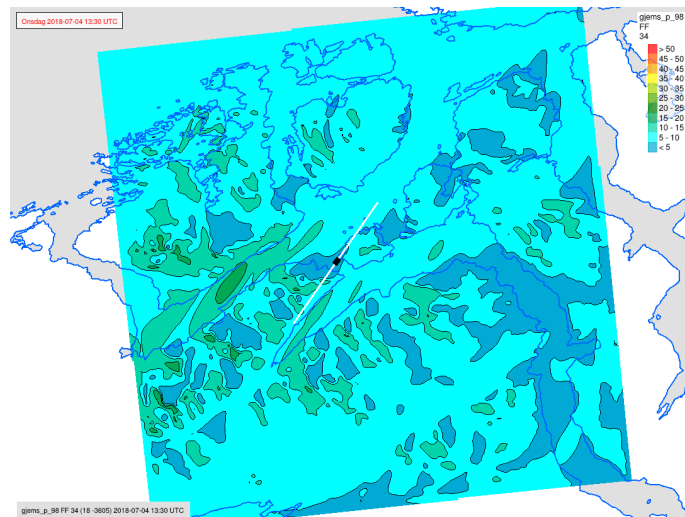
Figur 5.6: Kart over Gjemnessundet som viser vindvektorer i 40 m høyde på tvers av sundet to ulike vindretninger: nordlig vind ($210^{\circ} - 30^{\circ}$) og sørlig vind ($30^{\circ} - 210^{\circ}$). Hyppigheten til retningene er gitt ved antall timer i tittel til hver figur.



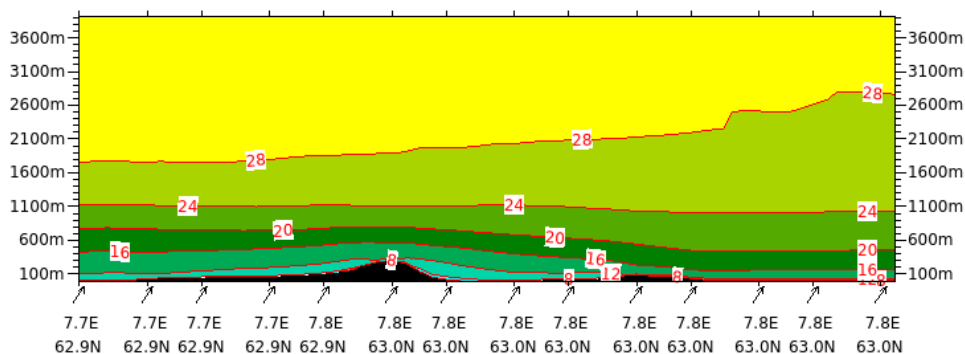
Figur 5.7: Turbulensintensitet i 40 m høyde fra SIMRA for nærmeste punkt observasjonen på Gjemnessundbrua med medianen og standardavvik for hver 10 graders retningsintervall og tynne linjer som angir 25 og 75-prosentdelene. Kun situasjoner med vindhastighet over 5 m/s er tatt med. Datadekningen over 30 graders intervaller er vist i prosent øverst i figuren.

6 Ekstremvind

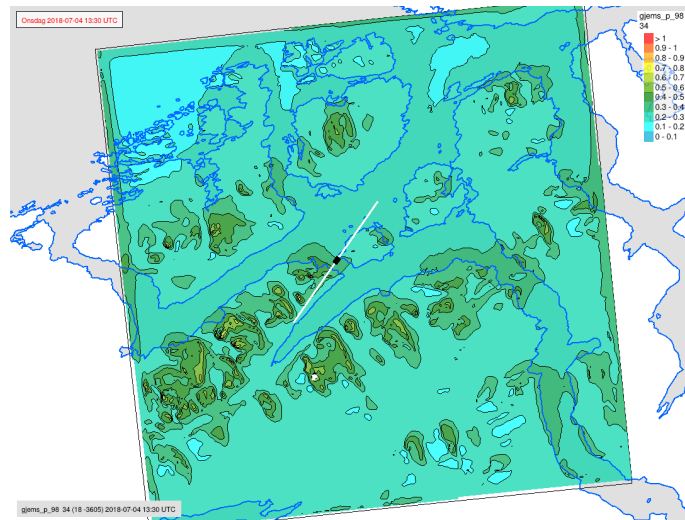
I forrige kapittel viste vi i figurene 5.1-5.4 kart og tverrsnitt av 50-prosentdelen av vind og turbulensintensitet. I figurene 6.1-6.4 har vi tilsvarende kart for 98-prosentdelen.



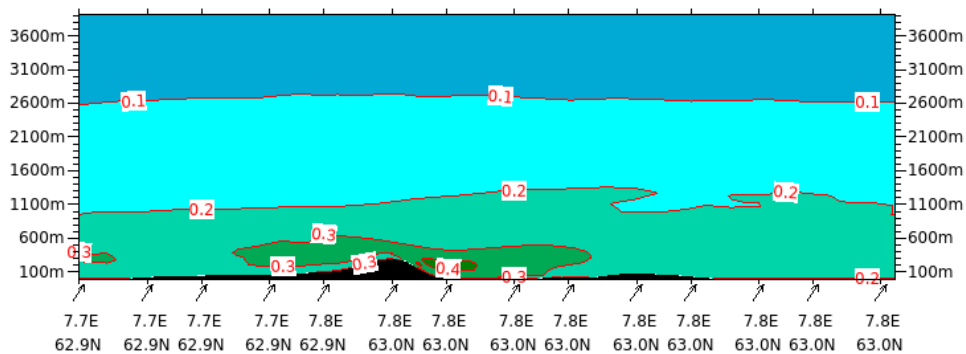
Figur 6.1: Kart for Gjemnessundet fra SIMRA-modellen med isolinjer for 98-prosentdelen av vindstyrke i 70 m over modelltopografien.



Figur 6.2: Vertikalt tverrsnitt for Gjemnessundet med isolinjer for 98-prosentdelen av vindstyrke. Posisjonen av snittet er vist med en hvit linje på kartet i figur 6.1 sammen med fargepaletten. Linjen inkluderer brotraseen med posisjonen markert i sort.

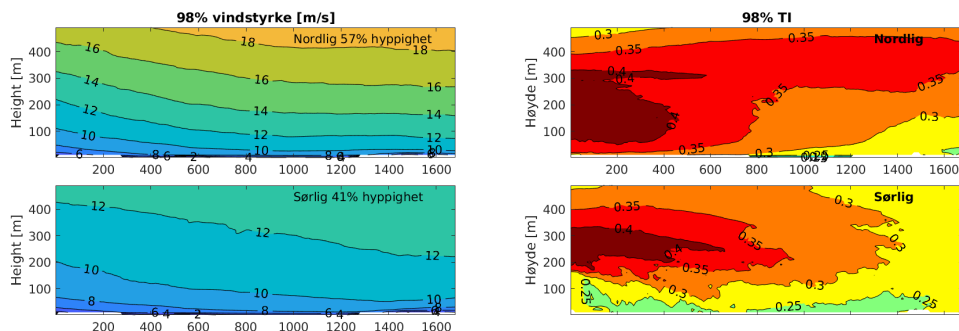


Figur 6.3: Kart for Gjemnessundet fra SIMRA-modellen med isolinjer for 98-prosentdelen av turbulensintensitet i 70 m over modelltopografien. Bare tidspunkt der vindstyrken er over 5 m/s er inkludert i beregningene.

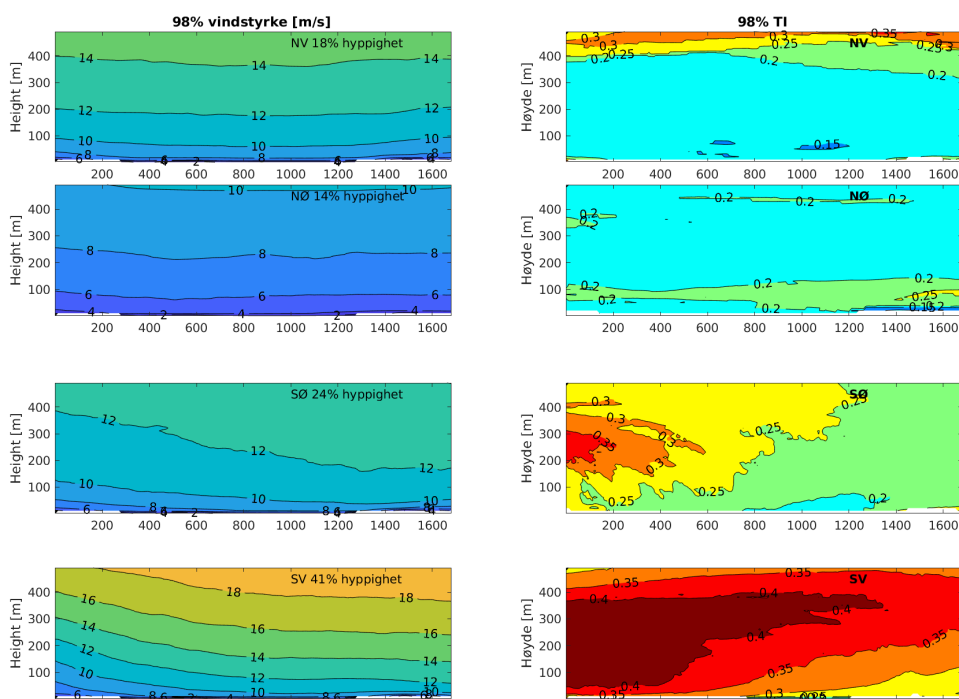


Figur 6.4: Vertikalt tverrsnitt med isolinjer for 98-prosentdelen av turbulensintensitet. Posisjonen av snittet er vist med en hvit linje på kartet i figur 6.3 sammen med fargepaletten. Linjen inkluderer brotraseen markert i sort.

Basert på vindretningen midt i sundet har vi sortert situasjonene fra SIMRA gjennom hele året og beregnet 98-prosentdeler av vindstyrke og turbulens for hver retningssektor. I figur 6.6 vises fire sektorer, mens figur 6.5 er oppdelt i de samme to sektorene som er brukt



Figur 6.5: Tverrsnitt over Gjømnessundet av 98-prosentdelen av vindstyrke [m/s] (venstre kolonne) og TI (høyre kolonne) for nordlig ($210 - 30^\circ$) og sørlig ($30 - 210^\circ$) vind. x-aksen angir avstand i km fra den sørvestlige ende av snittet som vist i 5.6.

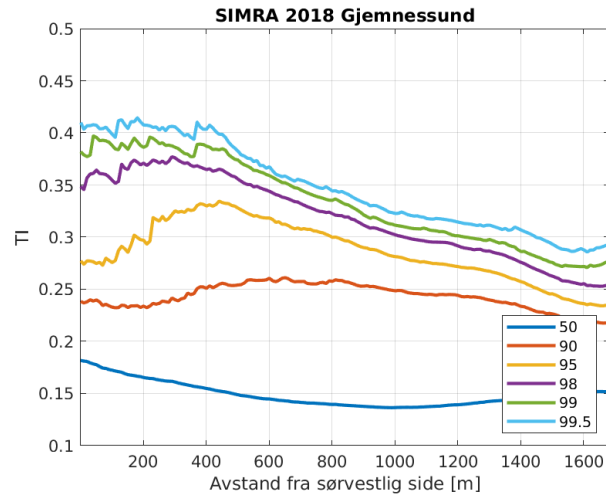


Figur 6.6: Som figur 6.5, men oppdelt i 4 sektorer (øverst til nederst): nordvest ($270 - 0^\circ$), nordøst ($0 - 90^\circ$), sørøst ($90 - 180^\circ$) og sørvest ($180 - 270^\circ$).

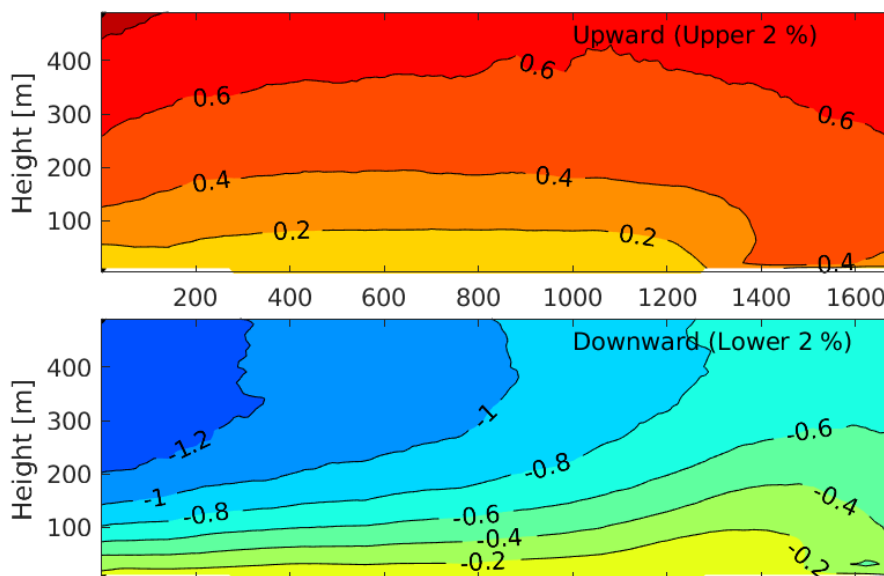
til tidligere figurer slik at det er enklere å sammenligne med vindprofilene.

Vinden er rimelig homogen på tvers av sundet, men med noe sterkere vind i den nordøstlige enden. Ved å sammenligne den sørvestlige sektor i figur 6.6 med figur 6.5, er det tydelig at begge snittene domineres av den sørvestlige vinden, som ikke bare er mest hyppig, men også sterkere og med mest turbulens. 98-prosentdelen av turbulensintensiteten i den sørvestlige enden av snittet (til venstre) ligger på over 0,35. 99,5-prosentdelen varierer fra 0,4 i sørvest til 0,3 i nordøst (figure 6.7).

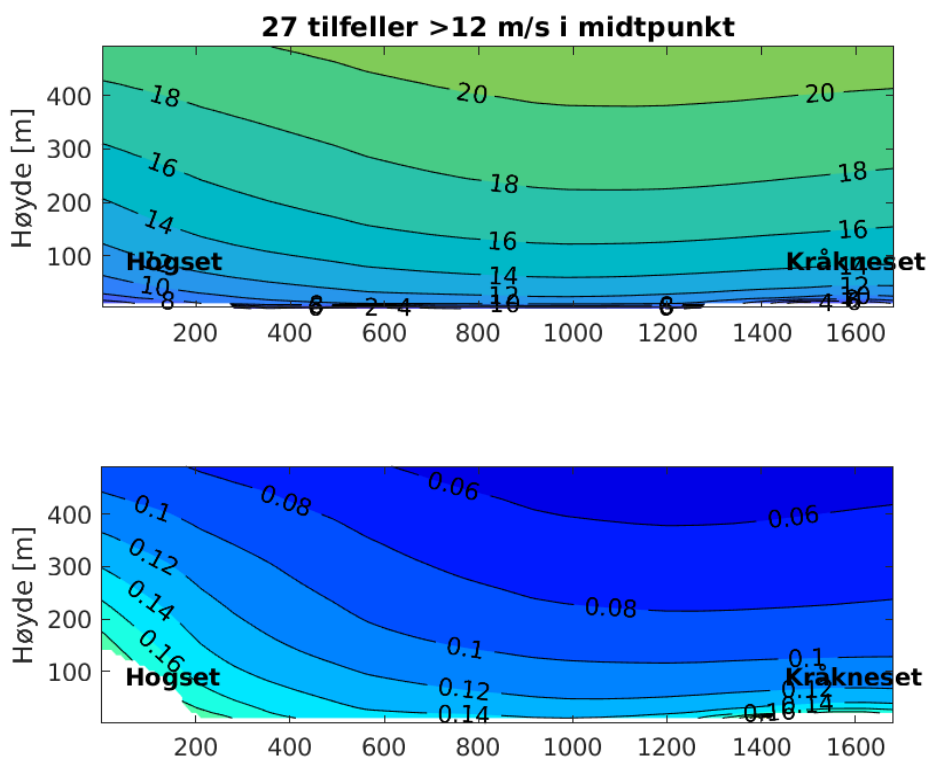
De 2% laveste og høyeste vertikale bevegelser (ned og opp) av vinden ligger på hastigheter av mellom -0,4 - +0,2 m/s i brohøyden i SIMRA (figur 6.8). Figur 6.9 viser middelverdien av vindstyrke og TI av de 27 tilfellene i 2018 hvor vindhastigheten i midten av sundet var større enn eller lik 12 m/s. SIMRA har kun liten variasjon i vinden på tvers av sundet og lav turbulens med TI omkring 0,1 i høyden til brobanen for disse tilfeller.



Figur 6.7: Kvantilplott av TI fra SIMRA på tvers av sundet. 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 Hogset til Kråkneset.



Figur 6.9: Middelerverdi av vindstyrke [m/s] (øverst) og TI (nederst) i Gjemnessund for situasjoner i 2018 hvor vinden i brohøyde i midten av sundet er større enn eller lik 12 m/s.

7 Stormer

I dette kapitlet har vi sett etter vær-situasjoner i 2018 med målt sterk vind på Gjemnessundbrua.

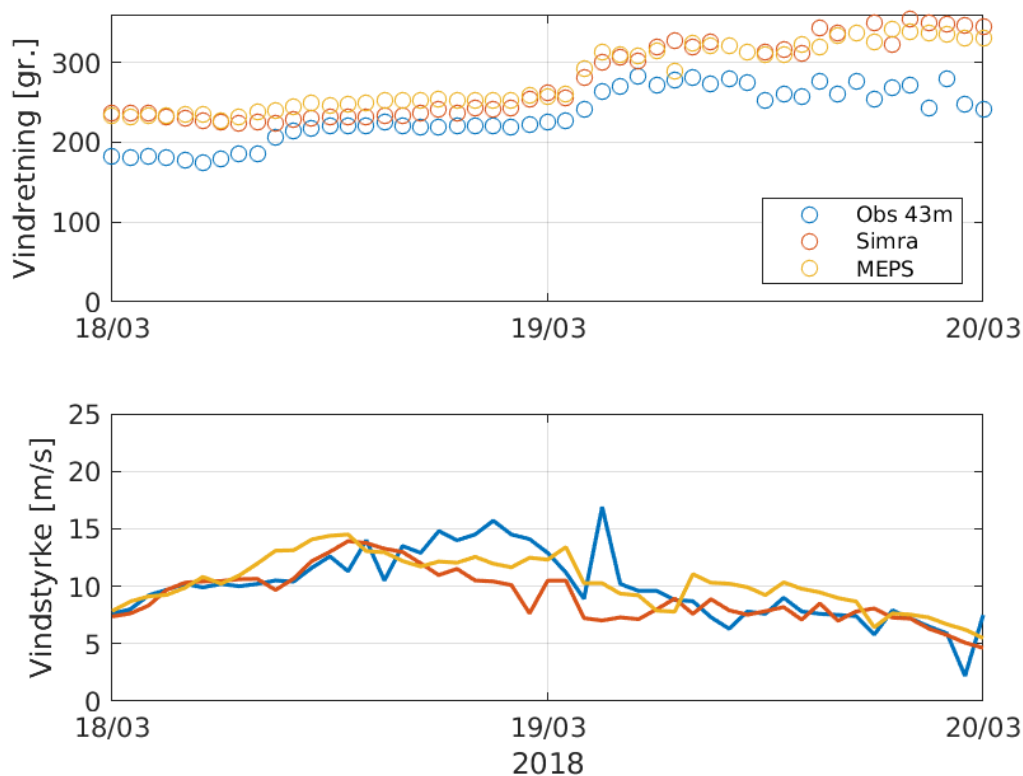
Vi har for dette sundet valgt tre tilfeller. Vi viser kart og snitt fra SIMRA, noen kart fra AROME-MEPS, og sammenligner tidsserier fra målingene med tidsserier fra begge modellene.

- 18.-19. mars
- 12.-15. oktober
- 27.-30. november

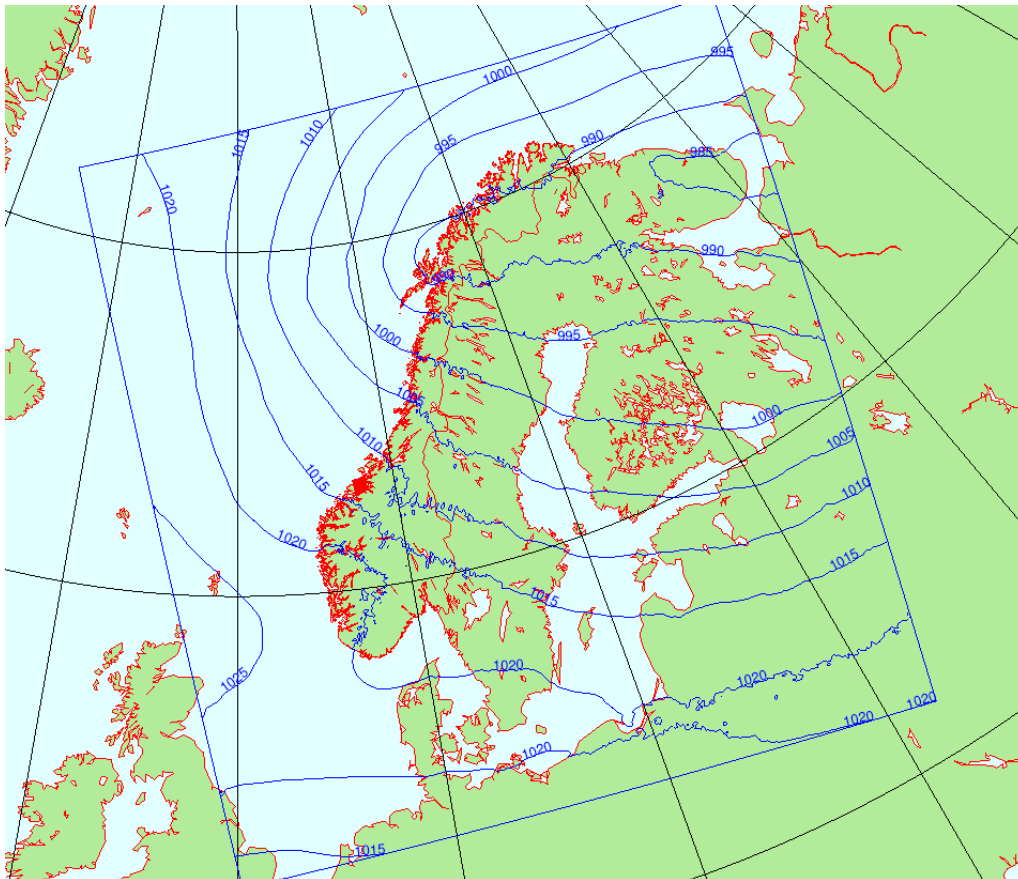
7.1 18.-19. mars

18.-19. mars 2018 gir et kraftig lavtrykk langt nord i Norskehavet sterk NW vind i Møre og Romsdal. Tidsseriene viser at vinden nådde et maksimum på 16,9 m/s fra 264° (vest) 19. mars kl. 03 (figur 7.1).

I denne situasjonen kom det en kraftig vindøkning fra SW 18. mars knytta til et stormsen-trum som passerte Island for så å forsette nord i Norskehavet mot Lofoten. Situasjonen er



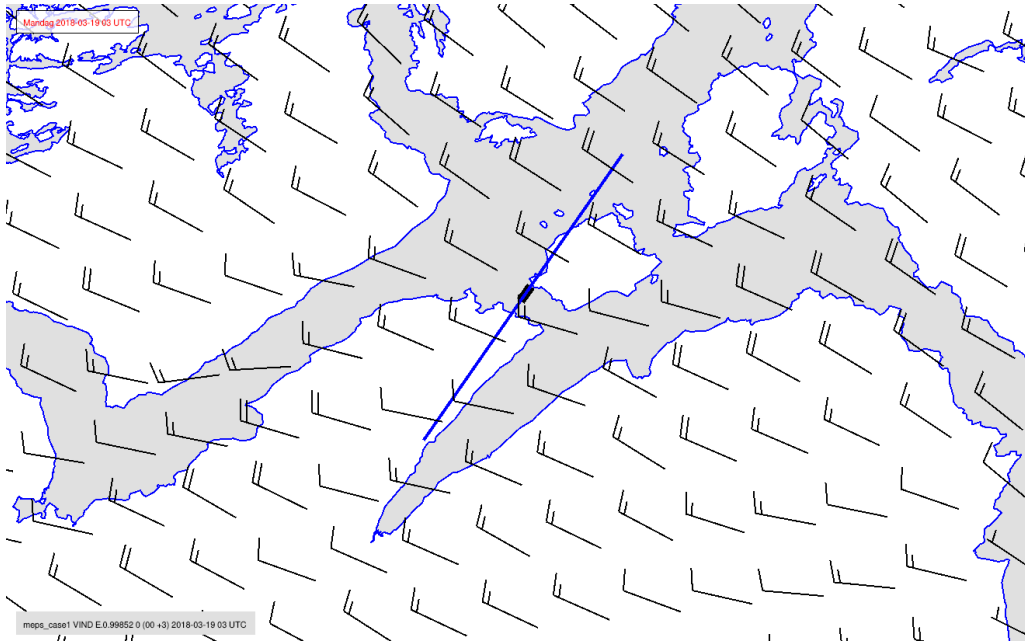
Figur 7.1: Tidsserier med vindretning (øverst) og vindstyrke (nederst) i perioden 18. til 20. mars. Observasjoner fra Gjemnessundbrua i blått, AROME-MEPS i gult og SIMRA i rødt.



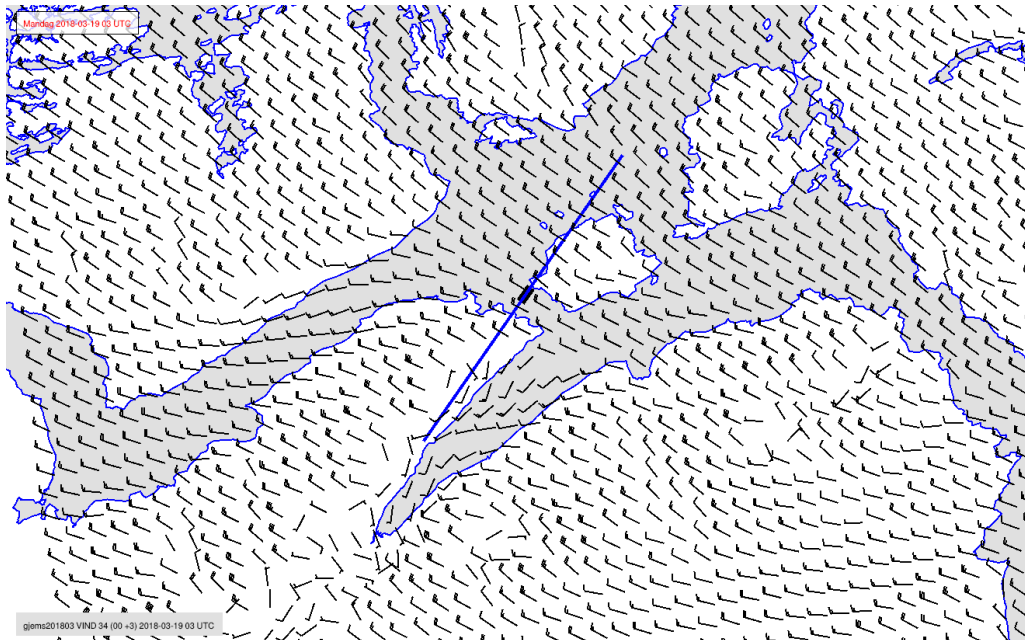
Figur 7.2: Kart fra MEPS-modellen gyldig 19. mars 2018 03 UTC. Kartet viser bakke-trykket redusert til havnivå.

presentert med kart og tverrsnitt som alle gjelder 19. mars 2018 03 UTC. MSLP for hele modellområdet for AROME-MEPS er vist i figur 7.2.

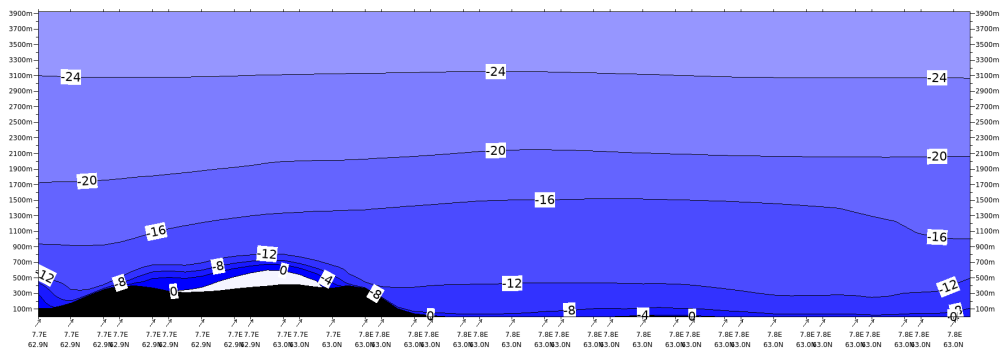
Utsnitt rundt Gjemnessundet er vist i figur 7.3 i en modellflate som ligger ca. 70 m over modellens topografi. Figur 7.4 viser SIMRA sin vind i modellflate 34 som også ligger rundt 70 m over topografien. På broa ble det målt 15 m/s om kvelden. Begge modellene hadde mindre vind. I det vinden dreide til NW tidlig om morgenen etter, ble det målt over 15 m/s på broa, mens modellen hadde noe mindre vind (se tidsserien i figur 7.1). Begge modellene har ganske lite detaljer i vinden i sundet. Siden SIMRA har langt flere gitterpunkter enn det er vist vindpiler i, har vi tatt med vertikale tverrsnitt langs brobanen. Figur 7.5 viser vinden normalt på snittet, mens figur 7.6 viser komponenten tangentielt på snittet. Vi ser at det er lite detaljer i SIMRA rundt broa. Det er også lav turbulent kinetisk energi (se figur 7.7), men den er høyere over det høye terrenget SW for broen. I denne situasjonen følger modellene hverandre ganske nøye. Detaljene i observasjonene tar ingen av dem. Begge underestimerer vinden og SIMRA er den laveste av dem. Den sterkeste målte vinden i perioden kan skyldes at vindmåleren måler lokal forsterkning ved brobanen, men dette er noe vi ikke har hatt tilgjengelige målinger til å gå nærmere inn i.



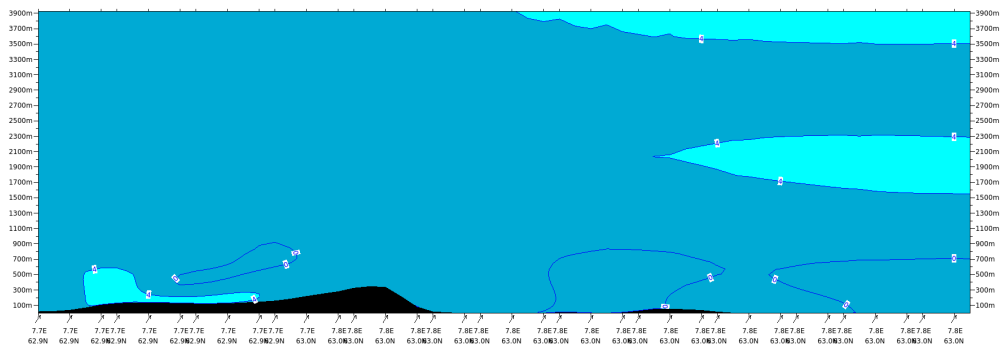
Figur 7.3: Utsnitt av MEPS-modellen for Gjemnessundet gyldig 19. mars 2018 03 UTC. Kartet viser vind og i modellflaten som ligger ca 70 m over MEPS-modellen sin topografi. Vinden er vist med vindpil i hvert gridpunkt. Posisjonen for tverrsnittene i figur 7.5-7.7 er markert med en blå linje på kartet.



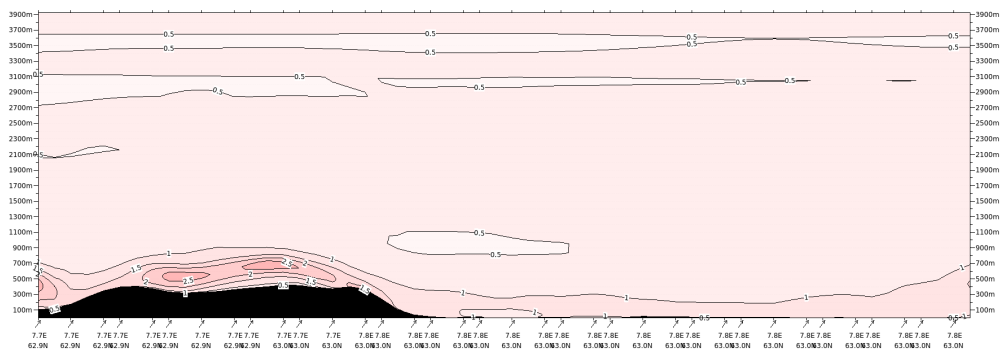
Figur 7.4: Utsnitt av SIMRA-modellen for Gjemnessundet gyldig 19. mars 2018 03 UTC. Kartet viser vind og i modellflaten 34 som ligger 70 m over SIMRA-modellen sin topografi. Vinden er vist med vindpil i hvert femte gridpunkt. Posisjonen for tverrsnittene i figur 7.5-7.7 er markert med en blå linje på kartet.



Figur 7.5: Vertikalsnitt fra SIMRA-modellen for Gjemnessundet gyldig 19. mars 2018 03 UTC. Snittet viser normalkomponenten av vinden i snittet med isolinjer for hver 4de m/s.



Figur 7.6: Vertikalsnitt fra SIMRA-modellen for Gjemnessundet gyldig 19. mars 2018 03 UTC. Snittet viser tangentialkomponenten av vinden i snittet med isolinjer for hver 4de m/s

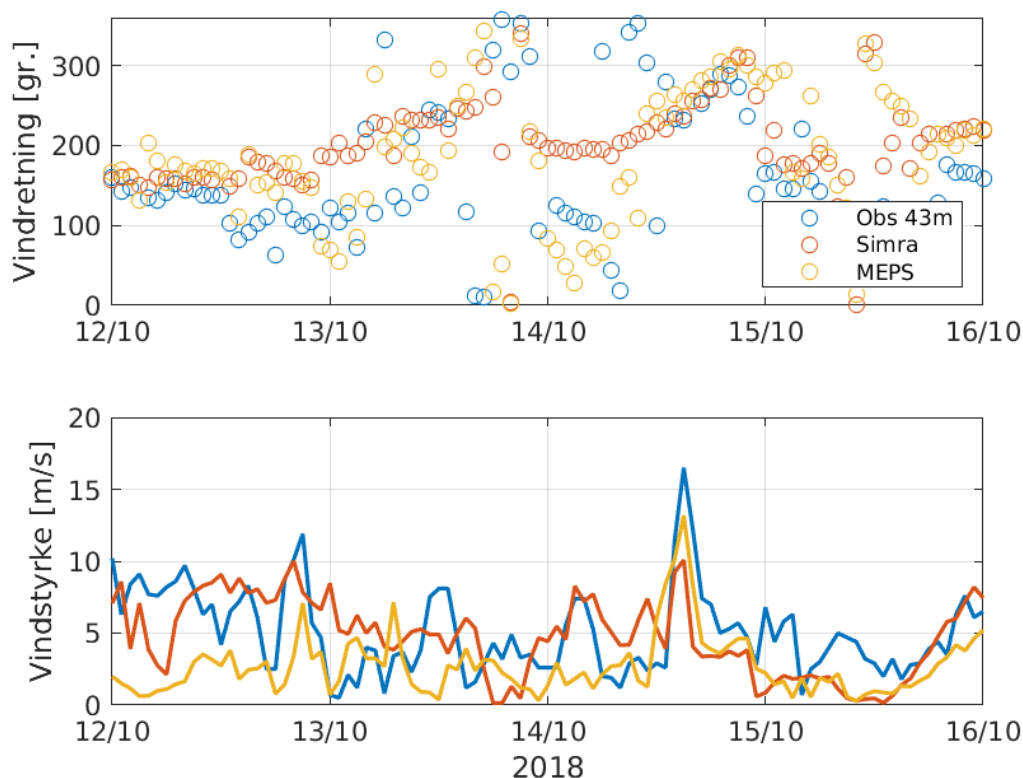


Figur 7.7: Vertikalsnitt av rTKE fra SIMRA-modellen for Gjemnessundet gyldig 19. mars 2018 03 UTC. Isoliner for hver 0,5 m/s

7.2 12.-15. oktober

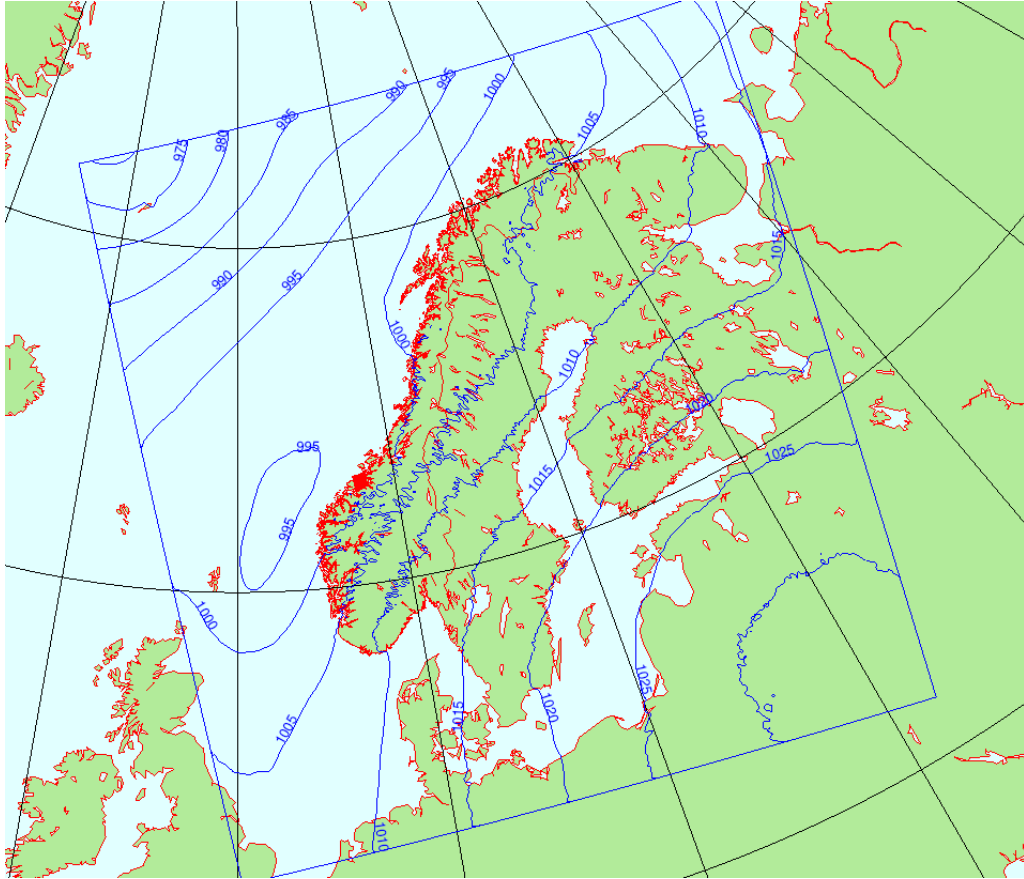
12.-15. oktober 2018 gir et lavtrykk som passerer rett nord for Møre og Romsdal sterk vind i fjorden. Tidsseriene viser at vinden nådde et maksimum på 16,5 m/s fra 232° (sør-vest) 14. oktober kl. 15 (figur 7.8).

Situasjonen er presentert med kart og tverrsnitt som alle gjelder 14. oktober 2018 15 UTC. MSLP for hele modellområdet for AROME-MEPS er vist i figur 7.9. Utsnitt rundt Gjemnessundet er vist i figur 7.10 i en modellflate som ligger ca. 70 m over modellens topografi. Figur 7.11 viser SIMRA sin vind i modellflate 34 som også ligger rundt 70 m over topografien. Se også tidsserien i figur 7.8.

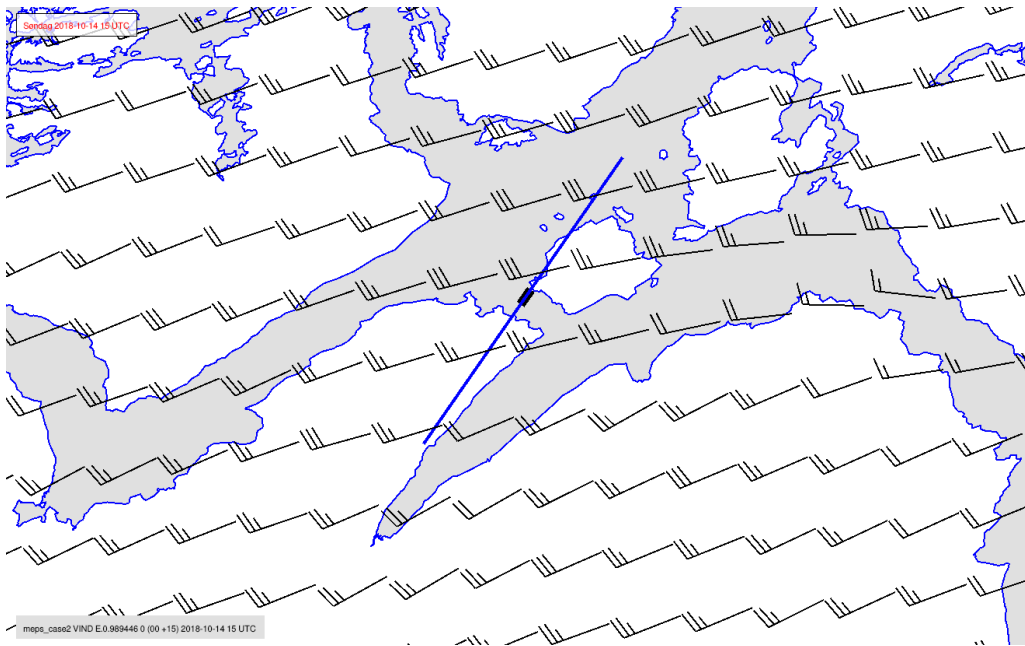


Figur 7.8: Tidsserier med vindretning (øverst) og vindstyrke (nederst) i perioden 12. til 14. oktober. Observasjoner fra Gjemnessundbrua i blått, AROME-MEPS i gult og SIMRA i rødt.

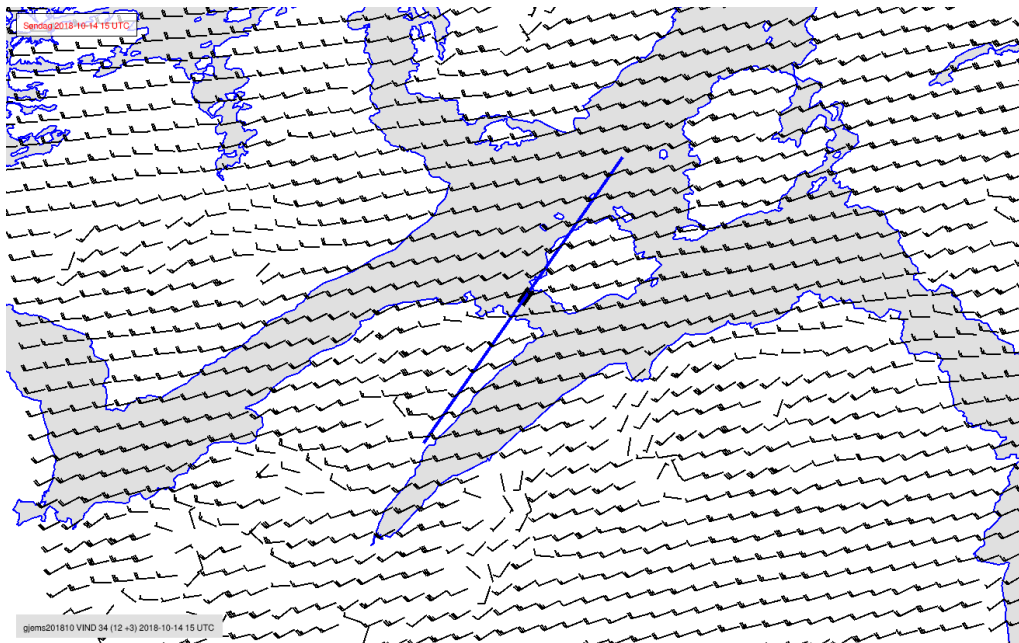
I denne perioden gir lavtrykket i Norskehavet en sterk SW-lig luftstrøm inn mot S-Norge. Ser vi på målingene på broen (figur 7.8) er det vind på 5-7 m/s store deler av perioden. Den målte vinden er 13. oktober og først på 14. oktober svært variabel i retning uten at den blir sterk. Modellene har også ulike vindretninger, og følger ikke hverandre i særlig grad. Det er ingen av de to som følger observasjonen så godt heller. Det er et markant maksimum 14. oktober 15 UTC som vi har fokusert på. På dette tidspunktet har modeller og observasjon samme SW-lige retning. Styrken er over 15 m/s på målingen. AROME-MEPS har nesten 15 m/s, mens SIMRA skuffende nok har 10 m/s.



Figur 7.9: Kart fra MEPS-modellen gyldig 14. oktober 2018 15 UTC. Kartet viser bakke-trykket redusert til havnivå

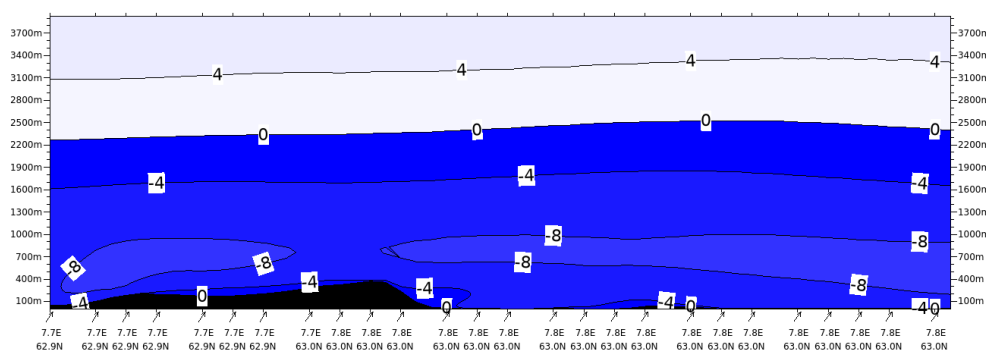


Figur 7.10: Utsnitt av MEPS-modellen for Gjemnessundet gyldig 14. oktober 2018 15 UTC. Kartet viser vind og i modellflaten som ligger ca 70 m over MEPS-modellen sin topografi. Vinden er vist med vindpil i hvert gridpunkt. Posisjonen for tverrsnittene i figur 7.12-7.14 er markert med en blå linje på kartet.

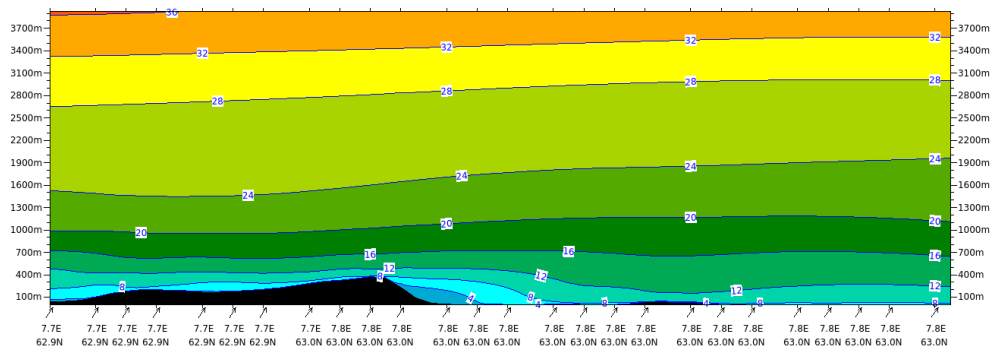


Figur 7.11: Utsnitt av SIMRA-modellen for Gjemnessundet gyldig 14. oktober 2018 15 UTC. Kartet viser vind og i modellflaten 34 som ligger 70 m over SIMRA-modellen sin topografi. Vinden er vist med vindpil i hvert femte gridpunkt. Posisjonen for tverrsnittene i figur 7.12-7.14 er markert med en blå linje på kartet.

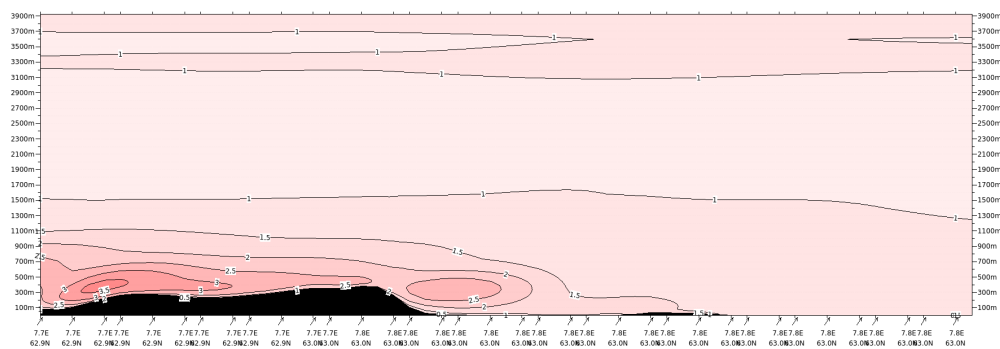
Når vi studerer tverrsnittene med henholdsvis normalkomponenten og tangentkomponenten av vind (figurene figur 7.12 og figur 7.13), ser vi det som også er tydelig på kartene med vind i brobanen: SIMRA har detaljer i vinden og har modellert langt svakere vind lenger vest i sundet. Samtidig underestimerer den den sterkeste vinden som er målt på broa i denne situasjonen. Vi har ikke hatt tilgjengelig andre målinger enn den ene og kan ikke verifisere den svakere vinden vest i brobanen, men vi vurderer denne detaljen som realistisk og det er konsistent med høyere turbulensverdier der. Tverrsnittet i figur 7.14 viser at rTKE har et markant maksimum på over 2,5 m/s i ca 250 meter høyde. SIMRA har et romlig bilde som virker realistisk, men den underestimerer den sterkeste vinden i målepunktet.



Figur 7.12: Vertikalsnitt fra SIMRA-modellen for Gjemnessundet gyldig 14. oktober 2018 15 UTC. Snittet viser normalkomponenten av vinden i snittet med isolinjer for hver 4de m/s.



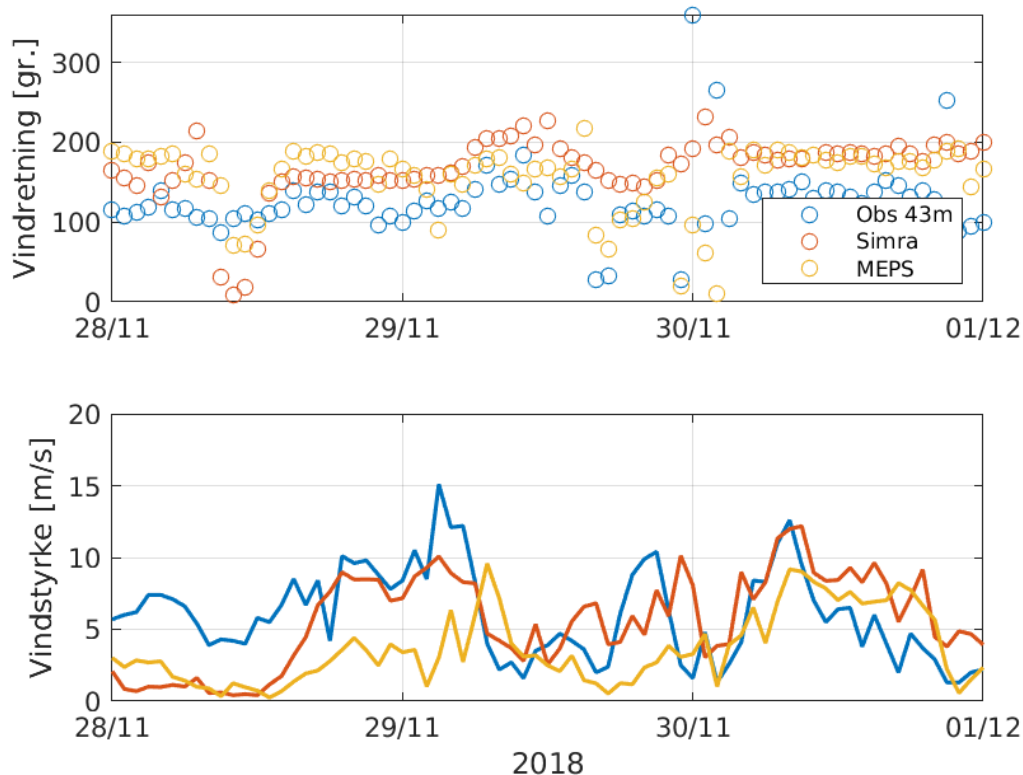
Figur 7.13: Vertikalsnitt fra SIMRA-modellen for Gjemnessundet gyldig 14. oktober 2018 15 UTC. Snittet viser tangentialkomponenten av vinden i snittet med isolinjer for hver 4de m/s



Figur 7.14: Vertikalsnitt av rTKE fra SIMRA-modellen for Gjemnessundet gyldig 14. oktober 2018 15 UTC. Isoliner for hver 0,5 m/s.

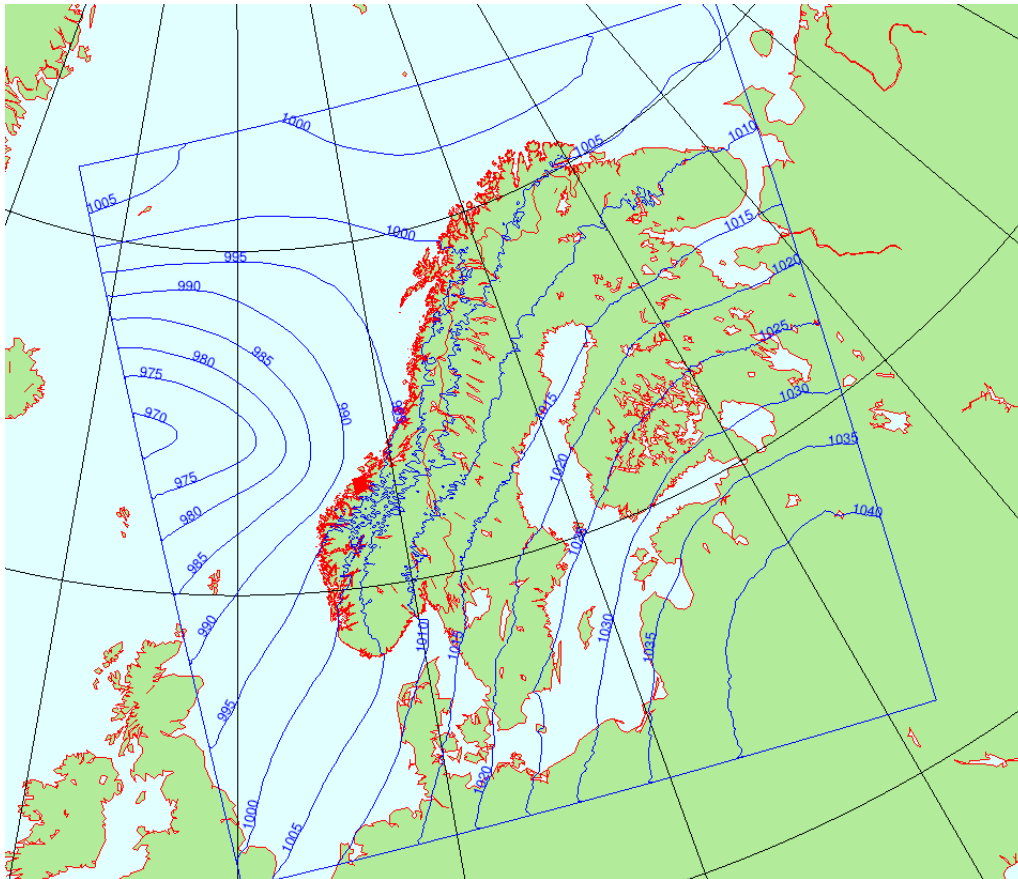
7.3 27.-30. november

27.-30. november 2018 gir et stormsentrum mellom S-Norge og Island kraftig vind i sektoren fra SW til SE. Tidsseriene viser at vinden nådde et maksimum på 15,1 m/s fra 117° (sørøst) 29. november kl. 03 (figur 7.15).

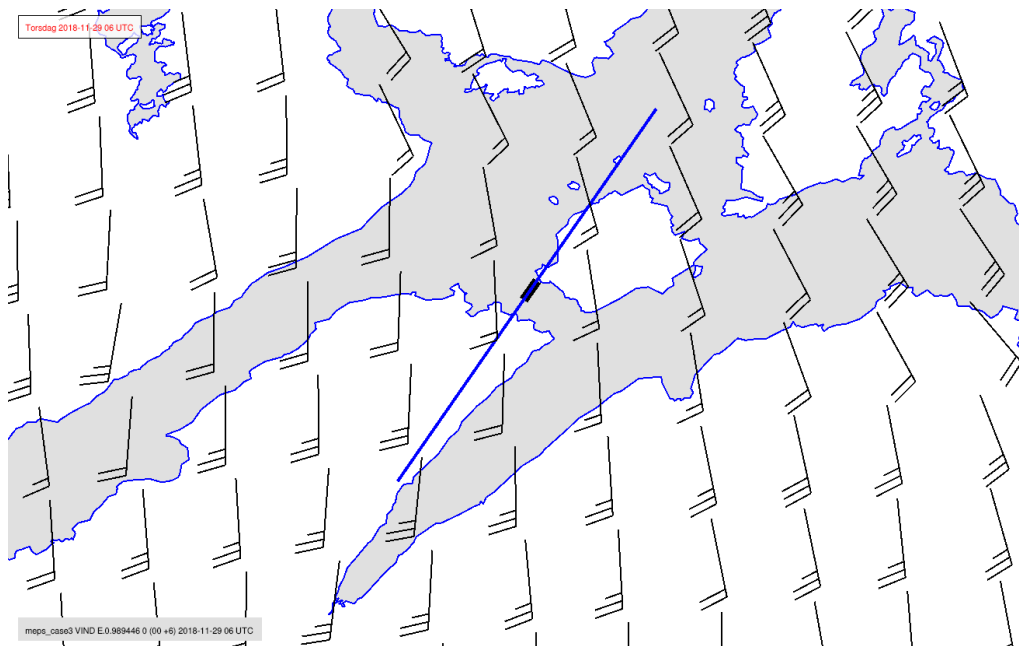


Figur 7.15: Tidsserier med vindretning (øverst) og vindstyrke (nederst) i perioden 27. til 30. november. Observasjoner fra Gjemnessundbrua i blått, AROME-MEPS i gult og SIMRA i rødt.

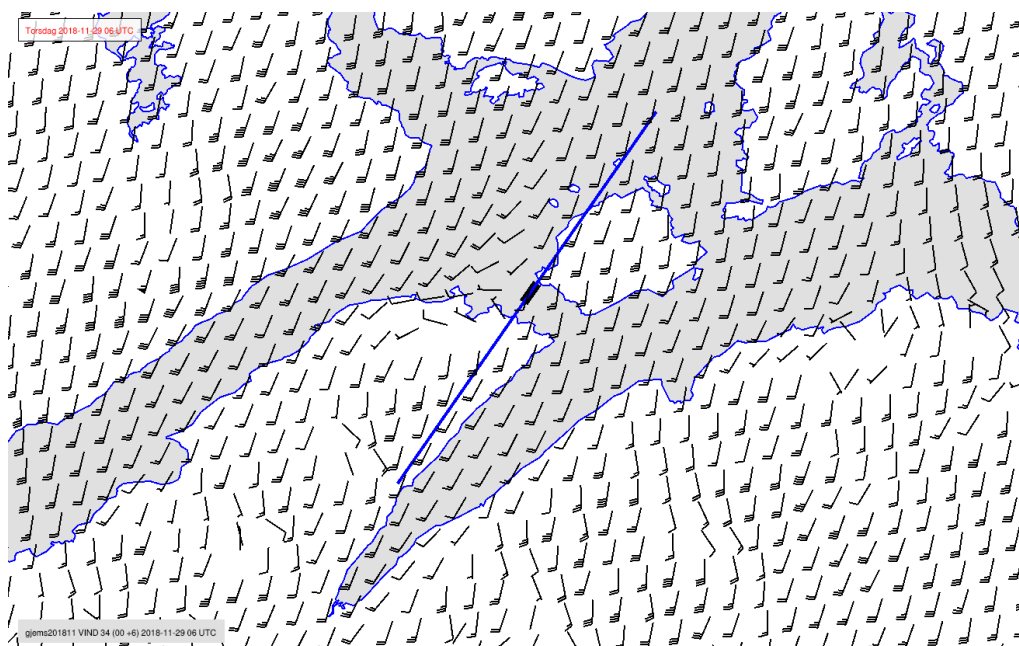
Situasjonen er presentert med kart og tverrsnitt som alle gjelder 29. november 2018 06 UTC. MSLP for hele modellområdet for AROME-MEPS er vist i figur 7.16. Utsnitt rundt Gjemnessundet er vist i figur 7.17 i en modellflate som ligger ca. 70 m over modellens topografi. Figur 7.18 viser SIMRA sin vind i modellflate 34 som også ligger rundt 70 m over topografien. 29. november 06 UTC ligger senteret midtveis mellom Stad og Island (figur 7.16). Tidsserien i denne situasjonen (figur 7.15) viser at det er avvik mellom målingen og de to modellene. Likevel er SIMRA gjennomgående bedre enn AROME-MEPS fra vinden i målingene øker seint 28. november og de to påfølgende dagene.



Figur 7.16: Kart fra MEPS-modellen gyldig 29. november 2018 06 UTC. Kartet viser bakkestrykket redusert til havnivå

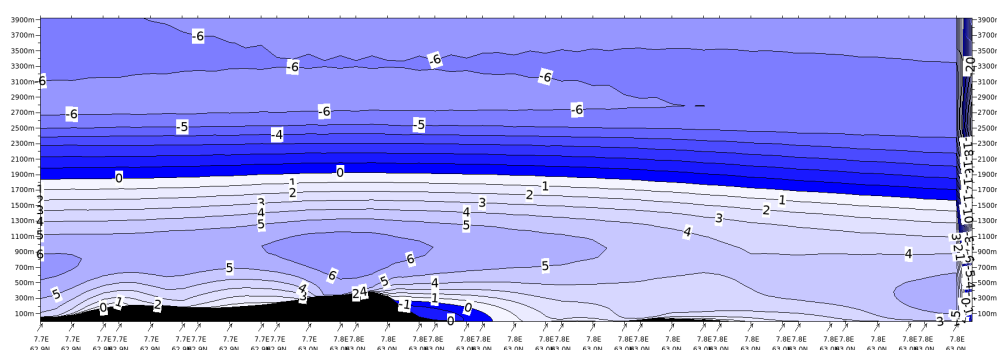


Figur 7.17: Utsnitt av MEPS-modellen for Gjemnessundet gyldig 29. november 2018 06 UTC. Kartet viser vind og i modellflaten som ligger ca 70 m over MEPS-modellen sin topografi. Vinden er vist med vindpil i hvert gridpunkt. Posisjonen for tverrsnittene i figur 7.19-7.21 er markert med en blå linje på kartet.

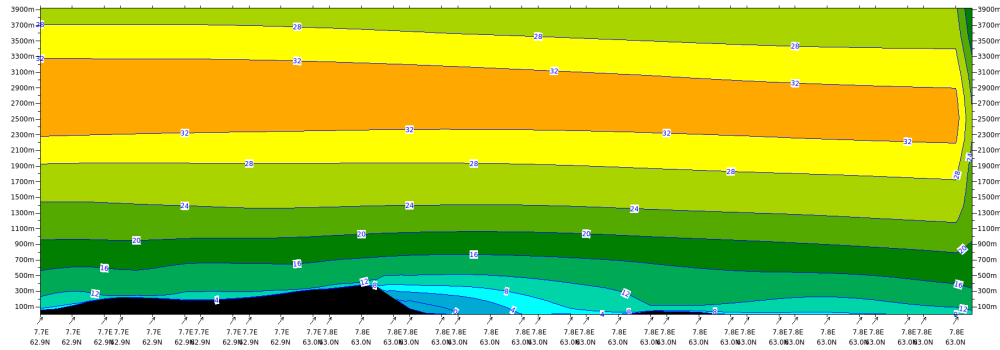


Figur 7.18: Utsnitt av SIMRA-modellen for Gjemnessundet gyldig 29. november 2018 06 UTC. Kartet viser vind og i modellflaten 34 som ligger 70 m over SIMRA-modellen sin topografi. Vinden er vist med vindpil i hvert femte gridpunkt. Posisjonen for tverrsnittene i figur 7.19-7.21 er markert med en blå linje på kartet.

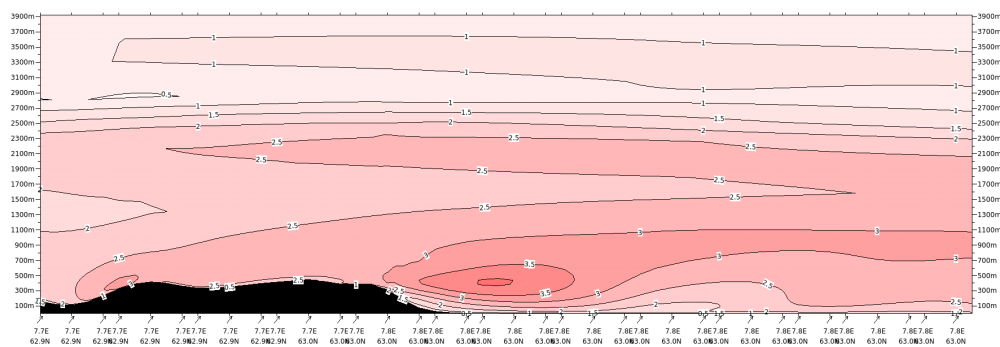
Vi har tatt ut kart med vind fra de to modellene og to tverrsnitt fra SIMRA med normal og tangentielle komponent i plottet (se figurene figur 7.19 og figur 7.20). SIMRA har i perioder dreid vinden litt vest for sør, noe AROME-MEPS ikke har klart og det ser ut til å ha noe å gjøre med den sterkeste vinden. Selv om det er feil i tid har SIMRA i dette tilfellet opp mot den samme vindstyrken som er målt. Det er ganske interessant å se på de høye verdiene av TKE (figur 7.21) som SIMRA gir over broen. Et maksimum på 4 m/s for roten av TKE i ca. 450 meters høyde er ganske mye. Det underbygger at SIMRA i denne situasjonen klarer å modellere høy turbulens og samtidig gi vind nær det vi observerer på broen. Vi må understreke at vi fortsatt knytter en liten usikkerhet til målingene siden den kan være lokalt påvirket av brobanen.



Figur 7.19: Vertikalsnitt fra SIMRA-modellen for Gjemnessundet gyldig 29. november 2018 06 UTC. Snittet viser normalkomponenten av vinden i snittet med isolinjer for hver 4de m/s.



Figur 7.20: Vertikalsnitt fra SIMRA-modellen for Gjemnessundet gyldig 29. november 2018 06 UTC. Snittet viser tangentialkomponenten av vinden i snittet med isolinjer for hver 4de m/s



Figur 7.21: Vertikalsnitt av rTKE fra SIMRA-modellen for Gjemnessundet gyldig 29. november 2018 06 UTC. Isolinjer for hver 0,5 m/s.

8 Oppsummering

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

Basert på verifikasjonen mot den ene målingen på sida av brobanen det ikke entydig at den ene modellen modellerer vindstyrke bedre enn den andre. Både SIMRA og AROME-MEPS underestimerer vindstyrke. For AROME-MEPS ser vi at den også overestimerer systematisk de få tilfellene av sterk vind.

Ingen av modellene gjensker retningsfordelingen som er observert. SIMRA har en bedre fordeling og har tydelig en bedre lokal føring av vinden i sundet som er bedre i samsvar med det observerte.

Analysen av vindforholdene viser at det er svakest vind i den sørvestlige delen av sundet. Der er det samtidig mest turbulens. Analysen av turbulensintensitet på retning for observasjonspunktet avdekker at det er markant forskjell på vind på tvers av sundet med verdier på opp mot 0,4 og vind langs sundet med verdier på 0,1-0,15. Analysen av de høyeste verdiene for vind og turbulens langs brobanen viser at den sterke vinden er litt sterkere nordøst langs brobanen, mens den sterkeste turbulensen er sterkst i den motsatt enden. Fordeler vi disse dataene på fire retninger, ser vi at det er sørvestlig sektor (180°-270°) som har sterkst vind og mest turbulens.

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. Studiet av caser kan følges opp med modellering med enda 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.

Vindklimaet i 2018 hadde hyppigere vind fra sør og muligens få situasjoner med kraftig vind fra nordvest. Langtidskorrigerer av datasettet bør derfor gjøres for å oppnå en bedre statistisk representasjon dersom det skal brukes til dimensjonering.

Referanser

- Midtbø, K. H., B. R. Furevik, and L. Østvand (2020a), *Finskala modellering av vind i fjorder. Sulafjorden og Vartdalsfjorden 2018*, MET report nr. 05/2020, Meteorologisk institutt, <https://www.met.no/publikasjoner/met-report>.
- Midtbø, K. H., B. R. Furevik, and L. Østvand (2020b), *Finskala modellering av vind i fjorder. Halsafjorden 2018*, MET report nr. 10/2020, Meteorologisk institutt, <https://www.met.no/publikasjoner/met-report>.
- 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:<https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0099.1>.
- Østvand, L., K. H. Midtbø, and B. R. Furevik (2021), *Finskala modellering av vind i fjorder. Julsundet 2018*, MET report nr. 01/2021, Meteorologisk institutt, <https://www.met.no/publikasjoner/met-report>.

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 ∞	0
Root Mean Square Error	RMSE	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i)^2}$	0 til ∞	0
Standard Deviation of Error	SDE	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i - ME)^2}$	0 til ∞	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 $\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$.