



Meteorologisk
institutt

METreport

Nr. 10/2020
2387-4201
METEOROLOGI
Bergen, 06.10.2020

Finskala modellering av vind i fjorder

Halsafjorden 2018
Knut Helge Midtbø, Birgitte Furevik og Lene Østvand



Meteorologisk
institutt

METreport

Tittel Finskala modellering av vind i fjorder. Halsafjorden 2018.	Dato 06.10.2020
Avdeling 1) SUV 2) Avdeling for oseanografi og maritim meteorologi	Rapport nr. 10/2020
Forfattere Knut Helge Midtbø ¹⁾ , Birgitte Rugaard Furevik ²⁾ og Lene Østvand ¹⁾	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 Halsafjorden for 2018. Hindcastdatasettet og inngangsdata fra den operasjonelle værvarslingsmodellen ved MET, AROME-MEPS, er sammenlignet med vindmålinger fra 2 master.	
Nøkkelord vind, turbulens, finskala, halsafjorden, simra, arome	

Faglig ansvarlig

Administrativt ansvarlig

Sammendrag

Denne rapporten dokumenterer vindmodelleringen med CFD-modellen SIMRA for Halsafjorden for 2018. Hindcastdatasettet og inngangsdata fra den operasjonelle værvarslingsmodellen ved MET, AROME-MEPS, er sammenlignet med vindmålinger fra 2 master.

Verifikasjonen viser at SIMRA i liten grad forbedrer vinden modellert på de to mastene i forhold til AROME-MEPS, og det ikke entydig at høyere romlig oppløsning gir bedre resultat for vindretningsfordelingen heller. SIMRA sine verdier av turbulensintensitet for hastigheter over 5 m/s samsvarer imidlertid godt med det som er rapportert fra analyse av måledata fra mastene. Også fordelingen av turbulensintensitet på retninger er rimelig god.

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 fjorden. Vi ser at Simra med sin høye oppløsning modellerer hjørnejet (avsnitt 7.1 og 7.2) og leeffekter (avsnitt 7.3) bedre enn AROME-MEPS. De valgte tilfellene demonstrer at SIMRA som forventet gir noe bedre modellering av detaljer i vinden i fjorden.

Måleprogrammet med LIDARer i Halsafjorden ble avsluttet etter første halvår 2018, men gir likevel resultater som kan brukes til å vurdere forholdene og kvaliteten på SIMRA-modellen ved mastene og midt i fjorden. En vurdering i forhold til rapporterte LIDAR-resultater antyder godt samsvar for retningsavhengighet av turbulensintensitet både midt i fjorden og på masteposisjonene.

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 mastobservasjoner	6
5	Generelle vindforhold	11
6	Ekstremvind	15
7	Stormer	20
7.1	15. januar 2018	20
7.2	15. februar 2018	24
7.3	10. november 2018	27
8	Oppsummering	30
	Referanser	31
A	Verifikasjonsmål	32

1 Introduksjon

Statens Vegvesen (SVV) har ansvar for planlegging og utbygging av en ferjefri veiforbinnelse mellom Kristiansand og Trondheim. Prosjektet Ferjefri E39 innebærer å krysse flere fjorder med faste forbindelser. Meteorologisk institutt har et samarbeid med SVV om målinger og modellering i fjordene i Midt-norge, blant annet Halsafjorden øst for Kristiansand.

Halsafjorden er ca 2 km bred mellom Halsaneset og Åkvik som er stedet det er aktuelt for utbygging. MET har simulert vindforholdene i Halsafjorden ved bruk av Computational Fluid Dynamics (CFD)-modellen SIMRA. SIMRA har vært i bruk ved MET i nesten 20 år til turbulensvarsling for norske flyplasser og i senere tid for flyplassutredninger. 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 de fire områdene Sula-fjorden/Vartdalsfjorden, Julsundet, Gjemnessund og Halsafjorden. Resultater for Sula-fjorden finnes i *Midtbø et al. (2020)*, mens resultater for Julsundet og Gjemnessund publiseres seinere. Denne rapporten bygger på datasettet for Halsafjorden.

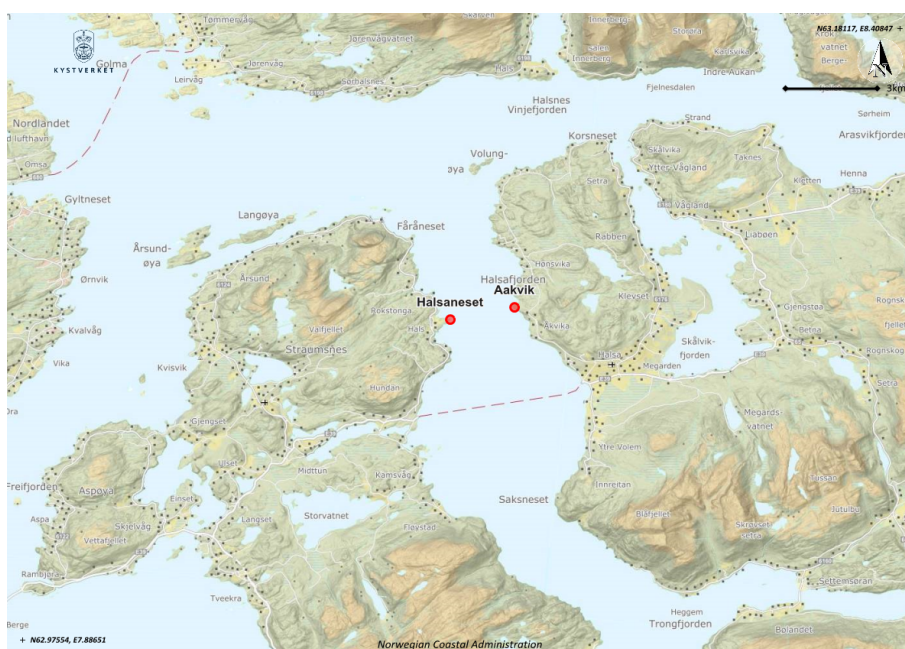
På oppdrag for SVV, satte Kjeller Vindteknikk (KVT) (nå Norconsult) i 2014 og 2015 opp to 50 m høye meteorologiske master til å måle vind, en på hver side av fjorden. Vi har validert vind fra modellen mot 10-minutters vind fra målingene på de to mastene i kapittel 4.

En oversikt over den romlige fordeling av middelvind og ekstremvind og tilhørende turbulensintensitet er presentert i henholdsvis kapittel 5 og 6. Basert på observasjoner og modell beskriver vi også noen tilfeller med sterk vind i 2018 i kapittel 7. Kapittel 2 og kapittel 3 beskriver målinger og modelloppsettet. En oppsummering er gitt i kapittel 8.

2 Målinger

Atmosfæredelen av måleprogrammet i Halsafjorden består av to 50 m høye master som er markert med de røde punktene i kartet i Figur 2.1. Det måles vind og turbulens i 3 høyder for hver mast. For masten på Halsaneset startet målingene opp 26. februar 2014 mens Åkvik startet opp 6. mars 2015. Målingene og oppsettet er beskrevet av *Furevik et al. (2020)*. Data fra måleprogrammet er tilgjengelig via <https://thredds.met.no/thredds/obs.html> og *Furevik et al. (2019)*.

Første halvdel av 2018 ble det målt med fire skannende Lidarer i Halsafjorden (*Kjeller Vindteknikk, 2018*). Sammenligning med disse resultatene er planlagt i en senere analyse.



Figur 2.1: Kart med navn og posisjoner på meteorologiske master (røde punkt) hvor data er tatt ut fra SIMRA. Målingene på Halsaneset opp 26. februar 2014 og Åkvik startet opp 6. mars 2015.

3 Modeller

3.1 AROME-MEPS 2.5

Den 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. 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.* (2020). Figur 3.1 viser et kart med AROME-MEPS-modellens topografi (gitteravstand på 2,5 km). På kartet vises også bakkestrykket 15. januar 2018 12 UTC fra denne modellen for en storm som ga kraftig vind i Halsafjorden. Den lille svarte firkant i kartet angir SIMRA-domænet over Halsafjorden.

Resultatene fra SIMRA er det som svarer til 10 minutters middelvind sammen med Turbulent Kinetisk Energi (TKE). TKE representerer den kinetiske energien i fluktuasjonene i vinden slik som modellen beregner den. For å bruke dette til dimensjonering er det viktig å huske på, at modeller kan ha ganske store feil og skal brukes som et supplement til målingene fra master og LIDAR. SIMRA-modellen vil ikke ha alle fenomener med og det er særlig fenomener på svært liten skala den ikke modellerer. Modellenes store styrke er at de gir et romlig bilde som er nyttig for forståelse av vindforholdene. Dette kan være til støtte for ekstrapolering av målingene i tid og rom.

Modelloppsettet for Halsafjorden 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.* (2020). Resultatene av vind og TI sammenlignes mot målinger fra mastene og med resultatene av vind fra AROME-MEPS.

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 $\text{Sqrt}(\text{Turbulent_Kinetic_Energy})$. 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 er

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

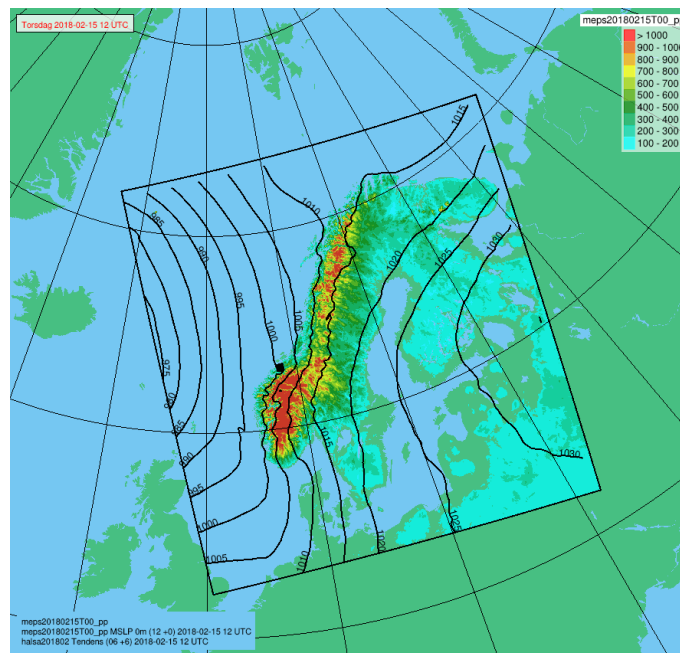
u' kan oppfattes som standardavvik av vindhastighet. Turbulensintensiteten TI er definert som

$$TI = \frac{u'}{\bar{u}}, \quad (2)$$

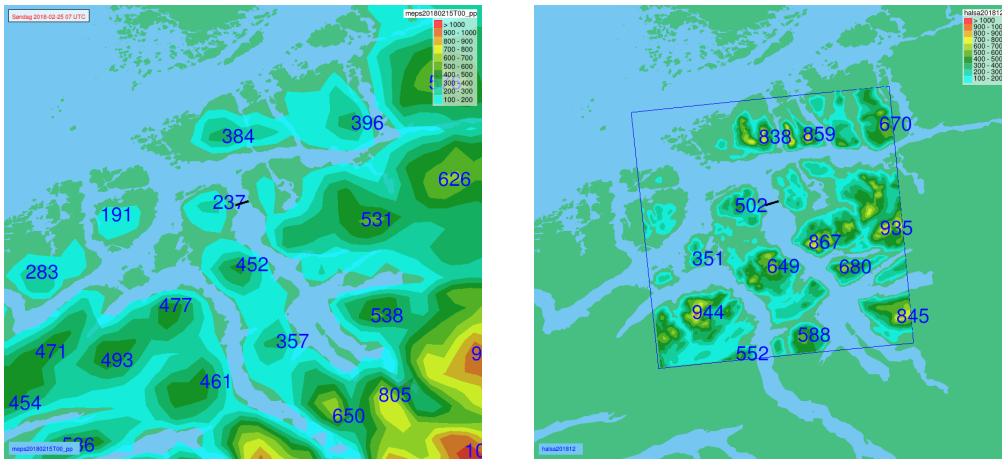
hvor \bar{u} er middelverdien av vindhastigheten. For en målt tidsserie vil u' og \bar{u} beregnes over en periode på for eksempel 10 minutter og det er den parameter som den horisontale vinden i modellen skal representere. Derfor bruker vi horisontal vindhastighet for hver time til å beregne TI og vi har satt en nedre grense for vindhastigheten på 5 m/s for ikke å komme til å fokusere på høye turbulensverdier ved svak vind. I noen kart og snitt med TI (figur 5.3, 5.4, 6.3, 6.4) er det vindhastigheten i hvert punkt som er brukt. Derfor kan det være litt forskjellig tidspunkt som er lagt til grunn henover kartet/snittet.

Figur 3.2 viser over Halsafjorden med topografien fra AROME-MEPS (til venstre) og SIMRA (til høyre) og de største høyder (i meter) angitt i blått. Fargepaletten som vist i øverste høyre hjørne er brukt sammen med isolinjer for hver 100 m for begge figurene. Linjen angir et snitt gjennom posisjonene for mastene på Halsaneset og Åkvik.

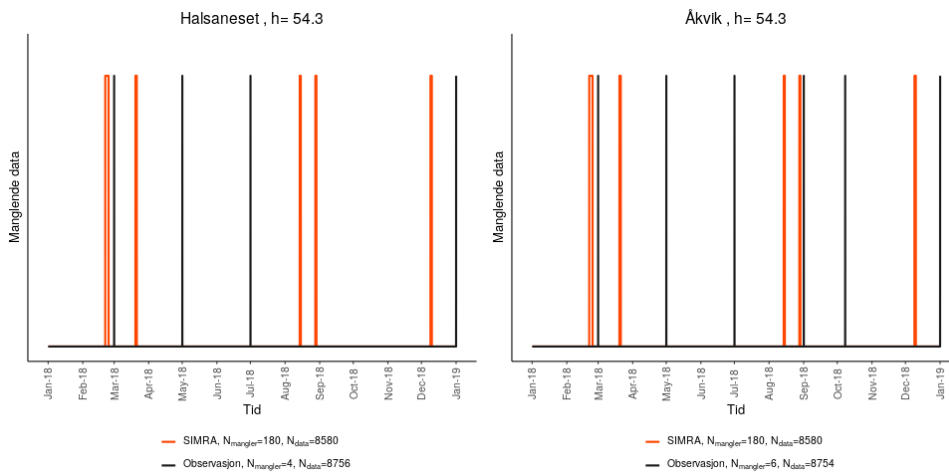
Figur 3.3 viser en oversikt over manglende data fra SIMRA og fra øverste sensor på mastene Halsaneset og Åkvik. For en full tidsserie fra 2018 mangler det i alt 180 timer fra SIMRA (ca 2 %), 4 timer (ca. 0,05 %) observerte data fra Halsaneset, og 6 timer observerte data fra Åkvik (ca. 0,07 %).



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 Halsafjorden. På kartet vises også bakketrykket (MSLP) under stormen 15. januar 2018 12 UTC fra AROME-MEPS.



Figur 3.2: Kart over Halsaffjorden med topografien fra AROME-MEPS (til venstre) og SIMRA (til høyre) og de største høyder (i meter) angitt i blått. Fargepaletten som vist i øverste høyre hjørne er brukt sammen med isolinjer for hver 100 m for begge figurene. Linjen angir et snitt gjennom posisjonene for mastene på Halsaneset og Åkvik.



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

4 Verifikasjon

4.1 Verifikasjon mot mastobservasjoner

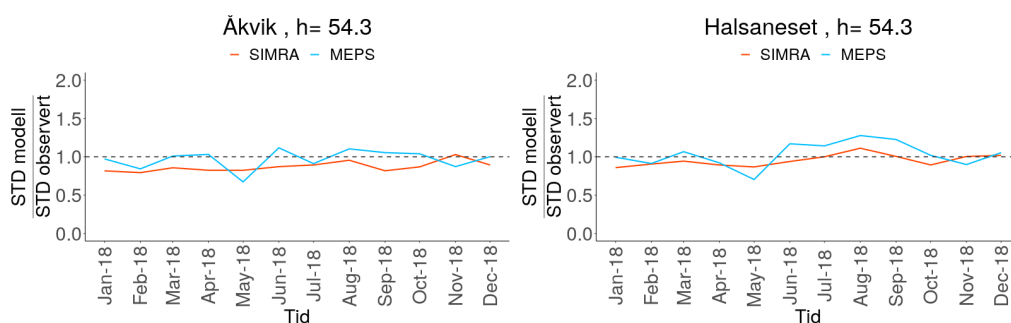
Vindstyrke og vindretning modellert for 2018 er validert mot målingene fra de to mastene i Halsafjorden. I SIMRA har vi interpolert modelldata fra de nærmeste gitterpunktene til hvert mastpunkt. For AROME-MEPS har vi valgt data fra det av de nærmeste hav- eller kystpunktene i modellen som har høyest korrelasjon til observasjonene i masten. Dette er valgt siden gitteropløsningen på 2,5 km ikke representerer topografien godt nok på denne skalaen.

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. Verifikasjonsscorene er nærmere beskrevet i appendix A.

98-prosentdelen av vindstyrken ligger litt under det som er observert av de to øverste mastsensorene ved Åkvik for SIMRA, og litt over for AROME-MEPS, men forskjellen mellom modell og observasjon er omtrent like stor. For den nederste sensoren viser begge modellene for høy 98% vindstyrke, og AROME-MEPS har størst avvik. Ved Halsaneset er 98 % vindstyrke lavere enn observert for begge modeller, men AROME-MEPS er nærmest det som er observert for alle høyder.

Mast	Sensorhøyde [m]	98% OBS [m/s]	98% SIMRA [m/s]	98% MEPS [m/s]	STD OBS [m/s]	N
Halsaneset	54,3	11,1	10,4	11,0	2,8	8527
Halsaneset	35,9	10,6	9,7	10,1	2,7	8527
Halsaneset	16,7	10,0	8,4	9,0	2,6	8527
Åkvik	54,3	11,6	10,6	12,7	3,0	8525
Åkvik	37,9	11,1	10,0	11,9	2,8	8525
Åkvik	23,0	6,7	8,9	10,8	1,6	8525

Tabell 1: 98-prosentdelen (98%) og standardavvik (STD) for vindstyrke fra master og modeller i Halsafjorden. MEPS er AROME-MEPS.



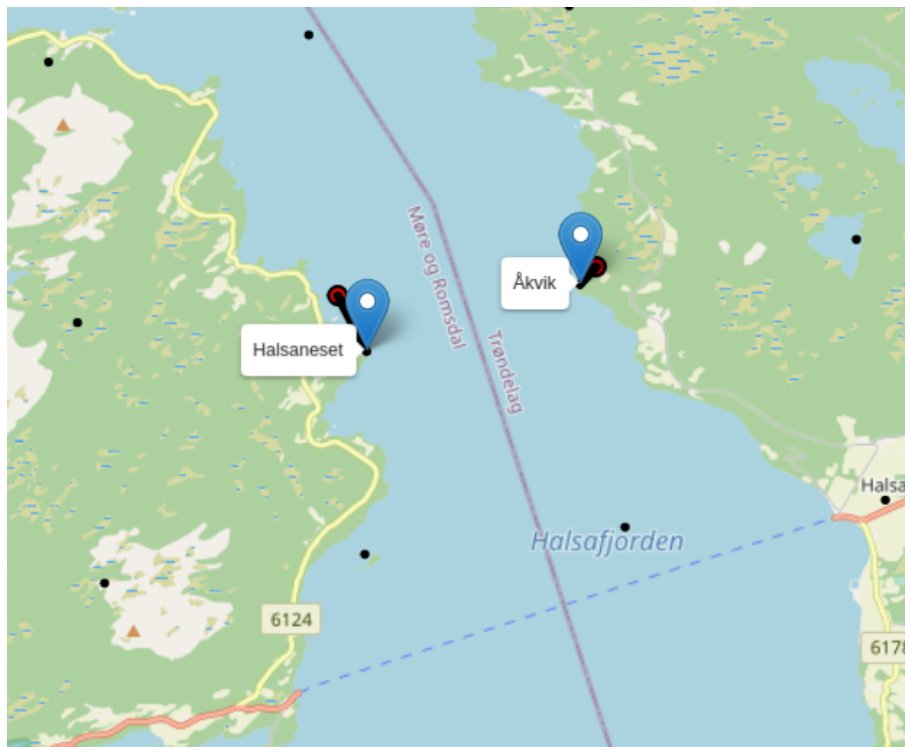
Figur 4.1: Månedlig forhold mellom standardavvik for modell og øverste sensor på hver mast, for SIMRA (rød) og AROME-MEPS (blå).

Når vi ser på forholdet mellom standardavvik for modell og observasjon (figur 4.1), gir AROME-MEPS noe bedre resultater for Åkvik, mens SIMRA gjør det best for Halsaneset. Det er dog litt variasjon fra måned til måned i hvilken modell som presterer best. Tabell 2 viser ulike feil og korrelasjon mellom modell og observasjon. AROME-MEPS

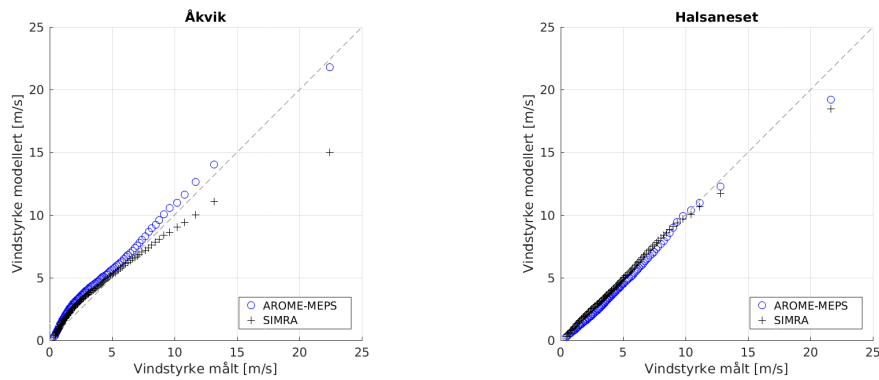
Mast	Sensorhøyde [m]	ME SIMRA [m/s]	ME MEPS [m/s]	RMSE SIMRA [m/s]	RMSE MEPS [m/s]	SDE SIMRA [m/s]	SDE MEPS [m/s]	Kor. SIMRA	Kor. MEPS
Halsaneset	54,3	-0,3	-0,5	2,4	2,6	2,4	2,5	0,6	0,6
Halsaneset	35,9	-0,4	-0,5	2,4	2,5	2,3	2,5	0,6	0,6
Halsaneset	16,7	-0,2	-0,3	2,4	2,5	2,4	2,5	0,5	0,5
Åkvik	54,3	0,5	0,7	2,4	2,4	2,4	2,2	0,7	0,7
Åkvik	37,9	0,4	0,6	2,3	2,2	2,3	2,1	0,6	0,7
Åkvik	23,0	1,8	2,0	2,6	2,7	1,9	1,9	0,6	0,6

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

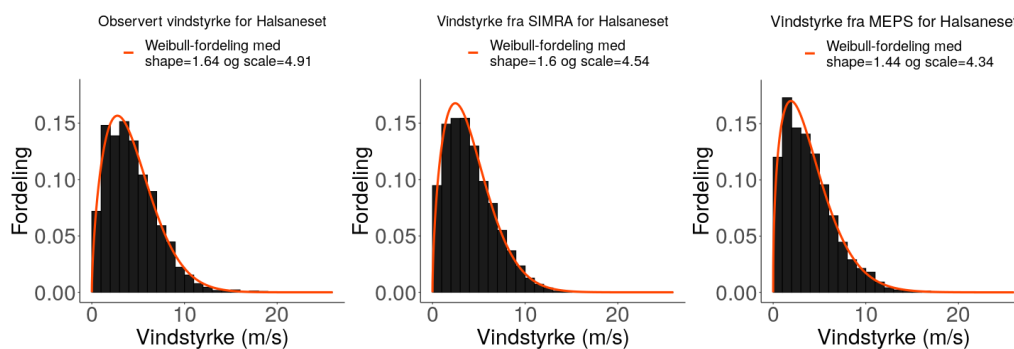
har jevnt over litt større feil enn SIMRA. Begge modeller overestimerer vindstyrken ved Åkvik, og underestimerer ved Halsaneset. Korrelasjonen er stort sett lik for begge modeller.



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.

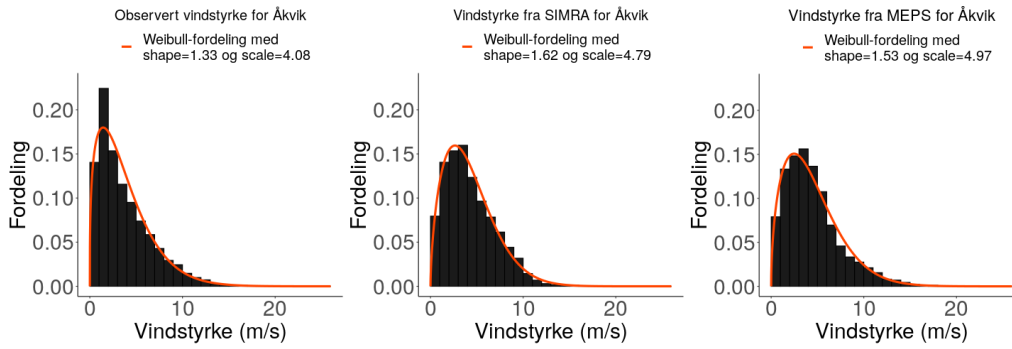


Figur 4.3: Kvantil-kvantil-plott av vindstyrke for SIMRA (svarte pluss) og AROME-MEPS (blå sirkler) for mastene. Hvert punkt representerer 1 % av dataene. Stiplet linje er 1:1-linjen.

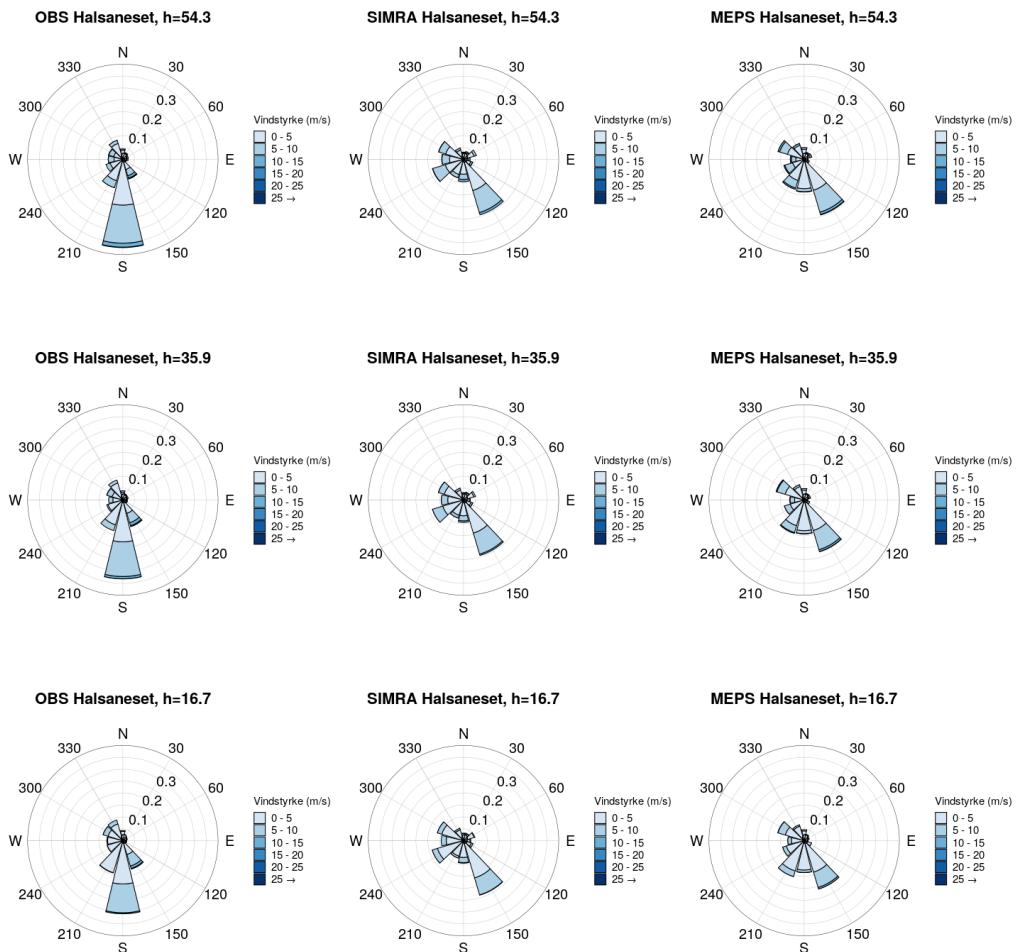


Figur 4.4: Histogram og tilpasset Weibull-fordeling for vindstyrke av samtidige data fra øverste sensorhøyde på Halsaneset med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.

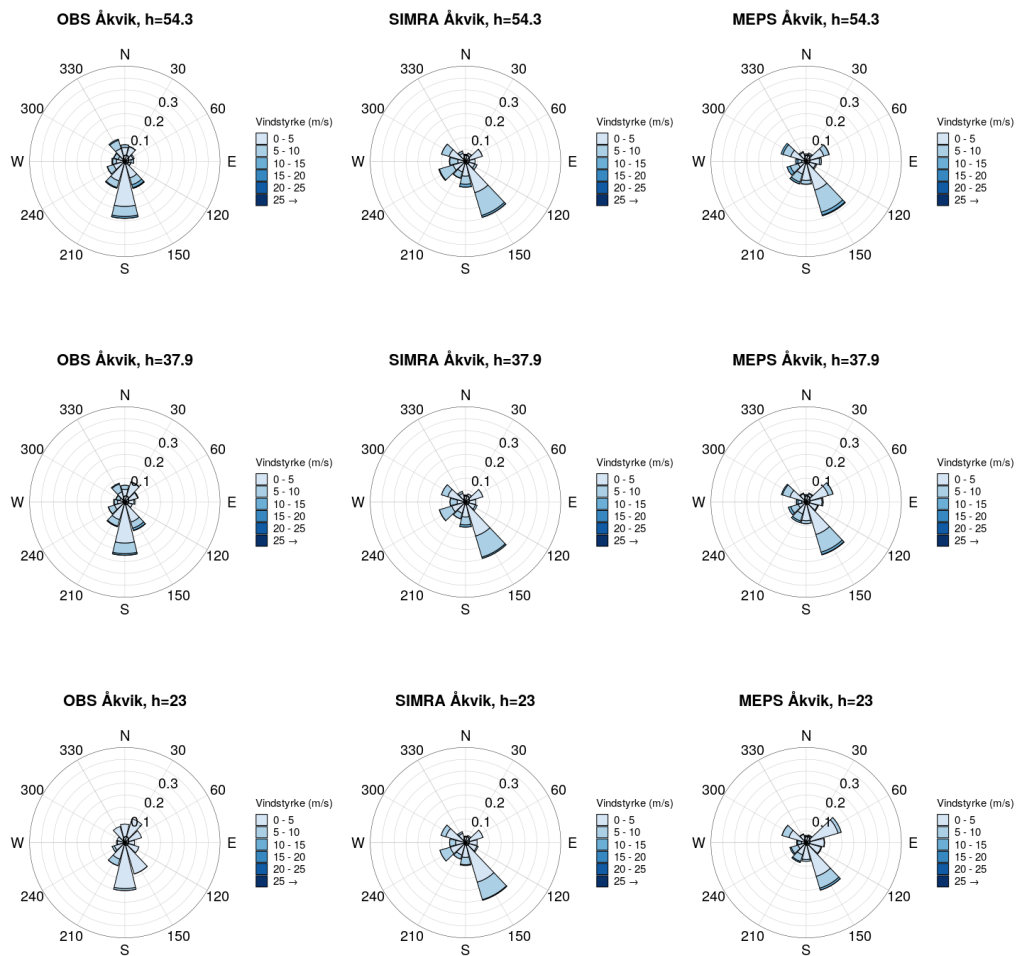
Figur 4.3 sammenligner frekvensfordelingene av vindstyrke fra AROME-MEPS og SIMRA mot observasjoner i et kvantil-kvantilplot for hver av de to mastene. SIMRA har lik fordeling som observert på Halsaneset mens AROME-MEPS er for lav her. Begge modellene overestimerer ved lav vind på Åkvik. SIMRA underestimerer sterk vind på Åkvik, særlig den øverste prosentdel. Figurene 4.4 og 4.5 viser histogram og estimert Weibull-fordeling for henholdsvis Åkvik og Halsaneset. Her ser vi at SIMRA har en fordeling som ligger noe nærmere den observerte fordelingen på Halsaneset. På Åkvik har modellene ganske lik fordeling, mens vi ser at masten måler større andel lav vind. Vindrosene fra modellene ved Halsaneset (figur 4.6) er ikke helt i tråd med vindrosene fra observasjon. For både SIMRA og AROME-MEPS er det mest vind fra sørøst, mens observasjonene har mest vind rett sør. Modellene har også en del vind fra sørvest som ikke ses i målingene. Dette gjelder for alle høyder. Vindrosene for Åkvik (figur 4.7) viser lignende resultater. Samlet sett ser vi at de to modellene ikke representerer målingene når det gjelder retning, mens styrken som vi har sett er bedre modellert. Begge modellene har topografi i fjorden som er orientert nærmere SE enn S. Dette er en utjevnet topografi for AROME-MEPS, men også for SIMRA. Det ser ut til at det for begge masteplasseringene er lokalt terreng som styrer vinden mot S og at det ikke er løst opp i noen av modellene. SIMRA som har den beste oppløsninga skulle ha best mulighet til dette. For å kunne forbedre retningsfordeling i modelleringen vil det være nødvendig å teste et ennå finere grid enn det vi har brukt for SIMRA.



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

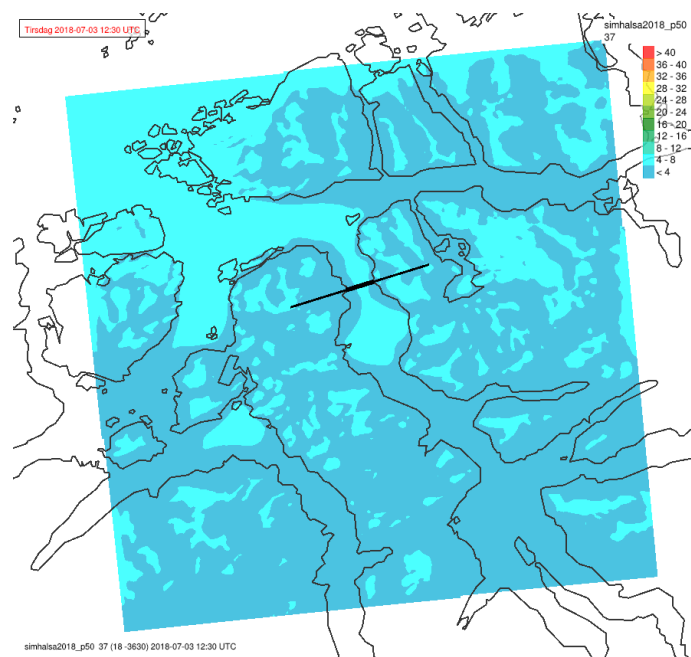


Figur 4.6: Vindroser for alle høyder på Halsaneset, med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.

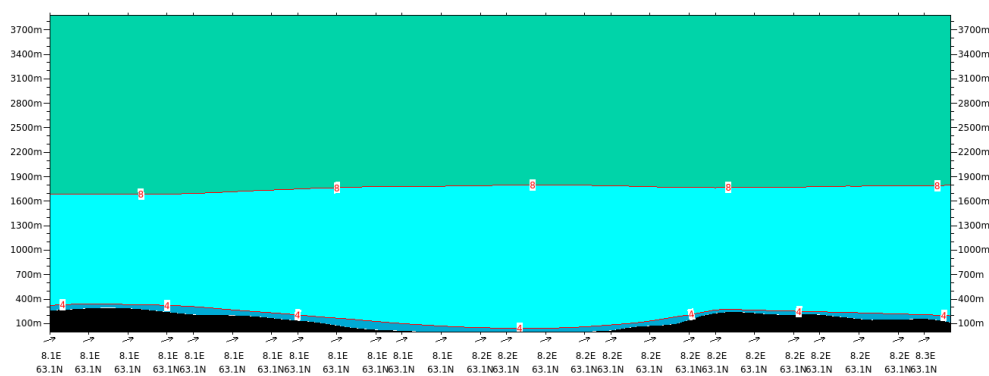


Figur 4.7: Vindroser for alle høyder på Åkvik, med observasjon til venstre, SIMRA i midten og AROME-MEPS til høyre.

5 Generelle vindforhold



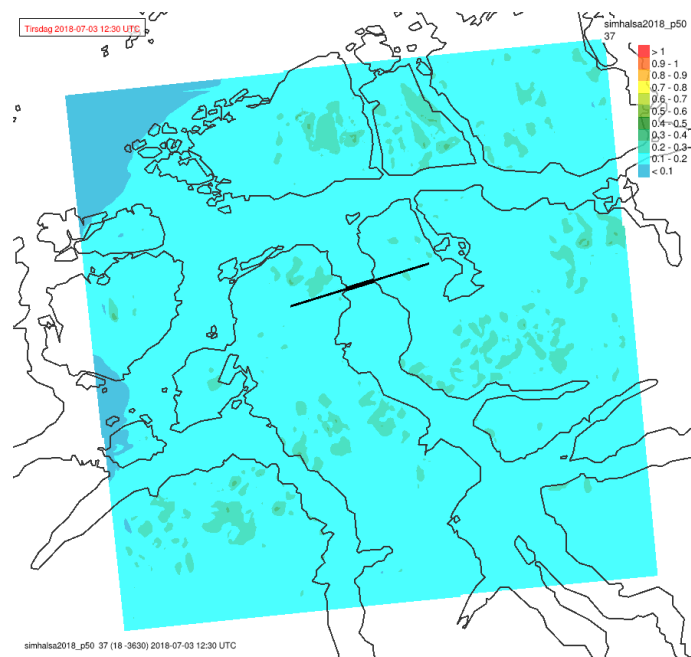
Figur 5.1: Kart for Halsafjorden fra SIMRA-modellen med isolinjer for 50-prosentdelen av vindstyrke i 70 m over modelltopografien.



Figur 5.2: Vertikalt tverrsnitt for Halsafjorden med isolinjer for 50-prosentdelen av vindstyrke. Fargepaletten er vist i figur 5.1. Posisjonen av snittet er markert med en tynn sort linje på kartet med Halsaneset til venstre og Åkvik til høyre.

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. I Halsafjorden viser vindrosene basert på data fra mastene og SIMRA at sørlig vind (vind ut fjorden) er mest vanlig. Det er også ved sørlig vind at det oftest er sterk vind, men NW vind inn fjorden kan også bli sterk. 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 tverrsnitt av 50-prosentdelen (medianen) av vindstyrke. Posisjonen av tverrsnittet som går igjennom masteposisjonene er vist med



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

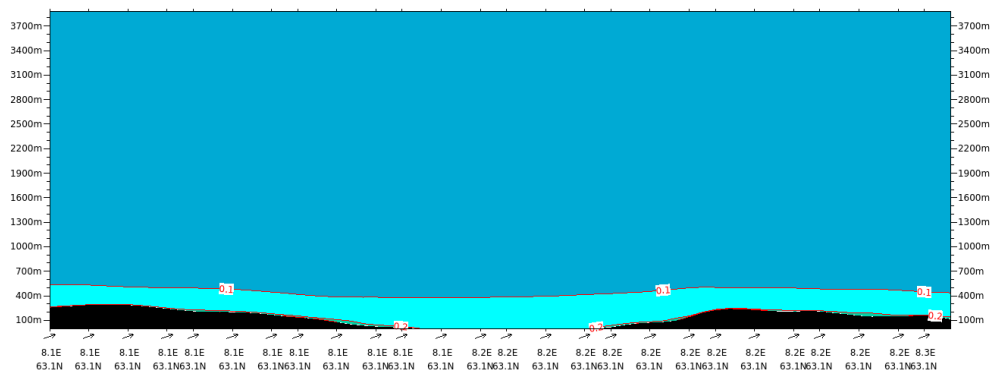
en svart linje på kartet. Tverrsnittet viser at det i middel er mest vind midt i fjorden og inne over terrenget. Det er også i middel sterkere vind høyere opp. Vi har også med tilsvarende kart og tverrsnitt til figurene 5.1 og 5.2 i figurene 5.3 og 5.4, men nå for 50-prosentdelen av turbulensintensitet. 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.

Vindhastighet og retning fra SIMRA i punktene i kartet (figur 2.1) er hentet ut opp til 500 m høyde for å lage vertikale profiler av vindhastighet og vindretning. Profilene er midlet over sørlig ($90 - 270^\circ$) og nordlig ($270 - 90^\circ$) vind basert på vindretning fra modellen i midten av fjorden mellom Halsaneset og Åkvik i ca. 70 m høyde. Vindprofilene er vist i figur 5.5. Gul linje er resultatet av å midle over alle situasjoner gjennom hele året, blå er sørlig vind og rød er nordlig vind.

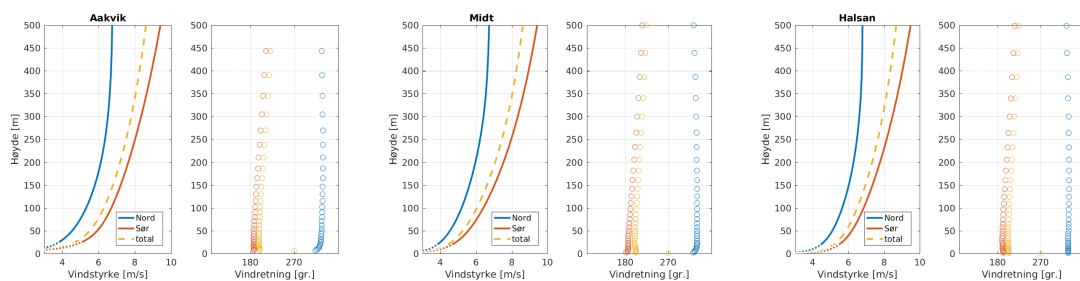
Horisontalt vindprofil i 70 m høyde mellom Halsaneset og Åkvik i Halsafjorden er vist med piler i figur 5.6. Vindprofilen er beregnet som middel av hver av vindkomponentene for seg for å kunne vise gjennomsnittlig vindretning. Det betyr at lengden på pilene er et mål for vindstyrke kombinert med stasjonaritet i vindretningen. Figurene viser en jevn retningsbelastning langs tverrsnittet for både nordlig og sørlig vind.

Figur 5.7 viser retningsavhengighet av turbulensintensiteten på mastlokasjonene og i midten av fjorden for vindhastigheter over 5 m/s. Fordelingen har store likhetstrekk med tilsvarende analyse fra mastene (Kjeller Vindteknikk, 2019b, figur 4-9), og LIDAR i midten av fjorden (Kjeller Vindteknikk, 2018, figur 6-13). Høyest turbulens (0,2-0,25) er det for vind fra sørvest og noe økt turbulens når vinden er fra øst. Vind inn og ut fjorden (mest hyppig) har lave verdier av turbulensintensitet på 0,1-0,15.

Modellene gir ganske like resultater for fordeling av vindretning for begge masteposisjonene. Det er også tydelig at for sørlige vindretninger har begge modellene langt hyppigere

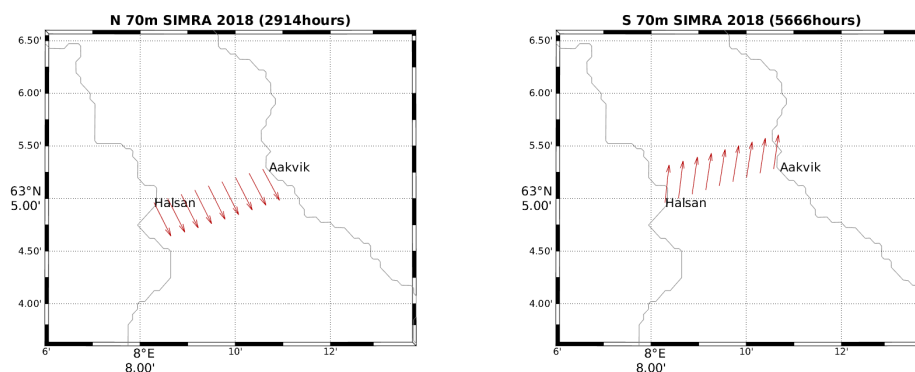


Figur 5.4: Vertikalt tverrsnitt med isolinjer for 50-prosentdelen av turbulensintensitet. Det er brukt samme fargepalett som i figur 5.3. Posisjonen av snittet er markert med en tynn sort linje på kartet med Halsaneset til venstre og Åkvik til høyre.

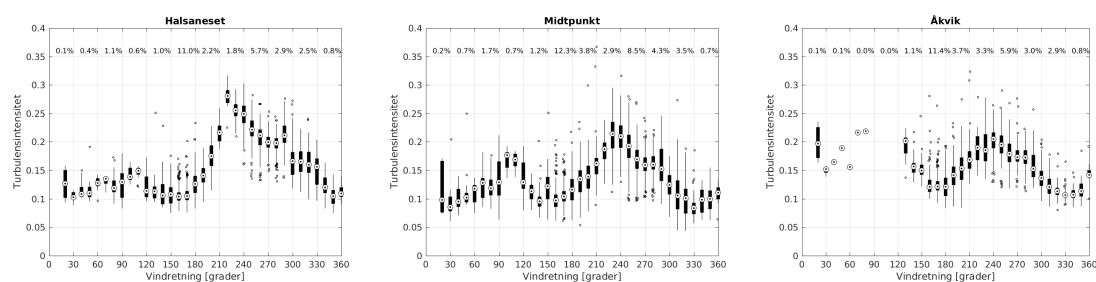


Figur 5.5: Vertikalt vindprofil av vindstyrke og retning fra SIMRA på Halsaneset, midt i fjorden og på Åkvik, oppdelt i nordlig vind (blå) og sørlig vind (rød). Det totale vindprofilen er vist i stiplet gult. Oppdeling i retninger er etter midtpunktet i 70 m høyde.

SE sektor enn S mens for observasjonene er sørlig sektor markert hyppigst. Modellene har også en større hyppighet av SW, W og NW enn det er i observasjonene. Modellen har liten variasjon i vindretning på tvers av fjorden (Figur 5.6) og stemmer godt med LIDAR-målingene i midten av fjorden. Dersom SIMRA, selv med 100 m gitteravstand, ikke får beskrevet terrenget detaljert nok nær endene av brubanen, vil variasjonen langs bruspenntet tatt fra SIMRA mangle detaljer nær masteposisjonene.

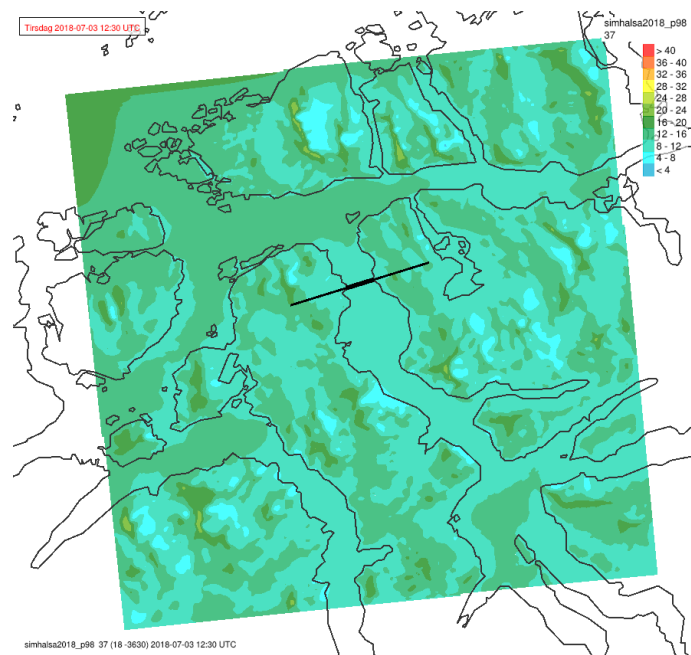


Figur 5.6: Kart over Halsafjorden som viser vindvektorer i 70 m høyde på tvers av fjorden to ulike vindretninger basert på midtpunkt i fjorden mellom Halsaneset og Åkvik (Nordlig vind ($270^\circ - 90^\circ$) og sørlig vind ($90 - 270^\circ$)). Hyppigheten til retningene er gitt ved antall timer i tittel til hver figur.

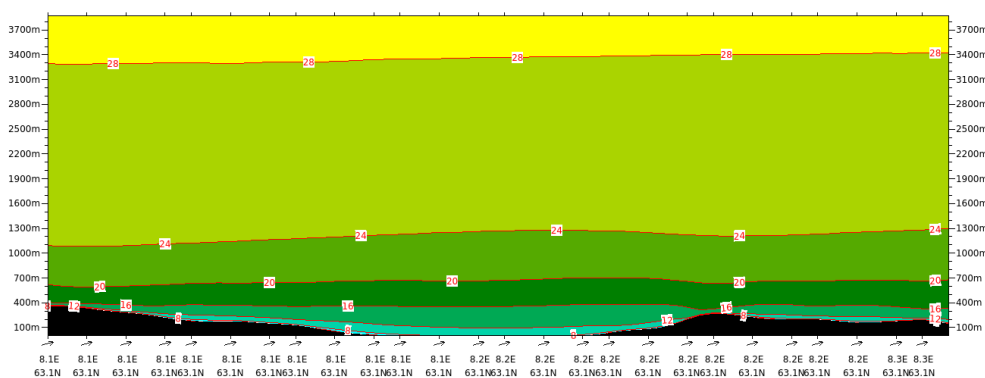


Figur 5.7: Turbulensintensitet i 100 m høyde fra SIMRA for nærmeste punkt til mastene og for midtpunktet i fjorden med medianen og standardavvik for hver 10 graders retningsintervall og tynne linjer som angir 25 og 75-prosentdelene. Kun situasjoner med vindhastighet over 5 m/s er tatt med. Datadekningen over 30 graders intervaller er vist i prosent øverst i hver figur.

6 Ekstremvind



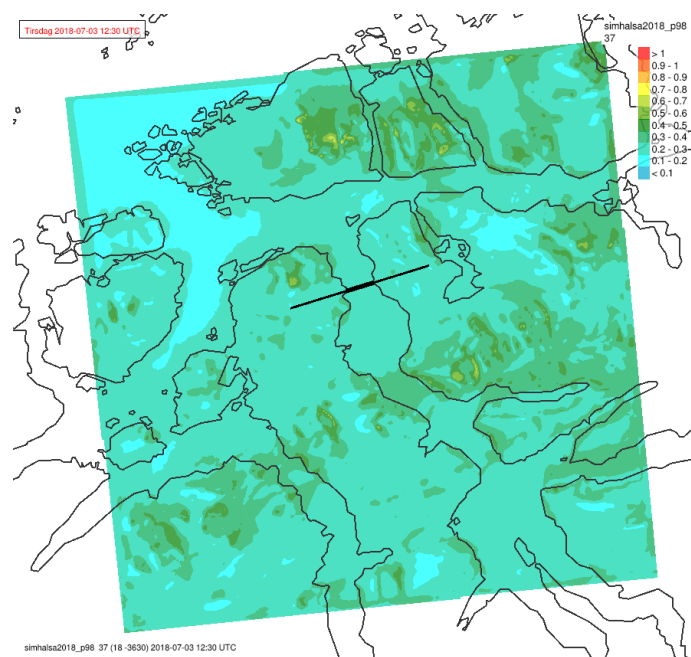
Figur 6.1: Kart for Halsafjorden fra SIMRA-modellen med isolinjer for 98-prosentdelen av vindstyrke i 70 m over modelltopografien.



Figur 6.2: Vertikalt tverrsnitt for Halsafjorden med isolinjer for 98-prosentdelen av vindstyrke. Fargepalett er vist i Figur 6.1. Posisjonen av snittet er markert med en tynn sort linje på kartet.

Vi ser først på 98-prosentdelen av vindstyrke og turbulens, dvs turbulensintensitet, fra SIMRA-modellen på kart for hele SIMRA-området og tverrsnittet markert med svart strek på kartet (figur 6.1-6.4). Kartene viser at turbulensen 70 m over modelltopografien ligger på forholdsvis lave verdier mellom 0,2 og 0,3 over Halsafjorden. TI avtar med høyden og isolinjen for 0,2 ligger i 700-800 meters høyde.

Det er interessant å se på tilsvarende kart og tverrsnitt for vindstyrke. I kartet med 98-prosentdelen av vindstyrken er verdien i 70 m mellom 8 og 12 m/s over fjorden og 16-20 m/s på det meste innover terrenget. Tverrsnittet viser hvordan vinden øker med høyden.

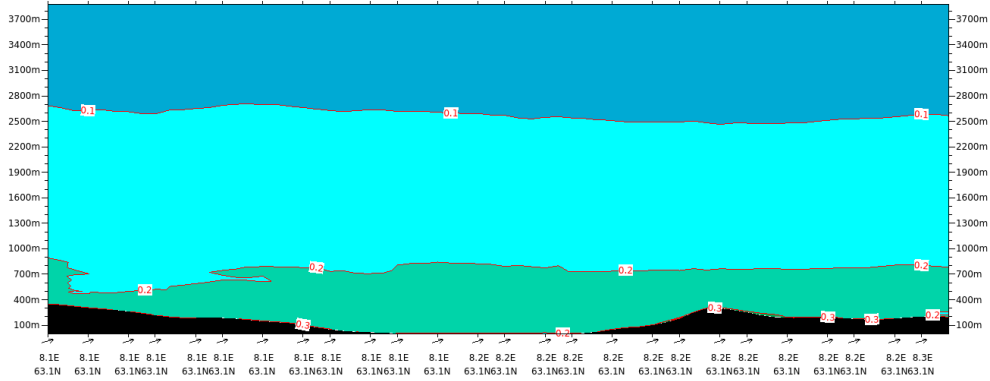


Figur 6.3: Kart for Halsafjorden fra SIMRA-modellen med isolinjer for 98-prosentdelen av turbulensintensiteten i 70 m over modelltopografien. Bare tidspunkt der vindstyrken er over 5 m/s er inkludert i beregningene.

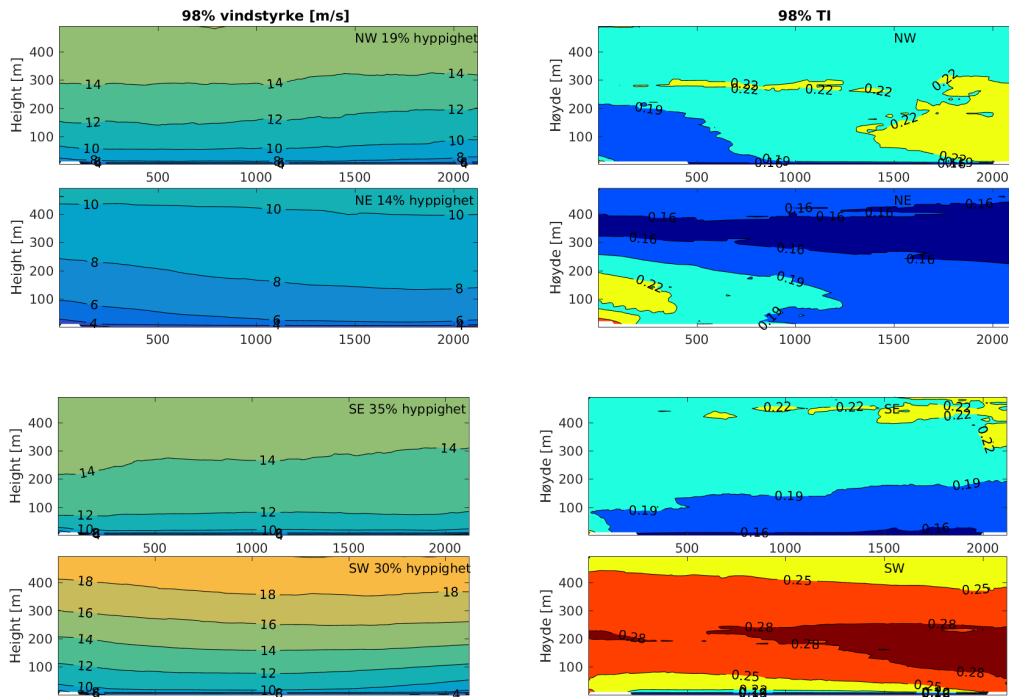
Isolinjen for 16 m/s ligger rundt 400 meters høyde.

Basert på vindretningen midt i fjorden har vi sortert situasjonene gjennom hele året og beregnet 98-prosentdeler av vindstyrke og turbulens for hver retning (Figur 6.5). Figurene viser at vind og turbulens over fjorden i gjennomsnitt er rimelig homogent fordelt for alle sektorer. Vind fra sør er mest hyppig og forekommer 66% av tiden. Det er også fra denne retning, særlig sørvest, at vind og turbulensen er kraftigst, selvom ingen av delene er spesielt kraftig sammenlignet med Sulafjorden (Midtbø *et al.*, 2020). I høyden til en eventuell brobane ligger 98-prosentdelen av turbulensintensiteten på ca 0,25 og vindstyrken på 10-12 m/s som nevnt tidligere. Prosentdelene 90-99,5 av TI over fjorden viser at det er litt høyere turbulens på østsiden ved Åkvik i modellen (Figur 6.6).

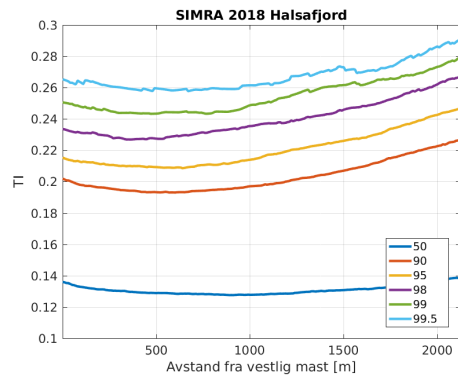
2- og 98-prosentdelene av den vertikale vindkomponenten (figur 6.7) viser at de ekstreme vertikale bevegelser av vinden ligger på hastigheter av mellom $\pm 0,5$ m/s over det meste av snittet. Figur 6.8 viser middelverdien av vindstyrke og TI av de 19 tilfeller i 2018 hvor vindhastigheten i midten av fjorden var større enn eller lik 15 m/s. Figuren viser at det bare er mindre variasjoner i vinden på tvers av fjorden i SIMRA for disse tilfeller og TI er under 0,2.



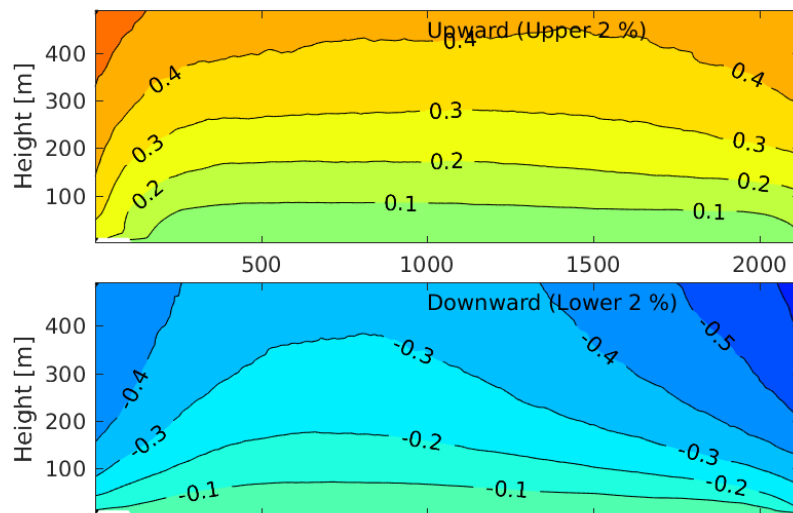
Figur 6.4: Vertikalt tverrsnitt for Halsaffjorden med isolinjer for 98-prosentdelen av turbulensintensitet. Fargepalett er vist i Figur 6.3. Posisjonen av snittet er markert med en tynn sort linje på kartet.



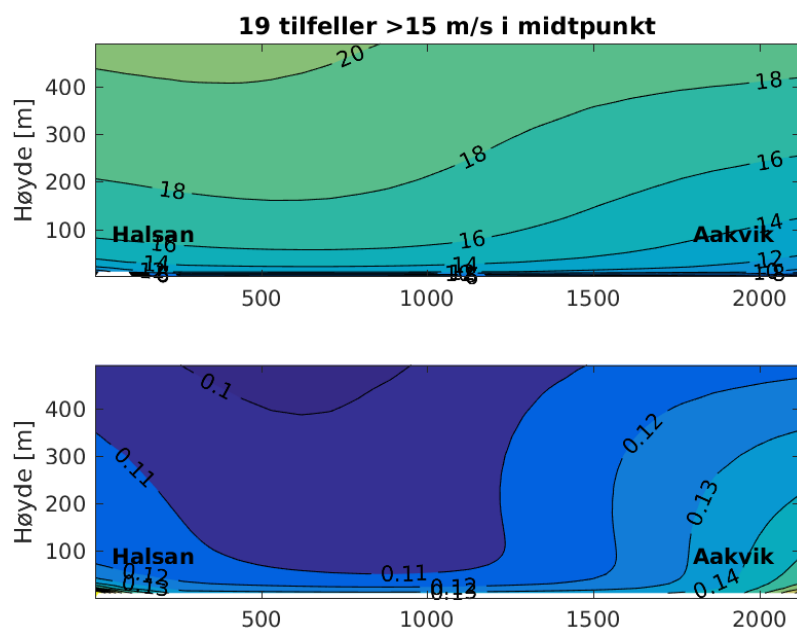
Figur 6.5: Tverrsnitt fra Halsaneset til Åkvik av 98-prosentdelen av vindstyrke [m/s] (venstre kolonne) og TI (høyre kolonne) for hver av fire vindretninger (øverst til nederst): nordvest ($270 - 0^\circ$), nordøst ($0 - 90^\circ$), sydøst ($90 - 180^\circ$) og sydvest ($180 - 270^\circ$). x-aksen angir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



Figur 6.6: Kvantilplott av TI fra SIMRA på tvers av fjorden fra Halsaneset til Åkvik. Linjene viser nivået til prosentdelene 50-99,5 som angitt.



Figur 6.7: Verdien av de laveste og høyeste 2% av den vertikale vindkomponenten [m/s] fra SIMRA langs tverrsnitt Halsaneset til Åkvik.



Figur 6.8: *Middelverdi av vindstyrke [m/s] (øverst) og TI (nederst) mellom Halsaneset og Åkvik for de 19 situasjonene i 2018 hvor vinden i midten av fjorden er større enn eller lik 15 m/s.*

7 Stormer

I dette kapitlet har vi sett etter vær-situasjoner i 2018 med målt sterk vind i mastene. I Halsafjorden er tilfellene med målt sterk vind dominert av sørlig vind ut fjorden. Vi har for denne fjorden valgt tre tilfelle, alle med sørlig vind. Vi viser kart og snitt fra SIMRA, noen kart fra AROME-MEPS og sammenligner tidsserier fra mastene med tidsserier fra begge modellene. For tidsseriene har vi også tatt ut statistikk for en periode på fire døgn rundt dagen med sterkest vind.

- 15. januar 2018 var en jevnt sørlig situasjon i Halsafjorden hvor vinden i midten av fjorden var 17,2 m/s i SIMRA, det kraftigste for dette punktet i den modellerte perioden.
- 15. februar 2018 var det også sørlig vind i fjorden, men noe svakere enn i januar. SIMRA har 11,2 m/s som den høyeste verdi i 70 m i midten av fjorden.
- 10. november 2018 var det også sørlig vind, en del svakere enn i januar. En annen forskjell er det i denne situasjonen var det målt to markante maksimum av sørlig vind, skilt av en periode med langt svakere østlig vind.

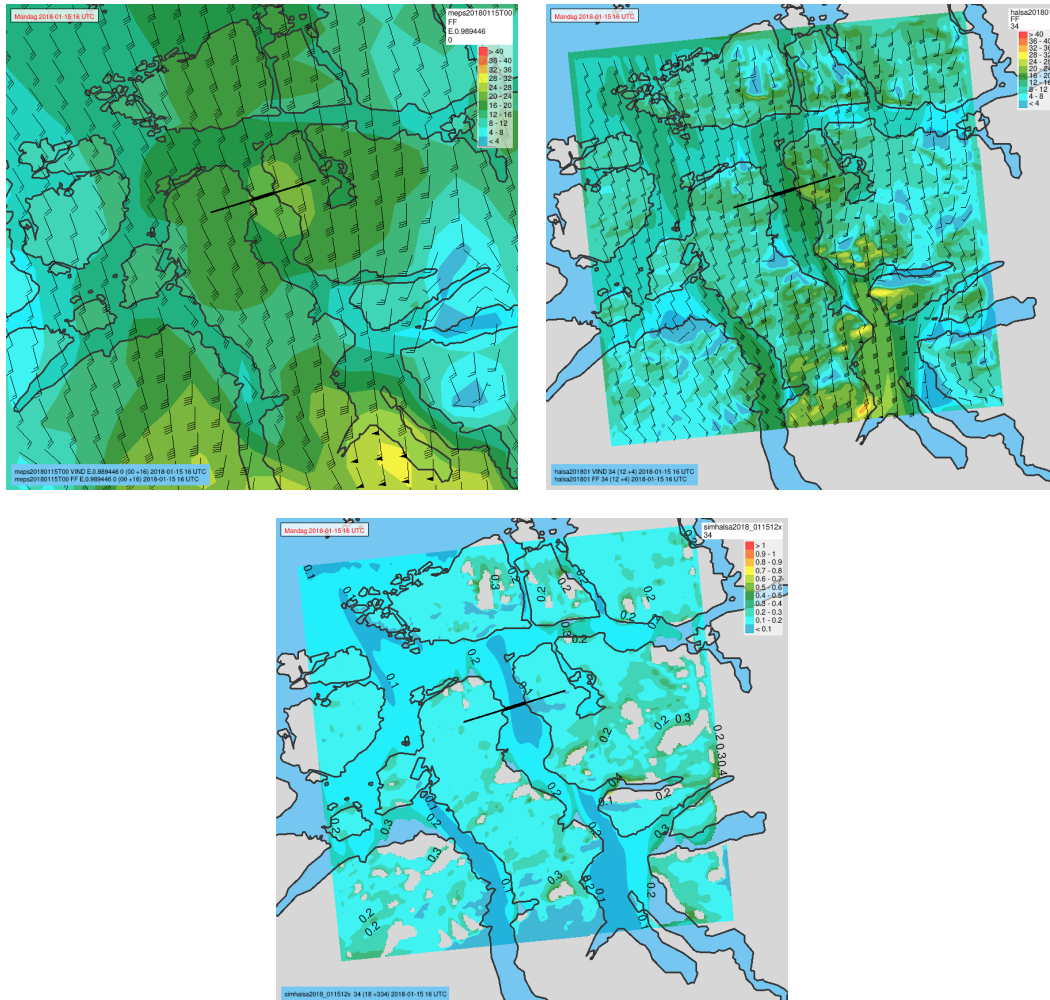
7.1 15. januar 2018

I denne situasjonen ligger et kraftig lavtrykk nær Jan Mayen. Over hele Sør-Norge er det sterk sørlig vind. På de to mastene i Halsafjorden ble det målt over 20 m/s i denne situasjonen. Godt over 20 m/s ble det også målt på mastene i drift i Sulafjorden, og denne stormen er en av de kraftigste i området i 2018.

Vi har tatt ut kart og tverrsnitt fra SIMRA av vind og turbulent kinetisk energi (7.1-7.3) for 15. januar 16 UTC som er det tidspunktet det ble målt sterkest vind i mastene. Kartene sammenholdt med tverrsnittet viser et maksimalområde for vind i rundt 400 meters høyde over Åkvik som strekker seg videre østover innover land. Et lignende maksimalområde så vi også i den samme vær-situasjonen over Sulafjorden (*Midtbø et al.*, 2020), og der knyttet vi det i diskusjonen til en markant temperaturinversjon rett over dette området. Når vi nå ser på modellen i Halsafjorden i løpet av samme vær-situasjonen i Halsafjorden, finner vi at maksimalvinden ikke er like sterk. Den lokale forsterkningen fra terrenget er ikke så markant der mastene står. Studerer vi et større område innover i fjorden ser vi at det her i Halsafjorden er en kraftig jet som ligger over fjorden. Det ser ut til at terrenget lenger innover i fjorden er med på å forsterke denne jetten. Også her er det en inversjon som ikke er like sterk som i Sulafjorden, men den bidrar nok til å holde den sterke vinden i lagene under 600-700 meter. Vi legger samtidig merke til at tubulensintensiteten er over 0,3 over terrenget øst for Åkvik. Kartet fra AROME-MEPS vist i 7.1 viser at denne modellen ikke har den sterke vinden og heller ikke de samme detaljene som SIMRA har sør for mastene og brutraseen. Selv om vi ikke har observasjoner utenom mastene å validere mot, velger vi å anta at SIMRA her har langt bedre beskrivelse av hvordan vinden er i området.

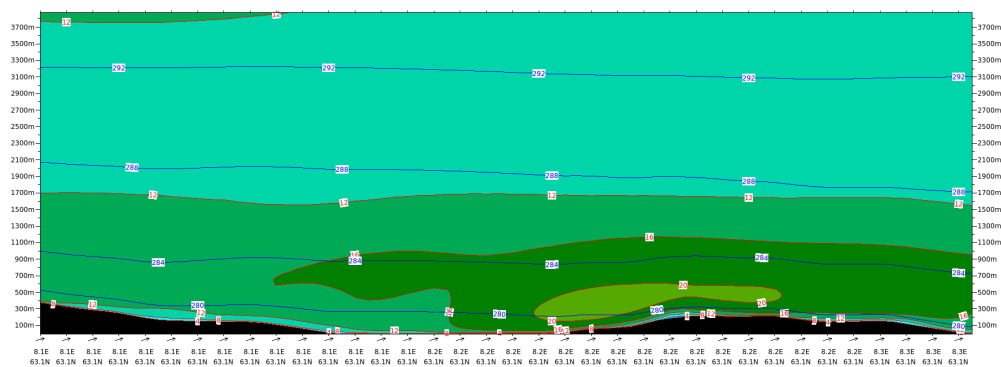
Når vi ser på figur 7.4 med tidsserier og konsentrerer oss om 15. januar, ser vi at AROME-MEPS har mer vind enn SIMRA først på dagen og treffer bedre med det. Siste del av dagen treffer begge modellene bedre. Samtidig underestimerer modellene vinden med unntak av tidspunktet der SIMRA har sterkest vind. Droppet i vind til 10 m/s i målingene sent på dagen er det bare SIMRA som tar.

Vi har også supplert visuell inspeksjon av kart og tverrsnitt med SDE og RMSE for perioden fra og med 14. januar til og med 17. januar. Dette er den samme statistikken som vi brukte for hele 2018 (se kapittel 4). Tolkning av denne type statistikk er vanskelig, særlig for korte perioder. Tabellen viser imidlertid at AROME-MEPS ligger nærmere observasjonene i de to mastene for de fire dagene sett under ett.

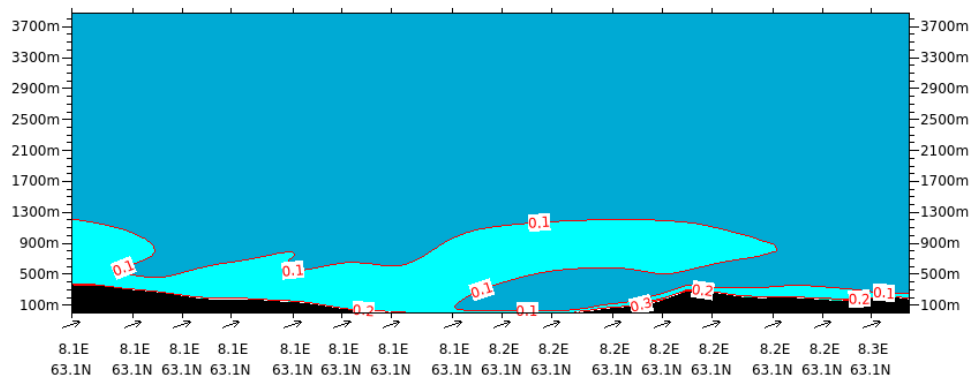


Figur 7.1: Vindstyrke [m/s] med vindpiler fra AROME-MEPS (øverst til venstre) og SIMRA (øverst til høyre) for Halsafjorden i 70 m over modelltopografien for 15. januar 2018 16 UTC. Vindpiler er plottet for hvert åttende gitterpunkt for SIMRA. Det nederste kartet viser TI fra Simra for det samme tidspunktet. Posisjonen for snittet er vist med en svart linje.

Tidsserier fra mastene og modellene er vist i figur 7.4 som dekker perioden fra 14. til 17. januar.



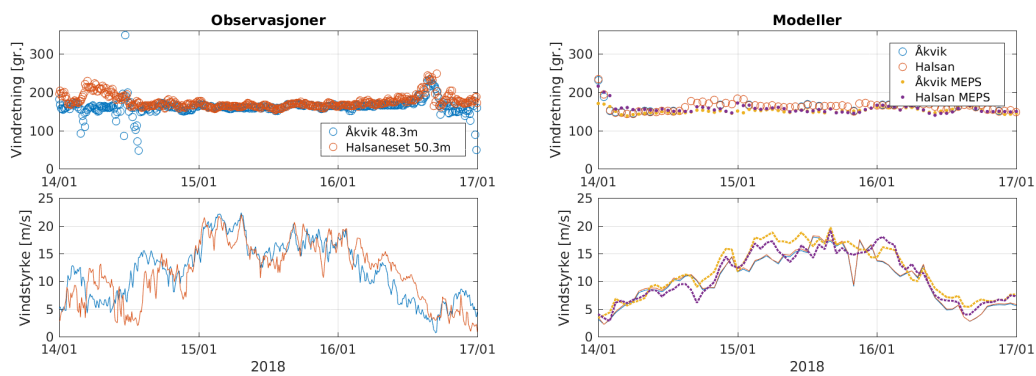
Figur 7.2: Vertikalt tverrsnitt av vindstyrke [m/s] normalt til tverrsnittet og blå isolinjer for potensiell temperatur [K] over Halsafjorden 15. januar 2018 16 UTC med SIMRA-modellen. Fargepalett for vindstyrke er vist i Figur 7.1.



Figur 7.3: Vertikalt tverrsnitt av TI for Halsafjorden for 15. januar 2018 16 UTC med SIMRA.

Mast	SDE SIMRA	SDE MEPS	RMSE SIMRA	RMSE MEPS
Halsaneset	3,0	2,8	3,4	3,0
Åkvik	3,8	3,5	4,6	3,5

Tabell 3: SDE og RMSE for SIMRA og AROME-MEPS under stormen 14.-17. januar 2018.



Figur 7.4: 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.

7.2 15. februar 2018

Også i denne situasjonen ligger et kraftig lavtrykk nær Jan Mayen som gir sterk sørlig vind i hele Sør-Norge. Vinden målt i mastene passerte såvidt 20 m/s på Halsaneset og stormen var nesten like kraftig i fjorden som for situasjonen en måned tidligere.

Vi har tatt ut kart og tverrsnitt fra SIMRA av vind og turbulent kinetisk energi (7.5-7.7). Kartene sammenholdt med tverrsnittet viser et maksimalområde for vind som nå ligger midt over fjorden og vesentlig høyere opp enn i den forrige situasjonen. Dette maksimalområdet er noe svakere med bare såvidt over 20 m/s i SIMRA. Maksimalområdet har en utløper ned mot 500 m høyde inn over terrenget i øst, men også dette er svakere enn det vi så 15. januar. Vi kan likevel merke oss at turbulensintensiteten ligger over 0,3 over terrenget rett øst for Åkvik, akkurat som i den første situasjonen.

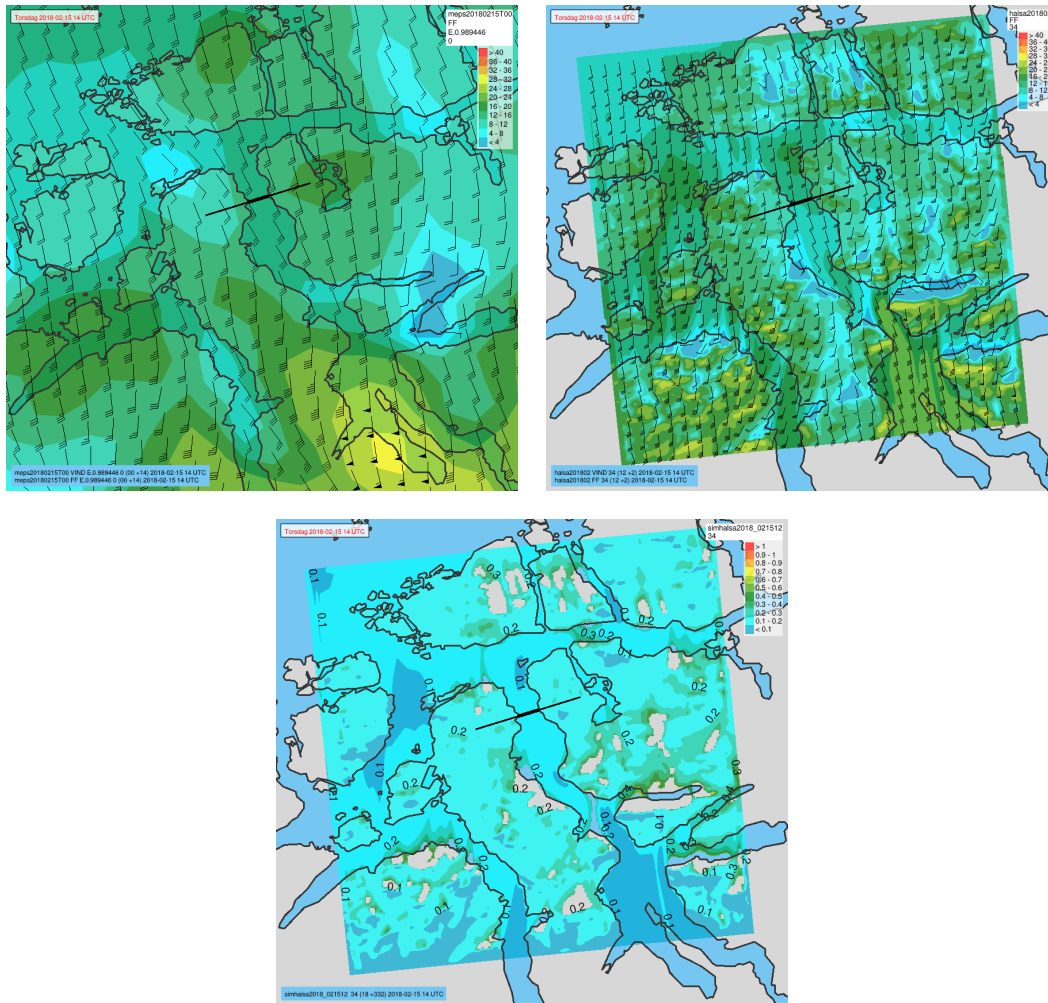
Når vi ser på figur 7.8 med tidsserier og konsentrerer oss om 15. februar, ser vi at modellen gir mye det samme varslet for hele dagen, og at de begge underestimerer vindstyrken. I målingene er det imidlertid en del detaljer siste del av dagen. Halsaneset får en vindøkning og vinddreining mot SSW. Rett etter faller vinden igjen og mest på Åkvik. Vi finner lite av disse detaljer i modellene.

Vi har også supplert visuell inspeksjon av kart og tverrsnitt med SDE og RMSE for perioden fra og med 14. februar til og med 17. februar. Med de samme forbehold vi nevnte i avsnitt 7.1, ser vi fra tabellen at statistikken for fire døgn gir mindre feil for SIMRA for Halsaneset mens AROME-MEPS er best for Åkvik.

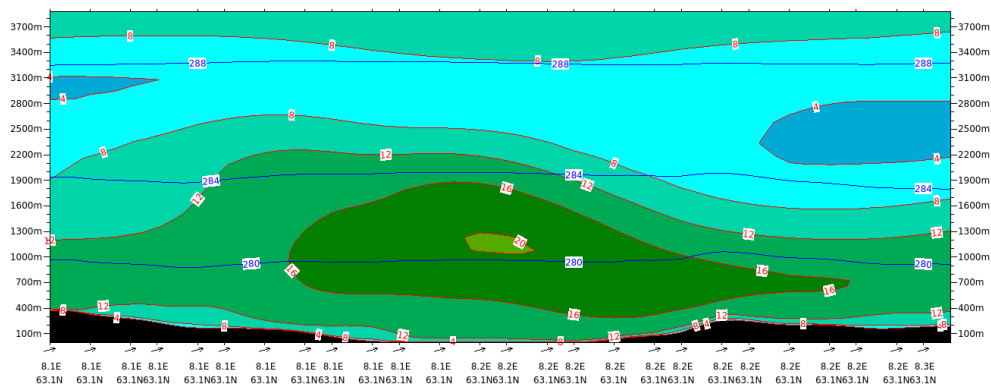
Tidsserier fra mastene og modellene er vist i figur 7.8 som dekker perioden fra 14. til 17. februar.

Mast	SDE SIMRA	SDE MEPS	RMSE SIMRA	RMSE MEPS
Halsaneset	2,7	3,0	2,8	3,2
Åkvik	3,7	3,2	3,8	3,2

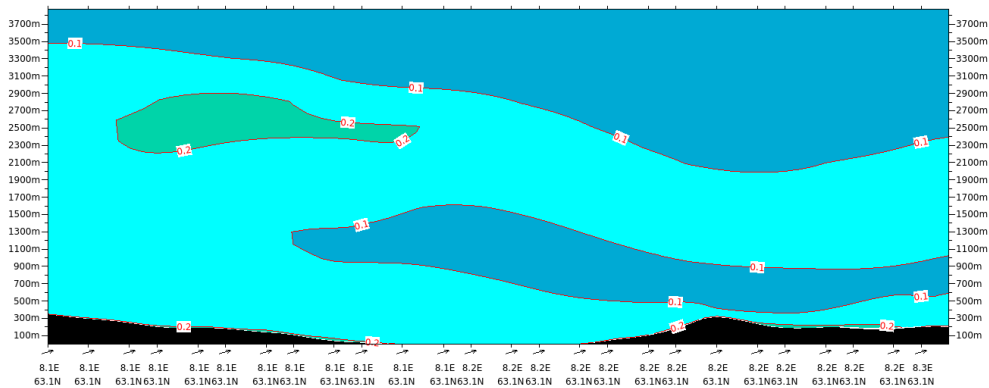
Tabell 4: SDE og RMSE for SIMRA og AROME-MEPS under stormen 14.-17. februar 2018.



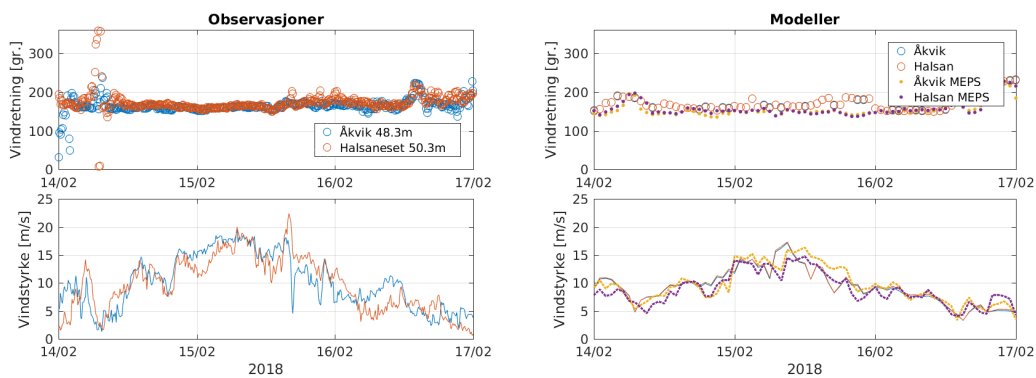
Figur 7.5: Figuren viser vindstyrke [m/s] med vindpiler fra AROME-MEPS (øverst til venstre) og SIMRA (øverst til høyre) for Halsafjorden i 70 m over modelltopografien for 15. februar 2018 14 UTC. Vindpiler er plottet for hvert åttende gitterpunkt for SIMRA. Det nederste kartet viser TI fra SIMRA for det samme tidspunktet. Posisjonen for snittet er vist med en tynn sort strek.



Figur 7.6: Vertikalt tverrsnitt av vindstyrke normalt til tverrsnittet og blå isolinjer for potensiell temperatur [K] for 15. februar 2018 14 UTC. Fargepalett er samme som i Figur 7.5.



Figur 7.7: Vertikalt tverrsnitt av TI 15. februar 2018 14 UTC.



Figur 7.8: 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.

7.3 10. november 2018

Igjen ligger et kraftig lavtrykk nær Jan Mayen. Det er sørlig vind over Sør-Norge, men det er en del forskjeller sammenlignet med de to første situasjonene.

Vi har igjen tatt ut kart og tverrsnitt fra SIMRA av vind og turbulent kinetisk energi (7.9-7.11). Kartene sammenholdt med tverrsnittet viser et maksimalområde for vind som nå ligger midt over fjorden og vesentlig høyere opp enn i den forrige situasjonen og vinden er bare såvidt over 20m m/s i SIMRA. Maksimalområdet har en utløper ned mot 500 m høyde inn over terrenget i øst, men også dette er svakere enn den 15. januar.

Når vi ser på figur 7.12 med tidsserier og konsentrerer oss om 10. november, ser vi at i modellene øker vinden først på dagen og avtar til kvelden med et maksimum på knappe 15 m/s. De underestimerer i forhold til mastene hvor det er målt sørlig vind 15-20 m/s mye av dagen, bortsett fra noen timer etter 12 UTC hvor vinden minker markant til 5 m/s for en periode og retningen i begge mastene blir omkring øst. Maksimal vind i målingene går litt over 20 m/s for Halsaneset første del av dagen. Siste del av dagen er bildet ganske så komplisert. SIMRA har et minimum i vindstyrken på omtrent rett tidspunkt og har også høyere vindstyrke igjen sist på dagen, noe som passer med observasjonene. AROME-MEPS har ikke modellert dette. SIMRA som modellerer vindstyrken best fanger likevel ikke opp dreiningen mot østlig vind som begge mastene måler.

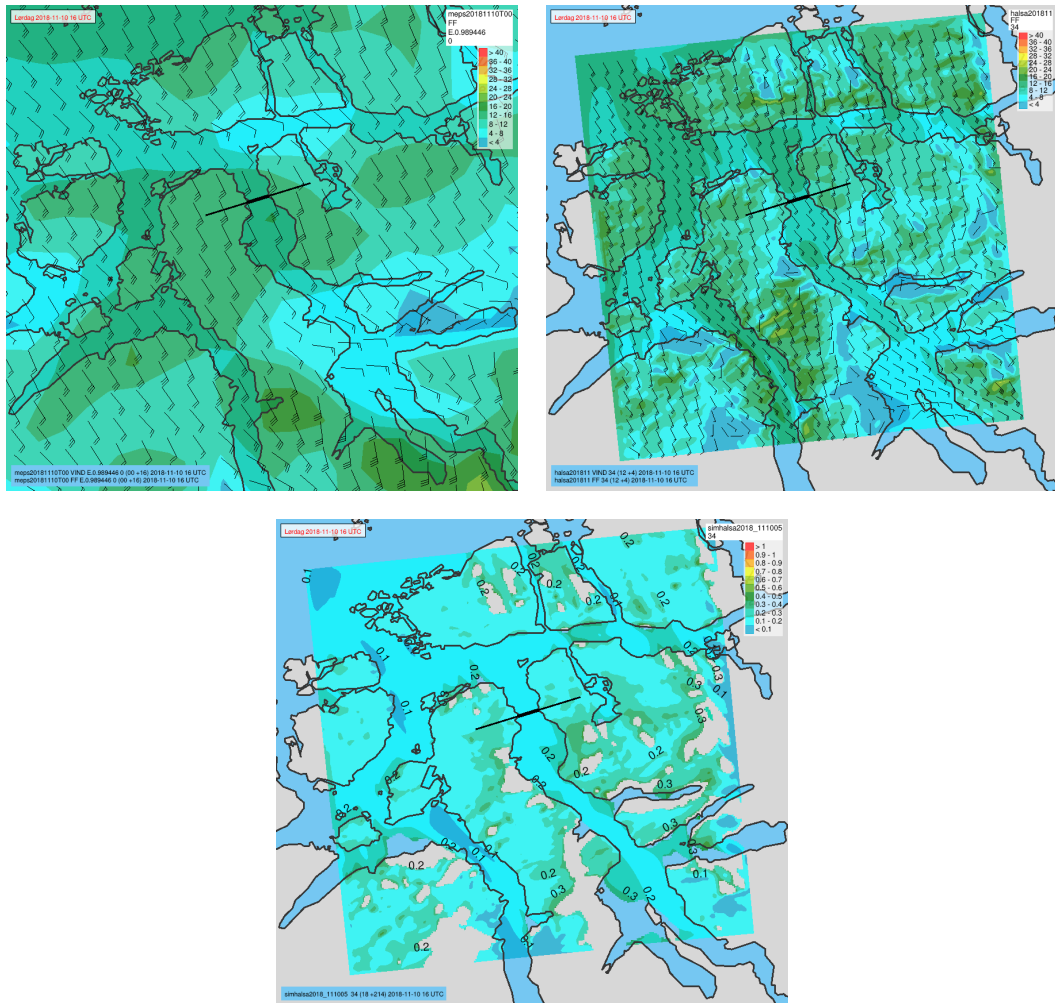
Fra kartene ser vi at SIMRA i motsetning til AROME MEPS gir redusert vind kombinert med økt turbulens sør for bruspenet (i et område som nedstrøms av Blåfjellet som ligger SSE for Åkvik). Vi har dessverre ikke målinger sør for bruspenet å validere mot. Dette eksemplet viser likevel at SIMRA med sin høye oppløsning ser ut til å gi detaljer vi finner støtte for i masteobservasjonene.

Vi har igjen supplert visuell inspeksjon av kart og tverrsnitt med SDE og RMSE for perioden fra og med 9. til og med 12. november. Med de samme forbehold vi nevnte i 7.1 ser vi fra tabellen at statistikken for fire døgn gir ganske lik feil for SIMRA og AROME-MEPS. Som en kuriositet mer enn noe signifikant ser vi at SDE er mindre for SIMRA enn AROME-MEPS for Åkvik, mens det er omvendt for Halsaneset.

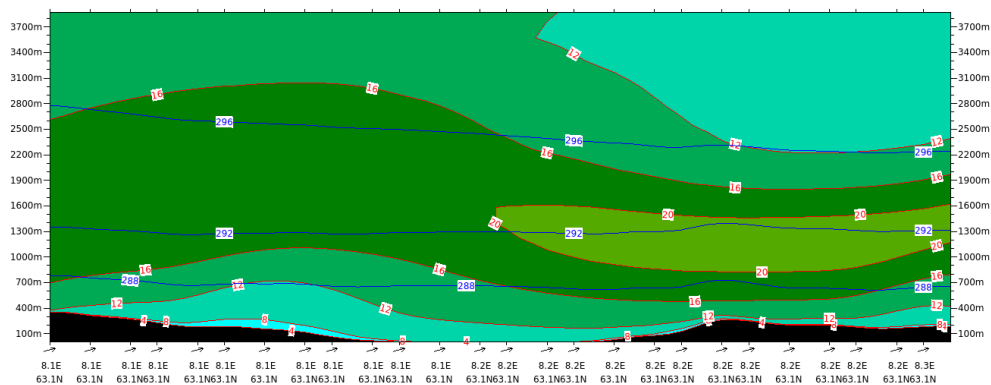
Tidsserier fra mastene og modellene er vist i figur 7.12 som dekker perioden fra 9. til 12. november.

Mast	SDE SIMRA	SDE MEPS	RMSE SIMRA	RMSE MEPS
Halsaneset	3,6	3,2	3,6	3,5
Åkvik	3,3	3,5	3,7	3,5

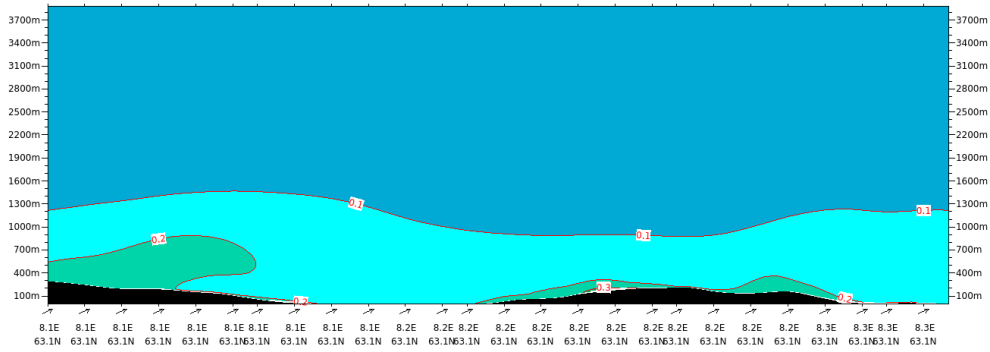
Tabell 5: SDE og RMSE for SIMRA og AROME-MEPS under stormen 9.-12. november 2018.



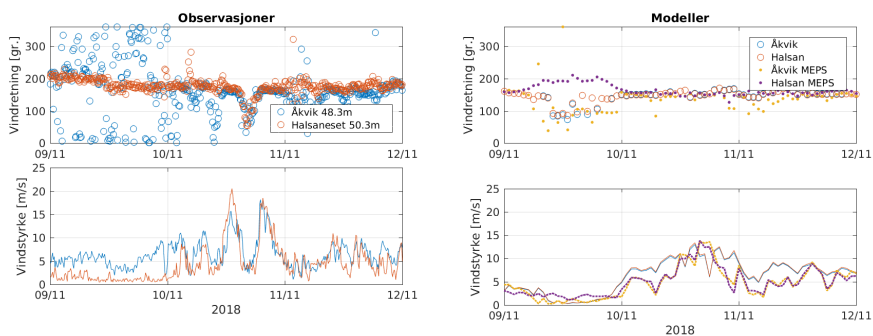
Figur 7.9: Figuren viser vindstyrke [m/s] med vindpiler fra AROME-MEPS (øverst til venstre) og SIMRA (øverst til høyre) for Halsafjorden i 70 m over modelltopografien for 10. november 2018 16 UTC. Vindpiler er plottet for hvert åttende gitterpunkt for SIMRA. Det nederste kartet viser TI fra SIMRA for det samme tidspunktet. Posisjonen for snittet er vist med en svart linje.



Figur 7.10: Vertikalt tverrsnitt av vindstyrke normalt til tverrsnittet og blå isolinjer for potensiell temperatur [K] for 10. november 2018 16 UTC fra SIMRA. Fargepalett som i Figur 7.9.



Figur 7.11: Vertikalt tverrsnitt for Halsaffjorden for 10. november 2018 16 UTC med SIMRA. Det er brukt en fargepalett der intervallet er 0,1.



Figur 7.12: 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.

8 Oppsummering

CFD-modellen SIMRA er kjørt for et år (2018) for området rundt Halsafjorden 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 vind fra begge modellene og presenterer resultater av vind og turbulensintensitet.

Basert på verifikasjonen mot målinger i mastene er det 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. SIMRA overestimerer vindstyrken for Åkvik og underestimerer for Halsaneset. SIMRA har litt bedre frekvensfordeling i vindstyrke for Halsaneset enn AROME-MEPS. For Åkvik har AROME-MEPS bedre frekvensfordeling enn SIMRA i sterk vind.

Modellene gir ganske like resultater for fordeling av vindretning for begge masteposisjonene. Det som også er tydelig er, at begge modellene når vinden er S eller SE har langt hyppigere SE sektor enn S. Modellene har også en større hyppighet av SW, W og NW enn det er i observasjonene. SIMRA har liten variasjon i både retning og styrke på tvers av fjorden, men retningsfordeling for midtpunktet av bruspenet med SE som den hyppigste sektoren bekreftes av LIDAR-målingene (*Kjeller Vindteknikk*, 2018). Det tyder på at SIMRA selv med 100 meter grid ikke har detaljer nok i beskrivelsen av terrenget nær mastene. På grunn av dette vil variasjonen langs bruspenet fra SIMRA mangle detaljer nær masteposisjonene.

Selve Halsafjorden ligger i nesten nord-sørlig retning og derfor delvis i le for de dominerende vindretningene. De høyeste verdiene for 98-prosentdelen av vindstyrke i observasjonene er (10-11 m/s), høyest for Åkvik. Dette klarer begge modellene å fange opp. Vindfeltet er rimelig homogent over fjorden med relativt lite turbulens. Når vinden er sørøstlig ligger brotraseen i le av Blåfjellet (902 m) mot sør (avsnitt 7.3).

Turbulensintensiteten beregnet fra SIMRA i 100 m for mastlokasjonene samsvarer godt med de tilsvarende analyser fra mastene i *Kjeller Vindteknikk* (2019a) med verdier opp til 0,25 ved vind fra SW.

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 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.

Vindklimaet i 2018 hadde hyppigere vind fra sør og muligvis 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

- Furevik, B. R., H. Ágústsson, A. Lauen Borg, and F. Nyhammer (2019), The E39 coastal highway observational dataset – atmospheric flow in complex coastal terrain in Mid-Norway [dataset], doi:<https://doi.org/10.21343/z9n1-qw63>.
- Furevik, B. R., H. Ágústsson, A. Lauen Borg, M. Zakari, F. Nyhammer, and M. Gausen (2020), Meteorological observations in tall masts for mapping of atmospheric flow in Norwegian fjords, *Earth System Science Data Discuss*, doi:<https://doi.org/10.5194/essd-2020-32>, in review.
- Kjeller Vindteknikk (2018), *E39, Halsaffjorden, Møre og Romsdal county. Analysis of LIDAR derived wind measurements September 2017 – June 2018*, Rapport nr. KVT/HÁ/2018/R065 Rev2.
- Kjeller Vindteknikk (2019a), *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 (2019b), *E39, brukryssninger Julsundet og Halsaffjorden, Møre og Romsdal. Statusrapport for vindmålinger pr desember 2018*, Rapport nr. KVT/HÁ/2019/R010 .
- Midtbø, K. H., B. R. Furevik, and L. Østvand (2020), *Finskalamodellering av vind i fjorder. Sulaffjorden og Vartdalsfjorden 2018, MET report nr. 05/2020*, 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>.

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