



FORORD

Denne masteroppgaven er en analyse av meteorologiske data fra Statkrafts vindpark Kjøllefjord, og er ment å utforske sammenhengen mellom parametere som vind, vindskjær, turbulens, temperatur og stabilitet som vil påvirke energiproduksjonen i parken. Kjeller Vindteknikk har tidligere analysert vind- og produksjonsdata fra Kjøllefjord i forbindelse med et forskningsprosjekt med Statkraft og Universitetet i Oslo, og det har gjennom disse innledende analysene framkommet problemstillinger som danner grunnlag for denne masteroppgaven.

Jeg vil gjerne rette en stor takk til Kjeller Vindteknikk for at de har latt meg ta del i forskningsprosjektet deres, og for deres innspill til problemstillingen i denne oppgaven. Jeg var så heldig å bli introdusert i prosjektet gjennom min sommerjobb på Kjeller, og jeg er takknemlig for at jeg fikk arbeide videre med problemstillingene ved Kjøllefjord vindpark.

En spesielt stor takk rettes til min veileder hos KVT, Dr. Erik Berge, for hans gode faglige veiledning under arbeidet med denne oppgaven. Han har vært en uvurderlig ressurs med sin kunnskap innen meteorologi, og gitt mange viktige innspill under drøftingen av resultatene. Takk rettes også til Dr. Ove Undheim (KVT) for forbehandlingen av datasettene fra målemastene i vindparken, og til Øyvind Byrkjedal (KVT) som stod for WRF-kjøringen. Begge to har vært til stor hjelp i analysearbeidet. Jeg vil også takke de andre gode kollegaene mine på Kjeller Vindteknikk for det gode arbeidsmiljøet og for all deres hjelp underveis.

Videre vil jeg også takke min veileder ved NMBU, Prof. Tor Anders Nygaard, for hans gode råd underveis og innspill til drøftingen.

Sist, men ikke minst, vil jeg gjerne takke min søster Alexandra for at hun korrekturleste oppgaven min, og alle de flotte masterstudentene ved IMT som har underholdt og hjulpet meg gjennom semesteret.

Ås, 14. mai 2013

Elisabeth Østreng

ABSTRACT

In this thesis, meteorological measurements from the Kjøllefjord wind farm and data from the mesoscale model WRF has been analysed. The period subject of analysis is from March 2007 to June 2009.

Introductory analyses by Kjeller Vindteknikk revealed large differences in wind speed between the two meteorological masts in the measurement period, and this thesis' goal was to investigate if these differences were related to stability or boundary layer height. A classification of the stability could not be obtained through measurements at the site, thus data from the WRF model was utilized. Data from the model was also compared directly with measurements from the site, to evaluate if WRF was able to display the trends observed in the wind climate at Kjøllefjord.

The characterization of the stability at Kjøllefjord, based on calculated values of the Richardson number, was 16,5 % : 48,1 % : 35,4 % (unstable : neutral : stable). This characterization could not be validated without observations from the site.

Through the thesis work, five periods subject of further analysis was selected. These periods represented different stability regimes, seasons and wind directions. Through each period, wind speed, direction, wind shear and temperature from WRF was compared with measurements from the site. WRF was able to simulate some of the observed winds, but there were several periods where the differences were quite large, especially regarding the wind speed and shear. It is likely that the terrain effects and the surface roughness at Kjøllefjord are not modelled well enough in WRF.

Through the five chosen periods, measurements of wind speed, shear and turbulence intensity from the two masts were compared. There were several periods with higher wind speed at the KVT mast compared to the Siemens-mast, and these periods had mostly winds from southwest, stable conditions and low PBL-height. These periods also had higher observed turbulence intensity at the Siemens mast.

Periods with the highest wind speed at the Siemens mast had a higher frequency of wind from west and northwest, and had mostly neutral conditions. In these periods, the KVT mast might be in the wake region of several local hills.

The differences in wind speed through the whole period were categorized according to the stability. The results showed a higher share of stable conditions when the wind speed was higher at the KVT mast, but there was also a high share of neutral conditions. The differences in wind speed were also categorized according to the PBL-heights. The results showed a higher share of low PBL-heights with higher wind speed at the KVT mast.

The PBL-height and stability at the site are related, and from the results it is not possible to assess which factor influences the differences the most and if the same trends can be observed for other wind directions than south and southwest.

SAMMENDRAG

I denne masteroppgaven har meteorologiske data fra Kjøllefjord vindpark og data fra mesoskalamodellen WRF blitt analysert. Analyseperioden er fra mars 2007 til juni 2009.

Innledende analyser utført av Kjeller Vindteknikk viste store hastighetsforskjeller mellom de to vindmålemastene i parken i måleperioden, og denne oppgaven skulle utforske om disse forskjellene kunne relateres til stabilitet eller grenselagshøyde. Målingene fra parken kunne ikke brukes til å beregne disse parametrene, derfor ble verdier fra mesoskalamodellen WRF benyttet. Simulerte verdier fra modellen ble også sammenlignet direkte med målinger fra parken, for å se om WRF klarte å gjenskape trendene i det observerte vindklimaet.

Karakteriseringen av stabiliteten på Kjøllefjord, basert på beregnede verdier av Richardson-tallet, gav fordelingen 16,5 % : 48,1 % : 35,4 % (ustabil : nøytral : stabil). Uten observasjoner fra parken kunne ikke denne stabilitetsfordelingen valideres.

Det har i oppgaven blitt valgt ut fem caseperioder som skulle analyseres nærmere. Disse periodene ble valgt ut fordi de representerte forskjellige stabilitetsforhold, sesonger og vindretninger. I hver caseperiode ble vindhastighet, vindretning, vindskjær og temperatur fra WRF sammenlignet med målinger fra hver av målemastene. WRF klarte tidvis å gi riktige verdier, men det var flere perioder med stor forskjell mellom modellen og målingene, spesielt for vindhastigheten og vindskjæret. Det skyldes trolig at terrengeffekter og overflateruhet på Kjøllefjord ikke er godt nok oppløst i modellen.

I de fem caseperiodene ble også målinger av vindhastighet, vindskjær og turbulensintensitet fra de to mastene sammenlignet. Det ble funnet flere perioder med høyere vindhastighet i KVT-masten enn i Siemens-masten, disse periodene ble i stor grad karakterisert av vind fra sørvest, stabile forhold og lav grenselagshøyde. I periodene ble det også observert høyere turbulensintensitet i Siemens-masten.

Periodene med høyest vind ved Siemens-masten hadde en større andel av vind fra vest og nordvest, og størst hyppighet av nøytral sjiktning. I disse periodene kan KVT-masten ligge i vake fra flere lokale topper.

Hastighetsforskjeller gjennom hele måleperioden ble klassifisert ut fra stabiliteten fra WRF. Resultatene viste en større hyppighet av stabile forhold når det var høyest hastighet ved KVT-masten, men det var også stor hyppighet av nøytrale forhold.

Hastighetsforskjellene gjennom hele måleperioden ble også klassifisert ut fra grenselagshøyden. Her viste resultatene en større hyppighet av lave grenselagshøyder ved høyest vindhastighet ved KVT-masten.

Grenselagshøyden og stabiliteten i parken henger sammen, og fra resultatene har det ikke vært mulig å avgjøre hvilken faktor som påvirker hastighetsforskjellene mest og om samme trend kan observeres for andre retningssektorer enn sør og sørvest.

INNHALDSFORTEGNELSE

Forord	1
Abstract.....	3
Sammendrag	4
Oversikt over figurer	8
Oversikt over tabeller	14
Forkortelser	15
1 Innledning.....	17
1.1 Bakgrunn.....	17
1.2 Målsetting	18
1.3 Presenterte data.....	19
1.4 Oppbygging av oppgaven	19
2 Kjøllefjord vindpark.....	21
2.1 Topografi.....	22
2.2 Vindklima.....	22
3 Teori: Numeriske værvarslingsmodeller og WRF	24
3.1 Mikro-, meso- og makroskala	24
3.2 Numeriske værvarslingsmodeller	24
3.2.1 Mesoskala meteorologiske modeller.....	25
3.3 The Weather Research and Forecast model (WRF).....	26
3.3.1 Hydrostatiske og ikke-hydrostatiske modeller.....	26
3.3.2 Koordinatsystemet sigma.....	27
3.3.3 Inngangsdata	28
3.3.4 Utgangsdata og oppsett av modellen	28
4 Teori: Vind, turbulens og stabilitet i grenselaget	30
4.1 Det atmosfæriske grenselaget.....	30
4.1.1 Det blandede laget.....	31
4.1.2 Residuallaget.....	31
4.1.3 Det stabile grenselaget.....	31
4.2 Turbulens.....	31
4.2.1 Turbulensintensitet.....	33
4.3 Potensiell og virtuell temperatur.....	33
4.4 Stabilitet	34
4.4.1 Statisk stabilitet.....	34
4.4.2 Dynamisk stabilitet	35
4.4.3 Richardson-tallet.....	35
4.4.4 Obukhov-lengden	37
4.4.5 Pasquills stabilitetsklasser.....	38
4.5 Vind og vertikal vindprofil.....	39
4.5.1 Vertikal vindprofil.....	40
4.5.2 Stabilitetseffekter og grenselagshøyde.....	41

4.5.3	Overflateruhet	42
4.5.4	Overflatetemperatur og snødekke	43
4.5.5	Vind over bakketopper og komplekst terreng.....	43
5	Teori: Energi fra vind	45
6	Metode og datamateriale.....	47
6.1	Beskrivelse av datamateriale.....	47
6.1.1	Data fra KVT-Masten.....	47
6.1.2	Data fra Siemens-masten	49
6.1.3	Data fra WRF.....	50
6.1.4	Rotering i forhold til grid	55
6.1.5	Interpolering til relevante høyder.....	55
6.2	Dataanalyse.....	55
6.2.1	Datautvelgelse og korrigering av måledata og WRF-data	56
6.2.2	Beregning av stabilitetsparametere gjennom måleperioden.....	56
6.2.3	Klassifisering ut fra Pasquills stabilitetsklasser	57
6.2.4	Utvalgte caseperioder.....	57
6.2.5	Sammenligning av stabilitetsklasser og vindklima.....	58
7	Resultater og diskusjon	60
7.1	Stabilitetsforhold på Kjøllefjord	61
7.1.1	Resultater.....	61
7.1.2	Diskusjon: Stabilitet fra WRF og stabilitetsforhold på Kjøllefjord.....	61
7.2	Case 1: 04.01.2008 – 06.01.2008	64
7.2.1	Beskrivelse av caseperiode 1.....	64
7.2.2	Resultater: Sammenligning målinger og WRF.....	64
7.2.3	Resultater: Grenselagshøyde og stabilitet.....	68
7.2.4	Resultater: Sammenligning mellom målemastene.....	70
7.2.5	Diskusjon av resultater fra caseperiode 1	72
7.3	Case 2: 09.02.2008 – 11.02.2008	74
7.3.1	Beskrivelse av caseperiode 2.....	74
7.3.2	Resultater: Sammenligning målinger og WRF.....	74
7.3.3	Resultater: Grenselagshøyde og stabilitet.....	78
7.3.4	Resultater: Sammenligning mellom målemastene.....	80
7.3.5	Diskusjon av resultater fra caseperiode 2	82
7.4	Case 3: 26.12.2008 – 28.12.2008.....	84
7.4.1	Beskrivelse av caseperiode 3.....	84
7.4.2	Resultater: Sammenligning målinger og WRF.....	84
7.4.3	Resultater: Grenselagshøyde og stabilitet.....	88
7.4.4	Resultater: Sammenligning mellom målemastene.....	90
7.4.5	Diskusjon av resultater fra caseperiode 3	92
7.5	Case 4: 07.08.2007 – 09.08.2007	94
7.5.1	Beskrivelse av caseperiode 4.....	94
7.5.2	Resultater: Sammenligning målinger og WRF.....	94
7.5.3	Resultater: Grenselagshøyde og stabilitet.....	98
7.5.4	Resultater: Sammenligning mellom målemastene.....	100
7.5.5	Diskusjon av resultater fra caseperiode 4	102

7.6	Case 5: 06.07.2007 – 08.07.2007	104
7.6.1	Beskrivelse av caseperiode 5.....	104
7.6.2	Resultater: Sammenligning målinger og WRF.....	104
7.6.3	Resultater: Grenselagshøyde og stabilitet.....	108
7.6.4	Resultater: Sammenligning mellom målemastene.....	110
7.6.5	Diskusjon av resultater fra caseperiode 5.....	112
7.7	Samlede resultater fra caseperiodene	113
7.7.1	Diskusjon av samlede resultater fra caseperiodene: Vurdering av vindklima i WRF-modellen.....	115
7.7.2	Diskusjon av samlede resultater fra caseperiodene: Sammenligning mellom mastene...	117
7.8	Hastighetsforskjeller og stabilitet	119
7.8.1	Diskusjon: Hastighetsforskjeller og stabilitet.....	122
7.9	Hastighetsforskjeller og grenselagshøyde.....	123
7.9.1	Diskusjon: Hastighetsforskjeller og grenselagshøyde.....	125
8	Konklusjoner	127
9	Forslag til videre arbeid	129
10	Kilder	130
11	Vedlegg	133
11.1	Oversiktskart og modelldomene i WRF.....	133
11.2	Vindrose og Weibull-fordeling.....	135
11.3	Meteorologiske kart fra caseperiodene.....	136

OVERSIKT OVER FIGURER

Figur 2.1: Oversiktskart over vindparken på Kjøllefjord, med plasseringen av målemastene. Utarbeidet av Kjeller Vindteknikk.	21
Figur 2.2: Terrenget på Dyfjordhalvøya sett fra Vindhamran, med Kjøllefjord vindpark i det fjerne. Hentet fra http://www.tu.no/nyheter/energi/2005/09/21/bygger-vindpark-i-finnmark	22
Figur 3.1: Høyde over havnivå for sigma-flater over et horisontalt rutenett. De nederste sigma-flatene følger terrenget ved jordoverflaten, mens sigma-flatene lenger oppe vil flate ut. Hentet fra UCAR (2002).	27
Figur 3.2: Oppbygningen av rutenettet i WRF, og oversikt over punktene de ulike variablene beregnes i. Hentet fra Wildland Fire Modeling (2012).	29
Figur 4.1: Strukturen og utviklingen til det atmosfæriske grenselaget når strålingsbalansen forandrer seg gjennom døgnet. Grenselaget består av et stabilt grenselag (SBL), et blandet lag (ML) og et residuallag (RL). Figuren viser også innblandingssonen ("entrainment zone") og inversjonssonen ("capping inversion"). Hentet fra Stull (2005).	30
Figur 4.2: Sammenhengen mellom bulk Richardson-tallet (RB) over et luftlag og sannsynligheten for at turbulens ("Clear air turbulence") skal oppstå i det luftlaget. Figuren er hentet fra Stull (1989 s. 178) og er basert på empiriske data.	36
Figur 4.3: Sammenhengen mellom Richardson-tallet og statisk stabilitet, dynamisk stabilitet og strømning. Ruten markert "Begge" indikerer at strømningen kan være enten laminær eller turbulent for disse Ri-verdiene, avhengig av utgangspunktet. Basert på figur 5.24 i Stull (1989 s. 186).	36
Figur 4.4: Vertikal profil for vindhastigheten i en nøytral atmosfære. Hentet fra Twidell og Weir (2006 s. 294).	40
Figur 4.5: (b), (c) og (d) viser vertikal hastighetsprofil og strukturen av turbulente virvler ved ulike stabilitetsforhold. (e) viser de tre vindprofilene plottet mot en logaritmisk høydeskala. Hentet fra Beljaars (1992 s. 5).	41
Figur 4.6: Utviklingen av det interne grenselaget og den vertikale vindprofilen etter en overgang mellom to områder med ulik overflateruhet. z_0 og u^* er ruhetslengden og friksjonshastigheten ved hver av overflatene. Hentet fra Arya (2001 s. 322).	43
Figur 5.1: Betz-modellen av en luftstrøm som passerer gjennom og forbi en vindturbin. Hentet fra Twidell og Weir (2006 s.294).	45
Figur 7.1: Vindhastigheten i 51 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Differansen mellom mastene er vist som den oransje linjen.	65
Figur 7.2: Vindhastigheten i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Differansen mellom mastene er vist som den oransje linjen.	65
Figur 7.3: Vindretning i 43/48 m høyde i KVT-masten (svart linje) og 61 m høyde fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008.	66
Figur 7.4: Vindretningen i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og i 61 m høyde fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008.	66

Figur 7.5: Glidende timesmiddelverdi for vindskjæret i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) for perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Differansen mellom mastene er vist som den oransje linjen.	67
Figur 7.6: Glidende timesmiddelverdi for vindskjæret i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) for perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Differansen mellom mastene er vist som den oransje linjen.	67
Figur 7.7: Temperaturen i 10 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punkt T15 (rød linje). Temperaturen i 2 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punkt KVT (grønn linje). Perioden er 04.01.2008 til 06.01.2008.....	68
Figur 7.8: Grenselagshøyde fra WRF-punkt 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008.	69
Figur 7.9: Vertikale profiler for den virtuelle potensielle temperaturen fra WRF-punktene 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Profilene er plottet for hver sjettede gjennom perioden.....	69
Figur 7.10: Pasquill-klasser i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Klassene basert på Ri fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som blå og rød linje, mens klassene basert på L fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som svart og grønn linje.	70
Figur 7.11: Vindhastighet i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Differansen er vist som den oransje linjen.....	71
Figur 7.12: Glidende timesmiddel for vindskjæret i KVT-masten (rød linje) og i Siemens-masten (blå linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Differansen er vist som den oransje linjen.....	71
Figur 7.13: Glidende timesmiddel for turbulensintensiteten i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008.	72
Figur 7.14: Vindhastigheten i 51 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.	75
Figur 7.15: Vindhastigheten i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.	75
Figur 7.16: Vindretning i 43/48 m høyde i KVT-masten (svart linje) og 61 m høyde fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008.	76
Figur 7.17: Vindretningen i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og i 61 m høyde fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008.	76
Figur 7.18: Glidende timesmiddelverdi for vindskjæret i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) for perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.....	77
Figur 7.19: Glidende timesmiddelverdi for vindskjæret i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) for perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.....	77

Figur 7.20: Temperaturen i 10 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punkt T15 (rød linje). Temperaturen i 2 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punkt KVT (grønn linje). Perioden er 09.02.2008 til 11.02.2008.....	78
Figur 7.21: Grenselagshøyde fra WRF-punkt 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008.	79
Figur 7.22: Vertikale profiler for den virtuelle potensielle temperaturen fra WRF-punktene 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Profilene er plottet for hver sjettede gjennom perioden.....	79
Figur 7.23: Pasquill-klasser i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Klassene basert på Ri fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som blå og rød linje, mens klassene basert på L fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som svart og grønn linje.	80
Figur 7.24: Vindhastighet i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Differansen er vist som den oransje linjen.....	81
Figur 7.25: Glidende timesmiddel for vindskjæret i KVT-masten (rød linje) og i Siemens-masten (blå linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Differansen er vist som den oransje linjen.....	81
Figur 7.26: Glidende timesmiddel for turbulensintensiteten i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008.	82
Figur 7.27: Vindhastigheten i 51 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.	85
Figur 7.28: Vindhastigheten i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.	85
Figur 7.29: Vindretning i 43/48 m høyde i KVT-masten (svart linje) og 61 m høyde fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008.	86
Figur 7.30: Vindretningen i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og i 61 m høyde fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008.	86
Figur 7.31: Glidende timesmiddelverdi for vindskjæret i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) for perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.....	87
Figur 7.32: Glidende timesmiddelverdi for vindskjæret i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) for perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.....	87
Figur 7.33: Temperaturen i 10 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punkt T15 (rød linje). Temperaturen i 2 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punkt KVT (grønn linje). Perioden er 26.12.2008 til 28.12.2008.....	88
Figur 7.34: Grenselagshøyde fra WRF-punkt 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008.	89

Figur 7.35: Vertikale profiler for den virtuelle potensielle temperaturen fra WRF-punktene 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Profilene er plottet for hver sjettede time gjennom perioden.....	89
Figur 7.36: Pasquill-klasser i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Klassene basert på Ri fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som blå og rød linje, mens klassene basert på L fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som svart og grønn linje.	90
Figur 7.37: Vindhastighet i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Differansen er vist som den oransje linjen.....	91
Figur 7.38: Glidende timesmiddel for vindskjæret i KVT-masten (rød linje) og i Siemens-masten (blå linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Differansen er vist som den oransje linjen.....	91
Figur 7.39: Glidende timesmiddel for turbulensintensiteten i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008.....	92
Figur 7.40: Vindhastigheten i 51 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.	95
Figur 7.41: Vindhastigheten i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.	95
Figur 7.42: Vindretning i 43/48 m høyde i KVT-masten (svart linje) og 61 m høyde fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007.	96
Figur 7.43: Vindretningen i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og i 61 m høyde fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007.	96
Figur 7.44: Glidende timesmiddelverdi for vindskjæret i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) for perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.....	97
Figur 7.45: Glidende timesmiddelverdi for vindskjæret i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) for perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.....	97
Figur 7.46: Temperaturen i 10 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punkt T15 (rød linje). Temperaturen i 2 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punkt KVT (grønn linje). Perioden er 07.08.2007 til 09.08.2007.....	98
Figur 7.47: Grenselagshøyde fra WRF-punkt 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007.	99
Figur 7.48: Vertikale profiler for den virtuelle potensielle temperaturen fra WRF-punktene 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Profilene er plottet for hver sjettede time gjennom perioden.....	99
Figur 7.49: Pasquill-klasser i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Klassene basert på Ri fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som blå og rød linje, mens klassene basert på L fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som svart og grønn linje.	100

Figur 7.50: Vindhastighet i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Differansen er vist som den oransje linjen.....	101
Figur 7.51: Glidende timesmiddel for vindskjæret i KVT-masten (rød linje) og i Siemens-masten (blå linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Differansen er vist som den oransje linjen.....	101
Figur 7.52: Glidende timesmiddel for turbulensintensiteten i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007.....	102
Figur 7.53: Vindhastigheten i 51 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.	105
Figur 7.54: Vindhastigheten i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.	105
Figur 7.55: Vindretning i 43/48 m høyde i KVT-masten (svart linje) og 61 m høyde fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007.	106
Figur 7.56: Vindretningen i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og i 61 m høyde fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007.	106
Figur 7.57: Glidende timesmiddelverdi for vindskjæret i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) for perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.....	107
Figur 7.58: Glidende timesmiddelverdi for vindskjæret i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) for perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.....	107
Figur 7.59: Temperaturen i 10 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punkt T15 (rød linje). Temperaturen i 2 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punkt KVT (grønn linje). Perioden er 06.07.2007 til 08.07.2007.....	108
Figur 7.60: Grenselagshøyde fra WRF-punkt 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007.	109
Figur 7.61: Vertikale profiler for den virtuelle potensielle temperaturen fra WRF-punktene 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Profilene er plottet for hver sjettede time gjennom perioden.....	109
Figur 7.62: Pasquill-klasser i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Klassene basert på Ri fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som blå og rød linje, mens klassene basert på L fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som svart og grønn linje.	110
Figur 7.63: Vindhastighet i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Differansen er vist som den oransje linjen.....	111
Figur 7.64: Glidende timesmiddel for vindskjæret i KVT-masten (rød linje) og i Siemens-masten (blå linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Differansen er vist som den oransje linjen.....	111
Figur 7.65: Glidende timesmiddel for turbulensintensiteten i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007.....	112

Figur 7.66: Hyppigheten av de 8 klassene for hastighetsforskjell mellom KVT-masten og Siemens-masten, fordelt ut fra stabilitetsklassene A-G. Skalaen på Y-aksen er logaritmisk	120
Figur 7.67: Middelvinden hver time ved KVT-masten plottet mot middelvinden ved Siemens-masten. Dataene er sortert ut fra Pasquill-klassene A-G, basert på grensene for Ri fra WRF-punkt 4010.	120
Figur 7.68: Hyppigheten av de 8 klassene for hastighetsforskjell mellom WRF-punkt KVT og T15, fordelt ut fra stabilitetsklassene A-G. Skalaen på Y-aksen er logaritmisk.....	121
Figur 7.69: Middelvinden hver time fra WRF-punkt KVT plottet mot middelvinden ved WRF-punkt T15. Dataene er sortert ut fra Pasquill-klassene A-G, basert på grensene for Ri fra WRF-punkt 4010.	121
Figur 7.70: Hyppigheten av de 8 klassene for hastighetsforskjell mellom KVT-masten og Siemens-masten, fordelt ut fra klassene for grenselagshøyde (PBLH) 1-5. Skalaen på Y-aksen er logaritmisk.	123
Figur 7.71: Middelvinden hver time ved KVT-masten plottet mot middelvinden ved Siemens-masten. Dataene er sortert ut fra klassene for grenselagshøyde (PBLH) 1-5.....	124
Figur 7.72: Hyppigheten av de 8 klassene for hastighetsforskjell mellom WRF-punkt KVT og T15, fordelt ut fra klassene for grenselagshøyde (PBLH) 1-5. Skalaen på Y-aksen er logaritmisk.	124
Figur 7.73: Middelvinden hver time fra WRF-punkt KVT plottet mot middelvinden fra WRF-punkt T15. Dataene er sortert ut fra klassene for grenselagshøyde (PBLH) 1-5.....	125
Figur 11.1: Oversiktskart av området rundt Dyfjordhalvøya i Finnmark. Hentet fra www.norgeskart.no	133
Figur 11.2: Kartet viser Dyfjordhalvøya i Finnmark med 20 m ekvidistanse. Vindmålemastene og WRF-punktene KVT, T15, 4010 og 4023 er markert med blått. Hentet fra www.norgeskart.no	134
Figur 11.3: Nestede modelldomener brukt i WRF. Den ytterste svarte firkanten representerer domenet d01 med oppløsning 16 km, og den nest innerste svarte firkanten representerer domenet d02 med oppløsning 4 km. Den innerste svarte firkanten representerer domenet d03 med oppløsning 1 km. Dette domenet er vist i større format i figuren til høyre. Figurene er utarbeidet av Kjeller Vindteknikk.	134
Figur 11.4: Vindrose og Weibull-fordeling i 51 m høyde i KVT-masten. Hentet fra Undheim (2013 s. 7). 135	
Figur 11.5: Vindrose og Weibull-fordeling i 70 m høyde i Siemens-masten. Hentet fra Undheim (2013 s. 12).....	135
Figur 11.6: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 04. januar 2008.	136
Figur 11.7: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 05. januar 2008.	137
Figur 11.8: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 06. januar 2008.	137
Figur 11.9: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 09. februar 2008.	138
Figur 11.10: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 10. februar 2008.	138

Figur 11.11: Bakkestrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 11. februar 2008.	139
Figur 11.12: Bakkestrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 26. desember 2008.	139
Figur 11.13: Bakkestrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 27. desember 2008.	140
Figur 11.14: Bakkestrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 28. desember 2008.	140
Figur 11.15: Bakkestrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 07. august 2007.	141
Figur 11.16: Bakkestrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 08. august 2007.	141
Figur 11.17: Bakkestrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 09. august 2007.	142
Figur 11.18: Bakkestrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 06. juli 2007.	142
Figur 11.19: Bakkestrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 07. juli 2007.	143
Figur 11.20: Bakkestrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 08. juli 2007.	143

OVERSIKT OVER TABELLER

Tabell 3.1: Ulike skalaer brukt til å klassifisere meteorologiske fenomener.	24
Tabell 4.1: 7 stabilitetsklasser (A-G) introdusert av Pasquill. Definisjonene er hentet fra (Golder 1972). ..	38
Tabell 4.2: Verdier for bulk Richardson-tallet og Obukhov-lengden i forhold til Pasquills stabilitetsklasser. Grensene gjelder for en ruhetslengde på 0.1 m. Hentet fra Golder (1972) og Mohan og Siddiqui (1998).	39
Tabell 6.1: Oversikt over sensorer og konfigurasjon av vindmålemasten driftet av Kjeller Vindteknikk AS. Hentet fra Undheim (2013 s. 5).	47
Tabell 6.2: Oversikt over sensorer og konfigurasjon av vindmålemasten levert av Siemens. Hentet fra Undheim (2013 s. 10).	49
Tabell 6.3: Terrengbeskrivelser og ruhetslengder brukt av WRF under kjøringen.	51
Tabell 6.4: Oppsettet av WRF under kjøringen.	51
Tabell 6.5: Tilgjengelige variabler beregnet i WRF hvert tiende minutt i perioden 01.03.2007 kl 00:10:00 til 01.07.2009 kl 03:00:00.	53
Tabell 6.6: Utvalgte WRF-punkter fra Kjøllefjord vindpark. Koordinater er gitt i desimalgrader.	53

Tabell 6.7: Relevante variabler fra WRF-kjøringen for perioden 01.03.2007 kl 04:00:00 til 01.07.2009 kl 03:00:00. Verdier for variablene er gitt som timesverdier.....	54
Tabell 6.8: Utvalgte WRF-punkter med timesverdier fra Kjøllefjord vindpark.....	54
Tabell 6.9: 8 klasser for hastighetsforskjellene mellom KVT- og Siemens-masten. For klasse 1-4 er hastigheten høyest ved Siemens-masten, for klasse 4-8 er hastigheten høyest ved KVT-masten.....	58
Tabell 6.10: 5 klasser for grenselagshøyden, PBLH.....	59
Tabell 7.1: Hyppigheten (i timer) av Pasquills stabilitetsklasser gjennom hele måleperioden, basert på beregnede timesverdier for L fra WRF-punkt 4010 og 4023.....	61
Tabell 7.2: Hyppigheten (i timer) av Pasquills stabilitetsklasser gjennom hele måleperioden, basert på beregnede timesverdier for Ri fra WRF-punkt 4010 og 4023.....	61
Tabell 7.3: Stabiliteten basert på Ri og grenselagshøyden (PBLH) fra WRF-punkt 4010, gitt som andel [%] av hver caseperiode. Stabiliteten er delt i klassene ustabilt, nøytralt og stabilt, og PBLH er delt i klasse 1-5.....	114
Tabell 7.4: De tre mest dominerende sektorene målt i 43/48 m høyde i KVT-masten, og 67,5 m høyde i Siemens-masten i hver caseperiode og hele måleperioden. Andelen [%] av hver av sektorene er gitt i parentes.....	114
Tabell 7.5: Middelvind i hver caseperiode og hele måleperioden for 51 m høyde i KVT-masten og WRF-punkt KVT, og for 70 m høyde i Siemens-masten og WRF-punkt T15.....	114
Tabell 7.6: Korrelasjon i vindhastigheten mellom målemastene og WRF-punktene KVT og T15 i hver caseperiode og hele måleperioden.....	115
Tabell 7.7: Middelvindskjær i hver caseperiode mellom 51 m og 30 m høyde i KVT-masten og WRF-punkt KVT, og mellom 70 m og 29 m høyde i Siemens-masten og WRF-punkt T15.....	115

FORKORTELSER

Forkortelse	Forklaring
KVT	Kjeller Vindteknikk AS
TWh	Terrawatttime
MW	Megawatt
UiO	Universitetet i Oslo
WRF	The Weather Research and Forecasting Model
TKE	Turbulent kinetisk energi
TI	Turbulensintensitet

1 INNLEDNING

1.1 BAKGRUNN

Verden står overfor stadig større utfordringer knyttet til klimaendringer og økt energiforbruk av en voksende befolkning. Det er klart at fremtiden må bringe mer energieffektivisering, men også videreutvikling og større bruk av fornybare energikilder.

EU har gjennom sitt direktiv 2009/28/EC, også kalt fornybardirektivet, vedtatt at hvert av medlemslandene skal ha en fornybarandel som utgjør 20 % av totalt energiforbruk (The European Parliament and the Council of the European Union 2009). Utbygging av vindkraftindustrien i Europa, ledet an av land som Tyskland, Spania og Danmark (Tande & Støa 2004), har vært en viktig bidragsyter på veien til dette målet, og har gjort at Europa leder utviklingen på verdensbasis med i overkant av 106 GW installert effekt i 2012. Dette tilsvarer omtrent 7 % av EUs elektrisitetsforbruk (Wilkes & Moccia 2013).

Gjennom innlemmelse av EUs fornybardirektiv i EØS-avtalen 19.12.2011, har Norge forpliktet seg til en andel fornybar energi på 67,5 % innen 2020 (Energi- og miljøkomiteen 2011). I løpet av 2013 var det forventet en produksjon på over 2 TWh vindkraft (Norsk Vindkraftforening 2013).

Norge har store vindressurser å utnytte, og Tande og Støa (2004) argumenterer for at det er realistisk med en utbygging på opptil 20 TWh vindkraft innen 2020. Selv om dette er langt mer optimistisk enn forventede mål fra myndighetene på 6-8 TWh (Norsk Vindkraftforening 2013), viser det at mulighetene for å bygge opp en stor vindkraftindustri i Norge er tilstede.

Et viktig steg på veien dit er en grundig forståelse av sammenhengen mellom energiproduksjonen fra en vindpark og vindklimaet på det bestemte stedet. For at dette skal være mulig, må man innhente mest mulig informasjon om de tilgjengelige vindressursene. Den vanligste måten å innhente slik informasjon har vært gjennom vindmålinger på stedet, med den klare ulempen at man sitter igjen med vinddata i kun ett geografisk punkt (Byrkjedal & Åkervik 2009a).

For en forståelse av hvordan vindklimaet varierer over større områder med tid, ønsker man å ta i bruk meso- og mikroskalamodeller til simulering. En modell vil aldri kunne gi et helt nøyaktig bilde av virkeligheten, men ved å sammenlikne det simulerte vindklimaet med observasjoner på stedet, håper man å identifisere de viktigste effektene som kan påvirke energiproduksjonen i en vindpark og finne fram til måter å forbedre modellene.

Mikro- og mesoskalamodeller har blitt et viktig verktøy under planleggingen av nye vindparker på verdensbasis, og vil bli stadig viktigere for å vurdere driften og fremtidig produksjon i etablerte vindparker.

1.2 MÅLSETTING

Denne masteroppgaven tar for seg problemstillinger fra Statkrafts vindpark Kjøllefjord. Hensikten med oppgaven er å analysere meteorologiske data fra vindparken, siden dette er viktig for forståelsen av hvordan energiproduksjonen henger sammen med vind, vindskjær, turbulens, temperatur og stabilitet.

På Kjøllefjord er det montert to vindmålemaster, som er plassert omtrent 4 km fra hverandre. Kjeller Vindteknikk (KVT) har analysert data fra mastene og produksjonsdata i forbindelse med et forskningsprosjekt med Statkraft og Universitetet i Oslo (UiO), og fant tidvis store forskjeller i vindforholdene mellom de to mastene samt forskjeller i energiproduksjonen i ulike deler av parken (Undheim 2013). Dette har blitt nærmere undersøkt med industristandardmodellen WaSP (Wind Atlas Analysis and Application Program), men forskjellene lot seg ikke enkelt forklare.

En av mastene ligger mellom 30 og 80 m lavere i terrenget enn vindparken og den andre masten. Gjennom de innledende analysene fant KVT store forskjeller i vindhastighet mellom mastene, med høyere vindhastighet ved den lavtliggende masten særlig om vinteren (Østreng 2013). Det er ofte mer stabile atmosfæriske forhold om vinteren i Finnmark, og derfor ønsker man å undersøke om de observerte forskjellene kan relateres til stabilitet.

Mastene i vindparken har kun målinger av temperatur i én høyde, og ingen målinger av varmekraft, slik at stabilitet ikke kan beregnes ut fra observerte verdier. I denne oppgaven vil det derfor bli brukt simulerte verdier fra mesoskalamodellen WRF til å beregne ulike stabilitetsparametere og karakterisere stabiliteten gjennom perioden. WRF beregner også grenselagshøyden, slik at effekten av denne parameteren også vil vurderes i perioder med store hastighetsforskjeller mellom mastene.

I tillegg til å bruke modellen til å karakterisere stabilitet og grenselagshøyde, vil simulerte verdier av vindhastighet, retning, vindskjær og temperatur fra modellen sammenlignes direkte med målinger fra de to mastene. Man ønsker slik å se om modellen viser de samme forskjellene mellom mastene, og eventuelt identifisere lokale effekter på Kjøllefjord som ikke fanges opp av modellen.

Målsettingen i oppgaven kan oppsummeres i følgende punkter:

- Karakterisering av stabiliteten gjennom måleperioden ved bruk av WRF-data. Vurdering av stabilitetsparametrene Richardson-tallet og Obukhov-lengden fra WRF, samt Pasquills stabilitetsklasser.
- Analyse av vindhastighet, retning, vindskjær, turbulensintensitet, temperatur, grenselagshøyde og stabilitet i fem caseperioder som reflekterer ulike vind- og stabilitetsforhold. Vurdering av WRF-data mot observerte data, og vurdering av forskjeller i hastighet og vindskjær mellom mastene.

- Klassifisering av hastighetsforskjeller mellom mastene gjennom hele måleperioden, og analyse av sammenheng med stabilitet fra WRF.
- Klassifisering av hastighetsforskjeller mellom to WRF-punkter på hver side av parken gjennom hele måleperioden, og analyse av sammenheng med stabilitet.
- Analyse av sammenheng mellom hastighetsforskjeller gjennom hele måleperioden og grenselagshøyde fra WRF.

Det forutsettes at leseren har grunnleggende kunnskaper om meteorologi og en viss kjennskap til bruken av numeriske værvarslingsmodeller. Hensikten med oppgaven er å bruke WRF-kjøringer utført av Kjeller Vindteknikk til å beskrive observerte trender i vindklimaet i Kjøllefjord vindpark, og oppgaven vil derfor ikke ta for seg programmeringsstrukturen til WRF-modellen og de fysiske ligningene de ulike parametriseringsskjemaene bygger på. For denne informasjonen bes leseren undersøke andre kilder, disse er nevnt innenfor de aktuelle delkapitlene og finnes i kildelisten.

1.3 PRESENTERTE DATA

Tidsseriene fra vindmålemastene og WRF som ble brukt i analysen inneholder omtrent to år med data, fra mars 2007 til juni 2009, og alle resultater er basert på data fra denne perioden med mindre annet er angitt.

I deler av analysen vil det refereres til vindretningssektorer mellom 1 og 12; dette er 30°-sektorer med sentrum i 0°, 30°, 60°, osv.

KVTs analyserapporter fra Kjøllefjord vindpark (Undheim (2013) og Østreng (2013)) er en del av forskningsprosjektet med Statkraft og UiO, og har derfor begrenset tilgjengelighet. Med tillatelse fra KVT og Statkraft vil det likevel presenteres relevant innhold fra disse rapportene. I disse tilfellene vil innholdet forklares grundig og merkes med kildehenvisning.

1.4 OPPBYGGING AV OPPGAVEN

Kapittel 1 beskriver motivasjonen bak valget av problemstilling og målsettingen i oppgaven.

Kapittel 2 er en presentasjon av Kjøllefjord vindpark og terrenget rundt, med beskrivelse av plassering av turbiner og vindmålemaster.

Kapittel 3-5 gir en presentasjon av teorigrunnlaget bak oppgaven. Kapittel 3 inneholder en kort beskrivelse av oppbygningen til numeriske værvarslingsmodeller, med størst fokus på mesoskalamodellen WRF. Kapittel 4 gir en introduksjon til teorien om det atmosfæriske grenselaget og prosessene som påvirker vindforholdene i overflatelaget.

Kapittel 5 gir en kort presentasjon av hvordan en vindturbin utnytter den tilgjengelige energien i vinden.

Kapittel 6 beskriver datasettet og metodene brukt i analysen.

Kapittel 7 presenterer og drøfter utvalgte resultater fra analysearbeidet. Kapitlet inneholder også beskrivelser av de fem caseperiodene.

Kapittel 8 presenterer konklusjonene fra drøftingen av resultatene.

Kapittel 9 gir forslag til videre arbeid med datasettet fra Kjøllefjord.

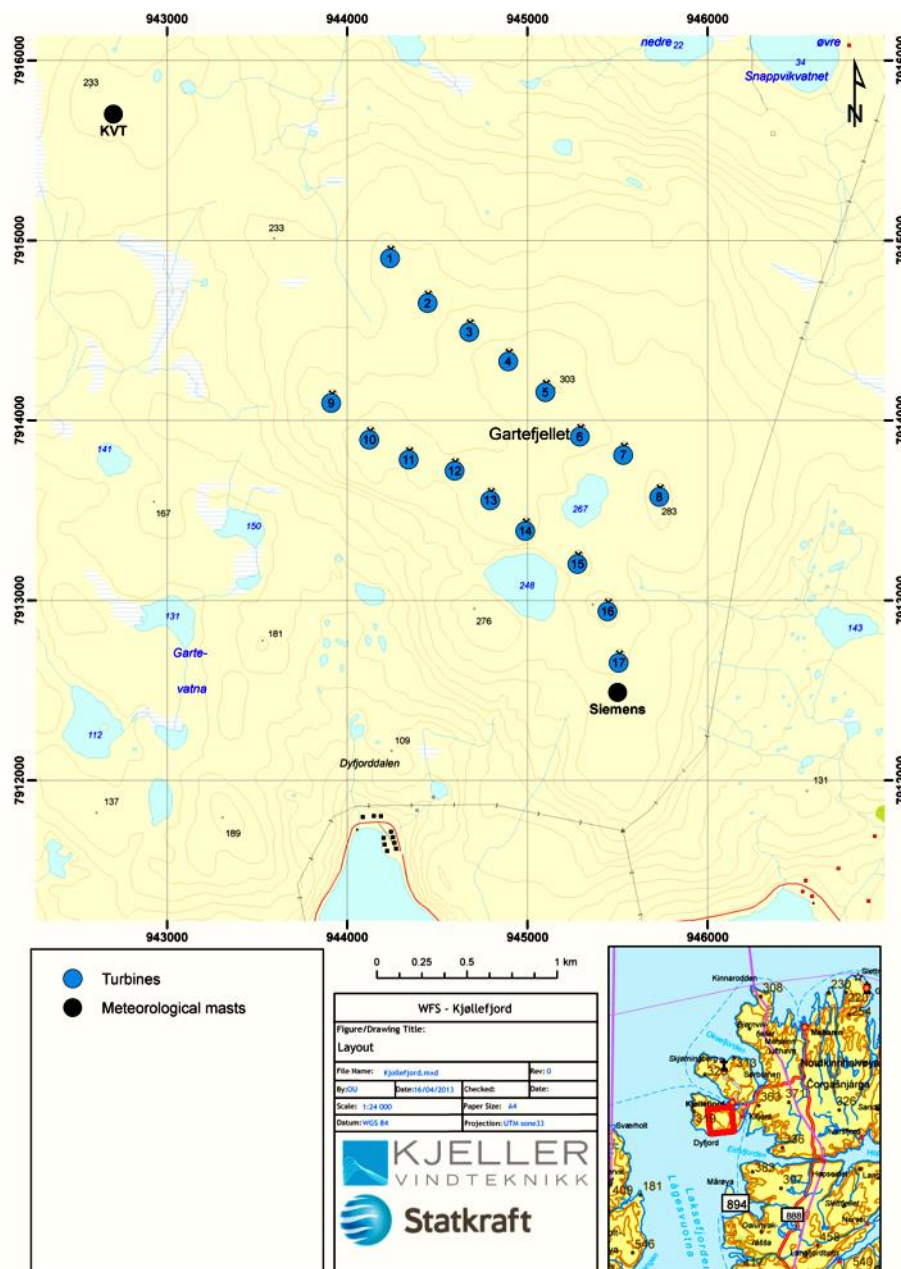
Kapittel 10 viser kildene som er brukt i arbeidet med oppgaven.

Vedleggene til oppgaven er gitt i kapittel 11.

2 KJØLLEFJORD VINDPARK

Kjøllefjord vindpark ligger i Lebesby kommune i Finnmark, og er eid og driftet av Statkraft. Vindparken består av totalt 17 turbiner (Siemens 2,3 MW), med en samlet installert effekt på 39,1 MW (Statkraft 2012).

Det er installert to meteorologiske målemaster i parken, levert av Kjeller Vindteknikk (KVT) og Siemens. Målemasten driftet av KVT ligger omtrent 1,5 km nordvest for vindparken, og er en 50 m høy rørmast av stål. Målemasten fra Siemens er plassert nærmere parken, rett sør for turbin 17, og er en 70 m høy gittermast. Figur 2.1 viser plasseringen av vindturbiner og målemaster i Kjøllefjord vindpark.



Figur 2.1: Oversiktskart over vindparken på Kjøllefjord, med plasseringen av målemastene. Utarbeidet av Kjeller Vindteknikk.

2.1 TOPOGRAFI

Kjøllefjord vindpark ligger på Dyfjordhalvøya nord i Laksefjorden, se kart i kapittel 11.1. Terrenget er kupert, og består stort sett av snaufjell. Et bilde av Dyfjordhalvøya med vindparken i det fjerne er vist i Figur 2.2.

Et oversiktskart av halvøya er gitt i kapittel 11.1. Siemens-masten er plassert 251,1 moh. nær turbin 17, i et område kalt Gartefjellet. Sør og sørvest for masten er terrenget bratt, og går ned mot Laksefjorden. Vindturbinene ligger nord og nordvest for masten, i et område som er 260-300 m over havnivå.

KVT-masten er plassert lavere i terrenget, 220 moh., i et område kalt Gartemyran. Nord og vest for KVT-masten ligger Kjemfjellet (319 moh.), Kjemtinden (312 moh.) og en rekke andre små høyder. Terrenget mot sør og sørvest ligger lavere, og går ned mot Gartebukta.



Figur 2.2: Terrenget på Dyfjordhalvøya sett fra Vindhamran, med Kjøllefjord vindpark i det fjerne. Hentet fra <http://www.tu.no/nyheter/energi/2005/09/21/bygger-vindpark-i-finnmark>.

2.2 VINDKLIMA

En innledende analyse av vindhastighet, vindretning, turbulensintensitet og vindskjær gjennom den utvalgte analyseperioden, fra mars 2007 til juni 2009, har blitt gjort av KVT i Undheim (2013) og Østreng (2013). Analysen var basert på data fra de to vindmålemastene, altså det samme datasettet som blir anvendt i denne oppgaven. Vindrose og Weibull-fordeling i 70 m høyde for Siemens-masten og 51 m høyde for KVT-masten fra KVTs rapport er gitt i kapittel 11.2.

Weibull-fordelingen i Siemens-masten har en relativt lav shape-faktor, k , noe som indikerer at tilfeller med høy vindhastighet er vanlig (Twidell & Weir 2006). Vindrosene viser at Siemens-masten har høye andeler av vind fra vestlige og sørvestlige sektorer gjennom måleperioden, mens KVT-masten er dominert av vind fra sør og sør-sørvest. Begge målemaster har høyest andel av vind fra sektor 8 (sentrert rundt 210°).

Det er en sesongvis trend i vindretning på Kjøllefjord, med høy andel av vind fra sørlige og sørvestlige sektorer om høsten, vinteren og våren, mens sommersesongen er dominert av vind fra nordlige sektorer (Østreng 2013). Den månedlige middelvinden er høyest i vintersesongen for begge master.

Det er observert tidvis store hastighetsforskjeller mellom de to vindmålemastene spesielt på vinteren og våren, mens det er generelt mindre forskjeller mellom mastene i sommersesongen (Østreng 2013).

3 TEORI: NUMERISKE VÆRVARSLINGSMODELLER OG WRF

3.1 MIKRO-, MESO- OG MAKROSKALA

Meteorologiske fenomener kan deles inn i tre skalakategorier basert på sin romlige og tidsmessige utstrekning. Disse kategoriene kalles mikro-, meso- og makroskala (Arya 2001), og er nærmere beskrevet i Tabell 3.1.

Tabell 3.1: Ulike skalaer brukt til å klassifisere meteorologiske fenomener.

Skala	Romlig omfang	Tidsmessig omfang
Mikro	< 1 km	Sekunder til minutter
Meso	1 km – 100 km	Sekunder til timer
Makro:		
Synoptisk	100 – 1000 km	Dager
Planetær	> 1000 km	Dager til uker

Makroskalaen omfatter de meteorologiske fenomenene som har lengst varighet og størst romlig utstrekning, og kan deles opp i den synoptiske og den planetære skalaen. Noen eksempler på meteorologiske fenomener på makroskala er storskala vindsystemer som passatvindene og sykkloner.

Meteorologiske fenomener på mesoskala har en horisontal utstrekning på mellom 1 og 100 km, og en varighet på opptil et døgn. Denne skalaen omfatter mindre værsystemer, som tordenvær og fronter, og lokal vind (Encyclopedia Britannica 2014).

Mikroskalaen omfatter de minste meteorologiske fenomenene, som ofte oppstår i og påvirkes av den nederste delen av det atmosfæriske grenselaget. Studiet av disse fenomenene, kalt mikrometeorologi, er viktig for å forstå utvekslingen av varme, masse og bevegelsesmengde mellom jordoverflaten og resten av atmosfæren (Arya 2001).

3.2 NUMERISKE VÆRVARSLINGSMODELLER

Et av de viktigste verktøyene for forskning på atmosfæren gjennom de siste tiårene har vært numeriske værvarslingsmodeller. Disse modellene er bygd opp av koblete ligningssett som beskriver de fysiske prosessene i atmosfæren, og kan brukes til å simulere utviklingen av fysiske parametere som vind, temperatur og trykk over tid (Aguado & Burt 2010). Ved å sette ulike initialbetingelser og anvende de matematiske ligningene, ønsker man å komme fram til et tredimensjonalt tilstandsbilde av atmosfæren ved et senere tidspunkt.

Ligningene som beskriver de atmosfæriske prosessene er kontinuerlige, men de er så komplekse at oppløsningen til modellene er avhengig av regnekraften som er tilgjengelig i dagens datamaskiner. Oppløsningen er derfor begrenset til et bestemt antall punkter eller bølger (Stull 1989).

Det finnes i hovedsak to typer modeller: rutenettmodeller og spektralmodeller. I en rutenettmodell løser man ligningene i hvert gridpunkt i et rutenett, og man bruker disse verdiene til å utlede verdier i andre punkter (Aguado & Burt 2010). Oppløsningen kan slik relateres til avstanden mellom hvert gridpunkt i rutenettet. I en spektralmodell brukes bølger med ulik bølgelengde og amplitude til å representere dataene i alle punkter. Oppløsningen er avhengig av antall bølger som brukes til å gjengi dataene (UCAR 2002).

Gitt en avstand mellom gridpunktene på Δx , kan man i følge prinsippet om Nyquist-frekvensen kun gjengi et meteorologisk fenomen med utstrekning $2\Delta x$ (Stull 1989). En dobling av denne oppløsningen medfører i følge Aguado og Burt (2010) en økning i beregningstiden med omtrent en faktor 8.

For å fange opp effekten av prosesser med mindre utstrekning, kan man anvende en metode kalt parametrisering (UCAR 2002). Denne metoden går ut på å estimere selve effekten, ved å forsøke å beskrive prosessen ut fra variabler som er oppløst i modellen. Et værphenomen som typisk har for liten utstrekning er skyer, som kan bli parametrisert ut fra variabler som temperatur og fuktighetsinnhold i lufta.

For å kunne modellere den vertikale atmosfæriske strukturen er det også nødvendig å definere en vertikal oppløsning. Siden ulike atmosfæriske prosesser vanligvis foregår på mer avgrensede vertikale områder i atmosfæren, er det ikke nødvendig med like høy vertikal oppløsning gjennom hele atmosfæren. Den høyeste oppløsningen brukes gjerne nærmest bakken, der de vertikale gradientene i vindhastighet, temperatur og fuktighet er størst, og transporten av varme, fuktighet og bevegelsesmengde er stor.

3.2.1 MESOSKALA METEOROLOGISKE MODELLER

Med utviklingen av mer kraftige datamaskiner de siste årene har man kunnet utvikle modeller som kan modellere meteorologiske fenomener på mesoskalanivå. Dagens mesoskalamodeller kjøres gjerne med en horisontal oppløsning som tilsvarer en avstand mellom gridpunktene på typisk 10 km.

Med så høy oppløsning er det ressurskrevende å kjøre modellene over store områder, så man bruker mindre modelldomener der man selv setter randbetingelsene (Aguado & Burt 2010). Disse randbetingelsene hentes ofte fra globale eller regionale modeller med lavere oppløsning.

Mesoskalamodeller er spesielt nyttige for modellering av områder med raskt skiftende miljømessige forhold, og er ofte overlegne modeller med lavere oppløsning i kyst- og fjellområder (UCAR 2002).

3.3 THE WEATHER RESEARCH AND FORECAST MODEL (WRF)

WRF-modellen (the Weather Research and Forecast Model) er en numerisk mesoskala værvarslingsmodell utviklet av blant annet the National Center of Atmospheric Research (NCAR), the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) og the Air Force Weather Agency (AFWA). Modellen blir brukt til værvarsling og til forskning på atmosfæren, og kan simulere både mer ideelle atmosfæriske forhold og reelle forhold. WRF er en rutenettmodell, og kan kjøres med en horisontal oppløsning ned mot 1 km (Michalakes et al. 2001).

Mer dokumentasjon om WRF kan finnes på <http://www.wrf-model.org/index.php>.

3.3.1 HYDROSTATISKE OG IKKE-HYDROSTATISKE MODELLER

Hydrostatiske modeller antar likevekt mellom tyngdekraften og den vertikale trykkgradienten, slik at man ser bort fra vertikal akselerasjon av vinden (Aguado & Burt 2010). Trykkendringen med høyde i den nederste delen av atmosfæren kan dermed beskrives ut fra den hydrostatiske ligningen:

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} - g = 0 \quad (1.1)$$

$$P(z_2) = P(z_1) - \int_{z_1}^{z_2} \rho(z)g dz \quad (1.2)$$

Der w er vindhastigheten i vertikal retning, ρ er lufttettheten, g er tyngdeakselerasjonen som har en global standardverdi på $9,80665 \frac{m}{s}$, og z_2 og z_1 er høyder over jordoverflaten.

Selv om den hydrostatiske ligningen ser bort fra vertikal akselerasjon, kan den være en god tilnærming til atmosfærisk bevegelse på stor skala (Arya 2001). For å beskrive bevegelse på mikro- og mesoskalanivå derimot, er den vertikale akselerasjonen av vinden viktig, og avviket fra den hydrostatiske likevekten kan bli signifikant.

WRF er en ikke-hydrostatisk modell, og inneholder derfor ligninger som direkte tar for seg vertikal bevegelse og akselerasjon. Dette er viktig for å kunne modellere fenomener med vertikal bevegelse, som konvektive stormer, bølger fra fjellkjeder og stor-skala turbulens (UCAR 2002).

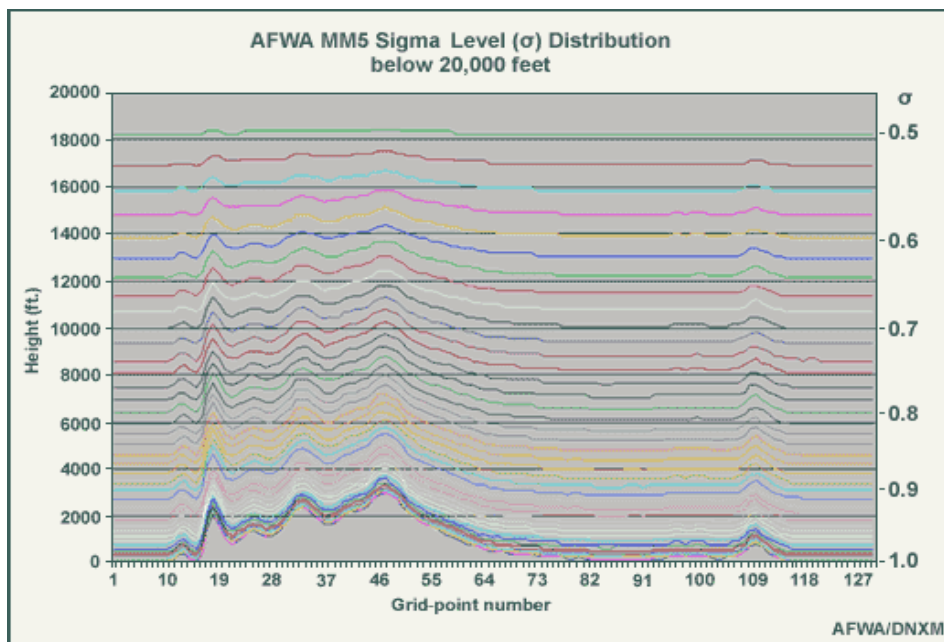
3.3.2 KOORDINATSYSTEMET SIGMA

WRF bruker det vertikale koordinatsystemet sigma (σ) for å representere de ulike atmosfæriske lagene (UCAR 2002). I dette koordinatsystemet brukes det horisontale lag som representerer skalerte nivåer av hydrostatisk trykk, der høyden til nivåene endrer seg med varierende trykk og tetthet gjennom året. Sigma-flatene kan defineres på følgende måte (Byrkjedal 2013):

$$\sigma = \frac{P - P_{topp}}{P_0 - P_{topp}} \quad (1.3)$$

Der P er trykket i det aktuelle horisontale laget, P_{topp} er trykket til toppen av atmosfæren i modellen og P_0 er trykket ved overflaten.

Topplaget i modellen representerer et lag der vertikal bevegelse er neglisjerbar, og man kan definere trykknivået i dette topplaget til å være for eksempel $P_{topp} = 5000 \text{ Pa}$. Dette tilsvarer da sigma-flaten hvor $\sigma = 0,0$, mens bunnlaget per definisjon har $\sigma = 1,0$. De nederste sigma-flatene i modellen vil følge terrenget på jordoverflaten, mens sigma-flatene lenger oppe vil flate ut og bli nær horisontale, se Figur 3.1.



Figur 3.1: Høyde over havnivå for sigma-flater over et horisontalt rutenett. De nederste sigma-flatene følger terrenget ved jordoverflaten, mens sigma-flatene lenger oppe vil flate ut. Hentet fra UCAR (2002).

3.3.3 INNGANGSDATA

Byrkjedal og Åkervik (2009a kap. 2) beskriver geografiske data, snødata og meteorologiske data som de tre viktigste inngangsparametrene ved kjøring av WRF.

De geografiske dataene inneholder informasjon om topografi, albedo, vegetasjon og overflateegenskaper, og er som regel statiske data. Snødata inneholder informasjon om snødekke, og baseres vanligvis på observasjoner av temperatur og nedbør fra meteorologiske stasjoner.

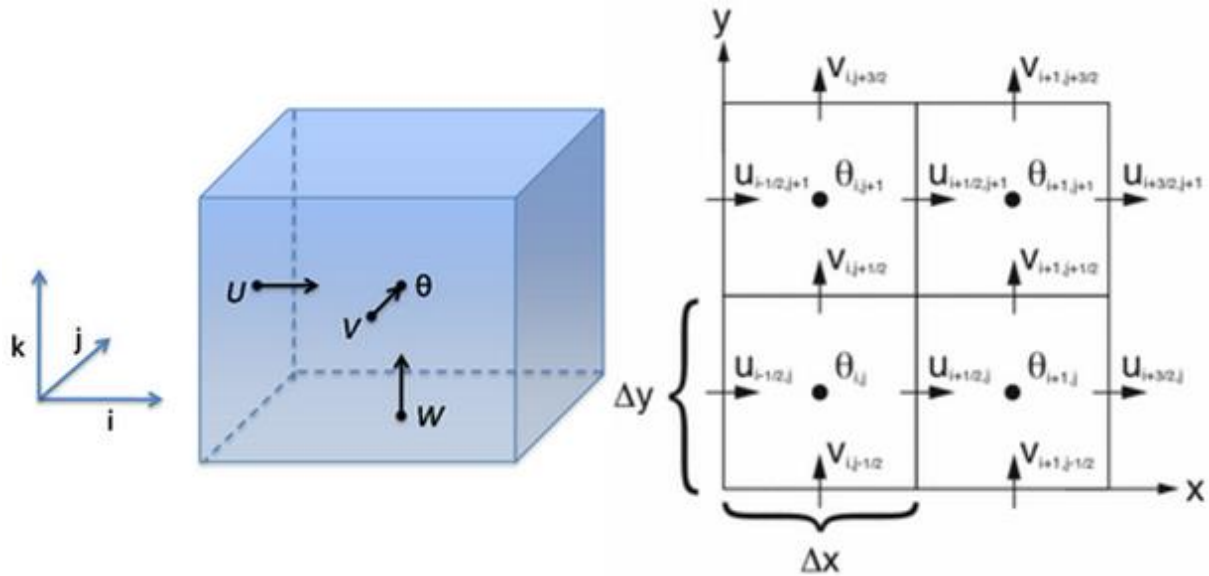
De globale meteorologiske dataene inkluderer informasjon om blant annet bakketrykk, temperatur, skyer, vindhastighet og vertikalt vindskjær, og hentes ut fra assimilasjonsmodellen FNL (Final Global Data Assimilation System). FNL brukes til å lage globale datasett for ethvert tidspunkt ut fra tilgjengelige globale observasjonsdata fra blant annet bakkestasjoner og satellitter. De meteorologiske dataene har en grads horisontal oppløsning og 28 lag vertikal oppløsning, og interpoleres slik at de tilsvarer oppløsningen til WRF-kjøringen. Dataene er tilgjengelige fra National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (Byrkjedal & Åkervik 2009a).

3.3.4 UTGANGSDATA OG OPPSETT AV MODELLEN

WRF beregner blant annet vindhastighet, vindretning, temperatur og trykk ved jordoverflaten gjennom simuleringsperioden; dette beregnes i hvert gridpunkt og for hvert modellnivå. Beregningene er initiert av de globale dataene fra FNL. Under simuleringen beregner modellen forandringen i de atmosfæriske feltene for små tidsskritt framover i tid, og data for et gridpunkt vil bli lagret for hver time (Byrkjedal & Åkervik 2009a). Noen utvalgte variabler kan også gis som timinuttersverdier, se 6.1.3.4.

Ved beskrivelse av turbulent bevegelse i grenselaget, møter man på problemet med turbulent lukking, det vil si at man har flere ukjente variabler enn man har ligninger (Stull 1989). En mulig løsning på dette problemet er å bruke et bestemt antall ligninger, og parametrisere de ukjente variablene. Ved kjøring av WRF kan man velge mellom flere parametriseringsskjemaer for det atmosfæriske grenselaget (PBL), overflatelaget, fysikken på mikronivå, skyer og innstråling (Krogsæter & Lisæter 2013). Skjemaene som er brukt i WRF-kjøringene i denne oppgaven er spesifisert under Metode og datamateriale.

WRF bruker et såkalt Arakawa C-rutenett, der variablene blir beregnet i fire mulige punkter (Michalakes et al. 2001), vist i Figur 3.2. De kan beregnes i sentrum av cellen (i θ -punkter), eller i "staggered grid" på sidene eller på bunnen av cellen (Wildland Fire Modeling 2012). Hastighetene U og V, i henholdsvis x- og y-retning, er beregnet på hver side av cellen. For å ha verdier for vindhastigheten i samme punkt, interpoleres U og V til θ -punktet i hver celle.



Figur 3.2: Oppbygningen av rutenettet i WRF, og oversikt over punktene de ulike variablene beregnes i. Hentet fra Wildland Fire Modeling (2012).

De fleste skalare variablene som trykk og temperatur beregnes i θ -punktene, med unntak av geopotensialet, som beregnes i W (Wildland Fire Modeling 2012). Geopotensialet representerer den potensielle energien per enhet masse i en gitt høyde.

θ -punktene ligger på såkalte halvnivåer, det vil si mellom modellflatene på fullnivå. WRF gir sigmaverdier for både halvnivåene og fullnivåene som utgangsdata i kjøringene sine, slik at man kan bruke formel (1.3) til å beregne trykket i hvert nivå (Byrkjedal 2013).

For beregning av høyden over bakkenivå, er det tilstrekkelig å bruke den hydrostatiske ligningen (1.2). Hvis man løser integralet i formel (1.2) ved hjelp av trapesmetoden (Mørken 2007), kan man finne et uttrykk for høydeforskjellen mellom hvert modellag eller nivå:

$$\int_{z_1}^{z_2} \rho(z)g dz \approx (z_2 - z_1)g \left[\frac{\rho(z_2) + \rho(z_1)}{2} \right] = (z_2 - z_1)g\rho_{mean} \quad (1.4)$$

$$(z_2 - z_1) = \Delta z \approx \frac{P(z_1) - P(z_2)}{g\rho_{mean}} \quad (1.5)$$

Der ρ_{mean} er den gjennomsnittlige lufttettheten mellom nivåene. Lufttettheten i hvert nivå kan beregnes ut fra den ideelle gassloven:

$$\rho(z) = \frac{P(z)}{R_s T(z)} \quad (1.6)$$

Der P er lufttrykket, R_s er den spesifikke gasskonstanten, som er $287,058 \frac{J}{kgK}$ for tørr luft (Ormestad 2014), og T er temperaturen.

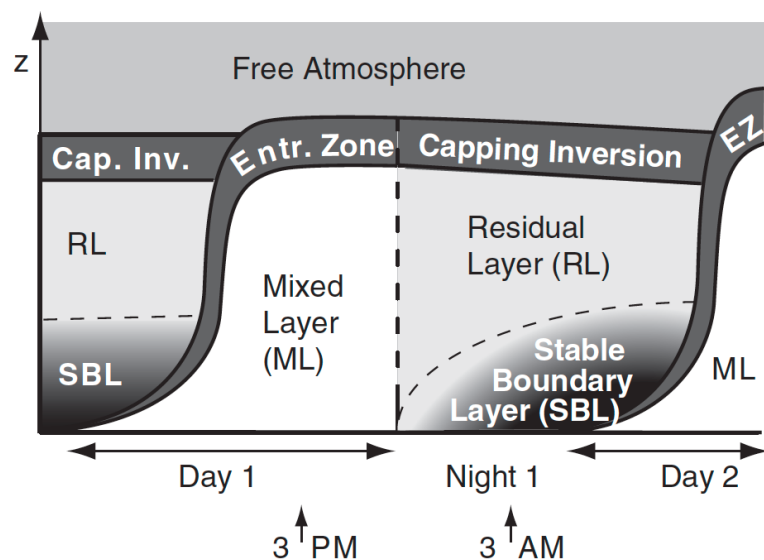
4 TEORI: VIND, TURBULENS OG STABILITET I GRENSELAGET

4.1 DET ATMOSFÆRISKE GRENSELAGET

Man kan definere det atmosfæriske grenselaget som ”den delen av troposfæren som er direkte påvirket av jordas overflate, og reagerer på overflateprosesser med en tidsskala på en time eller mindre” (Stull 1989 s. 2). Selve tykkelsen på sjiktet varierer mellom 50-100 m og et par kilometer, og er avhengig av faktorer som strålingsbalansen ved overflaten, vindforhold, overflateruhet og topografiske forhold (Arya 2001). Disse faktorene bidrar til turbulens i grenselaget, som sørger for utveksling av masse, bevegelsesmengde og varme.

Oppvarmingen og nedkjølingen av jordoverflaten gjennom døgnet sørger for en døgnvariasjon i strukturen til det atmosfæriske grenselaget, dette er illustrert i Figur 4.1. Disse døgnvariasjonene gjør at strukturen ofte deles opp i tre hovedlag; det blandede laget, residuallaget og det stabile grenselaget (Stull 1989). Utviklingen av grenselaget vist i figuren er idealisert, og man vil ikke se en like klar struktur i områder med kort sommersesong og lave temperaturer.

Den nederste delen av det atmosfæriske grenselaget kalles gjerne overflatelaget, og utgjør omtrent en tiendedel av grenselagets størrelse. Overflatelaget kjennetegnes av at de turbulente fluksene varierer med mindre enn 10% av total størrelse med høyden.



Figur 4.1: Strukturen og utviklingen til det atmosfæriske grenselaget når strålingsbalansen forandrer seg gjennom døgnet. Grenselaget består av et stabilt grenselag (SBL), et blandet lag (ML) og et residuallag (RL). Figuren viser også innblandingssonen ("entrainment zone") og inversjonssonen ("capping inversion"). Hentet fra Stull (2005).

4.1.1 DET BLANDEDE LAGET

Det blandede laget kjennetegnes av turbulent strømming som i stor grad skyldes konveksjon fra oppvarmingen av bakken, vindskjær på toppen av laget eller sterke vinder. Dette fører til en statisk ustabil tilstand som sørger for at varme, bevegelsesmengde og fuktighet er godt blandet gjennom hele laget (Stull 1989).

Det blandede laget vokser gjerne utover dagen som følge av oppvarmingen av bakken og ved at mindre turbulent luft blandes med laget i den såkalte innblandingssonen ("entrainment zone"). Denne sonen er stabil, og begrenser dermed videre utvidelse av det blandede laget (Stull 1989). Noen ganger vil man også finne en temperaturinversjon i denne øverste sonen.

4.1.2 RESIDUALLAGET

Mot slutten av dagen vil konveksjonen fra oppvarmingen av bakken avta, noe som gir mindre turbulens og blanding i grenselaget. Resultatet er et lag som er nøytralt stratifisert, der turbulensen har like stor utstrekning vertikalt som horisontalt (Stull 1989). Dette laget kalles gjerne residuallaget.

Residuallaget ligger over det stabile grenselaget, og har dermed ikke direkte kontakt med bakken. Dette gjør at mesteparten av laget er upåvirket av den turbulente transporten herfra.

4.1.3 DET STABILE GRENSELAGET

I løpet av natten blir luften i residuallaget nærmest bakken stadig mer stabil og mindre turbulent, og utgjør et lag kalt det stabile grenselaget. Vindhastighetene i dette laget er ofte lave, mens vinden lenger oppe er supergeostrøfisk og danner en lavtliggende jetstrøm (Stull 1989). Denne jetstrømmen kan typisk ligge 200 m over bakken, og har vindhastigheter i størrelsesorden 10-30 m/s.

4.2 TURBULENS

Turbulens er en av de viktigste prosessene for vertikal utveksling av fuktighet, varme og bevegelsesmengde i det atmosfæriske grenselaget, mens det er middelvinden som er viktigst for utvekslingen horisontalt (Stull 1989).

Turbulent kinetisk energi (TKE) er et mål på intensiteten til turbulensen, og er direkte relatert til utvekslingen vertikalt. Hvert av leddene i ligningen for TKE beskriver fysiske

prosesser som genererer turbulens, og slik utgjør TKE summen av bidragene fra alle disse prosessene. Ligningen for TKE er:

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} + \frac{\bar{U}_n \partial \bar{e}}{\partial x_n} = +\delta_{m3} \frac{g}{\bar{\theta}_v} \overline{(u'_m \theta'_v)} - \overline{u'_m u'_n} \frac{\partial \bar{U}_m}{\partial x_n} - \frac{\partial (\overline{u'_n e})}{\partial x_n} - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial (\overline{u'_m p'})}{\partial x_m} - \varepsilon \quad (1.7)$$

(1) (2) (3) (4) (5) (6) (7)

Der e er turbulent kinetisk energi per masseenhet, \bar{U} er midlere vindhastighet, x er avstand, θ_v er virtuell potensiell temperatur og ρ er lufttetthet. Indeksene m og n har verdiene 1-3, og angir romlig retning for parameteren. u'_m , u'_n og θ'_v representerer avvik fra middeltilstanden.

En mer detaljert matematisk forklaring til ligningen kan finnes i Stull (1989 kap. 5), her vil fokus være på å beskrive de fysiske prosessene bak hvert ledd og hvordan de bidrar til turbulens i grenselaget.

(1) Lokal lagring

TKE lagres i lufta i løpet av dagen (spin up), og minker gjennom kvelden (spin down) når dissipasjon og andre tap er større enn produksjon av turbulens.

(2) Adveksjon

Effekten av dette leddet er lite kjent. Man går ofte ut i fra at det er liten horisontal variasjon i TKE over store landområder, men at adveksjon over mindre områder og i overgangen mellom land og hav er viktig (Stull 1989).

(3) Tap/produksjon grunnet oppdrift

Når jordoverflaten er varmere enn luften ovenfor, vil det være stor produksjon av turbulens nær bakken og dette leddet vil være positivt. I et statisk stabilt grenselag vil leddet være negativt, ettersom den stabile luften vil dempe den vertikale utvekslingen og minke TKE.

(4) Mekanisk produksjon (Vindskjær)

Samspill mellom turbulente flukser av bevegelsesmengde og vindskjær fører ofte til større produksjon av turbulens. Den største mekaniske produksjonen av turbulens skjer nær jordoverflaten der vindskjæret er størst.

(5) Turbulent transport

Dette leddet kan beskrives som et fluksdivergens-ledd, og er en indikasjon på transporten av TKE i grenselaget (Stull 1989). Hvis det er større turbulent fluks inn i et luftlag enn ut av det, vil leddet være positivt og TKE vil øke. Leddet vil derimot være negativt når det er divergens i luftlaget.

(6) Trykkorrelasjon

De statiske trykkvariasjonene i atmosfæren er små og svært vanskelige å måle. Den reelle effekten av dette leddet er derfor vanskelig å fastslå, men resultater fra gravitasjonsbølge-teori indikerer at trykkvariasjonene står for noe av tapet av TKE (Stull 1989).

(7) Dissipasjon/tap

Det er de minste turbulente virvlene som står for den meste effektive dissipasjonen av TKE, og derfor vil dette tapsleddet bli større når intensiteten til småskala-turbulensen øker (Stull 1989). Den største dissipasjonen av TKE foregår nær bakken, der også produksjonen er størst.

Turbulens er en dissipativ prosess, slik at man alltid vil ha et tap av energi når TKE er større enn 0. Det betyr at turbulensen i et luftlag vil minke med tid hvis den ikke blir generert mekanisk eller konvektivt, eller blir transportert fra andre luftlag.

4.2.1 TURBULENSINTENSITET

Turbulensintensitet (TI) er et vanlig mål for å beskrive turbulensen knyttet til vindturbiner og vindkraft, og kan uttrykkes som forholdet mellom standardavviket av momentanhastigheten og gjennomsnittshastigheten:

$$TI = \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \quad (1.8)$$

En høy TI-verdi indikerer at turbulent vind utgjør en vesentlig andel av vindenergien (Wharton & Lundquist 2012).

En stor vindturbin vil ofte ha problemer med å følge hurtige endringer i vindretning og hastighet, og derfor vil ikke turbinen fange opp all energien i den turbulente vinden (Twidell & Weir 2006). Høy turbulensintensitet kan også gi økte laster for turbinen, og forårsake utmattingskader (Wharton & Lundquist 2012).

4.3 POTENSIELL OG VIRTUELL TEMPERATUR

Potensiell temperatur, θ , og virtuell potensiell temperatur, θ_v , kan defineres som følgende (Stull 1989):

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{R_s/c_p} \quad (1.9)$$

$$\theta_v = \theta * (1 + 0.61 * r) \quad (1.10)$$

Der T er temperatur, P er lufttrykk, P_0 er lufttrykket ved havnivå, R_s er den spesifikke gasskonstanten for luft, c_p er den spesifikke varmekapasiteten for luft ved konstant trykk og r er den relative massen av vanndamp i forhold til massen av tørr luft. Eksponenten $R_s/c_p \cong 0,286$. Lufttrykket ved havnivå kan settes til 101 325 Pa ved standard atmosfære (Finnemore & Franzini 2009).

Den potensielle temperaturen representerer temperaturen en luftpakke ville hatt hvis den forflyttes adiabatisk fra et nivå med trykk P til et nivå med referansetrykket P_0 (Arya 2001). Ved å bruke den potensielle temperaturen kan man med andre ord se bort i fra temperaturvariasjoner som skyldes forandring i lufttrykket med høyde.

Den virtuelle potensielle temperaturen er den potensielle temperaturen tørr luft ville hatt ved lik tetthet og trykk som fuktig luft (Arya 2001).

4.4 STABILITET

4.4.1 STATISK STABILITET

Statisk stabilitet er et mål som brukes til å beskrive vertikal forflytning av luft, og som er nært knyttet til konveksjon og oppdrift (Aguado & Burt 2010). Luften anses som statisk ustabil når luft med høy tetthet ligger over en luftpakke med lavere tetthet, noe som resulterer i oppdrift og sirkulasjon av luften for å oppnå stabilitet. Statisk stabil luft vil bevege seg tilbake til sin opprinnelige posisjon hvis den forflyttes vertikalt. Luften er statisk nøytral når den ikke opplever noen oppdriftskraft (Arya 2001).

Arya (2001 s.72) gir et tilnærmet uttrykk for akselerasjonen til en luftpakke ut fra den lokale gradienten av virtuell potensiell temperatur:

$$a \cong -\frac{g}{T_v} \frac{\partial \theta_v}{\partial z} \Delta z \quad (1.11)$$

Der T_v er den virtuelle temperaturen, g er tyngdeakselerasjonen og den vertikale forflytningen, Δz , antas å være liten.

Formel (1.11) gjør at man kan definere de tre kategoriene for statisk stabilitet ut fra den potensielle temperaturgradienten (Arya 2001):

1. Statisk ustabil, når $\partial \theta_v / \partial z < 0$
2. Nøytral, når $\partial \theta_v / \partial z = 0$
3. Statisk stabil, når $\partial \theta_v / \partial z > 0$

Bruken av den potensielle temperaturgradienten som et mål på statisk stabilitet har noen klare begrensninger når man skal beskrive stabiliteten til hele luftlag (Stull 1989). Et eksempel er det blandede laget som i følge de ovennevnte kategoriene bør karakteriseres som nøytralt eller svakt stabilt, fordi $\partial\theta_v/\partial z \cong 0$ eller er svakt positiv. I virkeligheten vil det blandede laget ha en positiv varme fluks og være godt blandet, noe som heller peker mot et statisk ustabil luftlag (Arya 2001).

Stull (1989) argumenterer for at oppdriftsfluksen, $\overline{w'\theta_v'}$, er et bedre mål på den statiske stabiliteten til et luftlag. Hvis oppdriftsfluksen er positiv ved jordoverflaten, sier man gjerne at hele grenselaget er ustabil eller konvektivt. Er oppdriftsfluksen derimot negativ ved jordoverflaten, vil hele grenselaget bli definert som stabilt.

Uten målinger av konveksjon eller oppdriftsfluks, brukes gjerne den gjennomsnittlige virtuelle potensielle temperaturen, $\overline{\theta_v}$, som et mål på statisk stabilitet. Man må da ha $\overline{\theta_v}$ -profilen gjennom hele grenselaget (Stull 1989).

4.4.2 DYNAMISK STABILITET

Vindskjær kan forårsake turbulens selv når grenselaget er statisk stabilt, noe som kan gi en dynamisk ustabil strømning der forstyrrelsene vil vokse med tid (Arya 2001). Når en dynamisk ustabil strømning oppstår mellom to statisk stabile luftlag, vil det dannes bølger som vokser seg store nok til å brytes, kalt Kelvin-Helmholtz-bølger (Stull 1989). Disse bølgene vil blande luft med ulik tetthet, som kan føre til lokale tilfeller av statisk ustabilitet. Den statiske og dynamiske ustabiliteten fører til flere turbulente bølger, som vil blande luftlagene. Blandingen fører til utveksling av bevegelsesmengde mellom luftlagene, som vil redusere vindskjæret og etter hvert eliminere den dynamiske ustabiliteten.

4.4.3 RICHARDSON-TALLET

To av de viktigste fysiske prosessene som bidrar til utviklingen av turbulens i grenselaget, er oppdrift og mekanisk produksjon av turbulens gjennom vindskjær (se avsnitt 4.2). Forholdet mellom disse to prosessene er derfor et viktig mål på stabiliteten i grenselaget, og kan uttrykkes ved det dimensjonsløse Richardson-tallet (Stull 1989):

$$Ri = \frac{\frac{g}{\theta_v} \frac{\partial \overline{\theta_v}}{\partial z}}{\left[\left(\frac{\partial \overline{U}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{V}}{\partial z} \right)^2 \right]} \quad (1.12)$$

Der g er tyngdeakselerasjonen, $\overline{\theta_v}$ er den gjennomsnittlige virtuelle temperaturen, z er høyden, og \overline{U} og \overline{V} er gjennomsnittshastighet i retning øst og nord.

Stabilitetskriteriene for Richardson-tallet sier at:

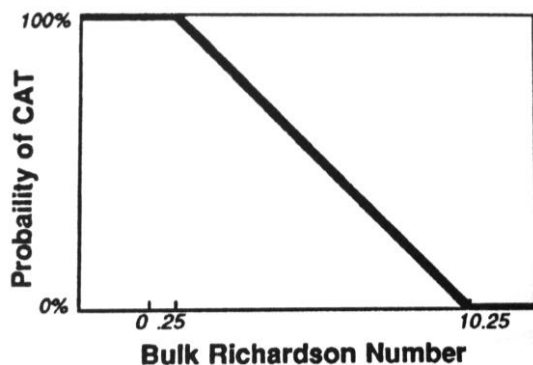
- Laminær strømming blir turbulent når $Ri < R_C$
- Turbulent strømming blir laminær når $Ri > R_T$

Man bruker vanligvis verdiene $R_C \approx 0,21 - 0,25$ og $R_T = 1,0$ (Stull 1989). Tallet sier ingenting om turbulensintensiteten, kun om turbulens er til stede.

Ved å bruke tilnærmingen $\partial\bar{\theta}_v/\partial z \approx \Delta\bar{\theta}_v/\Delta z$, $\partial\bar{U}/\partial z \approx \Delta\bar{U}/\Delta z$ og $\partial\bar{V}/\partial z \approx \Delta\bar{V}/\Delta z$, der Δ representerer differansen mellom to høydenivåer, kan man definere bulk Richardson-tallet:

$$R_B = \frac{g\Delta\bar{\theta}_v\Delta z}{\bar{\theta}_v[(\Delta\bar{U})^2 + (\Delta\bar{V})^2]} \quad (1.13)$$

Den kritiske verdien $R_C = 0,25$ gjelder kun for lokale gradienter, og er ikke tilpasset forskjeller gjennom tykke luftlag. Man introduserer dermed større usikkerhet i avgjørelsen om strømmingen er turbulent eller ei, eller man må bruke en kunstig høy kritisk verdi (Stull 1989). Sammenhengen mellom R_B og sannsynligheten for turbulens i luftlaget er vist i Figur 4.2. Figuren er basert på empiriske data, og viser at det kan forekomme turbulens i grenselaget for bulk Richardson-tall helt opp mot 10,25.



Figur 4.2: Sammenhengen mellom bulk Richardson-tallet (R_B) over et luftlag og sannsynligheten for at turbulens ("Clear air turbulence") skal oppstå i det luftlaget. Figuren er hentet fra Stull (1989 s. 178) og er basert på empiriske data.

Richardson-tallets sammenheng med statisk stabilitet, dynamisk stabilitet og strømming er illustrert i Figur 4.3.

RI	-2	-1	0	1	2
Statisk	Ustabil			Stabil	
Dynamisk	Ustabil			Begge	Stabil
Strømming	Turbulent			Begge	Laminær

Figur 4.3: Sammenhengen mellom Richardson-tallet og statisk stabilitet, dynamisk stabilitet og strømming. Ruten markert "Begge" indikerer at strømmingen kan være enten laminær eller turbulent for disse Ri-verdiene, avhengig av utgangspunktet. Basert på figur 5.24 i Stull (1989 s. 186).

Figuren viser at konseptene om dynamisk og statisk stabilitet henger sammen med hverandre. Negative Richardson-tall vil alltid indikere statisk og dynamisk ustabile forhold, som resulterer i turbulent strømming. Positive Richardson-tall indikerer statisk stabilitet, men strømmingen kan være dynamisk ustabil og turbulent avhengig starttilstanden til strømmingen. Strømming som allerede er turbulent vil forbli turbulent så lenge $Ri < 1$, mens laminær strømming vil bli turbulent omtrent ved $Ri = 0,25$ (Stull 1989).

4.4.4 OBUKHOV-LENGDEN

Som nevnt kjennetegnes overflatelaget av liten variasjon i turbulensfluksen med høyde, og det er derfor rimelig å bruke tilnærmingen at fluksen er konstant. Dette gjør at man kan definere turbulens ved å bruke overflateverdier for varmeoverføring og bevegelsesmengde (Stull 1989).

Med disse tilnærmingene kan man ta i bruk Monin-Obukhovs similaritetsteori, som beskriver utviklingen til middelvinden og turbulensen i overflatelaget som funksjon av viktige skaleringsparametere som friksjonshastighet, høyden over overflaten, virtuell temperaturfluks og oppdrift (American Meteorological Society 2012). Friksjonshastigheten er et mål på vindskjæret nær bakken, og kan defineres slik:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (1.14)$$

Der τ er skjærspenningen mellom luftlagene og ρ er lufttettheten.

Monin og Obukhov (1954) brukte dimensjonsanalyse til å finne fram til relevante skaleringsparametere, og har valgt å se bort i fra Coriolis-effekten og innstråling av varme i sine utledninger. De har også gått ut fra at endringen i lufttetthet med trykk er neglisjerbar. Ved hjelp av skaleringsparametrene definerte de en lengdeskala, L , kalt Obukhov-lengden:

$$L = \frac{-\overline{\theta}_v u_*^3}{kg(\overline{w'\theta_v'})_s} \quad (1.15)$$

Der k er von Karman-konstanten, som har en verdi nær 0,4, u_* er friksjonshastigheten, g er tyngdeakselerasjonen og $(\overline{w'\theta_v'})_s$ er den kinematiske virtuelle temperaturfluksen i vertikal retning nær overflaten.

Obukhov-lengden kan beskrives som en lengdeskala som er proporsjonal med høyden hvor oppdriftskrefter vil begynne å dominere over de mekaniske kreftene (Stull 1989).

Monin-Obukhovs similaritetsteori forutsetter konstant fluks i overflatelaget, slik at den kinematiske potensielle temperaturfluksen kan uttrykkes slik (Monin & Obukhov 1954):

$$\overline{(w'\theta_v')}_s = \frac{q}{c_p * \rho} = konst \quad (1.16)$$

Der q er den vertikale varmekapiteten ved overflaten, c_p er den spesifikke varmekapasiteten til tørr luft ved konstant trykk og ρ er lufttettheten.

Hvis man antar at temperaturendringen i overflatelaget er liten sammenlignet med middeltemperaturen i laget, T_0 , kan L uttrykkes ved (Monin & Obukhov 1954):

$$L = \frac{-\overline{\theta_v} u_*^3}{kg \overline{(w'\theta_v')}_s} \cong \frac{-T_0 u_*^3 c_p \rho}{kgq} \quad (1.17)$$

Der man antar at $c_p \cong 1005 \frac{J}{kgK}$ fordi temperaturendringen over laget er liten (Arya 2001; Monin & Obukhov 1954), og lufttettheten nær jordoverflaten kan beregnes ut fra formel (1.6).

Fortegnet til L er avhengig av stabiliteten i overflatelaget. Med et stabilt luftlag vil varmekapiteten være rettet mot jordoverflaten, slik at $L > 0$. Med et ustabilt luftlag vil det motsatte være tilfelle, $L < 0$. Når stabiliteten i luftlaget nærmer seg et nøytralt regime ($q \rightarrow 0$) vil $L \rightarrow \infty$.

4.4.5 PASQUILLS STABILITETSKLASSER

For å knytte verdier for Richardson-tallet og Obukhov-lengden opp mot ulike stabilitetsforhold i grenselaget, er det hensiktsmessig å ta i bruk en klassifisering av stabiliteten. Et av de mest brukte klassifiseringssystemene for stabilitet ble utviklet av Pasquill, og er basert på verdier for solinnstråling og vindhastighet (Golder 1972). Pasquill brukte 6 stabilitetsklasser (A-F), disse er gitt i Tabell 4.1. En ekstra stabilitetsklasse, G, har senere blitt lagt til i klassifiseringssystemet (Golder 1972).

Tabell 4.1: 7 stabilitetsklasser (A-G) introdusert av Pasquill. Definisjonene er hentet fra (Golder 1972).

Stabilitetsklasser	Definisjon
A	Veldig ustabilt eller konvektivt. Lave vindhastigheter.
B	Ustabilt.
C	Svakt ustabilt.
D	Nøytralt.
E	Svakt stabilt.
F	Stabilt. Lave vindhastigheter.
G	Veldig stabilt. Veldig lave vindhastigheter.

Mohan og Siddiqui (1998) har vurdert Pasquills klassifisering opp mot metoder basert på flere ulike stabilitetsparametere, og konkluderte med at klassifisering ved bruk av Obukhov-lengden og Richardson-tallet var i god overensstemmelse med Pasquills klasser.

Pasquills klassifisering tar ikke hensyn til overflateruheten, så sammenhengen mellom Pasquills klasser og L vil variere med ulik ruhet. Golder (1972 s. 56) har utviklet et mye brukt nomogram, basert på empiriske data, som relaterer $1/L$ med ruhetslengden, z_0 , og Pasquills klasser A-F.

Basert på nomogrammet har Mohan og Siddiqui (1998) utledet grensene for $1/L$ for en ruhetslengde $z_0 = 0.1$ m, og brukt disse verdiene til å beregne grenser for Richardson-tallet for hver stabilitetsklasse. Grensene for $1/L$ og R_B er vist i Tabell 4.2. Grensene gjelder for en ruhetslengde på 0,1 m, noe som kan være en rimelig ruhetslengde i Kjøllefjord om sommeren, mens lavere verdier kan forventes om vinteren da det er mye snø på bakken.

Tabell 4.2: Verdier for bulk Richardson-tallet og Obukhov-lengden i forhold til Pasquills stabilitetsklasser. Grensene gjelder for en ruhetslengde på 0.1 m. Hentet fra Golder (1972) og Mohan og Siddiqui (1998).

Stabilitetsklasser	Grenser for R_B	Grenser for $1/L$
A	$Ri_B < -5.34$	$1/L < -0.096 \text{ m}^{-1}$
B	$-5.34 \leq Ri_B < -2.26$	$-0.096 \text{ m}^{-1} \leq 1/L < -0.035 \text{ m}^{-1}$
C	$-2.26 \leq Ri_B < -0.569$	$-0.035 \text{ m}^{-1} \leq 1/L < -0.009 \text{ m}^{-1}$
D	$-0.569 \leq Ri_B < 0.083$	$-0.009 \text{ m}^{-1} \leq 1/L < 0.008 \text{ m}^{-1}$
E	$0.083 \leq Ri_B < 0.196$	$0.008 \text{ m}^{-1} \leq 1/L < 0.035 \text{ m}^{-1}$
F	$0.196 \leq Ri_B < 0.49$	$1/L \geq 0.035 \text{ m}^{-1}$
G	$Ri_B \geq 0.49$	-

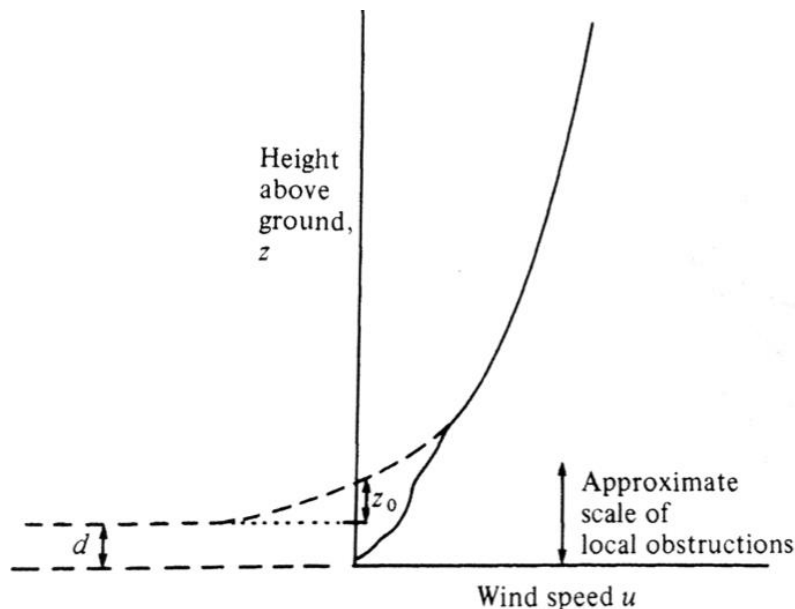
4.5 VIND OG VERTIKAL VINDPROFIL

Vindhastigheten og vindretningen nederst i det atmosfæriske grenselaget påvirkes av blant annet horisontale forskjeller i trykk og temperatur, overflateruhet, strålingsbalanse ved overflaten, tykkelsen til det atmosfæriske grenselaget og topografiske forhold (Arya 2001). Forståelse for hvordan disse faktorene påvirker den vertikale vindprofilen er viktig for å vurdere plasseringen av vindparker.

Ofte vil flere av faktorene endre seg på samme tid, men det finnes få studier som vurderer den samlede effekten av slike endringer på vindprofilen (Arya 2001).

4.5.1 VERTIKAL VINDPROFIL

I følge grenseflatebetingelsen for viskøse fluider må vindhastigheten ved bakken være 0 (Arya 2001), og gradvis stige jo lenger opp i grenselaget man kommer. Friksjonen fra bakken fører til en variasjon i vindhastighet og -retning vertikalt, og det oppstår vindskjær mellom de ulike luftlagene. Vertikal vindprofil for en nøytral atmosfære er vist i Figur 4.4.



Figur 4.4: Vertikal profil for vindhastigheten i en nøytral atmosfære. Hentet fra Twidell og Weir (2006 s. 294).

Vindprofilen viser hvordan vindhastigheten endrer seg med høyden, og kan for en nøytral atmosfære beskrives med den logaritmiske hastighetsfordelingen (Twidell & Weir 2006):

$$u_z = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z - d}{z_0} \right) \quad (1.18)$$

Der u_z er vindhastigheten i høyde z , u_* er friksjonshastigheten, k er von Karmans konstant, z_0 er ruhetslengden og d er nullplansforskyvningen. Nullplansforskyvningen representerer høyden over bakken der vindhastigheten er 0 grunnet hindringer som trær og bygninger, og er ofte nær 2/3 av den totale høyden til hindringene (Twidell & Weir 2006).

En forenklet versjon av vindprofilen kan beskrives med ligningen:

$$u_2 = u_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (1.19)$$

Der u_2 er vindhastigheten i høyde z_2 , u_1 er hastigheten i høyde z_1 og α er vindskjærkoeffisienten.

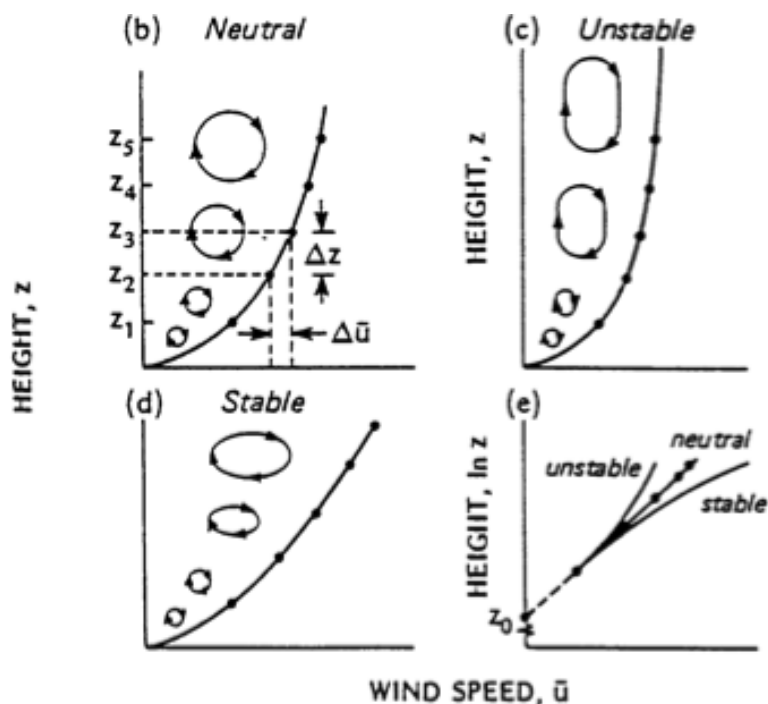
Den forenklede vindprofilen er ikke basert på prinsipper fra fluiddynamikk, men er tilpasset empiriske data og har vist seg som en rimelig tilnærming i den nederste delen av grenselaget (Wharton & Lundquist 2012). Formelen tar ikke direkte hensyn til overflatekarakteristikk og atmosfærisk stabilitet, men dette vil påvirke verdiene for vindskjærkoeffisienten:

$$\alpha = \frac{\ln(u_2/u_1)}{\ln(z_2/z_1)} \quad (1.20)$$

I et nær nøytralt grenselag vil verdier for α kunne variere fra rundt 0,1 for vann og isdekte overflater, til rundt 0,4 i bebygde områder (Arya 2001).

4.5.2 STABILITETSEFFEKTER OG GRENSELAGSHØYDE

Stabiliteten i det atmosfæriske grenselaget påvirker den vertikale utvekslingen av bevegelsesmengde og energi, og vil derfor også påvirke vindforholdene i grenselaget. Figur 4.5 illustrerer hvordan ulike stabilitetsforhold kan påvirke den vertikale vindprofilen, samt utstrekningen av turbulente virvler i grenselaget.



Figur 4.5: (b), (c) og (d) viser vertikal hastighetsprofil og strukturen av turbulente virvler ved ulike stabilitetsforhold. (e) viser de tre vindprofilene plottet mot en logaritmisk høydeskala. Hentet fra Beljaars (1992 s. 5).

Figur (b) viser den vertikale vindprofilen under nøytrale forhold.

Figur (c) viser hastighetsfordelingen når grenselaget er statisk ustabil. Under ustabile forhold, som i det blandede laget, vil det være sirkulasjon og vertikal utveksling grunnet konveksjon og oppdrift. Dette fører til lavere vertikalt vindskjær, og en mer uniform hastighets- og retningsprofil (Beljaars 1992). De høyeste vindskjærkoeffisientene finnes nær bakken.

Figur (d) viser den vertikale vindprofilen når grenselaget er statisk stabilt. Stratifiseringen i et stabilt grenselag vil begrense den vertikale utvekslingen av bevegelsesmengde, noe som kan føre til høyere vindskjær (Arya 2001).

Figur (e) viser de vertikale vindprofilene plottet mot en logaritmisk høydeskala, $\ln(z)$. Man ser fra figuren at vindprofilene avviker fra den logaritmiske vindprofilen under andre stabilitetsforhold enn nær nøytralt (Wharton & Lundquist 2012).

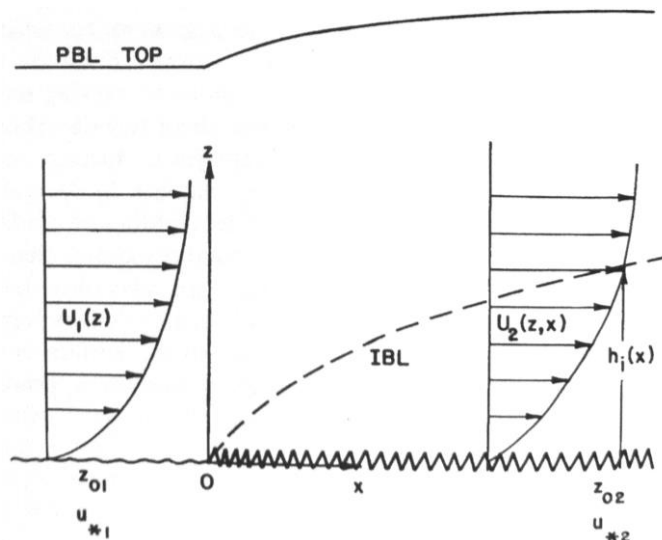
Grenselagshøyden bestemmer den øvre grensen for turbulensens vertikale utstrekning, og vil derfor kunne påvirke stabiliteten og den vertikale vindprofilen (Krogsæter & Reuder 2014). Høyden til grenselaget vil endre seg gjennom døgnet som følge av blant annet strålingsbalansen ved overflaten, se delkapittel 4.1, og dermed vil vindskjæret i en gitt høyde over jordoverflaten også kunne variere gjennom døgnet.

4.5.3 OVERFLATERUHET

Grenselaget som utvikler seg når vind beveger seg over ulike typer terreng vil være avhengig av ruheten til overflaten. Når vinden for eksempel beveger seg over et flatt terreng uten trær, vil grenselaget utvikle seg slik at det er i likevekt med påvirkningene fra bakken. Når vinden deretter beveger seg over et område med trær og mer komplekst terreng, vil den nederste delen av grenselaget bli påvirket av den endrede overflaten og det skapes et internt grenselag (Stull 1989), se Figur 4.6.

Dette interne grenselaget vil vokse mens vinden beveger seg over terrenget, fram til det når toppen av det atmosfæriske grenselaget eller til videre vekst begrenses av en inversjon. Under veksten vil det ligge et grenselag øverst som er upåvirket av den nye overflateruheten. I dette øvre laget vil vindprofilen være avhengig av jordoverflaten oppstrøms (Stull 1989).

Mange naturlige overflater består av flere overganger mellom områder med ulik overflateruhet, slik at det atmosfæriske grenselaget i prinsippet vil bestå av flere interne grenselag. Den vertikale vindprofilen vil dermed være påvirket av opptil flere overflater oppstrøms, og man vil ofte se diskontinuiteter i profilet der man har en overgang mellom de interne grenselagene (Arya 2001).



Figur 4.6: Utviklingen av det interne grenselaget og den vertikale vindprofilen etter en overgang mellom to områder med ulik overflateruhet. z_0 og u_* er ruhetslengden og friksjonshastigheten ved hver av overflatene. Hentet fra Arya (2001 s. 322).

4.5.4 OVERFLATETEMPERATUR OG SNØDEKKE

Forskjeller i albedo og varmekapasitet ved overflaten kan forekomme uavhengig av forskjeller i overflateruhet, og vil kunne føre til horisontale temperaturforskjeller (Arya 2001). Disse temperaturforskjellene kan gi opphav til termiske interne grenselag med sirkulasjon på mesoskala- og lokalt nivå. Et godt eksempel på slik sirkulasjon er sjøbris.

I et land som Norge vil snødekke kunne påvirke vindforholdene om vinteren. Med dyp nok snø vil overflaten kunne bli langt mer jevn, og slik redusere overflateruheten og endre vindprofilen på stedet. Snødekke vil også kunne gi reduserte temperaturer ved bakken, da det fører til høyere albedo og mindre varmetransport mellom luft og jordoverflate (Byrkjedal & Åkervik 2009a).

4.5.5 VIND OVER BAKKETOPPER OG KOMPLEKST TERRENG

I områder med høydeforskjeller vil luften nærmest jordoverflaten kunne varmes opp og avkjøles hurtigere enn resten av luften i samme høyde. Temperaturforskjellene som da oppstår vil forårsake sirkulasjon av luften og dermed generere lokale vinder (Stull 1989).

Et annet viktig fenomen forbundet med strømming i et slik terreng, spesielt ved nær nøytral sjiktning, er økningen av vindhastigheten over toppen av og rundt en bakketopp. Effekten kalles speed-up, og er avhengig av stigningen og bakkens størrelse (Arya 2001). På lesiden av bakketoppen vil det være en vakeregion med redusert vindhastighet og økt turbulens (Arya 2001).

Flere tredimensjonale bakketopper eller fjellrygger i samme område kan gi svært komplekse strømningsmønstre. Forsøk gjort i vindtunneler har vist størst speed-up-effekt over den første bakketoppen, men at disse effektene blir mindre etter hvert som de påfølgende fjellryggene og dalene påvirker strømmingen (Arya 2001).

I dalene vil vindhastigheten være redusert, og det vil være langt mer turbulens (Arya 2001). Ved strømming langs dalen vil middelvinden være noe høyere, men ikke fullt så høy som over bakketoppene.

4.5.5.1 STATISK STABILE FORHOLD

Under statisk stabile forhold vil vinden ha en økende tendens til å gå rundt hindringer i terrenget framfor over dem (Arya 2001). Dette skyldes at luften ikke har nok kinetisk energi til å kunne løftes på tvers av tetthetsgradientene i den stabile sjiktningen.

Ved særlig sterk stratifisering kan en del av vinden blokkeres rett foran hindringen og bli stillestående. Den blokkerte luften vil da bidra til at hindringen den resterende luften må passere over blir enda større (Stull 1989).

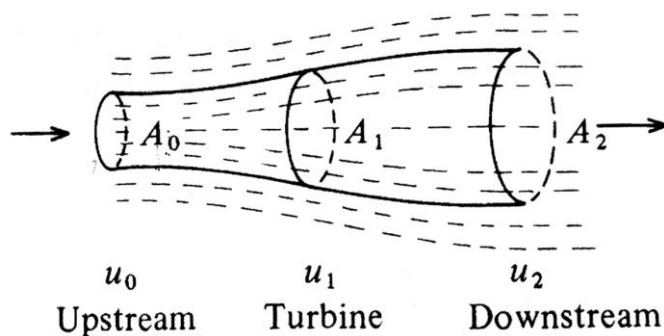
5 TEORI: ENERGI FRA VIND

Hvis man velger å se på en luftpakke i en luftstrøm før denne treffer en vindturbin, kan man definere effekten denne utgjør slik:

$$P_0 = \frac{1}{2}(\rho Au_0)u_0^2 = \frac{1}{2}\rho Au_0^3 \quad (1.21)$$

Der ρ er lufttettheten, u_0 er den uforstyrrede vindhastigheten og A er tverrsnittsarealet til turbindisken.

I en forenklet modell basert på Betz' lov forutsetter man at vind med konstant hastighet passerer gjennom og forbi vindturbinen, som vist i Figur 5.1. Man forutsetter også laminær strømning. I modellen behandles turbinen som en idealisert "aktuatordisk" som utvinner energi fra vinden. Denne energiutvinningen medfører en trykkendring over disken, og fører til at luftstrømmen har mindre bevegelsesmengde på den andre siden av turbinen (Twidell & Weir 2006).



Figur 5.1: Betz-modellen av en luftstrøm som passerer gjennom og forbi en vindturbin. Hentet fra Twidell og Weir (2006 s.294).

Figur 5.1 viser den uforstyrrede hastigheten før turbinen, u_0 , hastigheten når luftstrømmen passerer gjennom aktuatorens disk, u_1 , og hastigheten nedstrøms fra turbinen, u_2 . A_1 representerer tverrsnittsarealet som rotoren sveiper over, mens A_0 er arealet av luftstrømmen før den påvirkes av turbinen. A_2 skal representere tverrsnittsarealet av luftstrømmen der hastigheten nedstrøms er lavest. Hvis man antar en uniform luftstrøm, kan effekten turbinen henter ut uttrykkes ved kraften som virker på turbinen:

$$P_T = Fu_1 \quad (1.22)$$

Denne kraften er lik reduksjonen av bevegelsesmengde per tidsenhet for luftstrømmen, slik at:

$$P_T = Fu_1 = (\dot{m}u_0 - \dot{m}u_2)u_1 = \rho A_1 u_1^2 (u_0 - u_2) \quad (1.23)$$

Der \dot{m} er massestrømmen av luft og ρ er lufttettheten.

Man kan også uttrykke effekten som hentes ut ved hjelp av forandringen i kinetisk energi over turbinen:

$$P_T = \frac{1}{2} \dot{m}(u_0^2 - u_2^2) = \frac{1}{2} \rho A_1 u_1 (u_0^2 - u_2^2) \quad (1.24)$$

I følge Twidell og Weir (2006) kan man definere en interferensfaktor, a , som andelen hastighetsendring ved turbinen:

$$a = \frac{u_0 - u_1}{u_0} \quad (1.25)$$

Ved hjelp av denne faktoren og formel (1.23) og (1.24) kan man uttrykke P_T slik at:

$$P_T = 2\rho A_1 (1 - a)^2 u_0^2 [u_0 - (1 - a)u_0] = [4a(1 - a)^2] \left(\frac{1}{2} \rho A_1 u_0^3 \right) = [4a(1 - a)^2] P_0 \quad (1.26)$$

Dermed kan man definere andelen av effekt som hentes ut:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (1.27)$$

Den a -verdien som gir den maksimale effektandelen kan finnes ved derivasjon, som gir $a = 1/3$. Maksimal andel effekt som kan hentes ut av turbinen blir da:

$$C_{p \max} = \frac{16}{27} = 0.59 \quad (1.28)$$

Dette kriteriet kalles Betz-kriteriet, og gjelder for alle turbiner "plassert i en utvidet luftstrøm" (Twidell & Weir 2006 s. 277).

Betz-kriteriet er en teoretisk grense for andelen energi det er mulig å hente ut fra vinden, men det er nødvendig med optimal utforming og drift av vindturbinene for å nærme seg denne grensen (Twidell & Weir 2006).

Når vindturbinen henter ut kinetisk energi fra vinden under drift, vil vinden nedstrøms (vaken) ha redusert hastighet, lavere statisk trykk og høyere turbulens (Beaucage et al. 2012). Denne effekten kalles gjerne vakeeffekten.

6 METODE OG DATAMATERIALE

Målsettingen bak oppgaven var å analyse meteorologiske data fra vindparken og simulerte verdier fra WRF. I dette kapitlet beskrives det tilgjengelige datamaterialet fra vindmålemastene og modellen, og hvordan dette har blitt behandlet og korrigert. Kapitlet beskriver også de ulike trinnene i dataanalysen.

6.1 BESKRIVELSE AV DATAMATERIALE

6.1.1 DATA FRA KVT-MASTEN

En oversikt over sensorer og konfigurasjon av vindmålemasten som er installert og driftet av KVT er vist i Tabell 6.1.

Tabell 6.1: Oversikt over sensorer og konfigurasjon av vindmålemasten driftet av Kjeller Vindteknikk AS. Hentet fra Undheim (2013 s. 5).

Måleperiode	07.08.2006 – 07.09.2012
Koordinater (UTM WGS84 Zone 33)	E: 942703, N: 7915701
Høyde over havnivå	220,0 m
Sensorer (høyde):	
51.1 m	Anemometer: Risø
51.1 m	Anemometer: NRG #40
30.0 m	Anemometer: NRG #40
48.7 m	Vindretningsmåler: NRG #200P
43.0 m	Vindretningsmåler: NRG #200P
2.0 m	Trykk: NRG 110S
2.0 m	Temperatur: NRG 110S

6.1.1.1 ANALYSEPERIODE OG KORRIGERING AV DATA

Dataanalysen vil ta utgangspunkt i målinger fra mars 2007 til februar 2008 og fra juli 2008 til juli 2009. Disse periodene er valgt på bakgrunn av at begge vindmålemastene har god datatilgjengelighet i disse periodene.

KVT har valgt å kombinere tidsseriene fra vindretningsmålerne i 48.7 og 43.0 m høyde, da disse tidvis hadde dårlig datatilgjengelighet (Undheim 2013). Måledata før november 2011 kommer fra vindretningsmåleren i 43.0 m høyde. Tidsseriene har blitt isfiltrert basert på den kombinerte vindretningsserien, det vil si at perioder der instrumentene måler konstant vindretning filtreres ut grunnet mistanke om is på instrumentene.

Instrumentene har blitt kontrollert to ganger i løpet av den utvalgte perioden, og alle sensorene ble erstattet i september 2008. Den gjennomsnittlige datatilgjengeligheten

for data fra KVT-masten er 99.7 % i den utvalgte perioden, og 98.6 % etter isfiltrering (Undheim 2013).

6.1.1.2 TILGJENGELIGE DATA FRA KVT-MAST

Data fra KVT-masten er gitt for hvert timinuttersintervall. Datasettet brukt i analysen inneholder følgende parametere:

- Dato og tid (DD.MM.YY HH:MM:SS)
- Vindhastighet fra Risø-sensor i 51 m høyde [m/s]
- Standardavvik for hastigheten i 51 m høyde [m/s]
- Vindretning i både 43 m og 48 m [°]. Kombinert tidsserie, se forrige avsnitt.
- Vindhastighet i 30 m høyde [m/s]
- Standardavvik for hastigheten i 30 m høyde [m/s]
- Temperatur i 2 m høyde [°C]
- Trykk i 2 m høyde [Pa]
- Vindskjær mellom 30 m og 51 m høyde
- Turbulensintensitet i 51 m høyde

Vindhastighet, retning, temperatur og trykk er gitt som gjennomsnittsverdier for hvert timinuttersintervall, og vindretningen er målt relativt til rett nord. Vindskjærskoeffisienten mellom 30 m og 51 m høyde er beregnet ut fra formel (1.20), og turbulensintensiteten er beregnet ut fra vindhastigheten og standardavviket, se formel (1.8).

6.1.1.3 VAKEPÅVIRKEDE SEKTORER

Vindretningssektorer som er påvirket av vaken fra vindparken er beregnet i samsvar med standarden IEC 61400-12-1 (IEC 2005). KVT-masten er utenfor vaken for vindretninger fra 168,5° til 114,1° (relativt til rett nord), og denne sektoren utgjør 91,2 % av observasjonene (Undheim 2013).

I følge Undheim (2013) viser analyser av turbulens- og vindskjærdata fra KVT-masten at påvirkningen fra vakeregionen på måledataene er liten. Målingene har ikke blitt korrigert for masteskygge, men analyser av vindskjæret viser en liten effekt for sensoren i 30 m høyde fra sektoren sentrert ved 30°.

6.1.2 DATA FRA SIEMENS-MASTEN

En oversikt over sensorer og konfigurasjon av vindmålemasten fra Siemens er vist i Tabell 6.2. Detaljert informasjon om sensorene har ikke vært tilgjengelig fra Siemens.

Tabell 6.2: Oversikt over sensorer og konfigurasjon av vindmålemasten levert av Siemens. Hentet fra Undheim (2013 s. 10).

Måleperiode	08.11.2006 – 01.12.2009
Koordinater (UTM WGS84 Zone 33)	E: 945502, N: 7912488
Høyde over havnivå	251,1 m
Sensorer (høyde):	
70 m	Primæranemometer: Ukjent
68 m	Sekundæranemometer: Ukjent
65 m	Anemometer: NRG
29 m	Anemometer: Ukjent
10 m	Anemometer: Ukjent
70 m	Retningsmåler (primær): Ukjent
65 m	Retningsmåler: NRG
29 m	Retningsmåler: Ukjent
10 m	Retningsmåler: Ukjent
10 m	Trykk: Ukjent
10 m	Temperatur: Ukjent
10 m	Luftfuktighet: Ukjent
10 m	Nedbør: Ukjent

6.1.2.1 ANALYSEPERIODE OG KORRIGERING AV DATA

Periodene brukt i dataanalysen er som for KVT-masten, for lettere å kunne sammenlikne målinger fra de to mastene.

Instrumentene har ikke blitt kontrollert i måleperioden 08.11.2006 – 01.12.2009, derfor har KVT størst tillit til de tidligste målingene (Undheim 2013).

Den gjennomsnittlige datatilgjengeligheten for data fra Siemens-masten er 99,9 % i den utvalgte perioden, og 99,2 % etter isfiltrering.

6.1.2.2 TILGJENGELIGE DATA FRA SIEMENS-MAST

Data fra Siemens-masten er gitt for hvert timinuttersintervall. Datasettet brukt i analysen inneholder følgende parametere:

- Dato og tid (DD.MM.YY HH:MM:SS)
- Vindhastighet i 70 m høyde [m/s]
- Standardavvik for hastigheten i 70 m høyde [m/s]

- Vindretning i 67.5 m høyde [°]
- Vindhastighet i 29 m høyde [m/s]
- Standardavvik for hastigheten i 29 m høyde [m/s]
- Vindretning i 29 m høyde [°]
- Temperatur i 10 m høyde [°C]
- Trykk i 10 m høyde [Pa]
- Vindskjær mellom 29 m og 70 m høyde
- Turbulensintensitet i 70 m høyde

Vindhastighet, retning, temperatur og trykk er gitt som gjennomsnittsverdier for hvert timinuttersintervall. Vindskjær mellom 29 m og 70 m høyde er beregnet ut fra formel (1.20), og turbulensintensiteten er beregnet ved hjelp av formel (1.8).

6.1.2.3 VAKEPÅVIRKEDE SEKTORER

Vindretningssektorer som er påvirket av vaken fra vindparken er beregnet i samsvar med standarden IEC 61400-12-1 (IEC 2005). Siemens-masten er utenfor vakeregionen for retninger mellom 52,9° og 312,6° (relativt til rett nord). KVT har ikke hatt informasjon om referansen for retningene, men mener det er rimelig å anta at de er målt relativt til rett nord ettersom gjennomsnittsforskjellen i retningsmålingene mellom KVT- og Siemens-masten er -1° (Undheim 2013). 78,3 % av målingene er gjort utenfor vakeregionen.

Målingene er ikke korrigert for masteskygge, men analyser av vindskjæret i Siemens-masten viser at i hvert fall målingene fra sektorene sentrert ved 60° og 90° er påvirket av masten (Undheim 2013).

6.1.3 DATA FRA WRF

Kjeller Vindteknikk har kjørt mesoskalamodellen WRF for den utvalgte perioden, og alle WRF-data anvendt i analysen kommer fra denne modellkjøringen.

6.1.3.1 INNGANGSDATA

De geografiske dataene er hentet fra NOAA og N50-kartserien. Dataene har en horisontal oppløsning på 1 km, og terrenget er derfor glattet i forhold til virkeligheten.

WRF bruker et sett av definerte terrengetyper og ruhetslengder til å karakterisere terrenget på Kjøllefjord. Ruhetslengdene og terrengbeskrivelsene brukt i WRF om sommeren og vinteren er gitt i Tabell 6.3. WRF bruker tre terrengetyper til å beskrive

Dyfjordhalvøya med Kjøllefjord vindpark og havområdet rundt; "water bodies", "mixed tundra" og "bare ground tundra".

De meteorologiske dataene for Kjøllefjord er hentet fra National Centers for Environmental Prediction (NCEP).

Tabell 6.3: Terrengbeskrivelser og ruhetslengder brukt av WRF under kjøringen.

Terreng Kjøllefjord	Land use index	Beskrivelse	Ruhetslengde sommer [m]	Ruhetslengde vinter [m]
Hav	16	Water bodies	0.0001	0.0001
Kystlinje	22	Mixed tundra	0.15	0.15
Innland/ parkområde	23	Bare ground tundra	0.10	0.05

6.1.3.2 OPPSETT AV MODELL

KVT har kjørt WRF versjon 3.5.0 med oppsettet vist i Tabell 6.4.

Tabell 6.4: Oppsettet av WRF under kjøringen.

Oppsett	Beskrivelse
PBL-skjema:	Mynn2
Øvrige parametriseringsskjemaer:	Thompson (skyfysikk) Dudhia (kortbølget innstråling) RRTM (langbølget stråling) MYNN (overflatelaget) Thermal Diffusion Scheme (landoverflate)
Fitch:	No Fitch
Modellversjon:	WRF 3.5.0
Vertikaloppløsning:	51 nivå
Horisontaloppløsning:	1 km * 1 km
Modellhøyder:	12, 36, 61, 85, 109, 134, 158, 182, 206, 232, 260, 290

Modellen ble kjørt med grenselagsskjemaet "Mynn2", dette er nærmere beskrevet i avsnitt 6.1.3.3. Beskrivelser av de øvrige parametriseringsskjemaene kan finnes i Thompson et al. (2008), Dudhia (1989), Mlawer et al. (1997) og Dudhia (1996).

Modellen ble kjørt med en vertikaloppløsning på 51 nivå, der nivå 1 ligger på bakken og nivå 51 virker som et horisontalt lokk. Toppen av atmosfæren er i denne kjøringen definert som modellaget der $P_{topp} = 5000 Pa$. Data ble hentet ut for de 12 modellhøydene vist i Tabell 6.4.

Den horisontale oppløsningen var satt til 1 km gridruter. Under kjøringen var modellen satt opp med tre nestede domener, disse er vist i Figur 11.3 i kapittel 11.1. Det ytterste domenet, d01, har en oppløsning på 16 km. Innenfor d01 ligger domenet d02, med oppløsning 4 km. Helt innerst ligger domenet d03 med oppløsning 1 km.

Under denne kjøringen var modellen satt opp med "No Fitch", som tilsier at modellen ble kjørt uten at påvirkningen fra turbinene er regnet med. Modellen tar dermed utgangspunkt i terrenget uten vindparken, og vakeeffekter og turbulens fra parken blir ikke fanget opp.

6.1.3.3 PBL-SKJEMA: MYNN2

MYNN-skjemaet er en turbulensmodell utviklet av Mikio Nakanishi og Hiroshi Niino, og er nærmere beskrevet i deres artikkel Nakanishi og Niino (2009). MYNN er en videreutvikling av turbulensmodellen Mellor-Yamada (MY), og er ment å løse en del av MY-modellens problemer med langsom vekst av grenselaget under konvekktive forhold og for rask dissipasjon av turbulens under stabile forhold (Nakanishi & Niino 2009).

MYNN2 er en turbulensmodell av orden 1.5, som betyr at den kun bruker et begrenset antall av de prognostiske ligningene for varianser i turbulensmodellen (Stull 1989). En prognostisk ligning er en ligning som gir fremtidige verdier av en variabel basert på tidligere verdier, som for eksempel Navier-Stokes-ligningene. MYNN2 inneholder en prognostisk ligning for TKE (Angevine 2011).

MYNN2-skjemaet benytter lokal lukking, som betyr at ukjente variabler i et punkt blir parametrisert av verdier eller gradienter av kjente variabler i det samme punktet (Stull 1989).

I WRF er grenselagshøyden kun en diagnostisk parameter, slik at modellen vurderer grenselagshøyden først etter at de prognostiske variablene er beregnet i hvert tidsskritt. I MYNN2-skjemaet er grenselagshøyden definert som høyden hvor det lokale Richardson-tallet overstiger det kritiske tallet $R_C = 0.25$ (Krogsæter & Reuder 2014).

6.1.3.4 TILGJENGELIGE UTGANGSDATA

Timinuttersverdier:

WRF har beregnet timinuttersverdier for noen utvalgte variabler i perioden 01.03.2007 kl 00:10:00 til 01.07.2009 kl 03:00:00. Disse er vist i Tabell 6.5. Middelerverdi, standardavvik og maks- og minimumsverdi for disse variablene ble hentet ut av KVT i de tolv modellhøydene vist i Tabell 6.4.

Tabell 6.5: Tilgjengelige variabler beregnet i WRF hvert tiende minutt i perioden 01.03.2007 kl 00:10:00 til 01.07.2009 kl 03:00:00.

Tilgjengelige variabler	Beskrivelse
U	Vind i x-retning (staggered grid) [m/s]
V	Vind i y-retning (staggered grid) [m/s]
T2	Temperatur i 2 m høyde [K]
Q2	Fuktighetsinnhold i 2 m høyde [kg/kg]
U10	U i 10 m høyde [m/s]
V10	V i 10 m høyde [m/s]
GLW	Langbølget stråling ved jordoverflaten [W/m ²]
GSW	Kortbølget stråling ved jordoverflaten [W/m ²]
HFX	Varmefluks opp fra jordoverflaten [W/m ²]
LH	Latent varmekraft ved jordoverflaten [W/m ²]
TSK	Temperatur øverst i jordlaget [K]
FF	Vindhastighet i θ -punktet [m/s]
T	Temperatur [K]
Z	Geopotensiell høyde [m]

Kjeller Vindteknikk hentet ut timinuttersdata fra to WRF-punkter i nærheten av målemastene, kalt T15 og KVT. Koordinater og modellhøydene for disse punktene er gitt i Tabell 6.6, og de er markert på kartet i kapittel 11.1. WRF-punktet KVT ligger omtrent 1 km unna KVT-masten, men det var ingen tilgjengelige WRF-punkter som lå nærmere i kjøringen med timinuttersverdier. WRF-punktet T15 ligger i underkant av 1 km unna Siemens-masten.

Tabell 6.6: Utvalgte WRF-punkter fra Kjøllefjord vindpark. Koordinater er gitt i desimalgrader.

Navn	Breddegrad [°]	Lengdegrad [°]	Høyde i modell [m]
T15	70,9150	27,2758	237,1
KVT	70,9313	27,2207	205,5

Timesverdier:

For å vurdere tykkelsen av grenselaget og å kunne beregne ulike stabilitetsparametrer, ble det utført en WRF-kjøring med timesverdier av flere variabler. Denne kjøringen ble

gjort for perioden 01.03.2007 kl 04:00:00 til 01.07.2009 kl 03:00:00. Modellsimuleringen ble gjennomført med én simulering per døgn, der hver simulering kjørte 27 timer. Det var en spinup-periode på tre timer for hver simulering, og denne perioden har blitt slettet fra hver kjøring.

Tabell 6.7 viser relevante variabler som ble beregnet hver time i WRF-kjøringen. Variablene var tilgjengelige fra KVT i 15 modellhøyder opp mot 390 m.

Tabell 6.7: Relevante variabler fra WRF-kjøringen for perioden 01.03.2007 kl 04:00:00 til 01.07.2009 kl 03:00:00. Verdier for variablene er gitt som timesverdier.

Tilgjengelige variabler	Beskrivelse
COSALPHA	Rotasjon i forhold til rett nord, med en vinkel α
SINALPHA	Rotasjon i forhold til rett nord, med en vinkel α
FF	Vindhastighet i midten av ruten [m/s]
PBLH	Grenselagshøyde [m]
PSFC	Overflatetrykk [Pa]
Q2	Fuktighetsinnhold ved 2 m høyde [kg/kg]
HFX	Varmefluks opp fra jordoverflaten [W/m ²]
WRF_LAT	Breddegrad WRF-punkt [°]
WRF_LON	Lengdegrad WRF-punkt [°]
WRF_HGT	Høyde over overflaten WRF-punkt [m]
TEMPERATURE	Temperatur [K]
T2	Temperatur i 2 m høyde [m]
U	Vind i x-retning (staggered grid) [m/s]
V	Vind i y-retning (staggered grid) [m/s]
UST	Friksjonshastighet, similaritetsteori [m/s]
Z	Geopotensial [m ² /s ²]
ZNU	Sigmaverdier på halvnivå
ZNW	Sigmaverdier på fullnivå

Simulerte verdier for disse variablene var tilgjengelige i 12 ulike WRF-punkter, men siden dataene kun skulle bli brukt til klassifisering av stabilitet og grenselagshøyde, ble det valgt ut to punkter som lå nærme vindmålemastene. Koordinater og modellhøyder for de aktuelle punktene er vist i Tabell 6.8, og punktene er markert på kartet i kapittel 11.1. Punkt 4023 ligger vest-sørvest for Siemens-masten, mens punkt 4010 ligger sør for KVT-masten.

Tabell 6.8: Utvalgte WRF-punkter med timesverdier fra Kjøllefjord vindpark.

Navn	Breddegrad [°]	Lengdegrad [°]	Høyde i modell [m]
Punkt 4010	70,935478	27,218529	205,5
Punkt 4023	70,906937	27,265846	185,6

6.1.4 ROTERING I FORHOLD TIL GRID

Rutenettet i WRF-kjøringen var rotert med en vinkel α i forhold til rett nord, og man måtte derfor korrigere vindhastigheten og vindretningen slik at disse ble gitt relativt til rett nord, som vindmålemastene. Dette ble gjort ved å bruke variablene COSALPHA og SINALPHA fra WRF-kjøringen, som er beskrevet i Tabell 6.7.

COSALPHA og SINALPHA var gitt for hvert punkt og verdiene var de samme gjennom hele kjøringen.

6.1.5 INTERPOLERING TIL RELEVANTE HØYDER

For å kunne sammenlikne data fra WRF-kjøringen med observasjoner i Siemens- og KVT-masten, måtte WRF-dataene korrigeres til å representere data i de samme høydene som var tilgjengelige i vindmålemastene.

For å korrigere vindhastighetene til riktig høyde, tar man utgangspunkt i den logaritmiske vindprofilen, selv om denne tilnærmingen er mest nøyaktig ved nær nøytral stabilitet i grenselaget. Det var liten høydeforskjell mellom de utvalgte modellnivåene, så det var rimelig å bruke lineær interpolering i forhold til $\log(z)$ mellom nivåene.

Ved korrigering av temperaturen, T , ble det ansett som nøyaktig nok å ta i bruk vanlig lineær interpolering med høyden, z .

Erfaringsmessig forandrer vindretningene seg lite med høyde, og det ble derfor ikke ansett som nødvendig å korrigere retningen fra WRF til å representere retningen i 51 m og 67,5 m høyde i KVT- og Siemens-masten. I alle tilfeller der det er en sammenligning av retning, blir vindretningene i 61 m høyde fra WRF brukt.

6.2 DATAANALYSE

All analyse av tidsserier og måledata, samt plotting av resultater, har blitt gjort med MATLAB versjon R2013b. MATLAB er en matematisk programvare med et høynivå programmeringsspråk basert på C (MathWorks 2014). Alle skript og funksjoner anvendt i analysen kan finnes på den vedlagte CD-en. Datasettene brukt i oppgaven er eid av Statkraft og KVT, og kan derfor ikke distribueres.

Hvert trinn i dataanalysen blir beskrevet i de påfølgende delkapitlene.

6.2.1 DATAUTVELGELSE OG KORRIGERING AV MÅLEDATA OG WRF-DATA

Målinger fra mastene og timinuttersverdier fra WRF ble overlevert fra Kjeller Vindteknikk i form av .mat-filer. En del korrigerings og interpolering av datamaterialet var nødvendig, og ble gjort i MATLAB. Dette er nærmere beskrevet i 6.1.

WRF beregner ikke vindskjær direkte, så det var nødvendig å bruke vindhastigheten FF interpolert til høydene 70 m og 29 m i WRF-punkt T15, og til høydene 51 m og 30 m i WRF-punkt KVT. Man kunne dermed anvende formel (1.20) til å beregne vindskjærkoeffisientene.

Timesverdier for blant annet vindhastighet, friksjonshastighet, grenselagshøyde og varmefluks ble hentet ut for WRF-punktene 4010 og 4023. Disse dataene var tilgjengelige i .h5-format, og måtte leses inn og struktureres kronologisk i MATLAB. For timesverdiene var ikke høydene til modellnivåene beregnet, og man måtte derfor ta utgangspunkt i sigmaverdiene, variablene ZNW og ZNU fra modellen, og beregne trykket i hvert halvnivå og fullnivå fra (1.3). Man kunne deretter bruke formlene (1.5) og (1.6) til å regne seg fram til høyden.

På grunn av turbulens fra strømmingen gjennom vindparken, er det en del usikkerhet forbundet med målingene innenfor vakeregionen til målemastene (Undheim 2014). Det er også problematisk å sammenligne disse målingene med verdier fra WRF, da modellen ble kjørt uten påvirkningen fra parken. I sammenligningene av vindhastighet, vindskjær og turbulensintensitet er derfor perioder med vind fra de vakepåvirkede sektorene blitt filtrert bort for hver mast og for det nærmeste WRF-punktet.

I sammenligningen av vindskjæret har også perioder med vindhastighet lavere enn 4 m/s i den øverste høyden og 2 m/s i den nederste høyden blitt filtrert bort. Dette er for å se bort fra perioder der hastigheten er under cut-off hastighet for turbinene (Wan et al. 2010).

6.2.2 BEREGNING AV STABILITETSPARAMETRENER GJENNOM MÅLEPERIODEN

For å karakterisere stabilitetsforholdene på Kjøllefjord var det nødvendig å vurdere hvilke stabilitetsparametere som skulle beregnes. Valget falt på bulk Richardson-tallet og Obukhov-lengden, da disse er av de mest brukte i meteorologien. For sammenligning ble det også beregnet vertikale profiler for den virtuelle potensielle temperaturen. Beregningene ble gjort med timesverdier fra WRF-punktene 4010 og 4023.

Den virtuelle potensielle temperaturen i hvert modellnivå ble beregnet ut fra fuktighetsinnholdet i 2 m høyde, Q_2 , ved å bruke formlene (1.9) og (1.10).

For å vurdere stabiliteten i overflatelaget og over mastene, ble Richardson-tallet mellom 12 m og 109 m beregnet. Formel (1.13) ble benyttet, og forskjellene i beregnet potensiell

virtuell temperatur og vindhastighet FF mellom 12 og 109 m. Høydeforskjellen Δz ble beregnet ut fra de nøyaktige høydene til de to modellnivåene. For middeltemperaturen mellom lagene, $\overline{\theta_v}$, ble den virtuelle potensielle temperaturen i 61 m høyde benyttet.

Obukhov-lengden ble beregnet ut fra formel (1.17), ved å bruke UST og HFX som henholdsvis friksjonshastighet og varmefluks, og en verdi for von Karman-konstanten på 0,4. For middeltemperaturen i laget ble temperaturen i 2 m høyde, T2, benyttet.

6.2.3 KLASSIFISERING UT FRA PASQUILLS STABILITETSKLASSER

For en klassifisering av stabiliteten fra WRF gjennom hele måleperioden, ble Pasquills stabilitetsklasser benyttet. Ved å bruke grensene i Tabell 4.2 og beregnede timesverdier for Ri og L fra WRF-punktene 4010 og 4023 ble det laget fire tidsserier med stabilitetsklasser for måleperioden.

6.2.4 UTVALGTE CASEPERIODER

For å kunne se hvordan vindhastighet, retning, stabilitet og grenselagshøyde på Kjøllefjord varierte på samme tid, var det nødvendig å sammenligne målinger for hvert timinuttersintervall. Det ville blitt uforholdsmessig mye arbeid å gjøre dette for målinger fra hele måleperioden, så det ble det valgt ut fem caseperioder som skulle analyseres nærmere. Disse caseperiodene ble valgt ut på bakgrunn av meteorologiske kart fra måleperioden, slik at de representerte ulike stabilitetsforhold, vindretninger og vindhastigheter. Det var viktig å plukke ut noen typiske vintercase med vind fra sørlige sektorer og stabile forhold, og noen typiske sommercase med vind fra nordlige sektorer og lave vindhastigheter.

For å beskrive vindklimaet i hver caseperiode, var det relevant å se på målinger av vindhastighet, retning, vindskjær, turbulensintensitet og temperatur fra vindparken. Dette gjorde at man kunne identifisere perioder med særlige forskjeller mellom de to målemastene.

Det var videre nødvendig å klassifisere stabiliteten og grenselagshøyden i caseperioden, for å forsøke å relatere disse parametrene til observasjoner i mastene. Til dette formålet måtte beregnede verdier av Ri, L, vertikale temperaturprofiler og grenselagshøyden fra WRF-modellen benyttes.

For å vurdere hvordan modellen simulerer vindklimaet i hver caseperiode, ble verdier for vindhastighet, retning, vindskjær og temperatur fra modellen sammenlignet med målinger fra mastene i hvert tidsskritt. Målinger fra KVT-masten ble sammenlignet med simulerte verdier fra WRF-punkt KVT. Målinger fra Siemens-masten ble sammenlignet med simulerte verdier fra WRF-punkt T15.

De fem caseperiodene som ble analysert var:

- **Case 1: 04.01.2008 – 06.01.2008**
- **Case 2: 09.02.2008 – 11.02.2008**
- **Case 3: 26.12.2008 – 28.12.2008**
- **Case 4: 07.08.2007 – 09.08.2007**
- **Case 5: 06.07.2007 – 08.07.2007**

Hver av caseperiodene blir nærmere beskrevet i resultatkapittelet.

6.2.5 SAMMENLIGNING AV STABILITETSKLASSER OG VINDKLIMA

For å relatere observerte hastighetsforskjeller mellom mastene til stabilitetsforhold og grenselagshøyde gjennom hele tidsperioden, var det hensiktsmessig å dele forskjellene opp i 8 klasser. Disse er vist i Tabell 6.9. Ved å bruke disse klassene kunne trender i stabilitet og grenselagshøyde forbundet med høyere hastighet i en av mastene identifiseres, og man kunne undersøke om særlig store forskjeller forekom under bestemte meteorologiske forhold.

Stabilitetsparametrene og grenselagshøyden var beregnet for hver time, derfor ble middelverdien av vindhastigheten for hver time benyttet. For å beregne middelverdien ble data fra en halvtime før og etter tidspunktet benyttet, slik at middelverdien for kl 16 er basert på de målte vindhastighetene mellom kl 15:30 og kl 16:30. Forskjellene mellom mastene er derfor forskjellene mellom timesmiddelverdiene. For klasse 1-4 er timesmiddelet for hastigheten høyest ved Siemens-masten, og for klasse 4-8 er timesmiddelet høyest ved KVT-masten.

Tabell 6.9: 8 klasser for hastighetsforskjellene mellom KVT- og Siemens-masten. For klasse 1-4 er hastigheten høyest ved Siemens-masten, for klasse 4-8 er hastigheten høyest ved KVT-masten.

Hastighetsklasse	v_{diff} , hastighetsforskjell KVT-Siemens
1	$v_{diff} < -6 \text{ m/s}$
2	$-6 \text{ m/s} \leq v_{diff} < -4 \text{ m/s}$
3	$-4 \text{ m/s} \leq v_{diff} < -2 \text{ m/s}$
4	$-2 \text{ m/s} \leq v_{diff} < 0 \text{ m/s}$
5	$0 \text{ m/s} \leq v_{diff} < 2 \text{ m/s}$
6	$2 \text{ m/s} \leq v_{diff} < 4 \text{ m/s}$
7	$4 \text{ m/s} \leq v_{diff} < 6 \text{ m/s}$
8	$v_{diff} \geq 6 \text{ m/s}$

Tilsvarende klassifisering ble gjort for forskjellene mellom WRF-punktene KVT og T15, for å se om WRF fanget opp den samme trenden.

Basert på de 8 hastighetsklassene kunne man sortere de beregnede tidsseriene for stabilitet. Det var dermed mulig å lage en oversikt over hyppigheten av stabilitetsklassene innenfor hver hastighetsklasse.

For å lage en tilsvarende oversikt over grenselagshøyden innenfor hver hastighetsklasse, var det nødvendig å lage en klassifisering av høyden. Grenselagshøyden ble sortert i 5 klasser, disse er vist i Tabell 6.10. Det var spesielt interessant å identifisere trender i hastigheten ved de laveste grenselagshøydene, derfor har klasse 1 og 2 et intervall på bare 250 m.

Basert på klassifiseringen ble det laget en tidsserie med PBL-klasser. Disse tidsseriene kunne deretter sorteres ut fra de 8 hastighetsklassene, og man kunne lage en oversikt over hyppigheten av PBL-klassene innenfor hver hastighetsklasse.

Tabell 6.10: 5 klasser for grenselagshøyden, PBLH.

PBL-klasse	Grenselagshøyde, PBLH [m]
1	$PBLH < 250 \text{ m}$
2	$250 \text{ m} \leq PBLH < 500 \text{ m}$
3	$500 \text{ m} \leq PBLH < 1000 \text{ m}$
4	$1000 \text{ m} \leq PBLH < 1500 \text{ m}$
5	$1500 \text{ m} \leq PBLH$

Tidsseriene for vindhastigheten i mastene og fra WRF ble også sortert ut fra stabilitetsklassene A-G og PBL-klassene 1-5. For hver av klassene ble middelveiden for vindhastigheten hver time i KVT-masten plottet mot middelveiden i Siemens-masten. Det tilsvarende ble gjort for vindhastighetene i WRF-punktene KVT og T15 i 61 m høyde.

7 RESULTATER OG DISKUSJON

I dette kapittelet presenteres og drøftes utvalgte resultater fra analysearbeidet.

Kapittelet er delt opp i flere delkapitler. Det første delkapittelet presenterer stabilitetsforholdene på Kjøllefjord, basert på beregnede Richardson-tall og Obukhovlengder fra WRF. En drøfting av disse resultatene og stabilitetsparametrene finnes på slutten av delkapittelet.

De fem neste delkapitlene viser resultater fra hver caseperiode. I disse delkapitlene vil det først være en presentasjon av caseperioden basert på meteorologiske kart. Deretter vil resultater fra sammenligningen mellom målingene og WRF, og resultater for grenselagshøyden og stabiliteten presenteres. Til slutt vil det være en sammenligning av vindhastighet, vindskjær og turbulensintensitet mellom målemastene. Resultatene fra hver caseperiode vil drøftes på slutten av delkapitlene.

I det sjette delkapittelet vil samlede resultater fra alle caseperiodene presenteres og drøftes. Delkapittelet inneholder også vurderinger av WRF-modellen og målingene fra mastene.

I de to siste delkapitlene vil resultater fra analysen av sammenhengen mellom hastighetsforskjeller i mastene, stabilitetsforhold og grenselagshøyde presenteres og drøftes.

7.1 STABILITETSFORHOLD PÅ KJØLLEFJORD

I dette delkapittelet presenteres stabilitetsforholdene i Kjøllefjord vindpark, basert på data fra WRF-modellen.

7.1.1 RESULTATER

Stabiliteten gjennom hele måleperioden ble klassifisert i forhold til Pasquills stabilitetsklasser. Hyppigheten (i timer) av klassene A-F ble beregnet basert på timesverdier for Obukhov-lengden fra WRF-punkt 4010 og 4023, og er vist i Tabell 7.1. Hyppigheten for klassene A-G ble også beregnet basert på timesverdier for Richardson-tallet fra WRF-punkt 4010 og 4023. Dette er vist i Tabell 7.2.

Tabell 7.1: Hyppigheten (i timer) av Pasquills stabilitetsklasser gjennom hele måleperioden, basert på beregnede timesverdier for L fra WRF-punkt 4010 og 4023.

WRF-punkt	Klasse A	Klasse B	Klasse C	Klasse D	Klasse E	Klasse F
4010	257	1134	2673	14239	1175	994
4023	570	1223	2516	12748	1472	1943

Tabell 7.2: Hyppigheten (i timer) av Pasquills stabilitetsklasser gjennom hele måleperioden, basert på beregnede timesverdier for Ri fra WRF-punkt 4010 og 4023.

WRF-punkt	Klasse A	Klasse B	Klasse C	Klasse D	Klasse E	Klasse F	Klasse G
4010	1507	624	1240	9849	2041	2049	3162
4023	1305	662	1266	9408	2212	2092	3527

Ut fra Tabell 7.1 og Tabell 7.2 kan man beregne andelen av ustabile (klasse A-C), nøytrale (klasse D) og stabile forhold (klasse E-G) gjennom hele måleperioden. Det er kun en liten forskjell i resultatene mellom WRF-punktene 4010 og 4023, så data fra punkt 4010 har blitt mest brukt i oppgaven. Ut fra beregnede verdier for Obukhov-lengden fra WRF-punkt 4010 er forholdet 19,8 % : 69,6 % : 10,6 % (ustabil : nøytral : stabil). Ut fra beregnede verdier for Ri fra WRF-punkt 4010 er forholdet 16,4 % : 48,1 % : 35,4 % (ustabil : nøytral : stabil).

7.1.2 DISKUSJON: STABILITET FRA WRF OG STABILITETSFORHOLD PÅ KJØLLEFJORD

Stabilitet er en viktig parameter i beskrivelsen av vindklimaet i en vindpark, og karakteriseringen av stabiliteten på Kjøllefjord vil være verdifull når man skal forsøke å forklare de observerte trendene i målingene fra parken. En karakterisering av

stabiliteten vil også være viktig i senere analyser av produksjonen, da utmattingen av turbinene er avhengig av stabilitets- og turbulensforhold (Krogsæter & Reuder 2014).

Tabell 7.1 viser Pasquill-klassene som er beregnet basert på Obukhov-lengden fra WRF-punkt 4010 og 4023. Det er en liten forskjell mellom de to WRF-punktene, men trenden er at det er flest tilfeller av nøytrale forhold (klasse D). Beregningene viser også at det er flere tilfeller av ustabile forhold (klasse A-C) enn stabile (E-F).

Tabell 7.2 viser Pasquill-klassene som er beregnet basert på Richardson-tallet fra WRF-punkt 4010 og 4023. Her er forskjellen mellom de to WRF-punktene noe mindre. Beregningene viser at det er mest nøytrale forhold på Kjøllefjord, samme som for Obukhov-lengden, men her viser beregningene også at det er flere tilfeller av stabile forhold (klasse E-G) enn ustabile forhold (A-C). Det er også en høy andel av tilfeller der overflatelaget blir karakterisert som veldig stabilt (klasse G).

Det har ikke blitt foretatt målinger av varmefluks eller temperatur i flere høyder i mastene, dermed kan ikke stabiliteten fra WRF valideres med observasjoner på Kjøllefjord. Forfatteren har heller ikke klart å finne andre studier som beskriver stabilitetsforholdene gjennom året i Finnmark. Uten observasjoner må vurderingen av stabiliteten baseres på en vurdering av de fysiske parametrene som anvendes i utregningene, og hvordan disse er beregnet i WRF. Det er også nødvendig å vurdere grensene brukt i Pasquill-klassifiseringen.

I utregningen av Obukhov-lengden tar man i bruk overflateverdier for temperatur, lufttetthet og varmefluks, og derfor forventes det at L vil være et dårlig mål på stabiliteten i luftlag høyere opp enn overflatelaget (Wharton & Lundquist 2012). Ved å bruke overflateverdier vil verdiene for L også være mer følsomme for parametriseringsfeil innenfor én enkelt gridrute. Flere nyere studier har vist at WRF-modellen ofte har problemer med å gi riktige verdier for friksjonshastigheten og varmefluksen (Floors et al. 2013), noe som vil gi feilaktige verdier for L .

I utregningen av bulk Richardson-tallet benyttes gradienter av virtuell potensiell temperatur, høyde og vindhastighet mellom 12 og 109 m. Dette er et luftlag som strekker seg over målemastene og turbinene, og burde slik være et bedre mål på stabiliteten i høydene der målingene foretas. Selv om den virtuelle potensielle temperaturen vil være avhengig av varmefluksen fra bakken, vil adveksjon av luft fra andre gridruter lengre opp i luftlaget kunne føre til at verdiene er mindre følsomme for parametriseringsfeil innenfor en gridrute. Høyden til sigma-flatene endrer seg med lufttetthet og trykk gjennom året, noe som medfører at høydeforskjellene mellom de utvalgte modellagene også vil endre seg. Denne effekten antas likevel å være liten i de nederste lagene i modellen.

Grensene for klassifiseringen av Pasquill stabilitetsklasser basert på L er hentet fra nomogrammet i Golder (1972), som er utviklet basert på observasjoner fra fem steder med ulik ruhetslengde. For å sjekke gyldigheten av disse grensene har de blitt

sammenlignet med verdier brukt i NORSEWInD-prosjektet (Hahmann et al. 2012). Grensene er veldig like, og gav samme trend i stabilitetsfordelingen gjennom måleperioden. Hahmann et al. (2012 s. 40) argumenterer for at grensene for nøytral er for restriktive, og at et mindre intervall ($-0,001 \text{ m}^{-1} < 1/L < 0,001 \text{ m}^{-1}$) bør brukes. Det mindre intervallet er ikke anvendt i denne oppgaven, men vil kunne påvirke resultatet i Tabell 7.1 som viser en klar overvekt av tilfeller av nøytrale forhold.

Grensene for Ri er beregnet med bakgrunn i Golders nomogram, og vil derfor også være påvirket av de restriktive grensene for nøytral sjiktning. I følge Mohan og Siddiqui (1998) har grensene likevel vist seg å være i god overensstemmelse med Pasquills klasser, og resultatene i Tabell 7.2 viser at Ri i langt større grad forutsier tilfeller av ustabile og stabile forhold.

Grensene for både L og Ri vil være avhengig av ruhetslengden som er brukt i modellen. Tabell 6.3 viser at WRF brukte ruhetslengden 0,10 m om sommeren og 0,05 m om vinteren i parken, men informasjon om modellens karakterisering av sommer og vinter har ikke vært tilgjengelig. Ruhetslengden 0,10 m har derfor blitt anvendt for Pasquill-klassifiseringen, da forskjellen på 0,05 m har liten innvirkning på grensene for ustabil, nøytral og stabil i nomogrammet i Golder (1972). $z_0 = 0,10 \text{ m}$ anses som en realistisk verdi i vindparken på Kjøllefjord.

De beregnede verdiene for Ri og L vil være avhengig av parametriseringsskjemaene brukt i WRF-kjøringen, da det påvirker beregningene for blant annet varmekraft og friksjonshastighet. Krogsæter og Reuder (2014) har anvendt fem ulike PBL-skjemaer i WRF, og vurdert hvordan de modellerer stabiliteten i Nordsjøen. Beregninger av Richardson-tallet fra WRF har blitt sammenlignet med beregninger basert på målinger fra plattformen FINO1. Krogsæter og Reuder har brukt de samme grensene for Ri som er anvendt i denne oppgaven, og en høydegradient på 100 m. Resultatene deres viser at MYNN2-skjemaet har den laveste frekvensen av feil (-1,6 %) i forhold til målingene fra FINO1 for stabilitetsklassene A-B, noe som tilsier at WRF med MYNN2-skjemaet er godt egnet til å forutsi ustabile forhold.

Det er forventet at et skjema som benytter lokal lukking vil være bedre til å forutsi nøytrale og stabile forhold, men resultatene i Krogsæter og Reuder (2014) viser at frekvensen av feil for MYNN2-skjemaet i forhold til FINO1 for stabilitetsklasse F-G var +12,3 %. Det vil tilsa en overprediksjon av stabile forhold. Resultatene fra Krogsæter og Reuder (2014) er basert på forhold offshore, men kan indikere at det er færre tilfeller av stabile forhold på Kjøllefjord enn resultatene i Tabell 7.2 tilsier.

Det er vanskelig å komme med en endelig beskrivelse av stabilitetsforholdene på Kjøllefjord uten observasjoner fra parken eller andre stasjoner i nærheten, men ut fra vurderingene ovenfor festes det størst lit til Pasquill-klassifiseringen basert på Richardson-tallet. Basert på Richardson-tall fra WRF-punkt 4010 er stabilitetsforholdet i perioden mars 2007 til juni 2009 16,4 % : 48,1 % : 35,4 % (ustabil : nøytral : stabil).

7.2 CASE 1: 04.01.2008 – 06.01.2008

I dette delkapittelet vil resultater fra caseperiode 1 presenteres og drøftes.

7.2.1 BESKRIVELSE AV CASEPERIODE 1

Caseperiode 1 vil beskrives basert på meteorologiske kart fra perioden. Meteorologiske kart som viser bakkestrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa for caseperiode 1 er vist i Figur 11.6-Figur 11.8 i kapittel 11.3. Kartene er for tidspunktet kl 12 på hver av dagene i caseperioden. De hvite isobarene gir verdier for bakkestrykk i hPa, mens fargeskalaen gir geopotensiell høyde ved 500 hPa i meter.

Ut fra kartene ser man at det er en høytrykksituasjon over Finnmark, som forflytter seg østover gjennom perioden. Isobarene indikerer at det er vind fra sørlig og sørvestlig retning, som betyr at det er transport av luft fra Finnmarksvidda. Bakketemperaturene i innlandet vil være lave i denne perioden fordi det er minimalt med innstråling, slik at lufta fra Finnmarksvidda sannsynligvis er kald og stabil. Trykkflaten ved 500 hPa ligger høyt over Kjøllefjord, som betyr at det er varmt i høyden. Sammen med kald lufttransport fra sør vil det tilsi stabile forhold på Kjøllefjord.

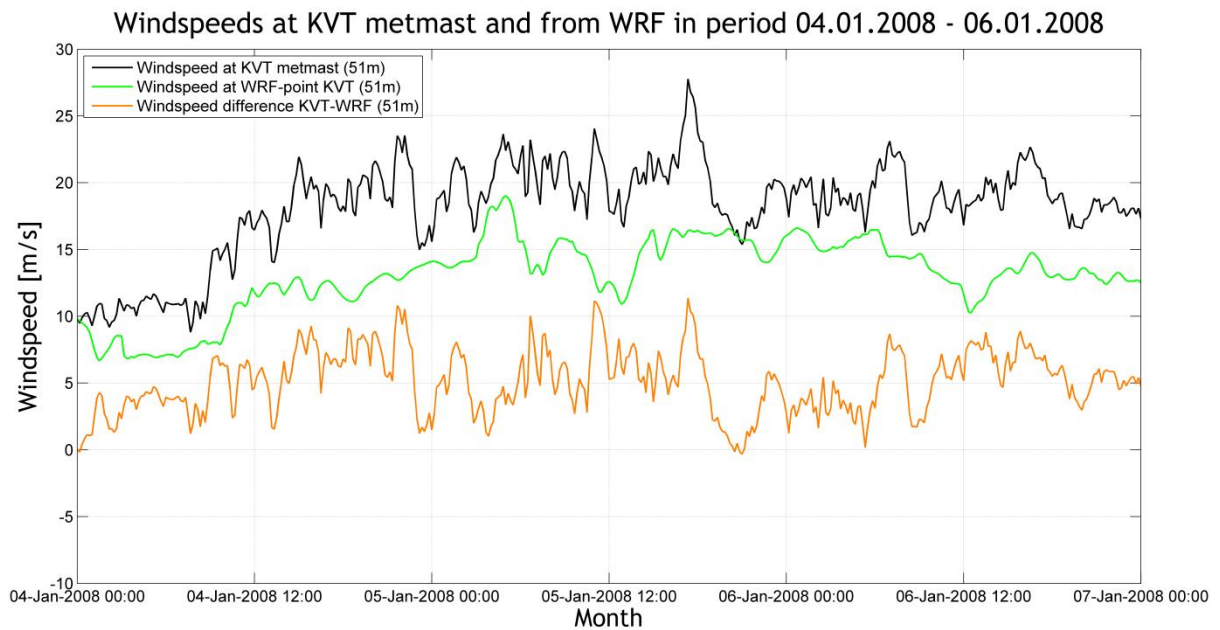
7.2.2 RESULTATER: SAMMENLIGNING MÅLINGER OG WRF

Figur 7.1 og Figur 7.2 viser vindhastigheten i mastene sammenlignet med simulerte verdier fra WRF.

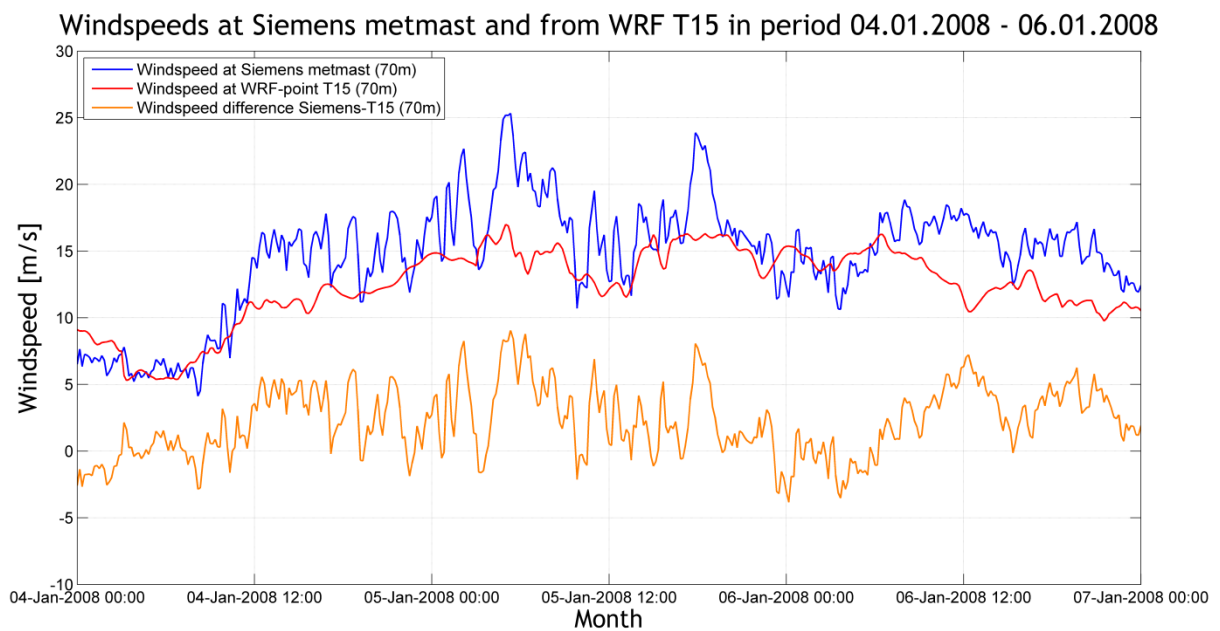
Figur 7.3 og Figur 7.4 viser målt vindretning i mastene, og simulert vindretning fra WRF.

For at det skulle være lettere å se trendene i vindskjæret, ble glidende timesmiddelværdier gjennom caseperioden beregnet. Figur 7.5 og Figur 7.6 viser vindskjæret i målemastene og fra WRF.

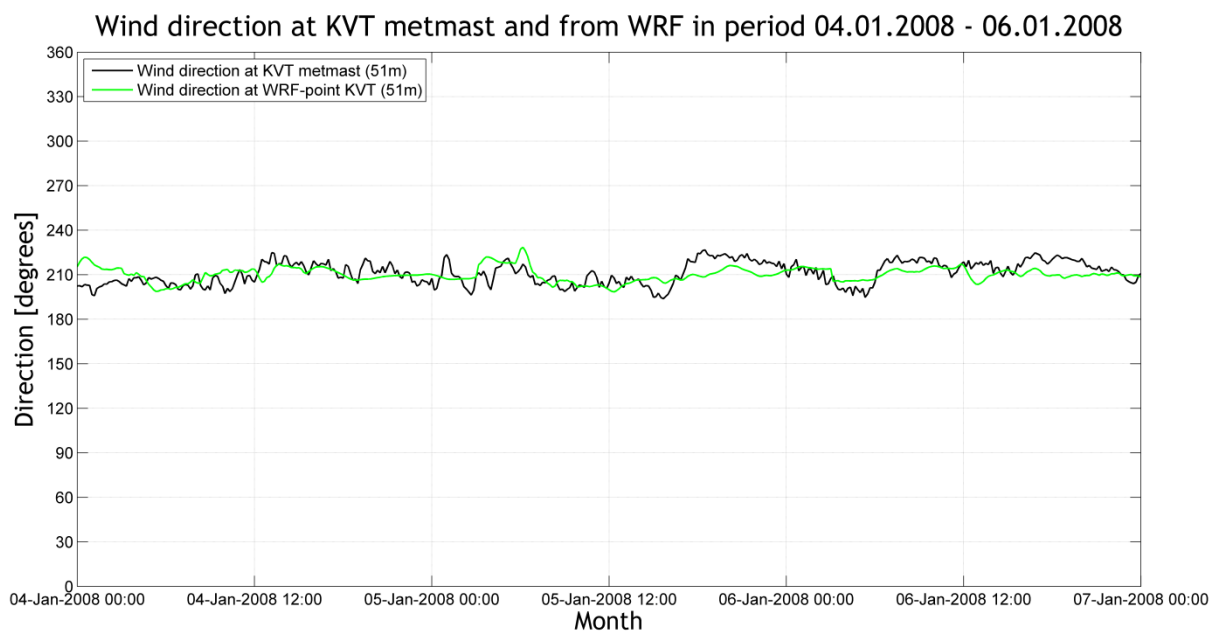
Figur 7.7 viser målt temperatur i 2 m høyde i KVT-masten og fra WRF-punkt KVT, og temperatur i 10 m høyde i Siemens-masten og fra WRF-punkt T15.



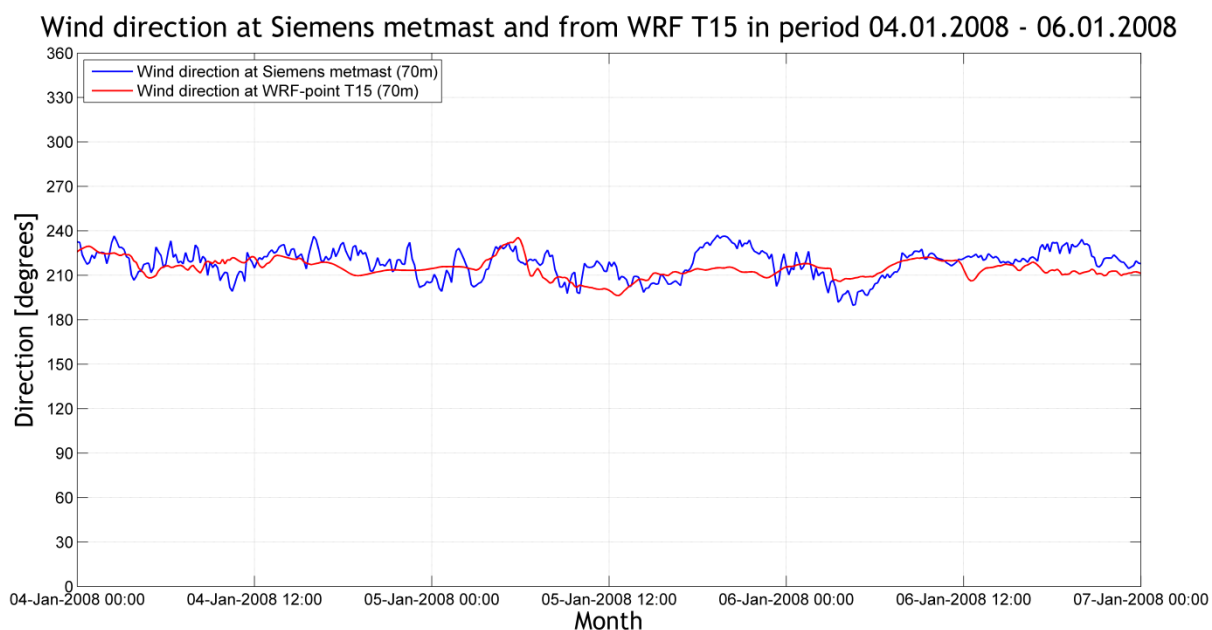
Figur 7.1: Vindhastigheten i 51 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Differansen mellom mastene er vist som den oransje linjen.



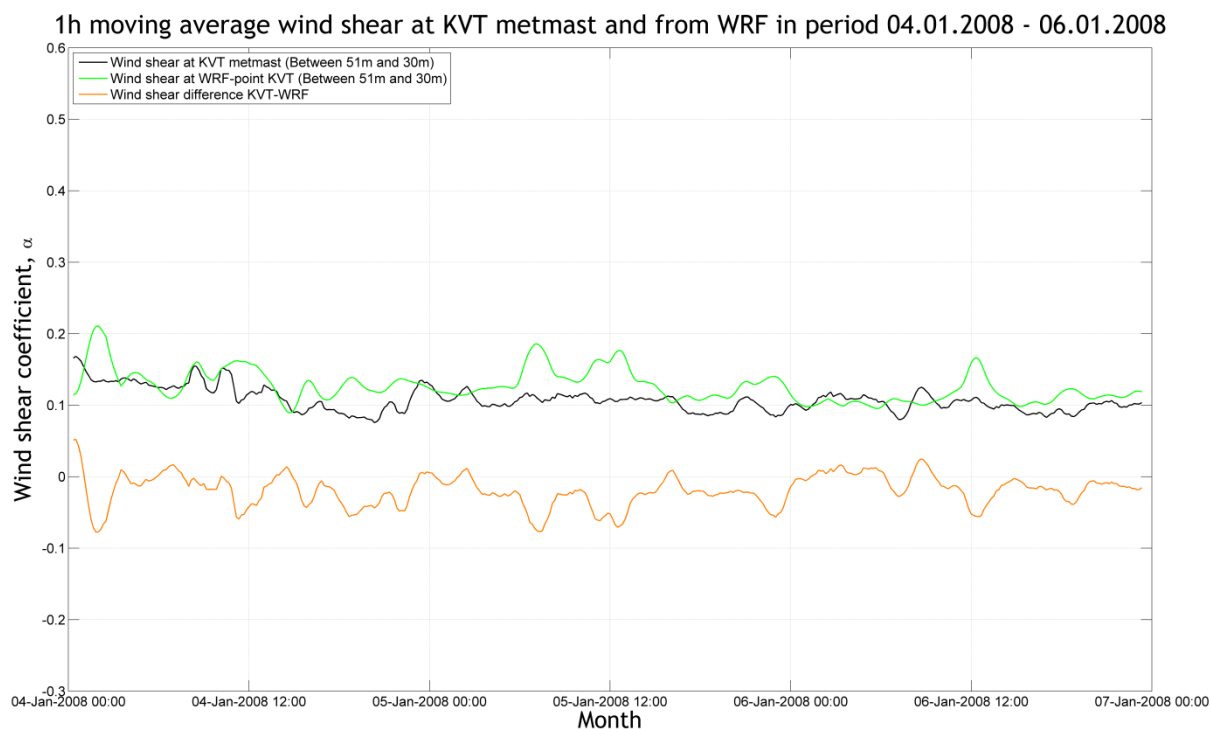
Figur 7.2: Vindhastigheten i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Differansen mellom mastene er vist som den oransje linjen.



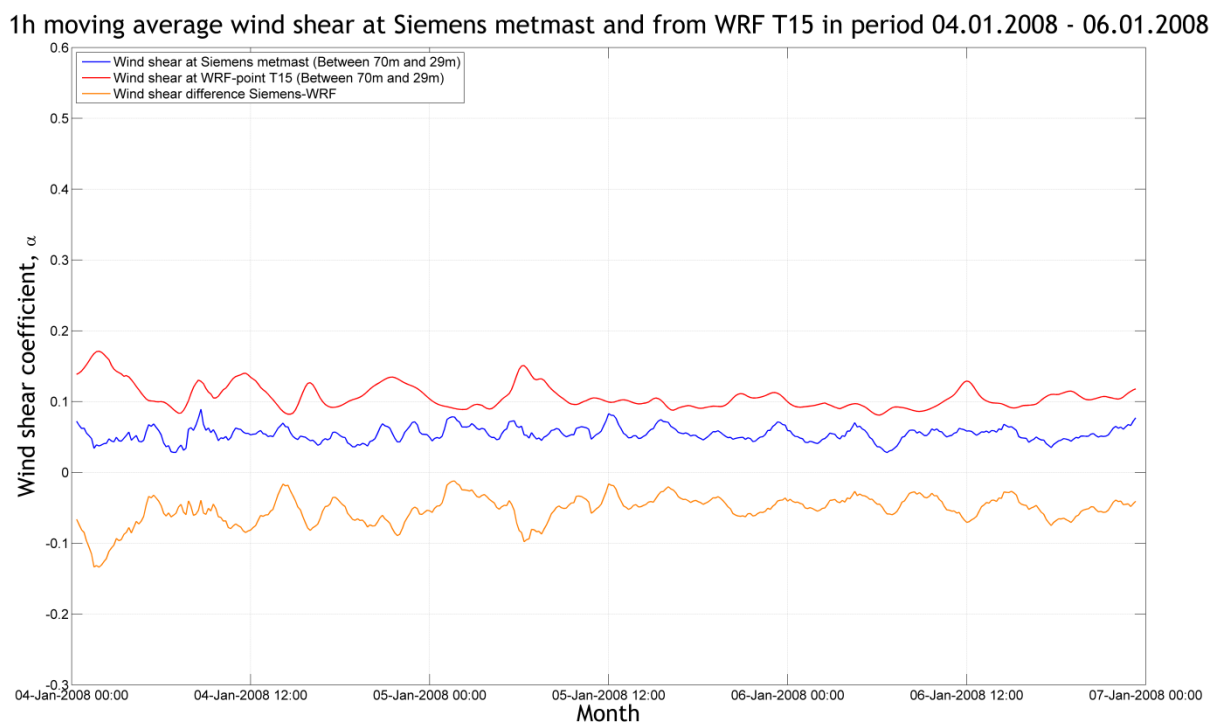
Figur 7.3: Vindretning i 43/48 m højde i KVT-masten (svart linje) og 61 m højde fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008.



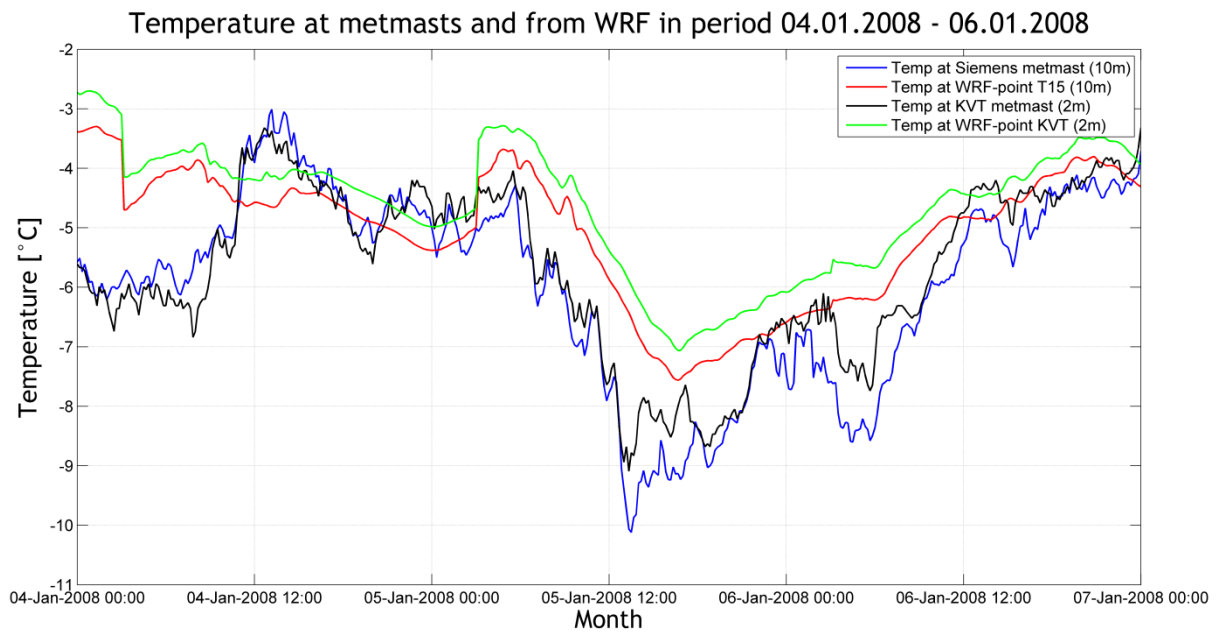
Figur 7.4: Vindretningen i 70 m højde i Siemens-masten (blå linje) og i 61 m højde fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008.



Figur 7.5: Glidende timesmiddelverdi for vindskjæret i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) for perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Differansen mellom mastene er vist som den oransje linjen.



Figur 7.6: Glidende timesmiddelverdi for vindskjæret i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) for perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Differansen mellom mastene er vist som den oransje linjen.



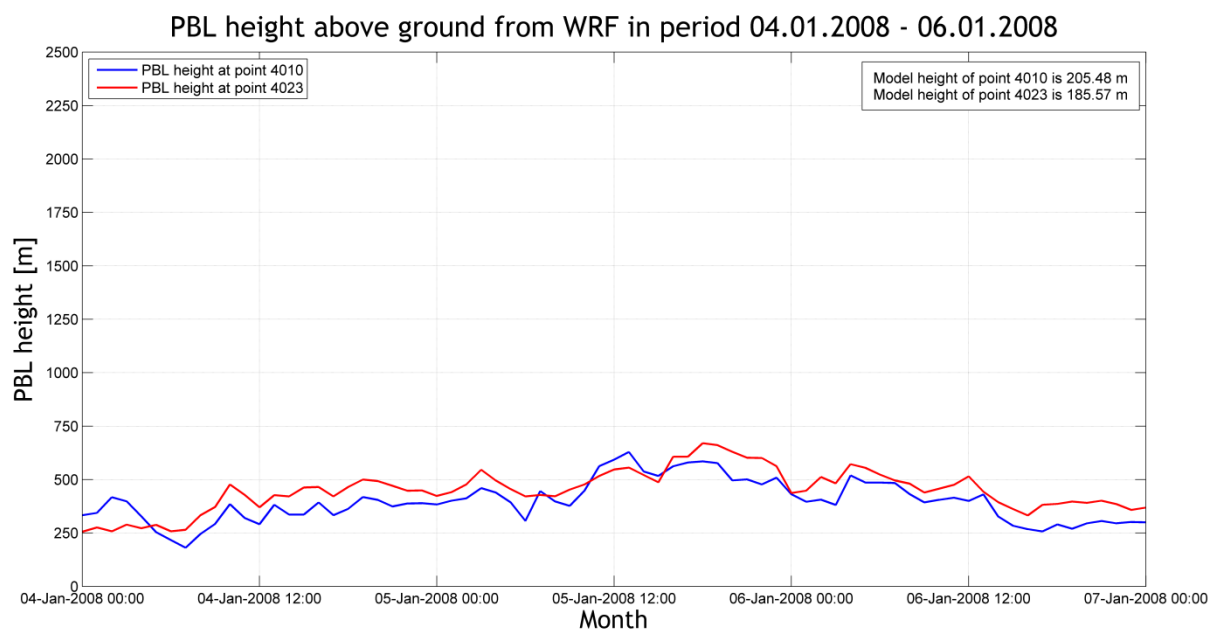
Figur 7.7: Temperaturen i 10 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punkt T15 (rød linje). Temperaturen i 2 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punkt KVT (grønn linje). Perioden er 04.01.2008 til 06.01.2008.

7.2.3 RESULTATER: GRENSELAGSHØYDE OG STABILITET

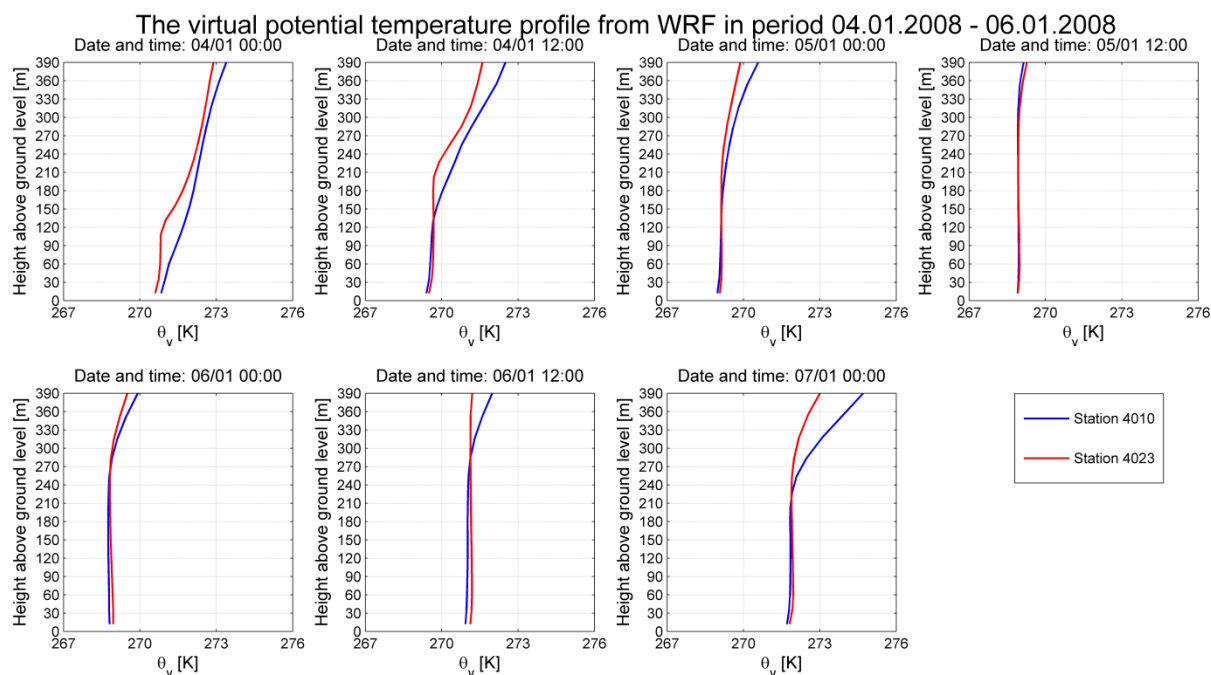
Figur 7.8 viser grenselagshøyden fra WRF-punkt 4010 og 4023.

Figur 7.9 viser de vertikale profilene opp til 390 m for den virtuelle potensielle temperaturen fra WRF-punkt 4010 og 4023. De vertikale temperaturprofilene for WRF-punkt 4010 og 4023 ble plottet for hver sjette time, for å fange opp døgnvariasjoner i stabiliteten.

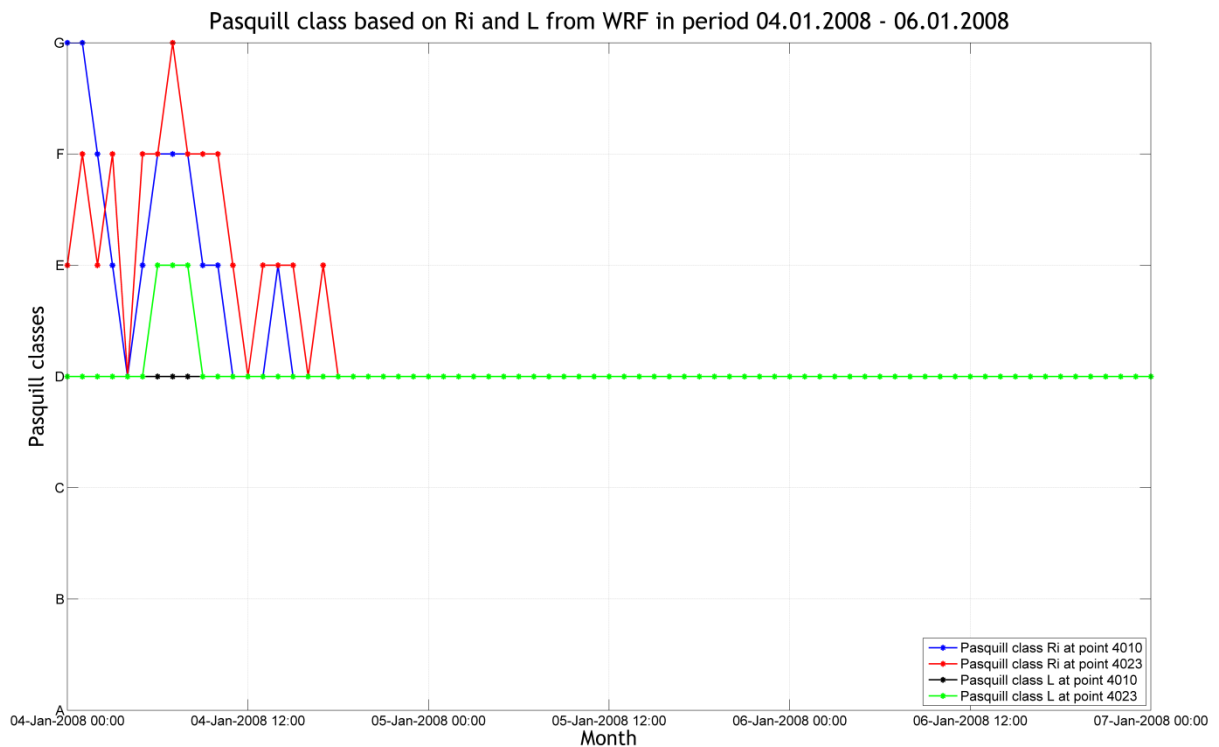
Figur 7.10 viser Pasquill-klassifiseringen gjennom caseperioden basert på beregnede verdier for Ri og L fra WRF-punkt 4010 og 4023.



Figur 7.8: Grenselagshøyde fra WRF-punkt 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008.



Figur 7.9: Vertikale profiler for den virtuelle potensielle temperaturen fra WRF-punktene 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Profilene er plottet for hver sjette time gjennom perioden.



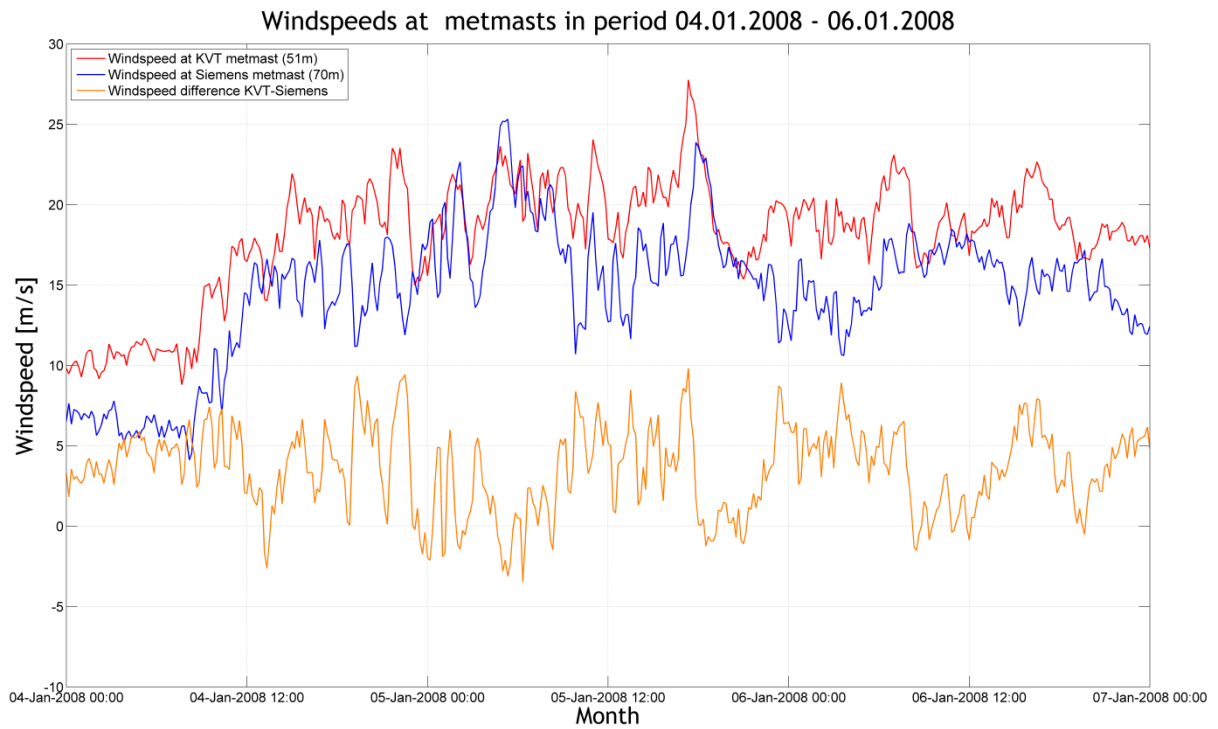
Figur 7.10: Pasquill-klasser i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Klassene basert på Ri fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som blå og rød linje, mens klassene basert på L fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som svart og grønn linje.

7.2.4 RESULTATER: SAMMENLIGNING MELLOM MÅLEMASTENE

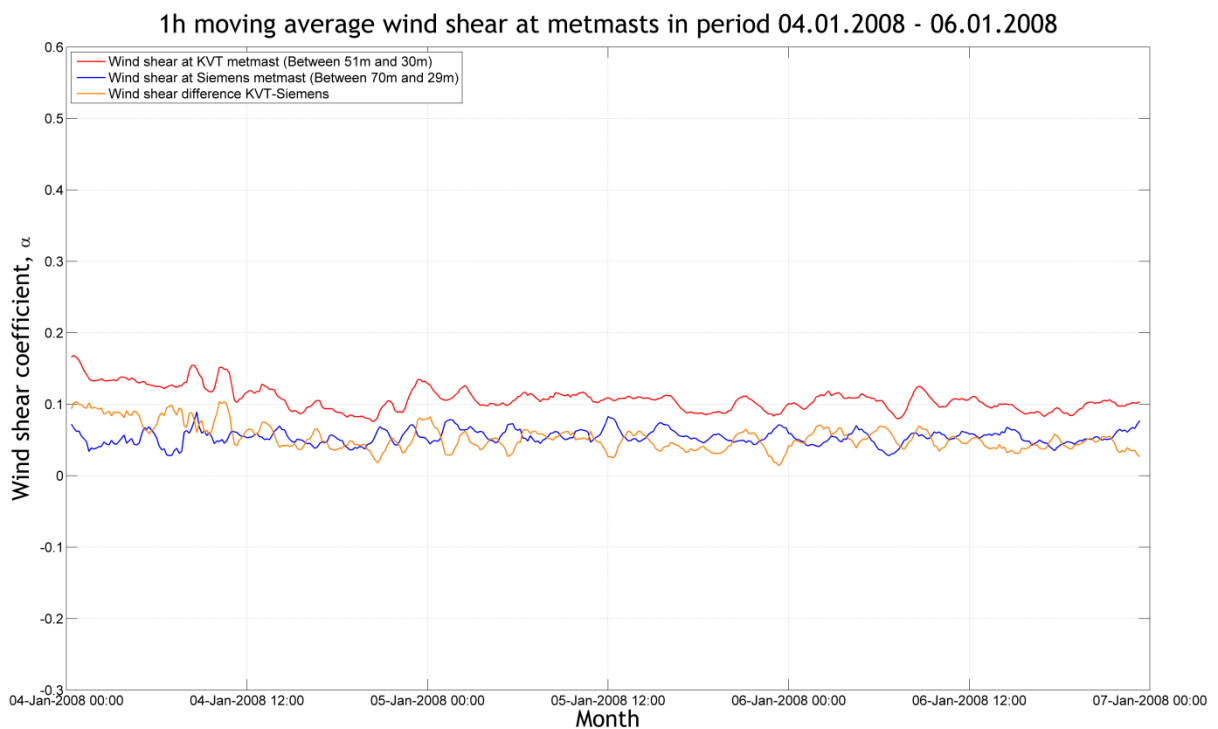
Figur 7.11 viser vindhastigheten i KVT-masten sammenlignet med vindhastigheten i Siemens-masten gjennom caseperioden.

Figur 7.12 viser glidende timesmiddelverdier for vindskjæret i KVT-masten sammenlignet med vindskjæret i Siemens-masten gjennom caseperioden.

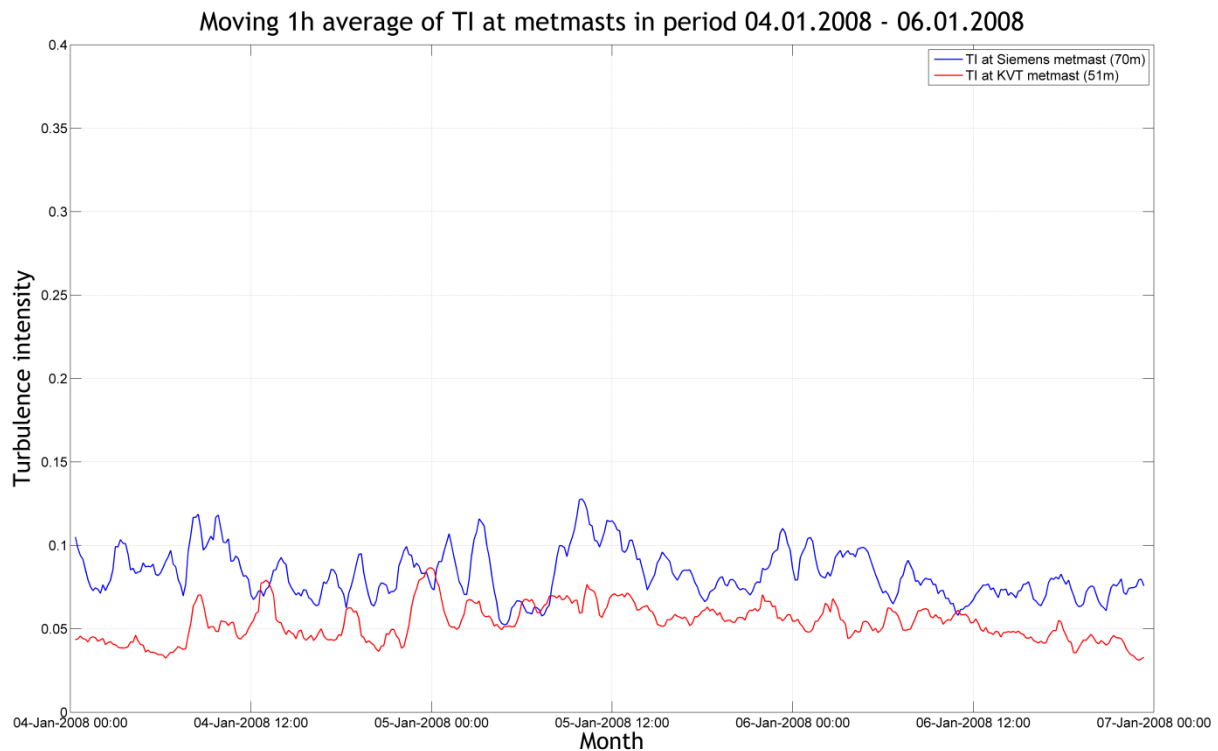
Figur 7.13 viser glidende timesmiddelverdier for turbulensintensiteten i KVT-masten sammenlignet med turbulensintensiteten i Siemens-masten.



Figur 7.11: Vindhastighet i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Differansen er vist som den oransje linjen.



Figur 7.12: Glidende timesmiddel for vindskjæret i KVT-masten (rød linje) og i Siemens-masten (blå linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008. Differansen er vist som den oransje linjen.



Figur 7.13: Glidende timesmiddel for turbulensintensiteten i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 04.01.2008 til 06.01.2008.

7.2.5 DISKUSJON AV RESULTATER FRA CASEPERIODE 1

Vindhastigheten i begge master er mellom 5-25 m/s gjennom perioden. Differansen mellom KVT-masten og WRF viser høyere vindhastighet i masten, med forskjeller opp mot 10 m/s. WRF klarer til dels å følge trenden med økt vindhastighet i midten av perioden, men fanger ikke opp variabiliteten mellom timinuttersintervallene, noe som kan forventes da WRF-verdiene representerer gjennomsnittsverdien innenfor en gridrute. Differansen mellom målingene i Siemens-masten og WRF er mindre, og WRF klarer å følge de fleste underliggende trendene i målingene.

Vindretningene målt i mastene og fra WRF er svært like, og viser vind fra hovedvindretningen, sektor 8. Dette stemmer også med de meteorologiske kartene.

WRF fanger opp noen trender i vindskjæret ved KVT-masten, men har flere topper som ikke er observert i målemasten. Ved Siemens-masten er det observert lavere vindskjær enn de simulerte verdiene gjennom hele perioden, noe som kan skyldes terrengeffekter som ikke modelleres i WRF. Ut fra Figur 11.2, ser man at terrenget sør og sørvest for Siemens-masten er ganske bratt, noe som kan gi speed-up av vinden særlig nær bakken. Dette vil kunne bidra til lavere vindskjær i masten, som observert. Bratt terreng et stykke unna masten vil også kunne bidra til å generere turbulens, men det er vanskelig å si nøyaktig hvor denne overgangen vil befinne seg uten å gjøre mer detaljerte mikroskalaberegninger.

Temperaturen i mastene varierer mellom $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ gjennom perioden. Temperaturen i de to mastene følger hverandre, med noen tilfeller av temperaturforskjell opp mot $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Det største avviket i temperatur mellom WRF og målingene er før kl 12 den 4. januar; i samme periode var det lite avvik i vindhastighet mellom målingene og modellen. Dette skyldes sannsynligvis ikke lokale effekter, men heller parametriseringen av energibalansen, vertikal transport av varme i modellen eller feil i initialbetingelsene for simuleringen av døgnet.

Grenselagshøyden fra de to WRF-punktene følger stort sett hverandre, og høyden varierer mellom 200 og 750 m. Lav grenselagshøyde stemmer overens med stabile eller nær nøytrale forhold gjennom perioden.

De vertikale temperaturprofilene viser typisk stabile forhold med $\partial\theta_v/\partial z > 0$ i begynnelsen av perioden. Utover i perioden ser man at det nærmer seg nøytrale forhold, $\partial\theta_v/\partial z \approx 0$, i de nederste høydene. De vertikale profilene viser stabile forhold lengre opp i høyden, som kan indikere hvor toppen av grenselaget ligger. Hvis man sammenligner profilene med timesverdiene for PBL-høyden, ser man at forandringen fra nøytralt til stabilt i profilene gir en god indikasjon på nivået til grenselagshøyden.

Pasquill-klassifisering basert på L viser nær nøytrale forhold gjennom hele perioden, og vil ikke bli videre diskutert jmf. vurderingen av denne parameteren ovenfor. Ri viser stabile forhold fram til omtrent kl 18 på 4. januar, og nøytrale forhold etter. Dette er i godt samsvar med trenden i de vertikale temperaturprofilene.

Vindhastigheten ved KVT-masten ligger over Siemens-masten i store deler av perioden, med differanser opp mot 10 m/s. Ved sammenligning med plott av stabiliteten og PBL-høyde, skiller tidsperioden fram til ca. kl 9 den 4. januar seg ut. Dette er en periode som er karakterisert som stabil og veldig stabil, og har grenselagshøyde under 400 m. Vindhastigheten i begge master er lavere, rundt 10 m/s i KVT-masten og rundt 6 m/s i Siemens-masten, enn i resten av perioden. Differansen mellom mastene er også mer konstant.

Forskjellen i vindskjær mellom mastene er nær 0,05 gjennom hele perioden, med høyest vindskjær i KVT-masten. Det lavere vindskjæret ved Siemens-masten kan som tidligere nevnt skyldes speed-up og turbulens over toppen der masten ligger med vind fra sør. I tidsperioden fram til kl 9 den 4. januar er differansen mellom mastene størst, og vindskjæret i KVT-masten er på sitt høyeste. Det stemmer godt overens med veldig stabil sjiktning i WRF-punkt 4010 nærmest KVT-masten.

Nivået på turbulensintensiteten ved Siemens-masten ligger høyere enn turbulensintensiteten i KVT-masten. I tidsperioden fram mot kl 9 den 4. januar er turbulensintensiteten i KVT-masten på sitt laveste, noe som indikerer mindre blanding av grenselaget og stemmer overens med høyere observert vindskjær.

7.3 CASE 2: 09.02.2008 – 11.02.2008

I dette delkapittelet vil resultater fra caseperiode 2 presenteres og drøftes.

7.3.1 BESKRIVELSE AV CASEPERIODE 2

Caseperiode 2 vil beskrives på tilsvarende måte som caseperiode 1, basert på meteorologiske kart som viser bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa i Figur 11.9-Figur 11.11 i kapittel 11.3.

Kartene viser at det er vind fra sør og sørvest gjennom perioden, med transport av luft fra Norskehavet. Det er mørketid i Nord-Norge på denne tiden, noe som betyr at det vil være et strålingsunderskudd og lave bakketemperaturer. Norskehavet er varmet opp av Golfstrømmen, slik at luften som transporteres over Kjøllefjord er varm. Dette vil kunne skape en temperaturinversjon over Finnmark, som vil gi stabile forhold.

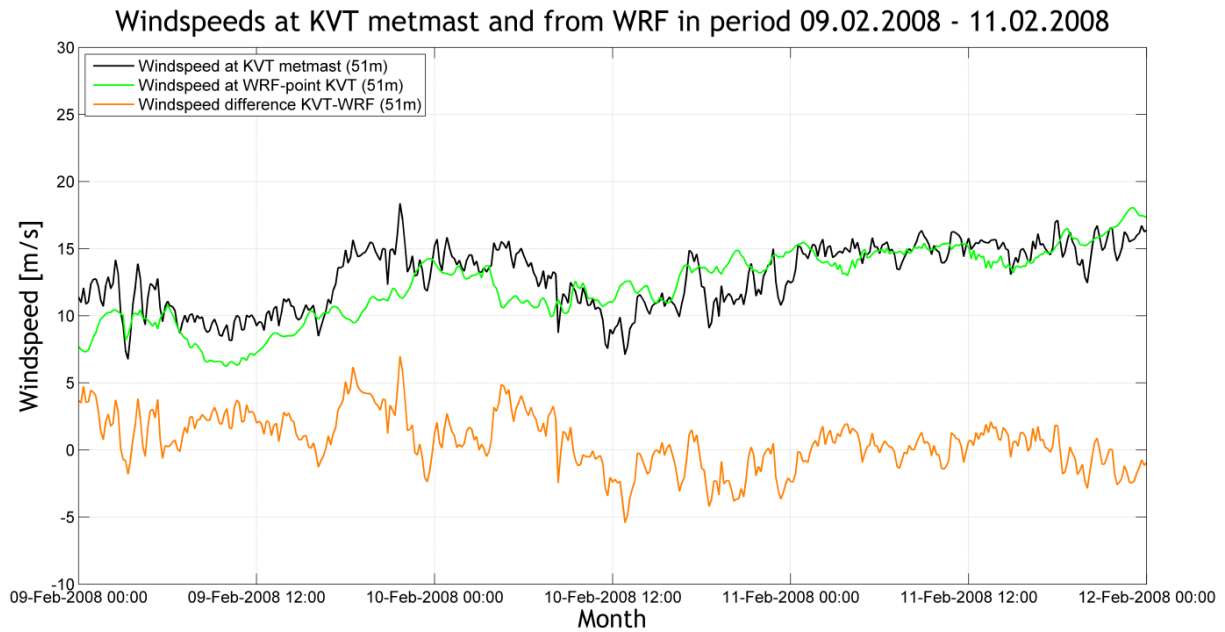
7.3.2 RESULTATER: SAMMENLIGNING MÅLINGER OG WRF

Figur 7.14 og Figur 7.15 viser vindhastigheten i mastene sammenlignet med simulerte verdier fra WRF.

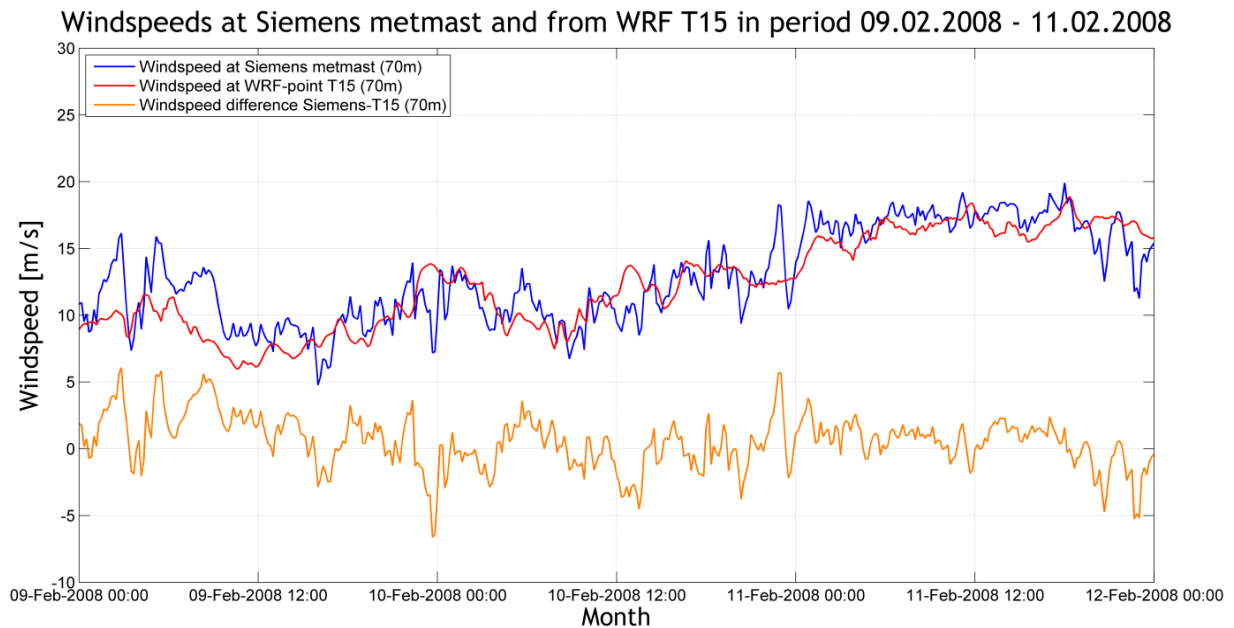
Figur 7.16 og Figur 7.17 viser målt vindretning i mastene, og simulert vindretning fra WRF.

Figur 7.18 og Figur 7.19 viser glidende timesmiddel for vindskjæret i målemastene og fra WRF.

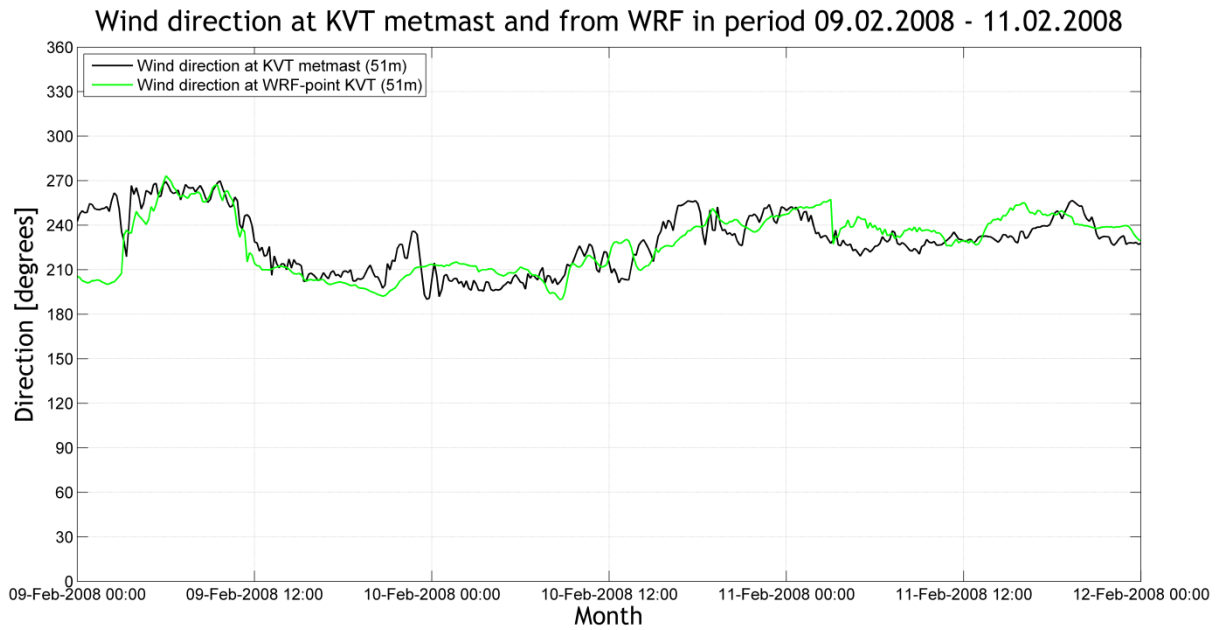
Figur 7.20 viser målt temperatur i 2 m høyde i KVT-masten og fra WRF, og temperatur i 10 m høyde i Siemens-masten og fra WRF.



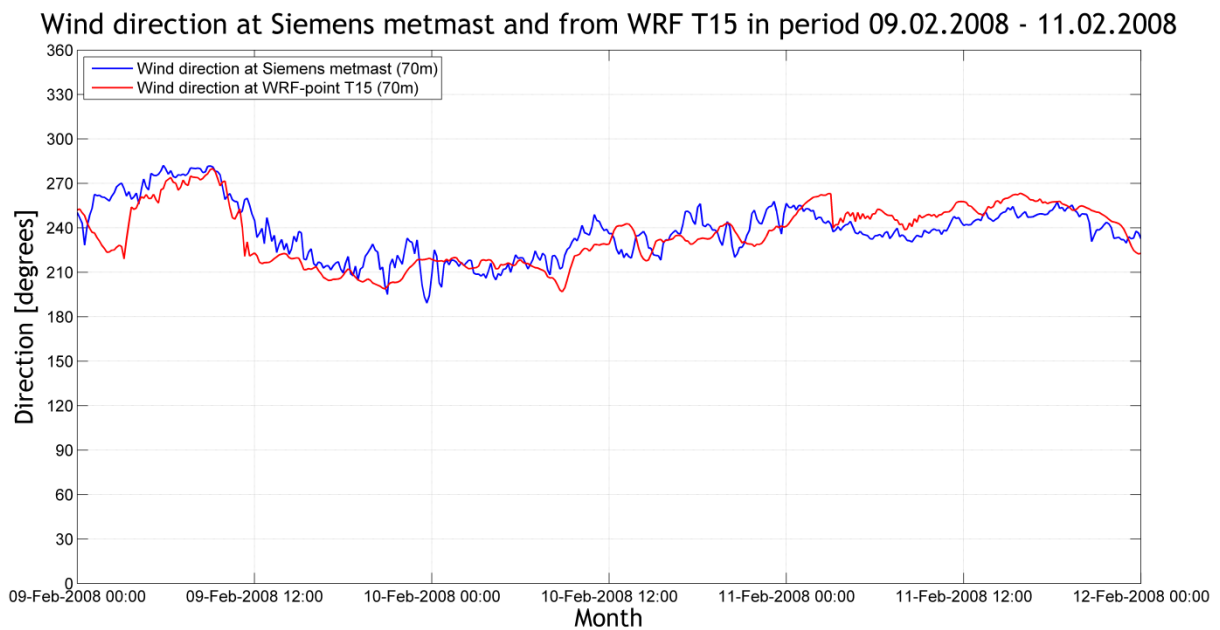
Figur 7.14: Vindhastigheten i 51 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.



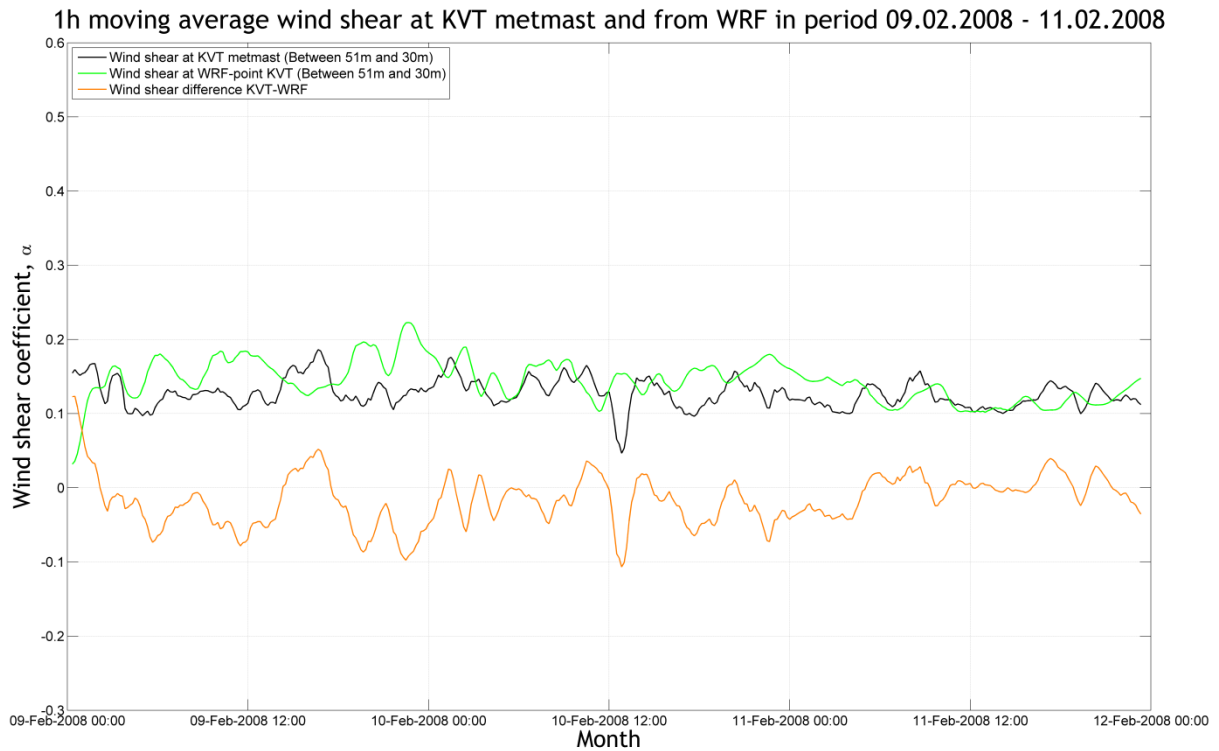
Figur 7.15: Vindhastigheten i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.



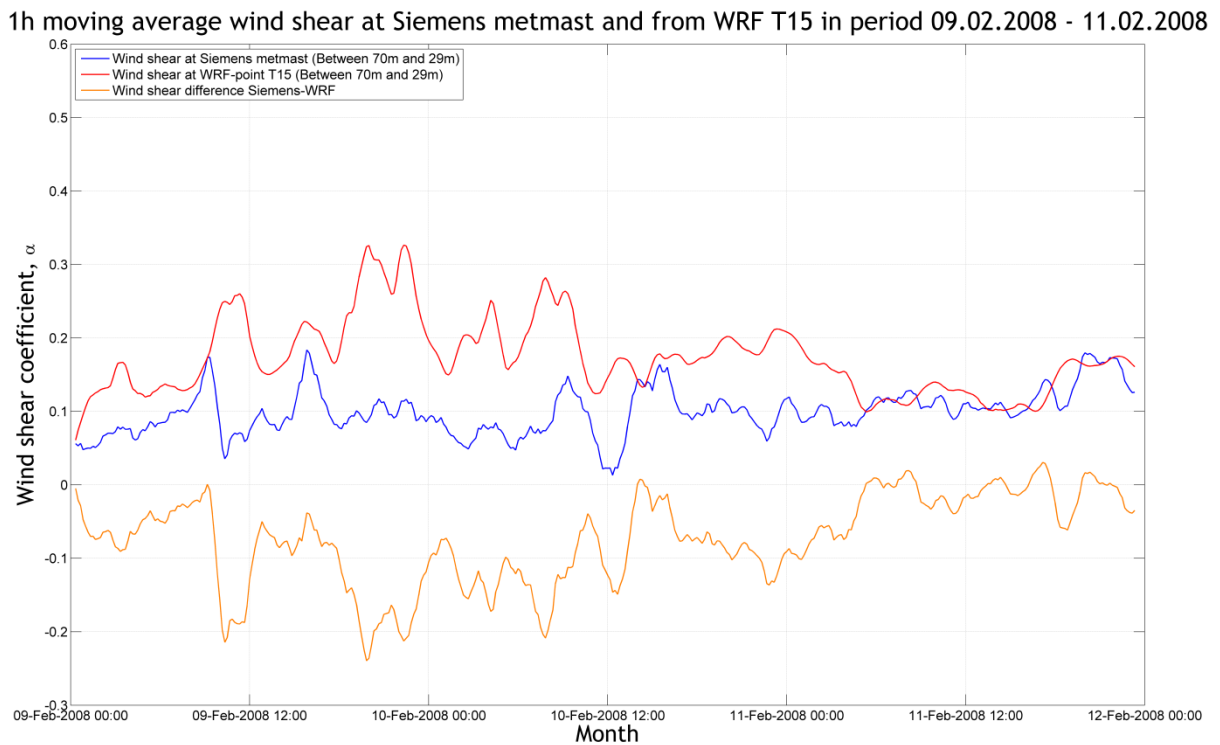
Figur 7.16: Vindretning i 43/48 m høyde i KVT-masten (svart linje) og 61 m høyde fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008.



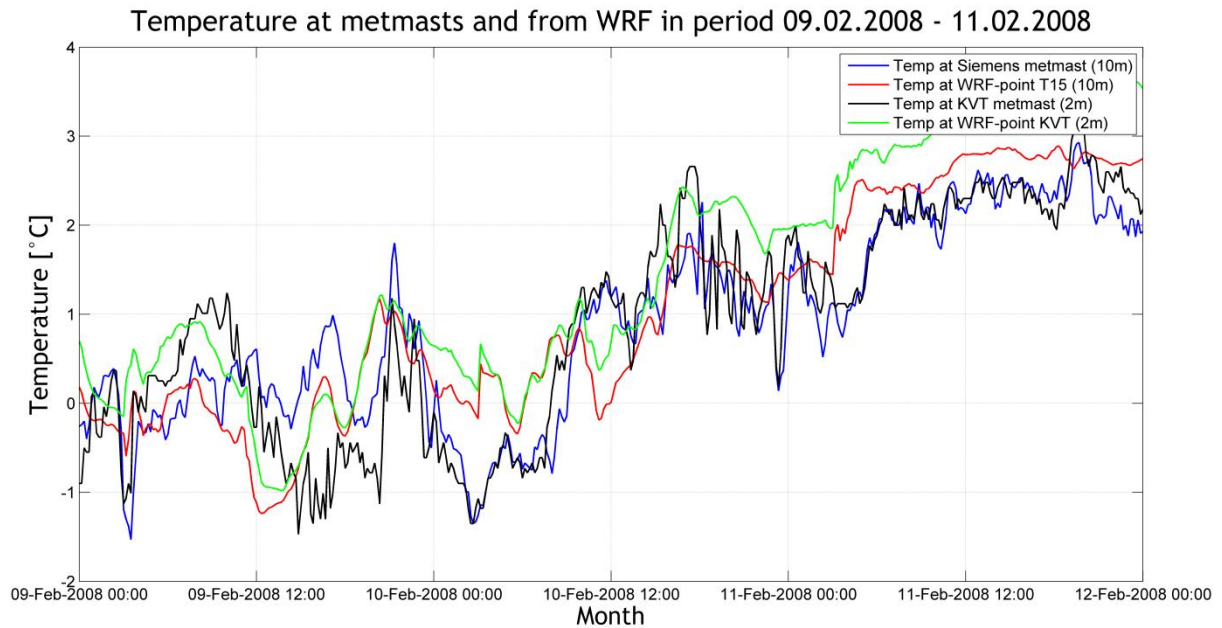
Figur 7.17: Vindretningen i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og i 61 m høyde fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008.



Figur 7.18: Glidende timesmiddelverdi for vindskjæret i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) for perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.



Figur 7.19: Glidende timesmiddelverdi for vindskjæret i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) for perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.



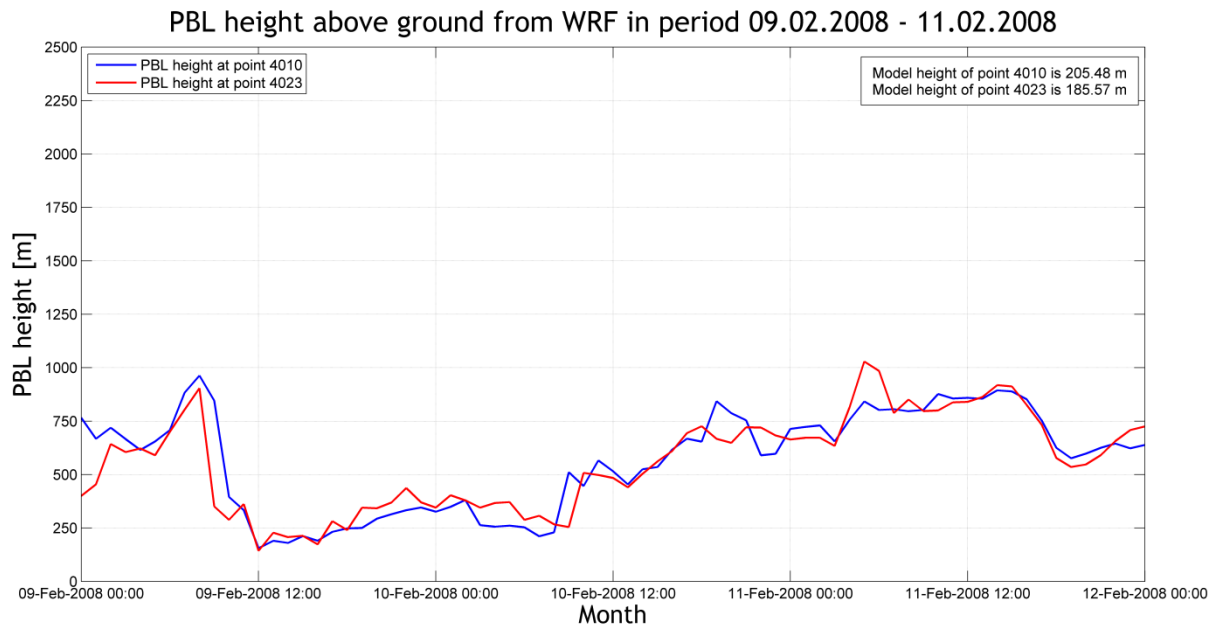
Figur 7.20: Temperaturen i 10 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punkt T15 (rød linje). Temperaturen i 2 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punkt KVT (grønn linje). Perioden er 09.02.2008 til 11.02.2008.

7.3.3 RESULTATER: GRENSELAGSHØYDE OG STABILITET

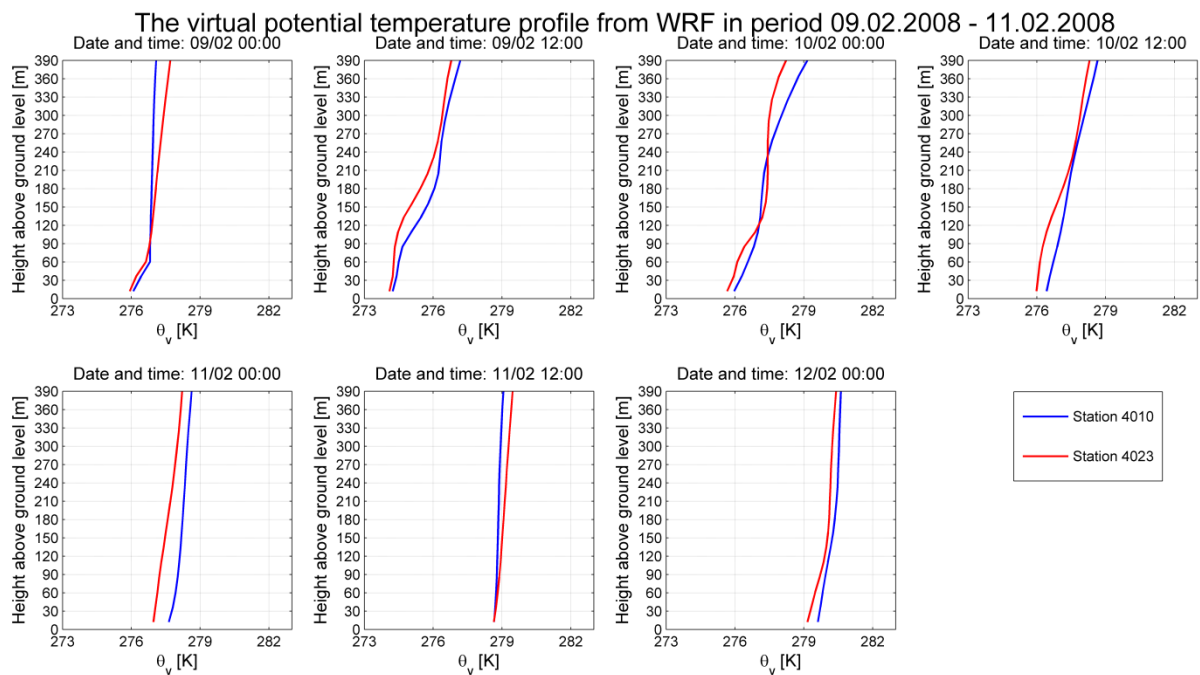
Figur 7.21 viser grenselagshøyden fra WRF-punkt 4010 og 4023.

Figur 7.22 viser de vertikale profilene opp til 390 m for den virtuelle potensielle temperaturen fra WRF-punkt 4010 og 4023.

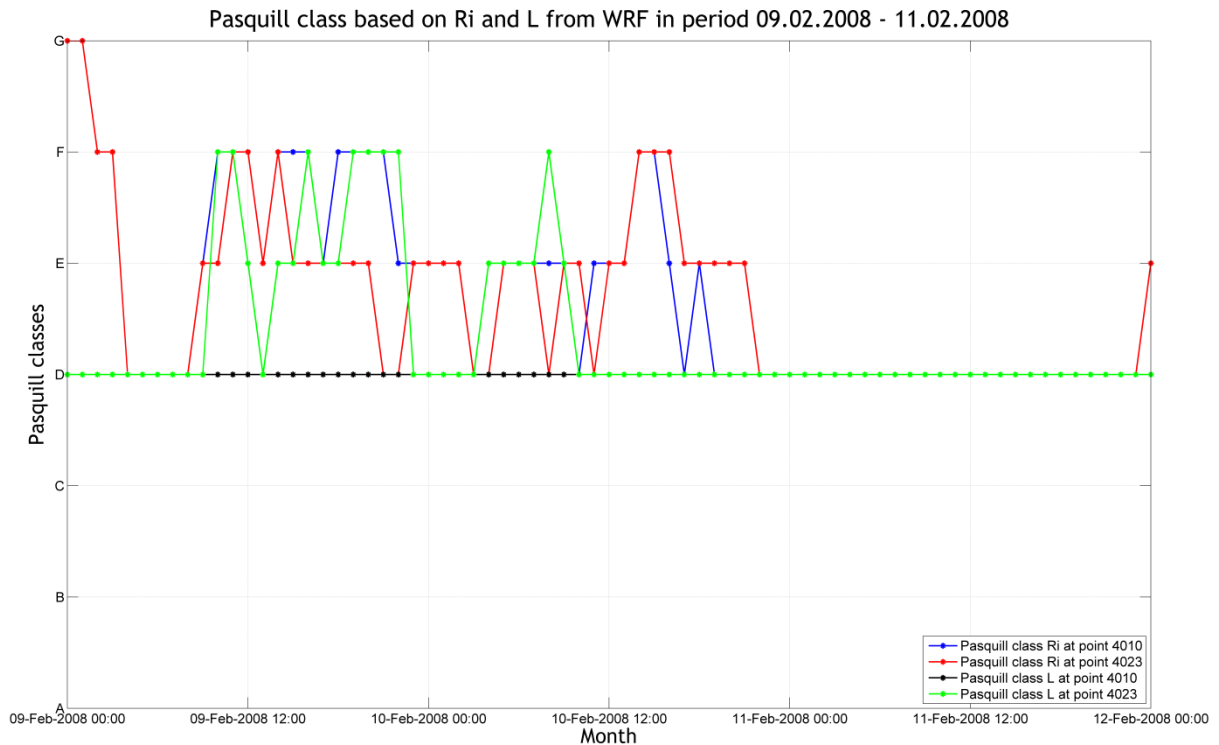
Figur 7.23 viser Pasquill-klassifiseringen gjennom caseperioden basert på beregnede verdier for Ri og L fra WRF-punkt 4010 og 4023.



Figur 7.21: Grenselagshøyde fra WRF-punkt 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008.



Figur 7.22: Vertikale profiler for den virtuelle potensielle temperaturen fra WRF-punktene 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Profilene er plottet for hver sjette time gjennom perioden.



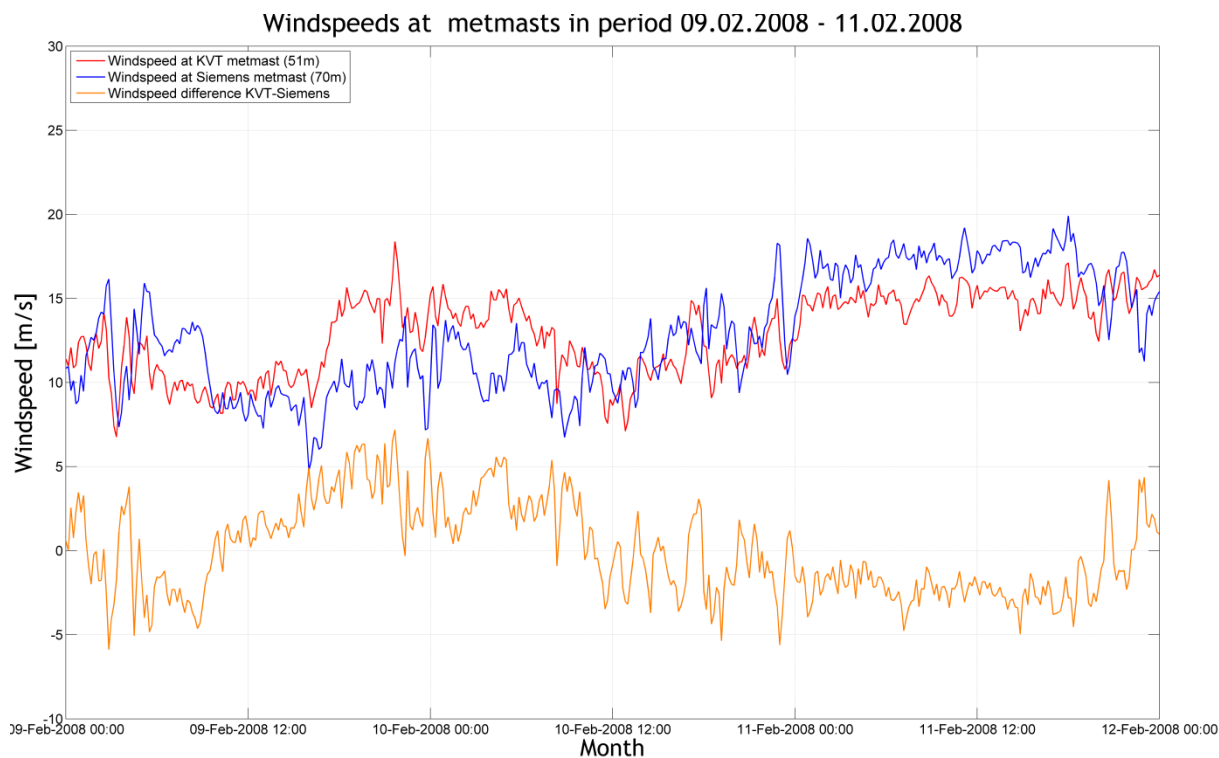
Figur 7.23: Pasquill-klasser i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Klassene basert på Ri fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som blå og rød linje, mens klassene basert på L fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som svart og grønn linje.

7.3.4 RESULTATER: SAMMENLIGNING MELLOM MÅLEMASTENE

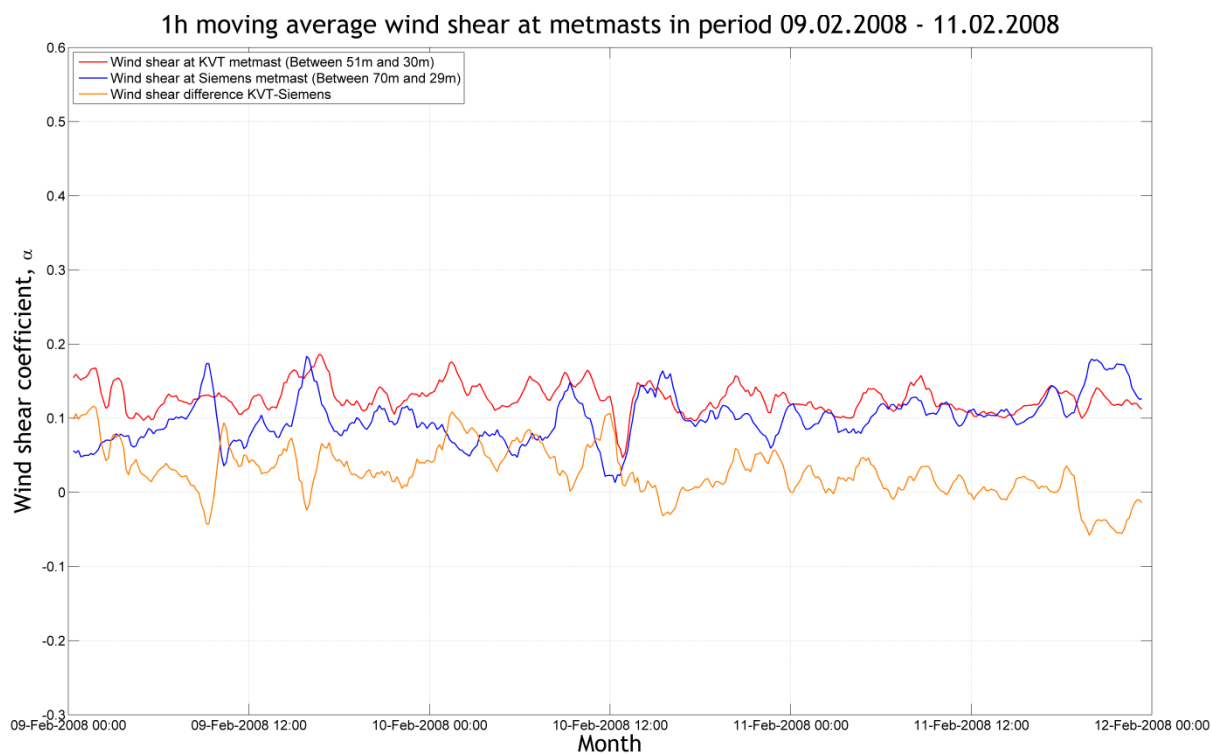
Figur 7.24 viser vindhastigheten i KVT-masten sammenlignet med vindhastigheten i Siemens-masten gjennom caseperioden.

Figur 7.25 viser glidende timesmiddelverdier for vindskjæret i KVT-masten sammenlignet med vindskjæret i Siemens-masten gjennom caseperioden.

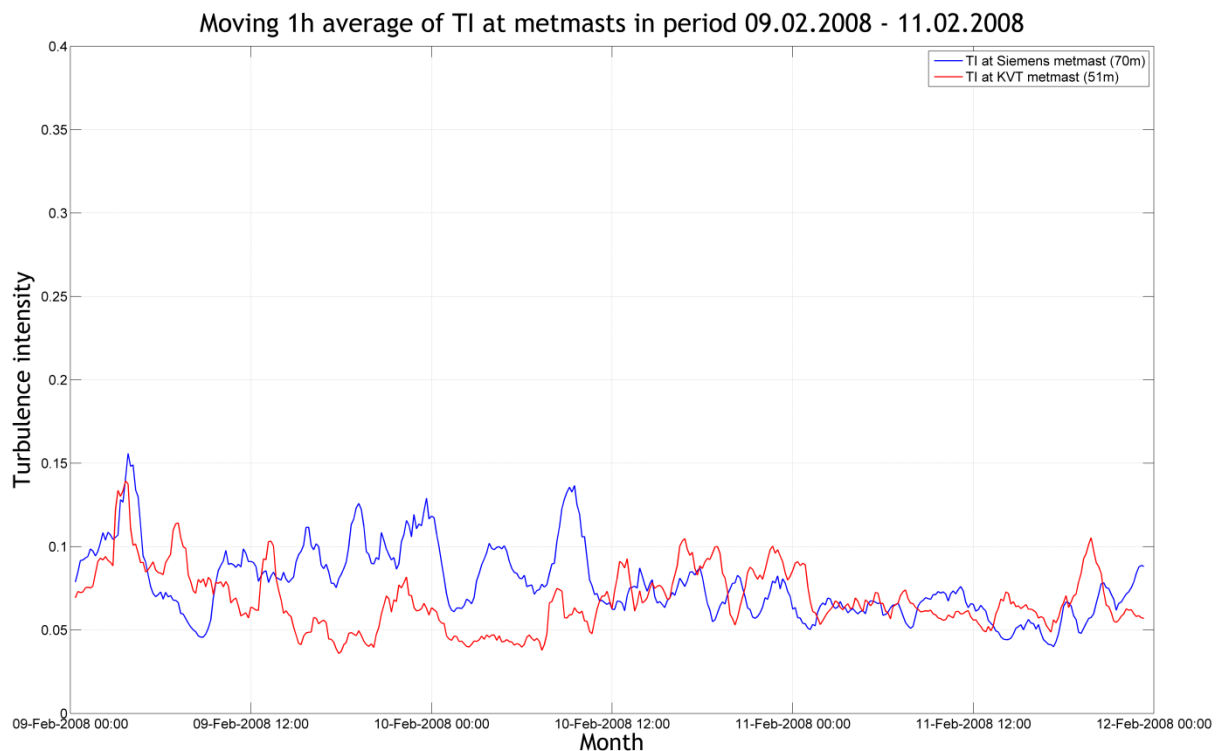
Figur 7.26 viser glidende timesmiddelverdier for turbulensintensiteten i KVT-masten sammenlignet med turbulensintensiteten i Siemens-masten.



Figur 7.24: Vindhastighet i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Differansen er vist som den oransje linjen.



Figur 7.25: Glidende timesmiddel for vindskjæret i KVT-masten (rød linje) og i Siemens-masten (blå linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008. Differansen er vist som den oransje linjen.



Figur 7.26: Glidende timesmiddel for turbulensintensiteten i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 09.02.2008 til 11.02.2008.

7.3.5 DISKUSJON AV RESULTATER FRA CASEPERIODE 2

Vindhastigheten i begge master er mellom 6-20 m/s gjennom perioden. Differansen mellom KVT-masten og WRF er mindre i denne perioden, med forskjeller på rundt 5 m/s. WRF klarer i langt større grad å følge de observerte trendene, selv om den ikke fanger opp variabiliteten mellom timinuttersintervallene. Differansen mellom målingene i Siemens-masten og WRF er også mindre i denne perioden, og WRF klarer å følge hastighetsnivået i masten.

Vindretningen i begge master er nær 270° fram til omtrent kl 12 den 9. februar. I resten av perioden varierer retningen mellom sektor 8 og 9. Dette stemmer med vurderingen av de meteorologiske kartene i kapittel 11.3. WRF viser opptil 30° feil i de tre første timene av kjøringen, men følger sektorene i mastene i resten av perioden. Det kan bety at det er feil i initialbetingelsene i modellen for det døgnet.

Vindskjæret fra WRF-punkt KVT ligger høyere enn KVT-masten i store deler av perioden, med en differanse opptil -0,1. Ved Siemens-masten er det observert lavere vindskjær enn de simulerte verdiene gjennom nesten hele perioden, som kan skyldes de samme terrengeffektene som ble nevnt for forrige caseperiode siden vindretningen fremdeles er fra de sørvestlige sektorene.

Temperaturen i mastene varierer mellom $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ gjennom perioden, med stigende temperaturer mot slutten. Dette styrker vurderingen av de meteorologiske kartene, som indikerte transport av varm luft fra Norskehavet gjennom perioden. Temperaturen i de to mastene følger hverandre godt, med noen få tilfeller av temperaturforskjell nær $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. De største avvikene mellom WRF og målingene er på den 11. februar.

Grenselagshøyden fra de to WRF-punktene følger hverandre. PBL-høyden er mellom 500 og 1000 m før ca. kl 9 den 9. februar, og etter kl 12 den 10. februar. I den midtre perioden er grenselagshøyden lavere, ned mot 200 m. Dette er en periode som klassifiseres som svakt stabil og stabil ut fra Richardson-tallet og de vertikale temperaturprofilene.

De vertikale temperaturprofilene viser veldig stabile og stabile forhold i de nederste høydene fram til 11. februar. Resten av perioden er $\partial\theta_v/\partial z \approx 0$, noe som indikerer mer nøytrale forhold. Ri viser svakt stabile og stabile forhold i midten av caseperioden, fra omtrent kl 9 den 9. februar til litt før midnatt den 10. februar. Resten av caseperioden er klassifisert som nøytral.

Vindhastigheten i mastene er høyest i slutten av perioden, nær 15 m/s, med høyest hastighet målt i Siemens-masten. Hastigheten er høyest i KVT-masten mellom ca. kl 18 den 9. februar og kl 6 den 10. februar. Sett sammen med plottet av stabiliteten og PBL-høyden, kan man se en tendens til høyere vindhastighet ved KVT-masten under stabile forhold og ved lavere PBL-høyde. Dette samsvarer med perioder med vind fra sektor 8. Under nøytrale forhold og ved større grenselagshøyde er vindhastigheten stort sett høyest i Siemens-masten.

Vindskjæret i KVT-masten er høyere enn i Siemens-masten gjennom store deler av caseperioden, og kan skyldes speed-up og turbulens i Siemens-masten med vind fra sørvest. Det er en viss trend med lavere vindskjær og mindre differanse mellom mastene i periodene med nær nøytral sjiktning enn stabil sjiktning.

Mindre differanse mellom mastene i de nøytrale periodene kan også observeres for turbulensintensiteten. I perioden med lavere PBL-høyde, er turbulensintensiteten i Siemens-masten høyere enn i KVT-masten. Dette indikerer mer turbulent blanding i Siemens-masten og stemmer overens med lavere observert vindskjær.

7.4 CASE 3: 26.12.2008 – 28.12.2008

I dette delkapittelet vil resultater fra caseperiode 3 presenteres og drøftes.

7.4.1 BESKRIVELSE AV CASEPERIODE 3

Caseperiode 3 vil beskrives på tilsvarende måte som caseperiode 1, basert på meteorologiske kart som viser bakkestrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa i Figur 11.12-Figur 11.14 i kapittel 11.3.

Isobarene på kartene viser at det er vind fra vest og nordvest gjennom denne caseperioden. Spesielt i starten av perioden vil det være transport av kald luft fra Svalbard, som vil bevege seg over det varme Norskehavet. Luften vil bli varmet opp nedenfra av havet, noe som vil føre til en blanding av luftlaget. Dette kan føre til nøytrale eller svakt ustabile forhold på Kjøllefjord.

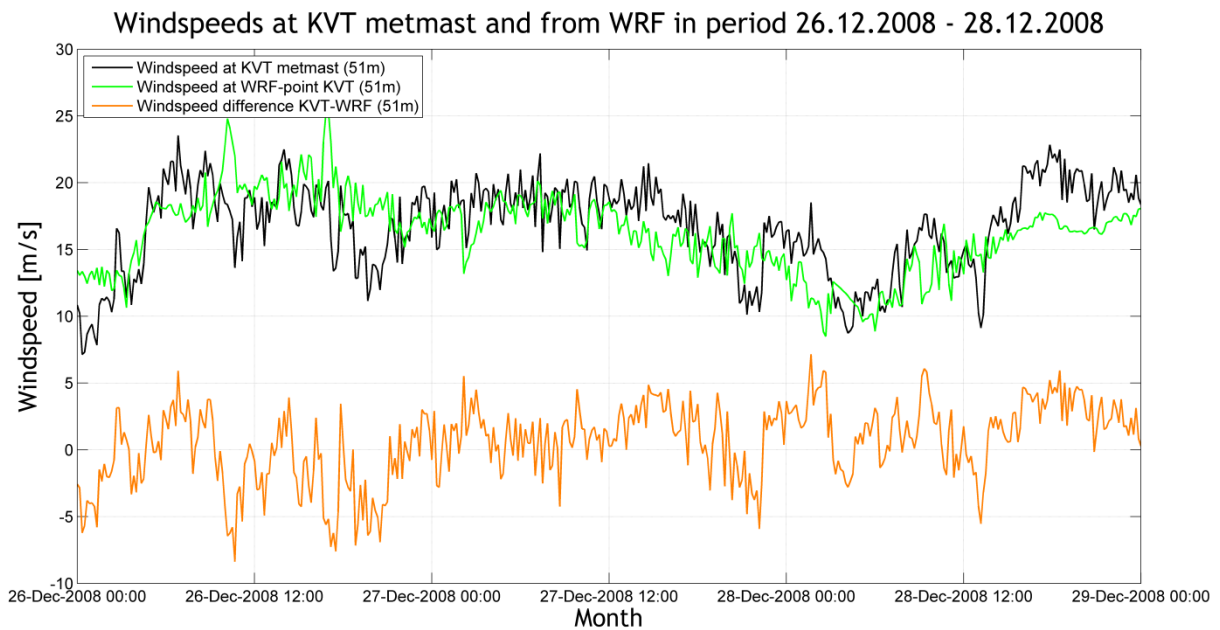
7.4.2 RESULTATER: SAMMENLIGNING MÅLINGER OG WRF

Figur 7.27 og Figur 7.28 viser vindhastigheten i mastene sammenlignet med simulerte verdier fra WRF.

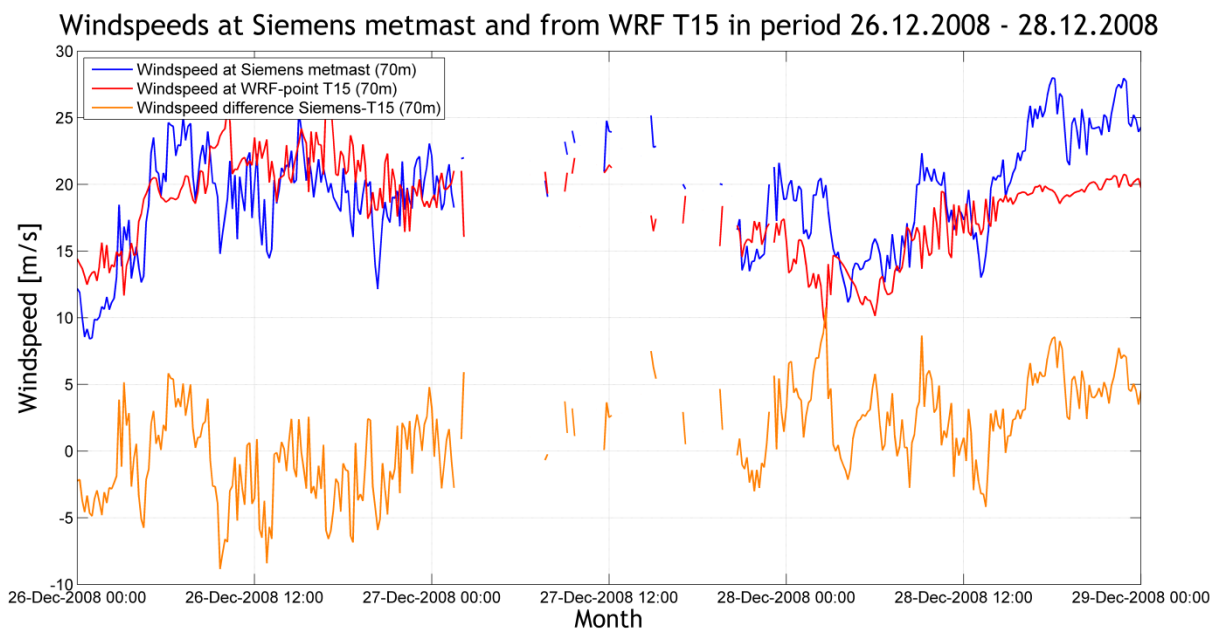
Figur 7.29 og Figur 7.30 viser målt vindretning i mastene, og simulert vindretning fra WRF.

Figur 7.31 og Figur 7.32 viser glidende timesmiddel for vindskjæret i målemastene og fra WRF.

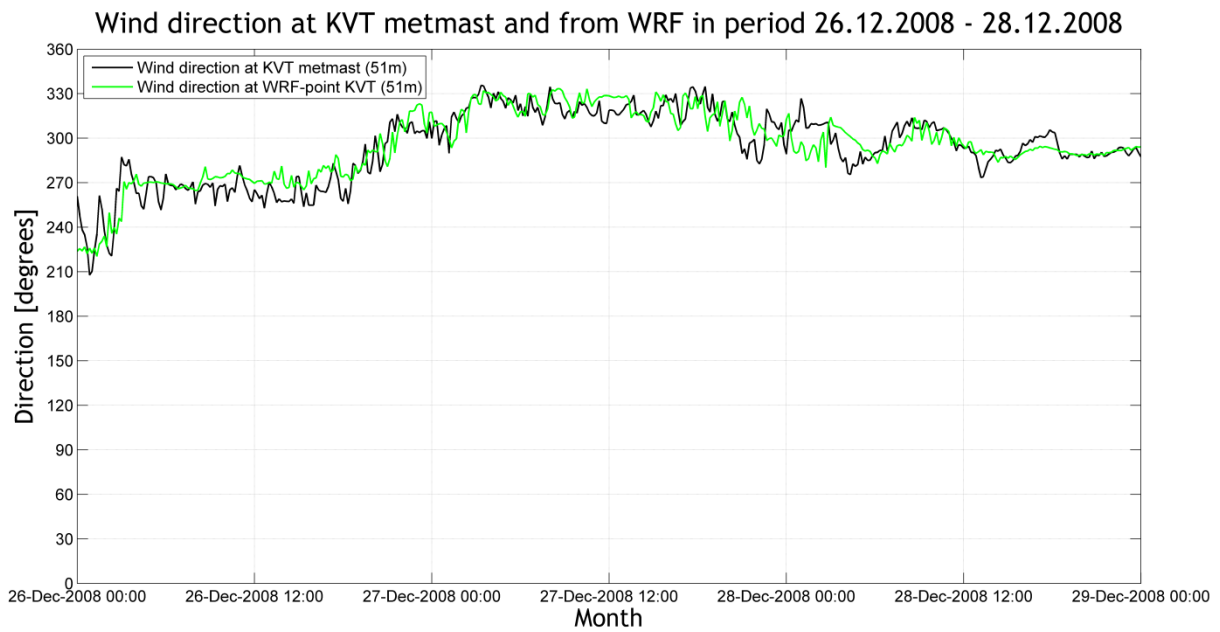
Figur 7.33 viser målt temperatur i 2 m høyde i KVT-masten og fra WRF, og temperatur i 10 m høyde i Siemens-masten og fra WRF.



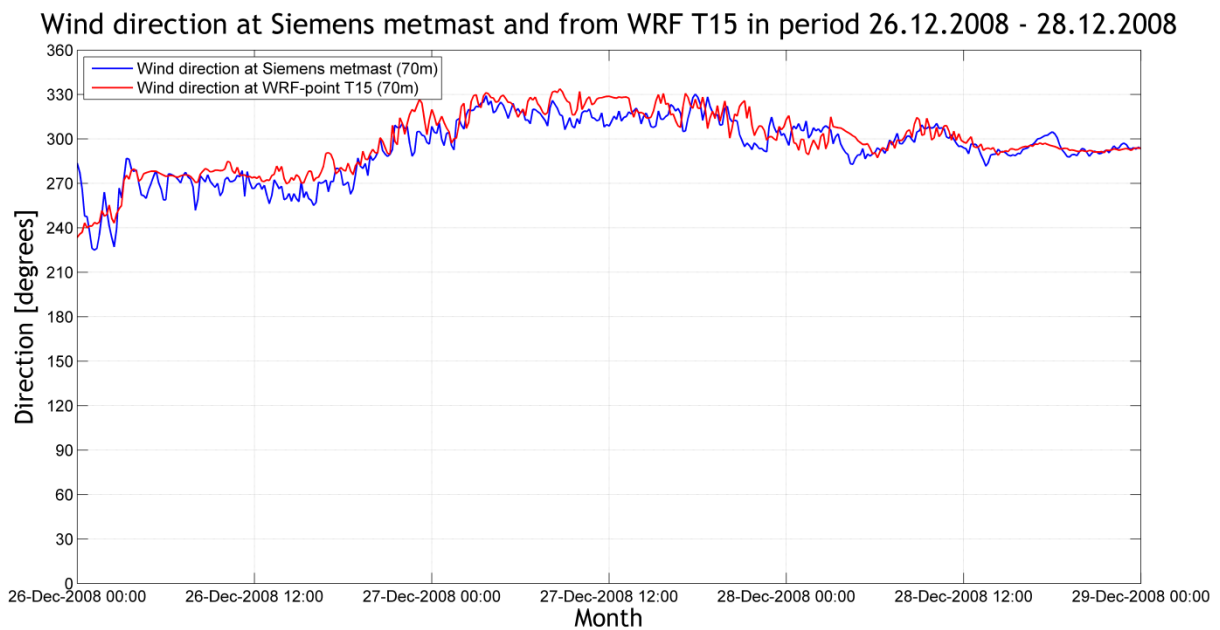
Figur 7.27: Vindhastigheten i 51 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.



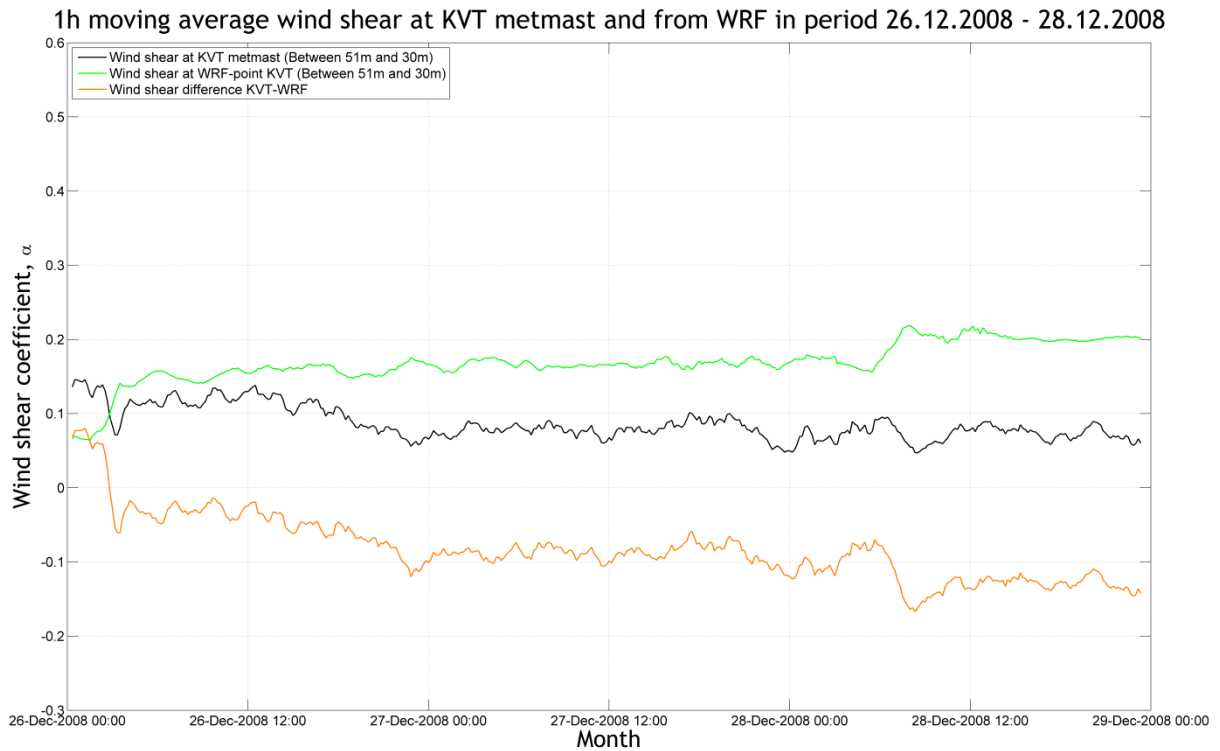
Figur 7.28: Vindhastigheten i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.



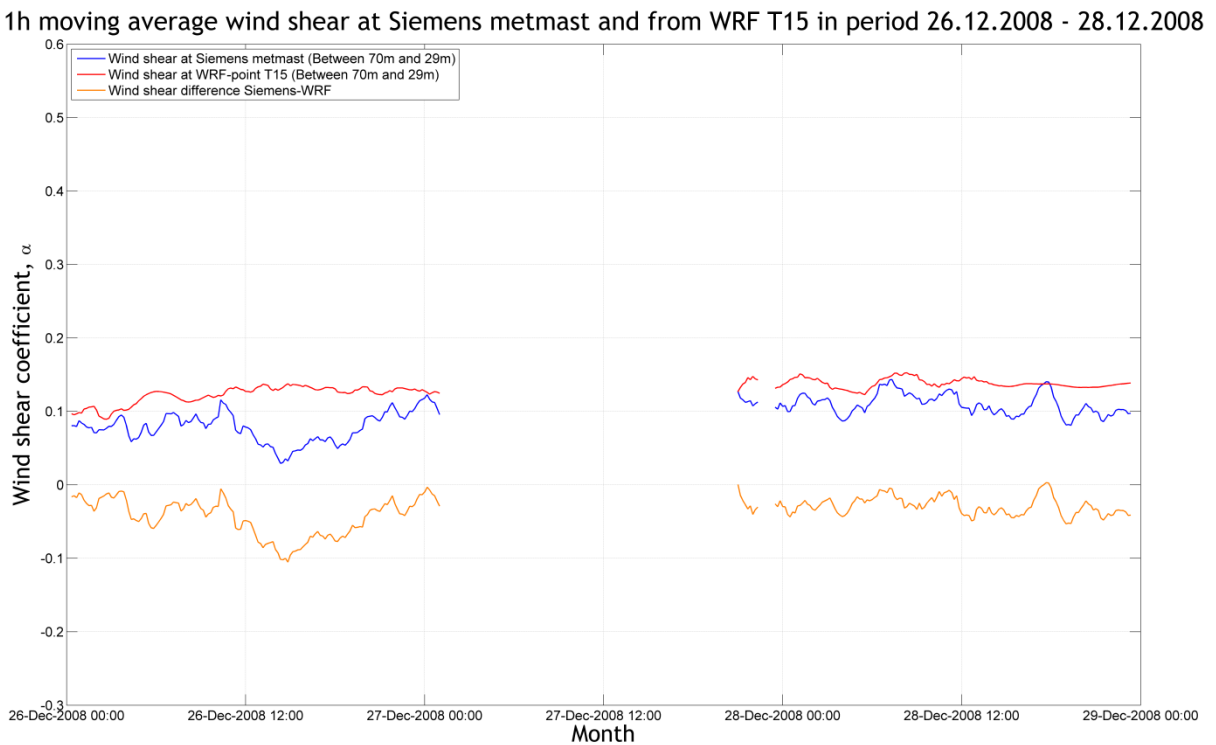
Figur 7.29: Vindretning i 43/48 m høyde i KVT-masten (svart linje) og 61 m høyde fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008.



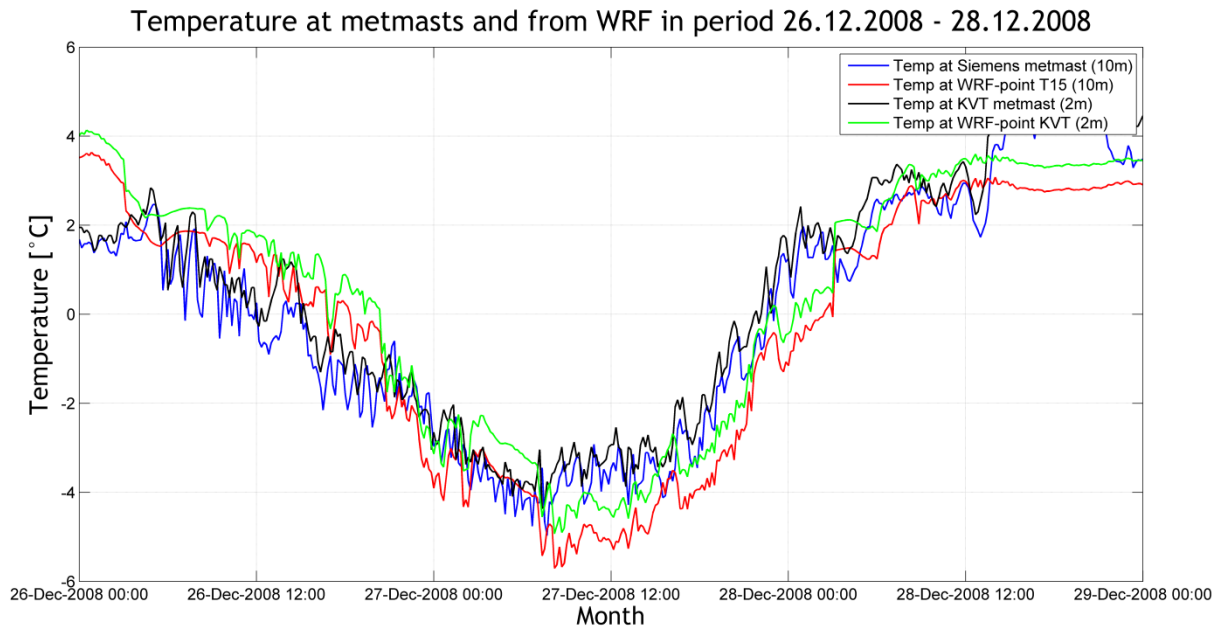
Figur 7.30: Vindretningen i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og i 61 m høyde fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008.



Figur 7.31: Glidende tidsmiddelverdi for vindskjæret i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) for perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.



Figur 7.32: Glidende tidsmiddelverdi for vindskjæret i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) for perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.



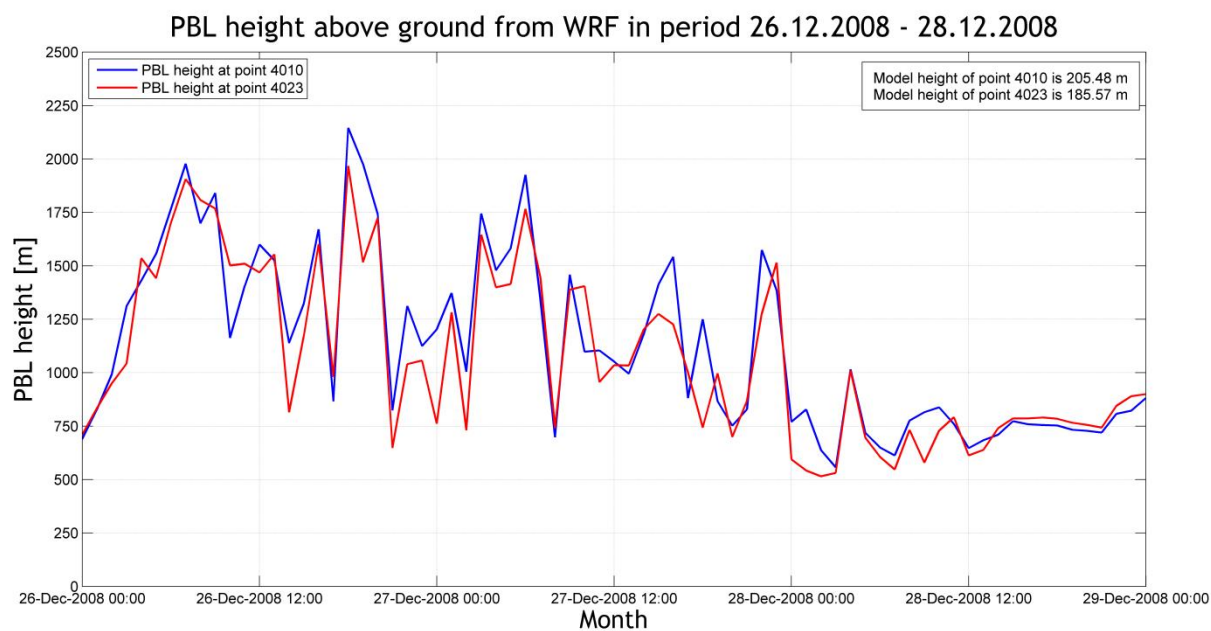
Figur 7.33: Temperaturen i 10 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punkt T15 (rød linje). Temperaturen i 2 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punkt KVT (grønn linje). Perioden er 26.12.2008 til 28.12.2008.

7.4.3 RESULTATER: GRENSELAGSHØYDE OG STABILITET

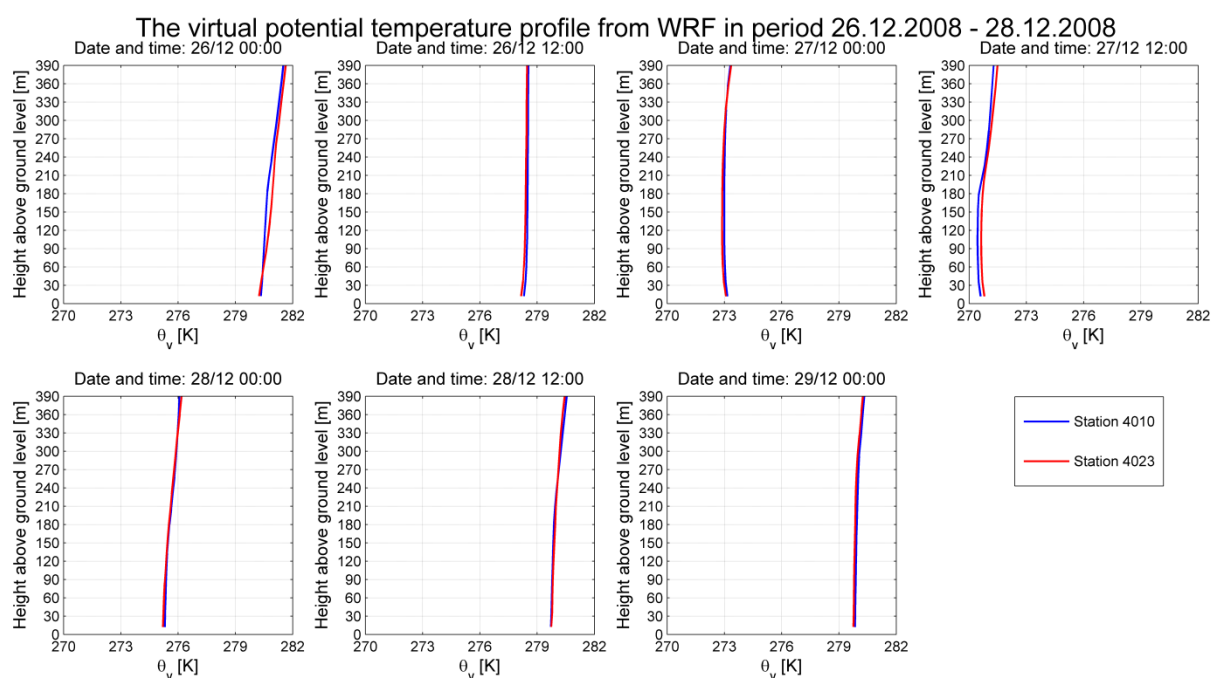
Figur 7.34 viser grenselagshøyden fra WRF-punkt 4010 og 4023.

Figur 7.35 viser de vertikale profilene opp til 390 m for den virtuelle potensielle temperaturen fra WRF-punkt 4010 og 4023.

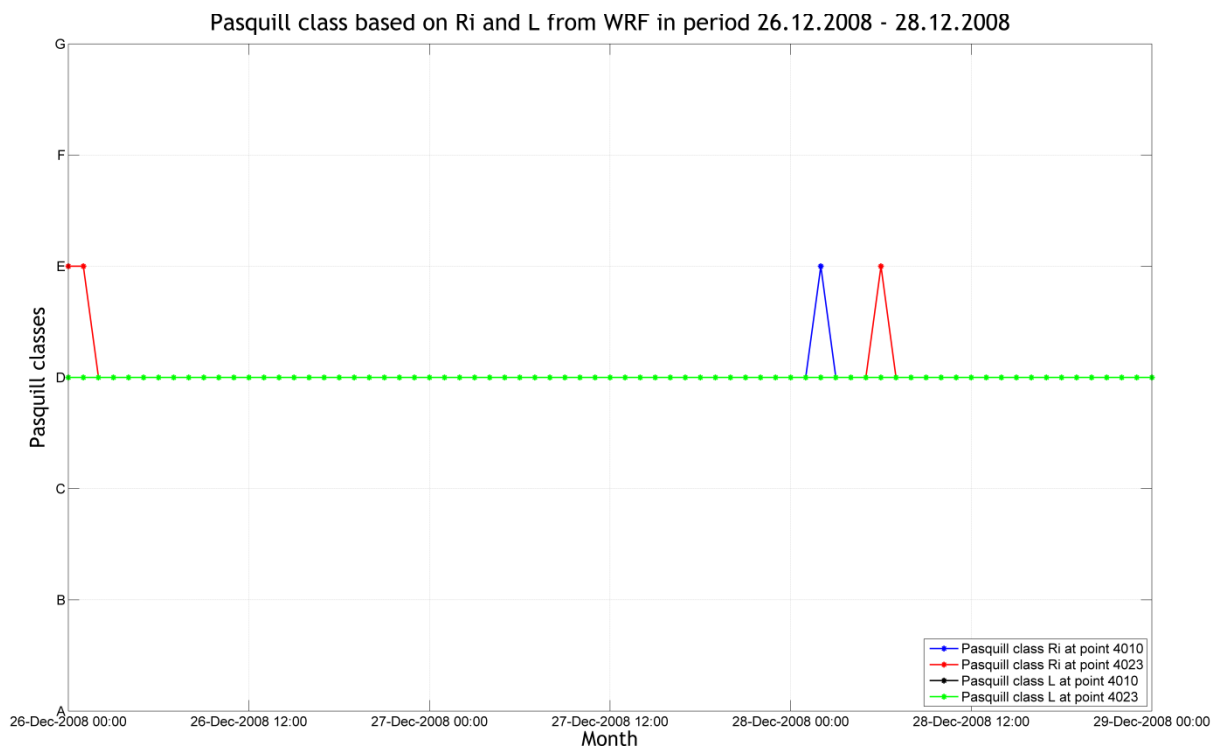
Figur 7.36 viser Pasquill-klassifiseringen gjennom caseperioden basert på beregnede verdier for Ri og L fra WRF-punkt 4010 og 4023.



Figur 7.34: Grenselagshøyde fra WRF-punkt 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008.



Figur 7.35: Vertikale profiler for den virtuelle potensielle temperaturen fra WRF-punktene 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Profilene er plottet for hver sjette time gjennom perioden.



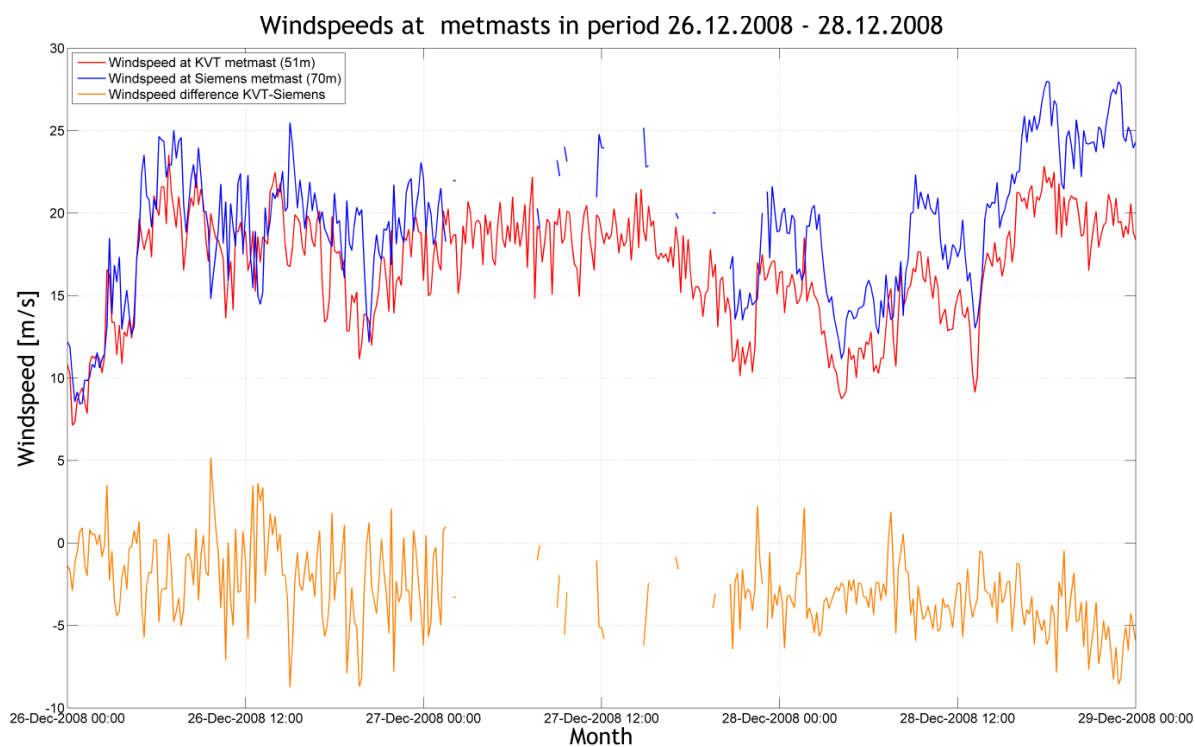
Figur 7.36: Pasquill-klasser i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Klassene basert på Ri fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som blå og rød linje, mens klassene basert på L fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som svart og grønn linje.

7.4.4 RESULTATER: SAMMENLIGNING MELLOM MÅLEMASTENE

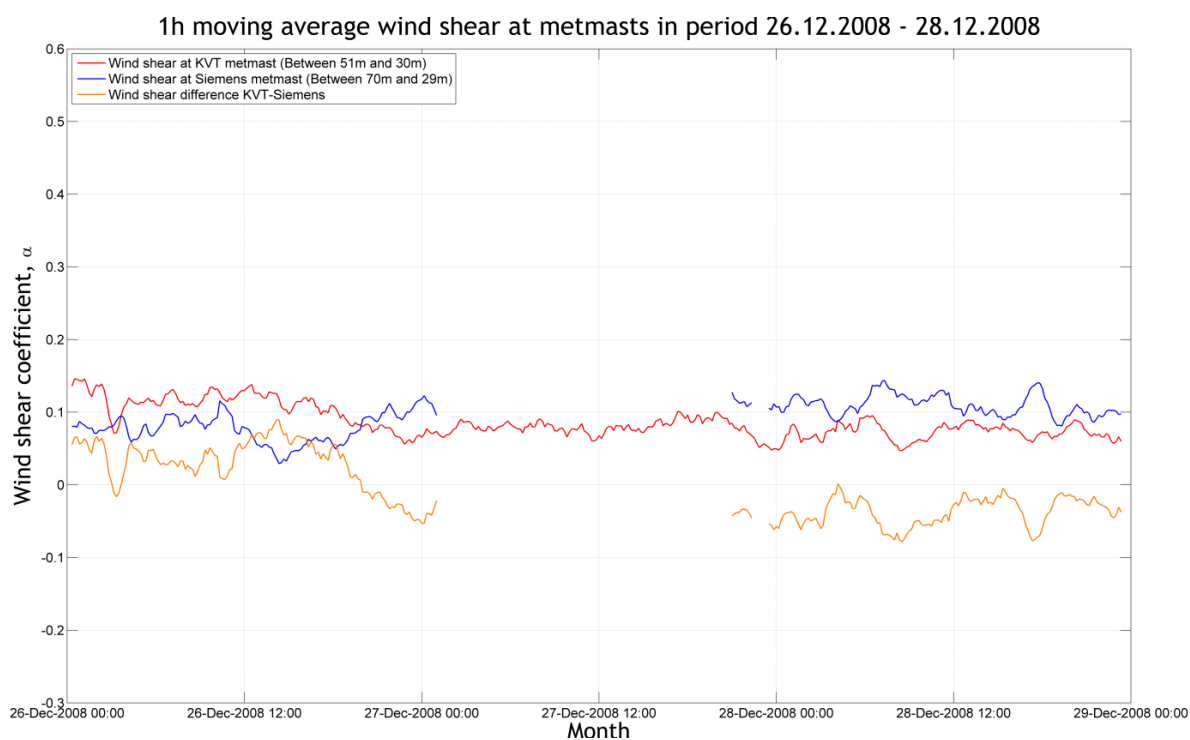
Figur 7.37 viser vindhastigheten i KVT-masten sammenlignet med vindhastigheten i Siemens-masten gjennom caseperioden.

Figur 7.38 viser glidende timesmiddelverdier for vindskjæret i KVT-masten sammenlignet med vindskjæret i Siemens-masten gjennom caseperioden.

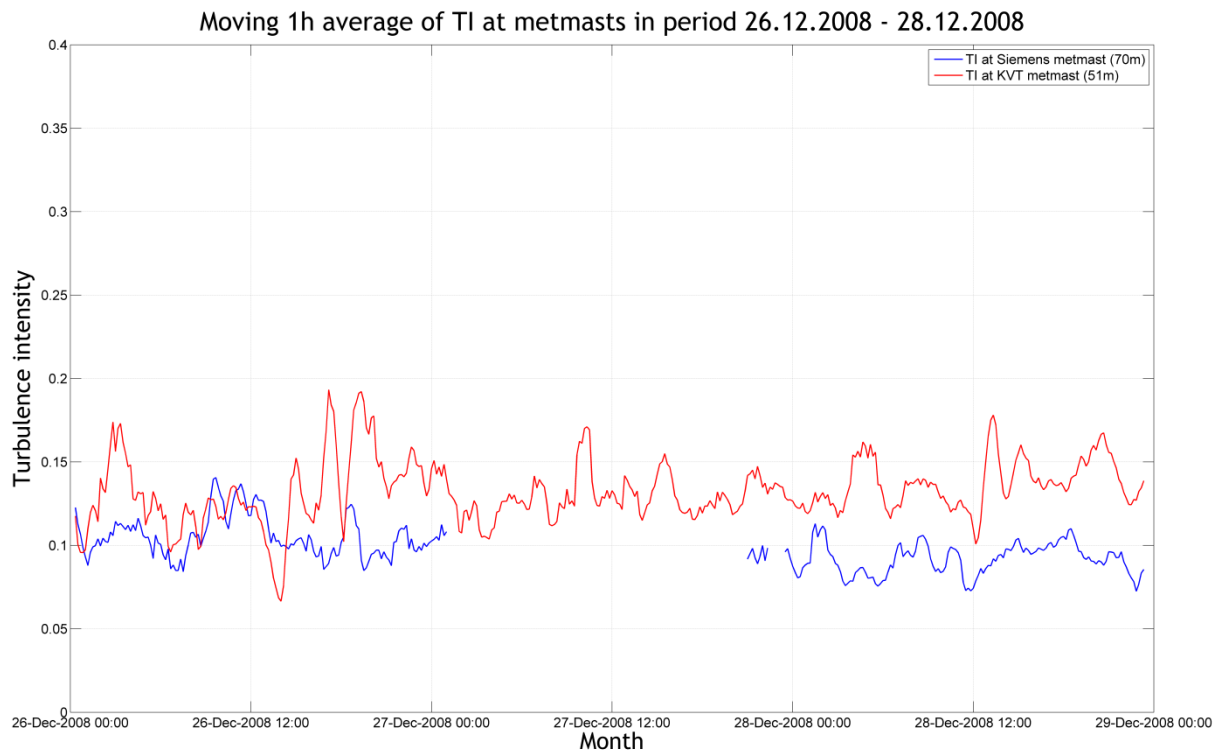
Figur 7.39 viser glidende timesmiddelverdier for turbulensintensiteten i KVT-masten sammenlignet med turbulensintensiteten i Siemens-masten.



Figur 7.37: Vindhastighet i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Differansen er vist som den oransje linjen.



Figur 7.38: Glidende timesmiddel for vindskjæret i KVT-masten (rød linje) og i Siemens-masten (blå linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008. Differansen er vist som den oransje linjen.



Figur 7.39: Glidende tidsmiddel for turbulensintensiteten i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 26.12.2008 til 28.12.2008.

7.4.5 DISKUSJON AV RESULTATER FRA CASEPERIODE 3

Vindhastigheten i begge master er mellom 10-25 m/s gjennom perioden. De fleste målingene fra Siemens-masten den 27. desember har blitt filtrert bort fordi masten er i vake. WRF følger trenden i målingene gjennom mesteparten av caseperioden, men viser langt lavere hastigheter enn i begge master i perioden etter kl 12 den 28. februar.

Vindretningen i begge master er fra sektor 9 og 10 fram til ca. kl 18 den 26. februar. Det er deretter vind fra sektor 11 og 12 fram til 28. desember, noe som tilsvarer vakeregionen for Siemens-masten. Siste del av perioden er dominert av vind fra sektor 11. WRF følger nivået i målingene gjennom caseperioden.

Vindskjæret i KVT-masten minker fra 0,15 til 0,05 gjennom perioden, mens motsatt trend observeres i WRF-punkt KVT. Ved sammenligning med plott av vindretningen kan det virke som det er en viss retningsrelatert trend i verdien for vindskjæret, med klart høyere vindskjær i WRF enn i KVT-masten for spesielt sektor 11. Vind fra denne retningen må gå over Kjempellet og en del lokale topper i nærheten av KVT-masten, noe som kan føre til en viss vakeeffekt i masten. Dette vil tilsa mer turbulente forhold, som vil gi lavere vindskjær. Oppløsningen av terrenget i WRF er lav, så modellen kan ha vanskeligheter med å modellere denne effekten.

Vindskjæret fra WRF-punkt T15 ligger over observert vindskjær i Siemens-masten gjennom hele perioden. Det er en lokal topp vest-nordvest for Siemens-masten, som kan forklare hvorfor vindskjæret i WRF er høyere enn målingene i denne masten gjennom perioden.

Temperaturen i mastene synker fra 2 °C i starten av perioden til -4 °C i midten av perioden. Temperaturen stiger deretter til 6 °C nærmere 29. desember. WRF følger utviklingen av temperaturen gjennom perioden, men viser opp mot 2 °C feil i forhold til målingene helt i starten og helt i slutten av caseperioden.

Grenselagshøyden varierer mye, men er lavere mot slutten av perioden, da den er rundt 750 m. De vertikale temperaturprofilene og Pasquill-klassifiseringen viser nær nøytrale forhold gjennom hele perioden. Dette stemmer overens med vurderingen av de meteorologiske kartene i kapittel 11.3.

Det er observert høyere vindhastighet ved Siemens-masten enn ved KVT-masten gjennom store deler av perioden. Differansen mellom mastene er størst på 28. desember, da grenselagshøyden er på sitt laveste, rundt 750 m. Det er også i samme tidsrom det er mest vind fra sektor 11, som kan bety at det er en sterkere vakeeffekt fra det lokale terrenget nær KVT-masten.

Vindskjæret i KVT-masten er høyere enn i Siemens-masten fram til omtrent kl 18 den 26. desember, og lavere enn i Siemens-masten den 28. desember. I den første tidsperioden er det vind fra sektor 10, mens det er mest vind fra sektor 11 i den siste tidsperioden. Her vil en vakeeffekt fra det lokale terrenget rundt KVT-masten gi mer turbulens og lavere vindskjær i masten. Målinger av turbulensintensiteten fra de to mastene viser faktisk noe høyere turbulensintensitet ved KVT-masten i den siste tidsperioden.

7.5 CASE 4: 07.08.2007 – 09.08.2007

I dette delkapittelet vil resultater fra caseperiode 4 presenteres og drøftes.

7.5.1 BESKRIVELSE AV CASEPERIODE 4

Caseperiode 4 vil beskrives på tilsvarende måte som caseperiode 1, basert på meteorologiske kart som viser bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa i Figur 11.15-Figur 11.17 i kapittel 11.3.

På sommerhalvåret vil det være mye solinnstråling på Kjøllefjord, og man forventer en døgnsyklus med varierende grenselagshøyde og stabilitet. Kartene viser at det er svake trykkfelt over Nord-Norge i perioden, som indikerer lav vindhastighet. Svake trykkfelt vil også gi mer skiftende vindretning i perioden, da retningen i større grad vil bestemmes av lokale termiske effekter som skyldes soloppvarming. Kartene indikerer likevel at det vil være en transport av varm luft fra innlandsområdene i Europa.

I sommerhalvåret vil døgnvariasjonene i strålingsbalansen avhenge av graden av skydekke, derfor har det blitt innhentet observasjoner av skydekke fra nærmeste værstasjon. Det er Gamvik 2 (stasjonsnr. 96560) på Nordkinnhalvøya, som ligger nær 50 km fra Kjøllefjord. Observasjoner fra Gamvik 2 viser at det var skyet på den 7. august og delvis skyet på den 8. august. Det har ikke blitt foretatt noen målinger av skydekke på den 9. august på grunn av tåke.

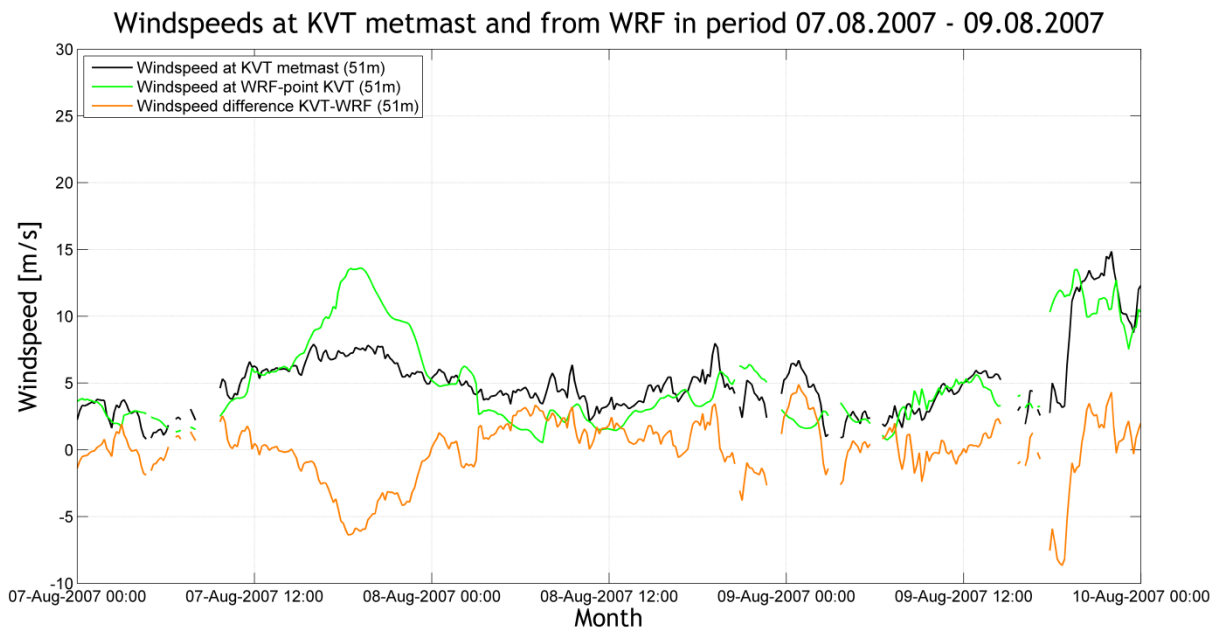
7.5.2 RESULTATER: SAMMENLIGNING MÅLINGER OG WRF

Figur 7.40 og Figur 7.41 viser vindhastigheten i mastene sammenlignet med simulerte verdier fra WRF.

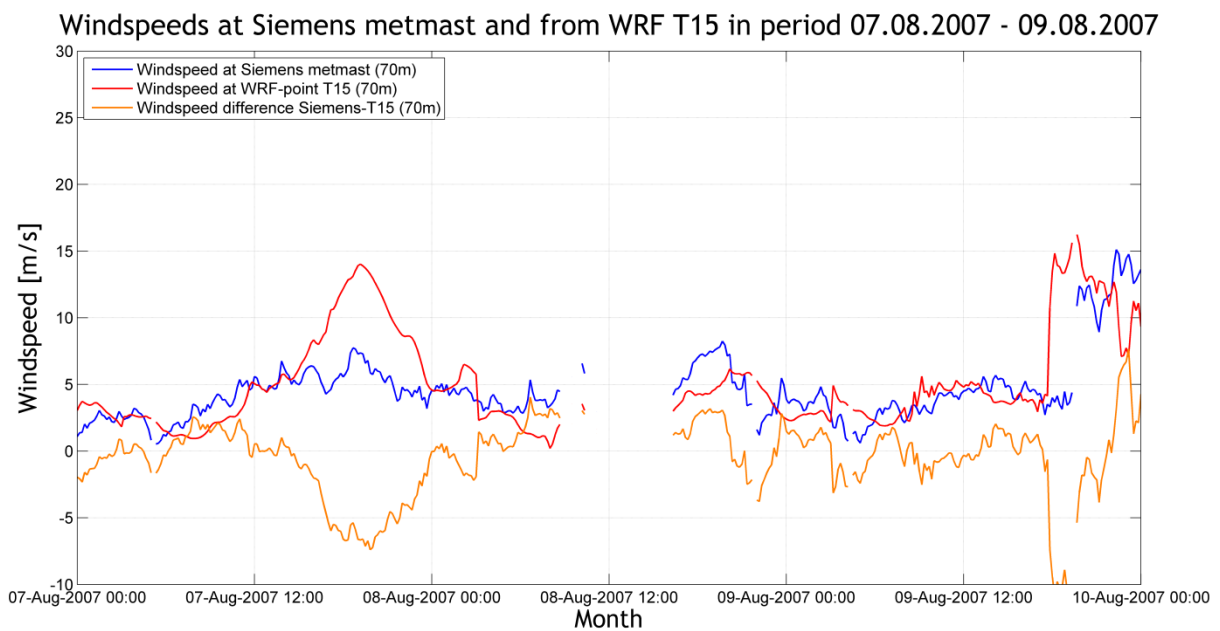
Figur 7.42 og Figur 7.43 viser målt vindretning i mastene, og simulert vindretning fra WRF.

Figur 7.44 og Figur 7.45 viser glidende timesmiddel for vindskjæret i målemastene og fra WRF.

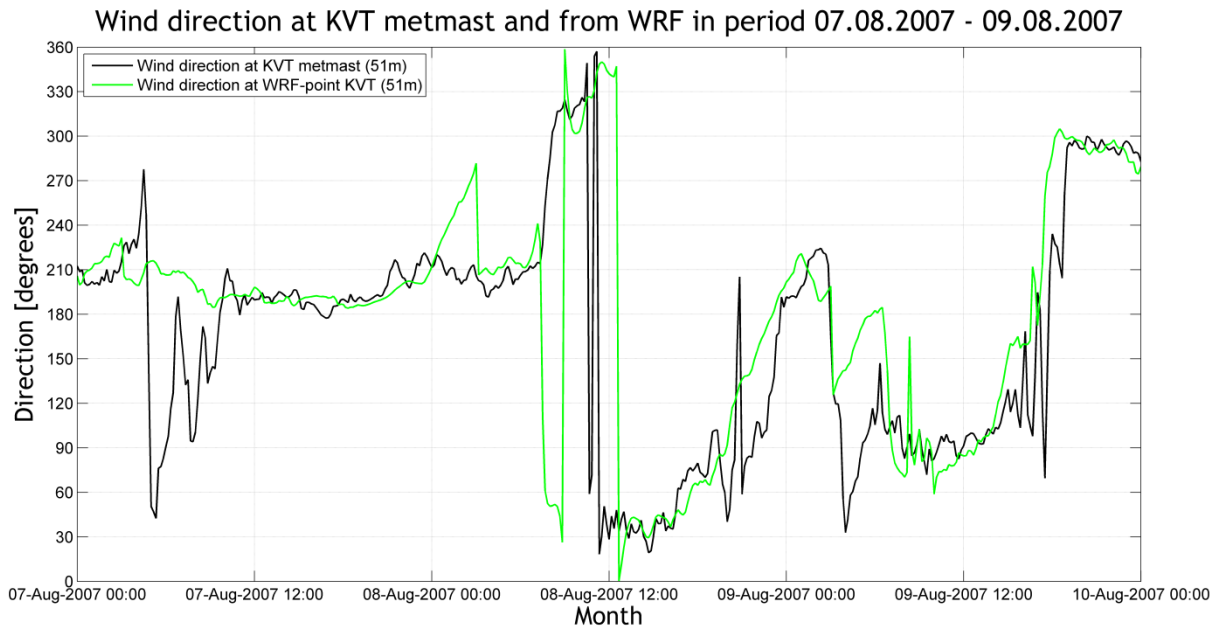
Figur 7.46 viser målt temperatur i 2 m høyde i KVT-masten og fra WRF, og temperatur i 10 m høyde i Siemens-masten og fra WRF.



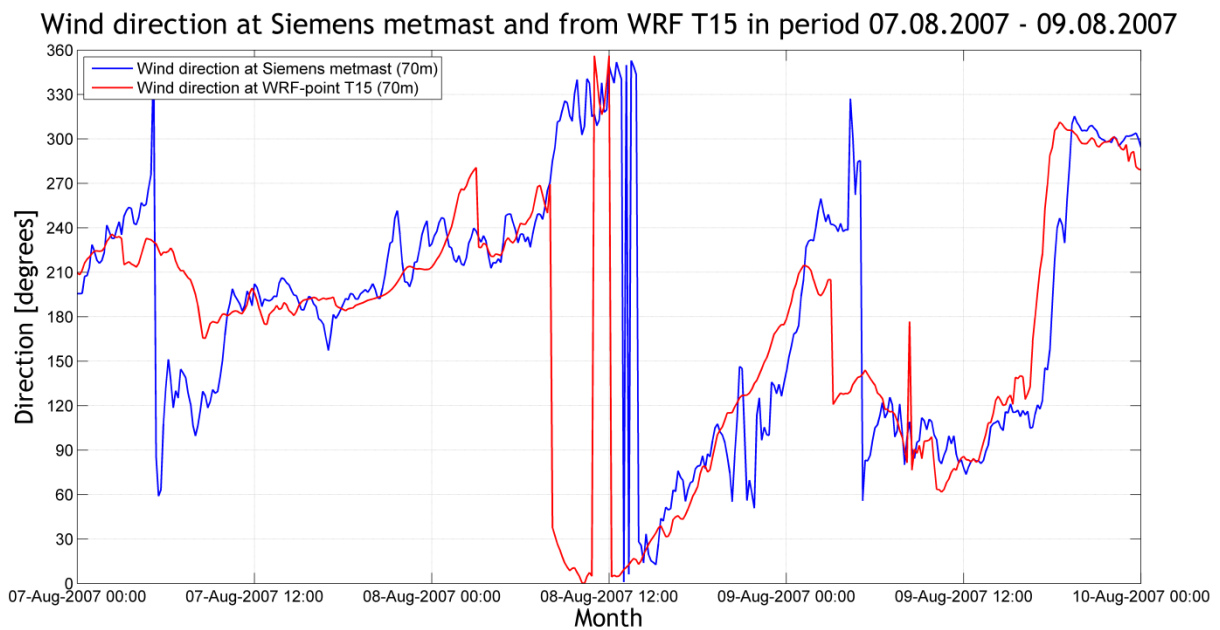
Figur 7.40: Vindhastigheten i 51 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.



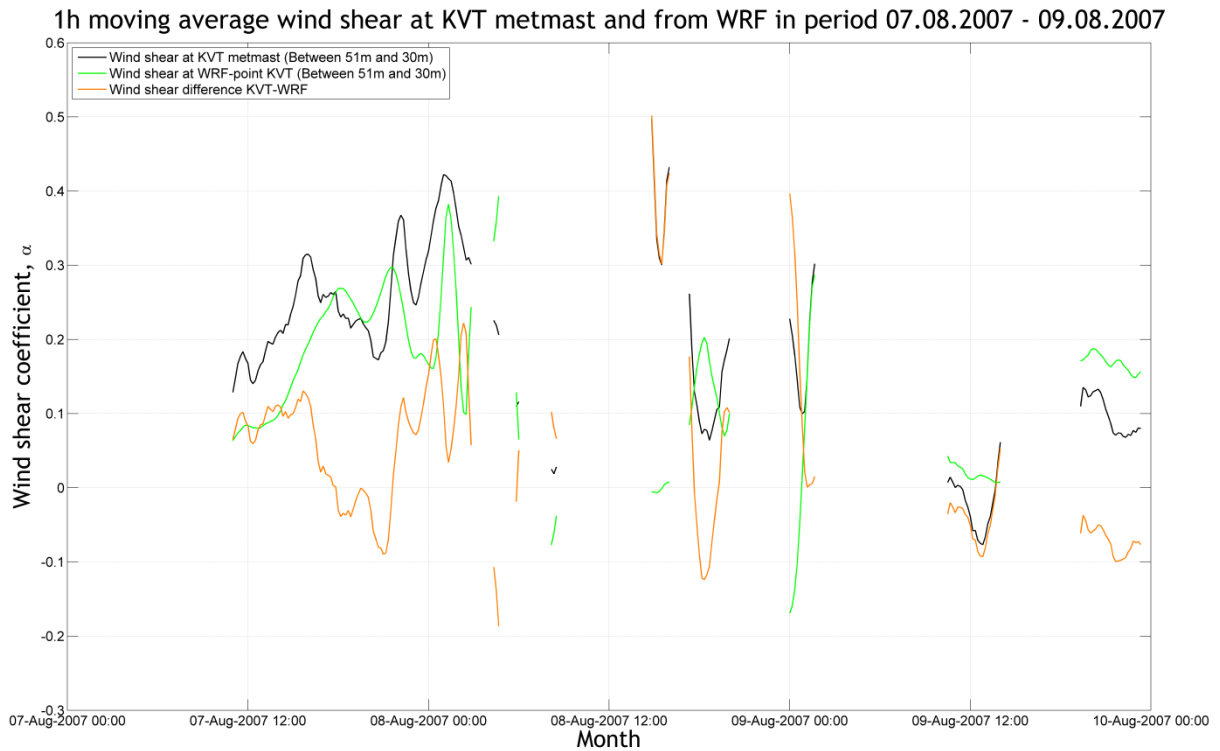
Figur 7.41: Vindhastigheten i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.



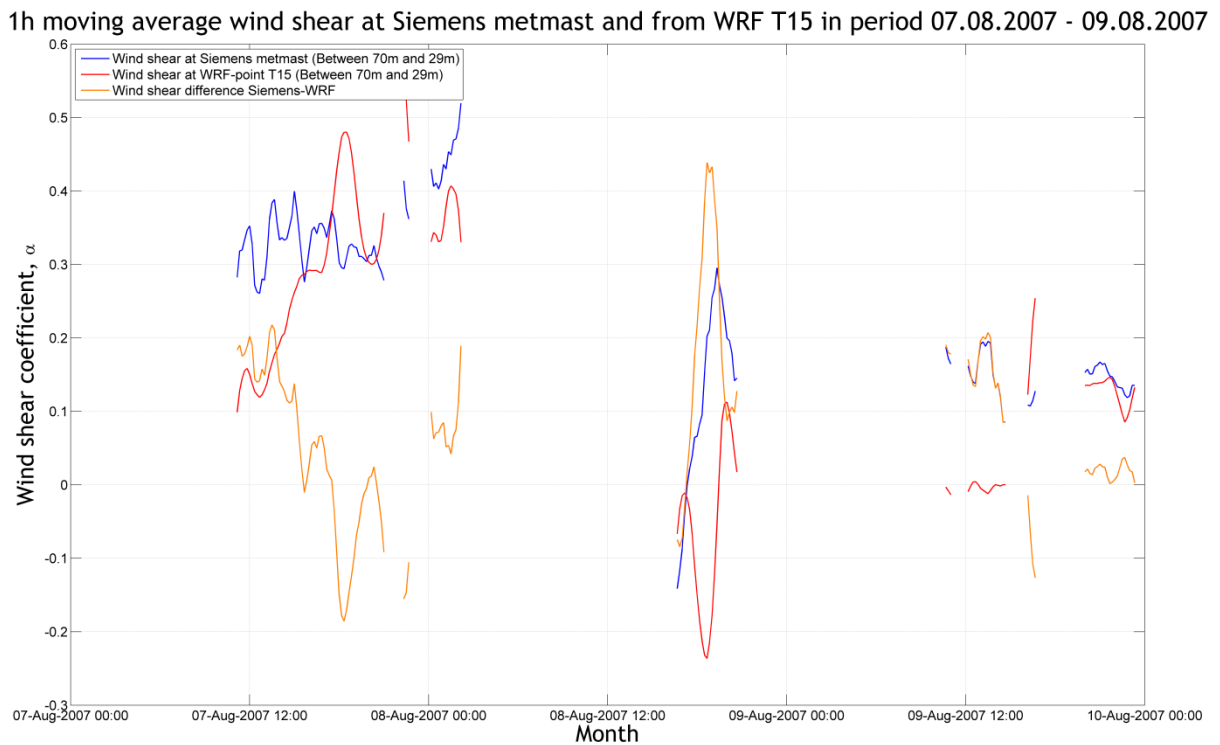
Figur 7.42: Vindretning i 43/48 m højde i KVT-masten (svart linje) og 61 m højde fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007.



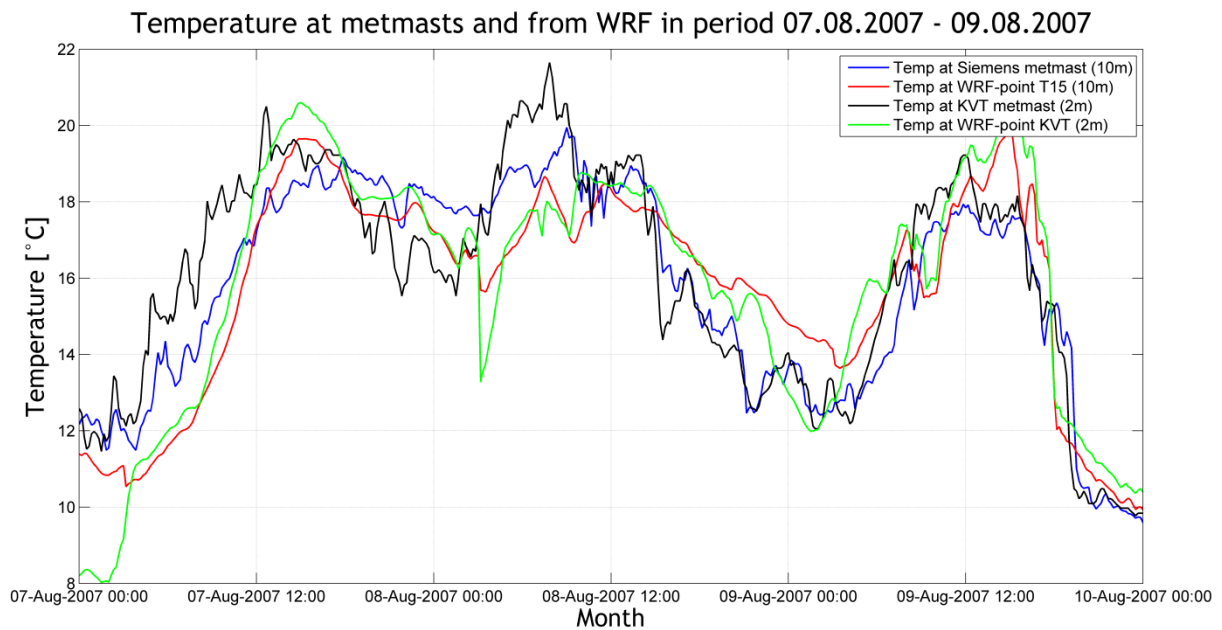
Figur 7.43: Vindretningen i 70 m højde i Siemens-masten (blå linje) og i 61 m højde fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007.



Figur 7.44: Glidende tidsmiddelverdi for vindskjæret i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) for perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linje.



Figur 7.45: Glidende tidsmiddelverdi for vindskjæret i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) for perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linje.



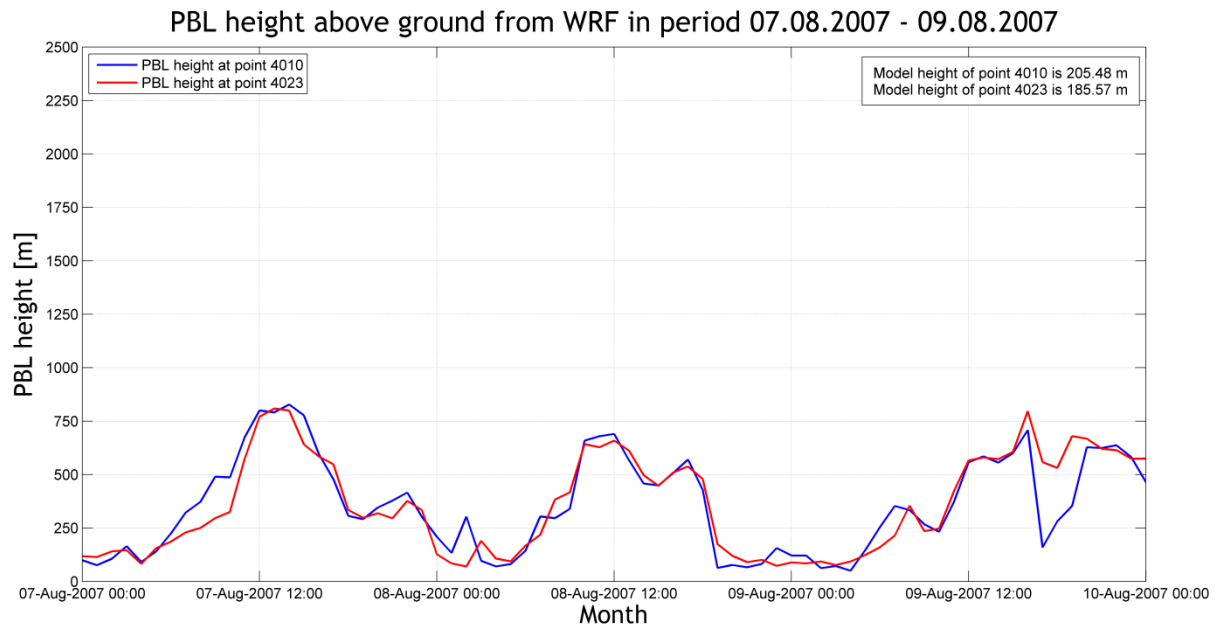
Figur 7.46: Temperaturen i 10 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punkt T15 (rød linje). Temperaturen i 2 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punkt KVT (grønn linje). Perioden er 07.08.2007 til 09.08.2007.

7.5.3 RESULTATER: GRENSELAGSHØYDE OG STABILITET

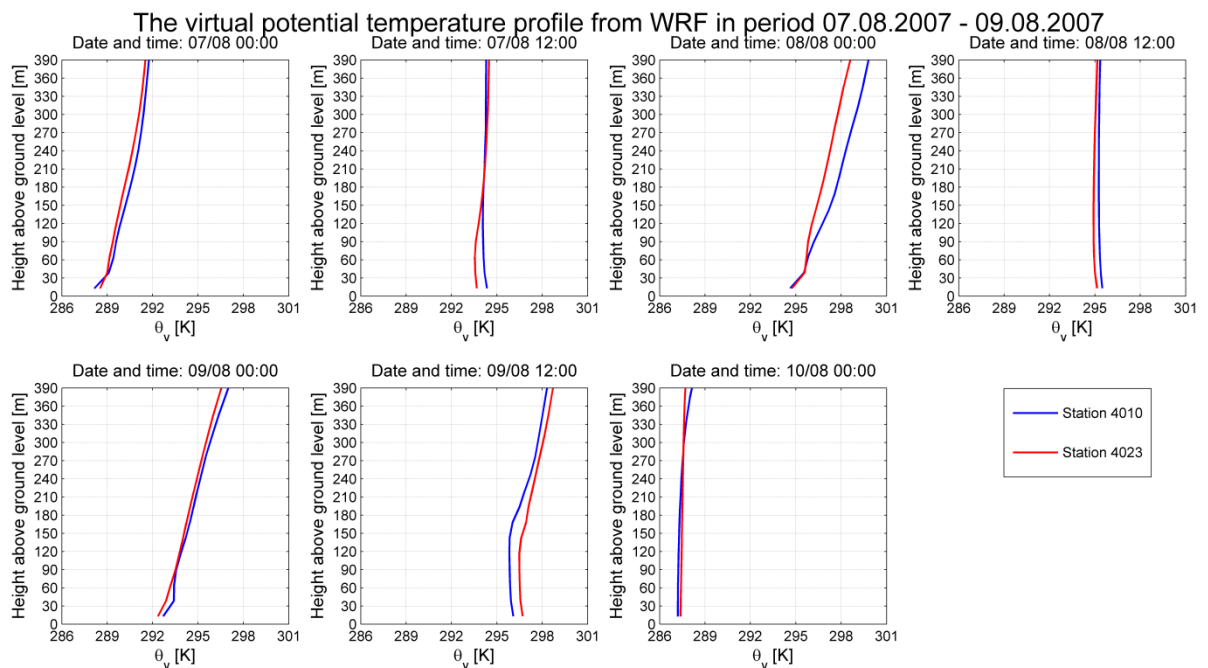
Figur 7.47 viser grenselagshøyden fra WRF-punkt 4010 og 4023.

Figur 7.48 viser de vertikale profilene opp til 390 m for den virtuelle potensielle temperaturen fra WRF-punkt 4010 og 4023.

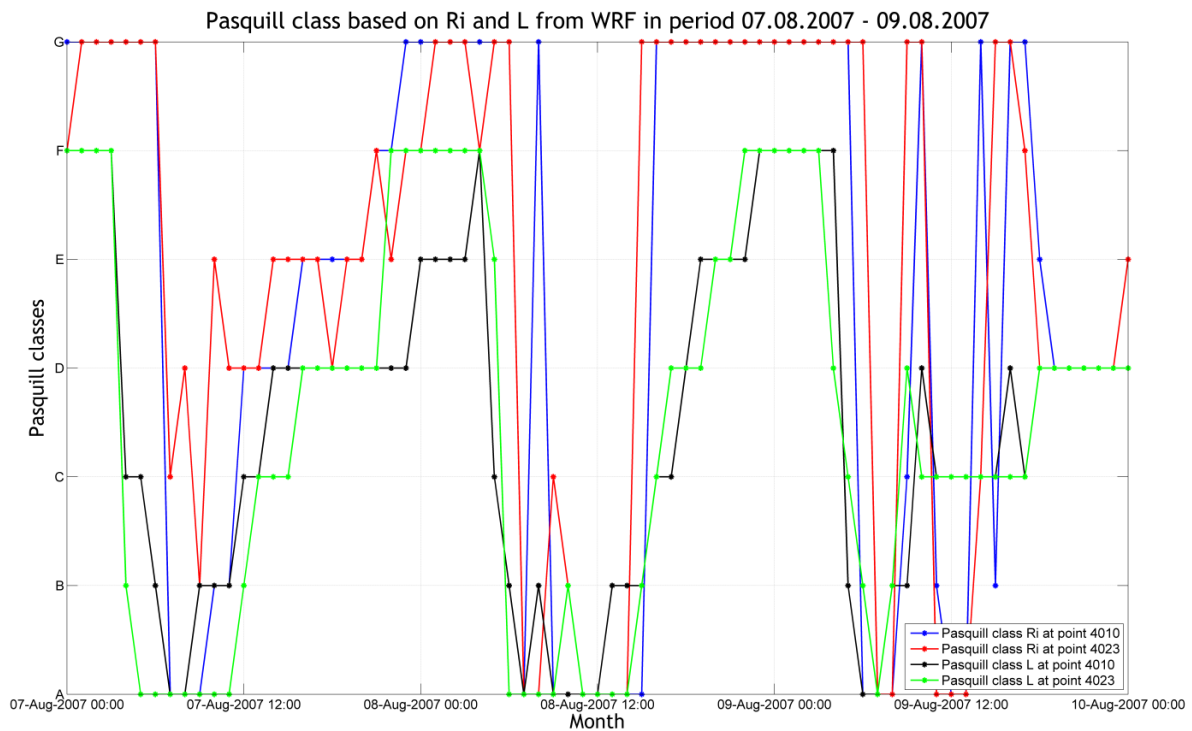
Figur 7.49 viser Pasquill-klassifiseringen gjennom caseperioden basert på beregnede verdier for Ri og L fra WRF-punkt 4010 og 4023.



Figur 7.47: Grenselagshøyde fra WRF-punkt 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007.



Figur 7.48: Vertikale profiler for den virtuelle potensielle temperaturen fra WRF-punktene 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Profilene er plottet for hver sjettede time gjennom perioden.



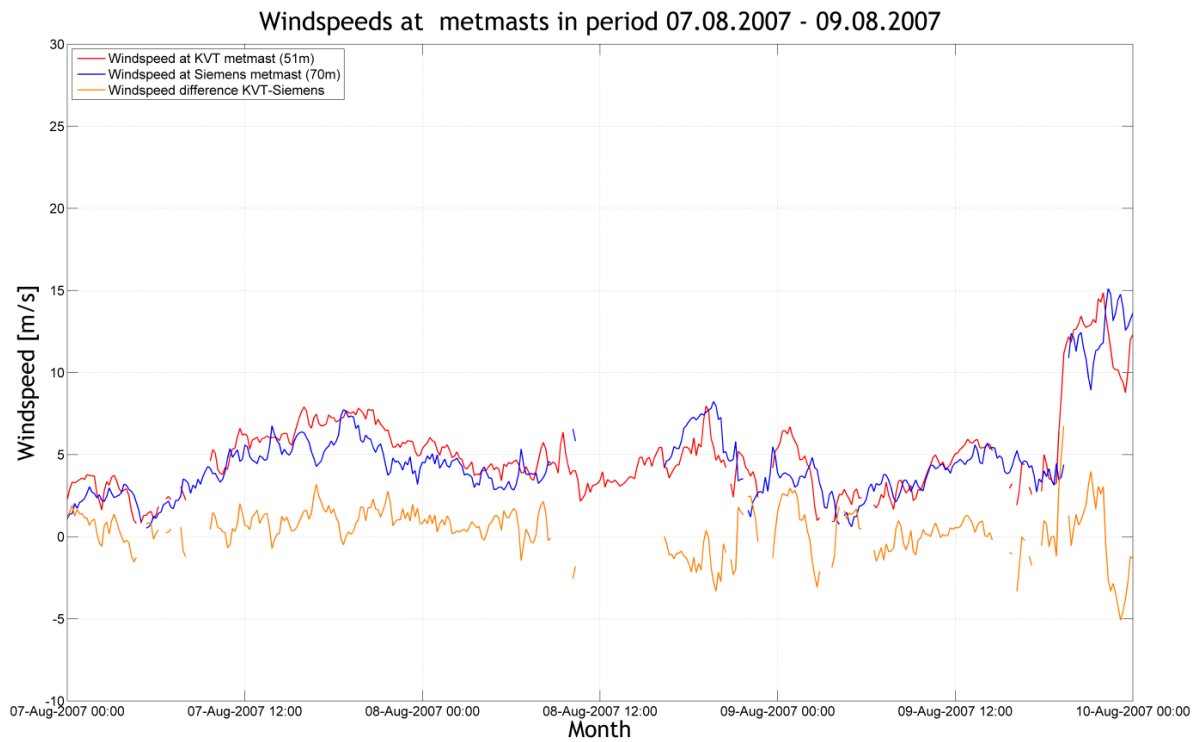
Figur 7.49: Pasquill-klasser i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Klassene basert på Ri fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som blå og rød linje, mens klassene basert på L fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som svart og grønn linje.

7.5.4 RESULTATER: SAMMENLIGNING MELLOM MÅLEMASTENE

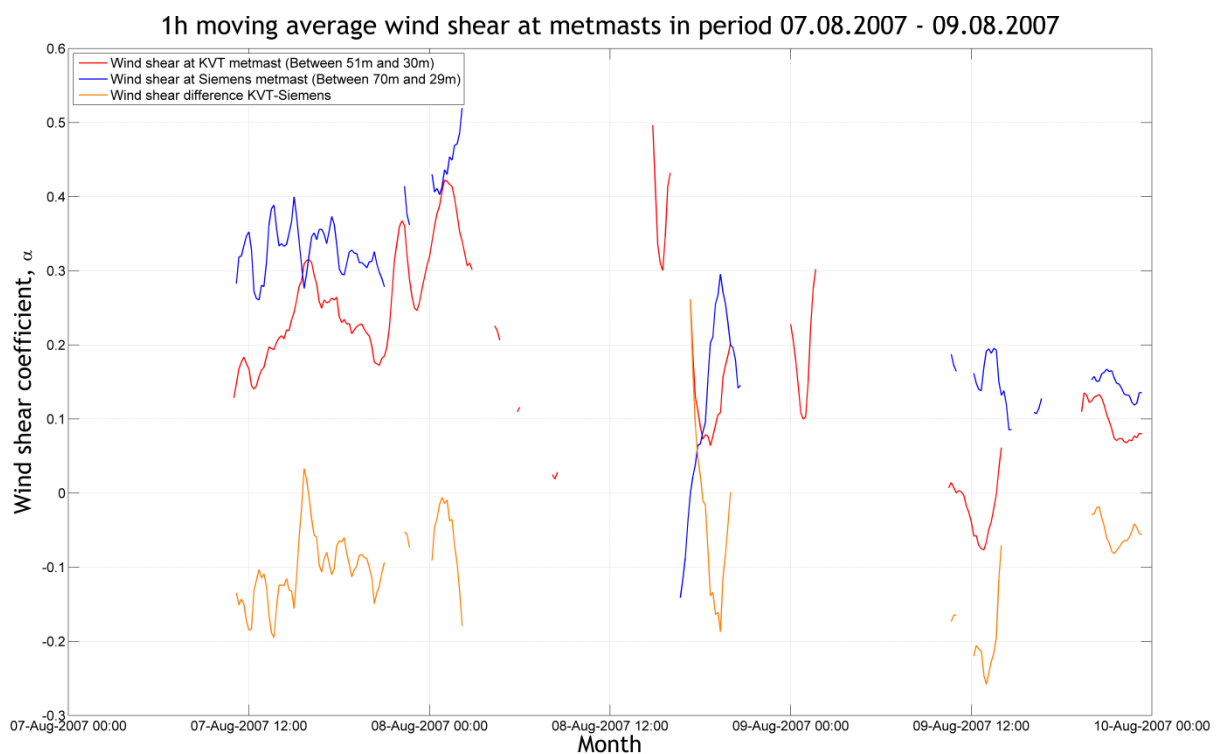
Figur 7.50 viser vindhastigheten i KVT-masten sammenlignet med vindhastigheten i Siemens-masten gjennom caseperioden.

Figur 7.51 viser glidende timesmiddelverdier for vindskjæret i KVT-masten sammenlignet med vindskjæret i Siemens-masten gjennom caseperioden.

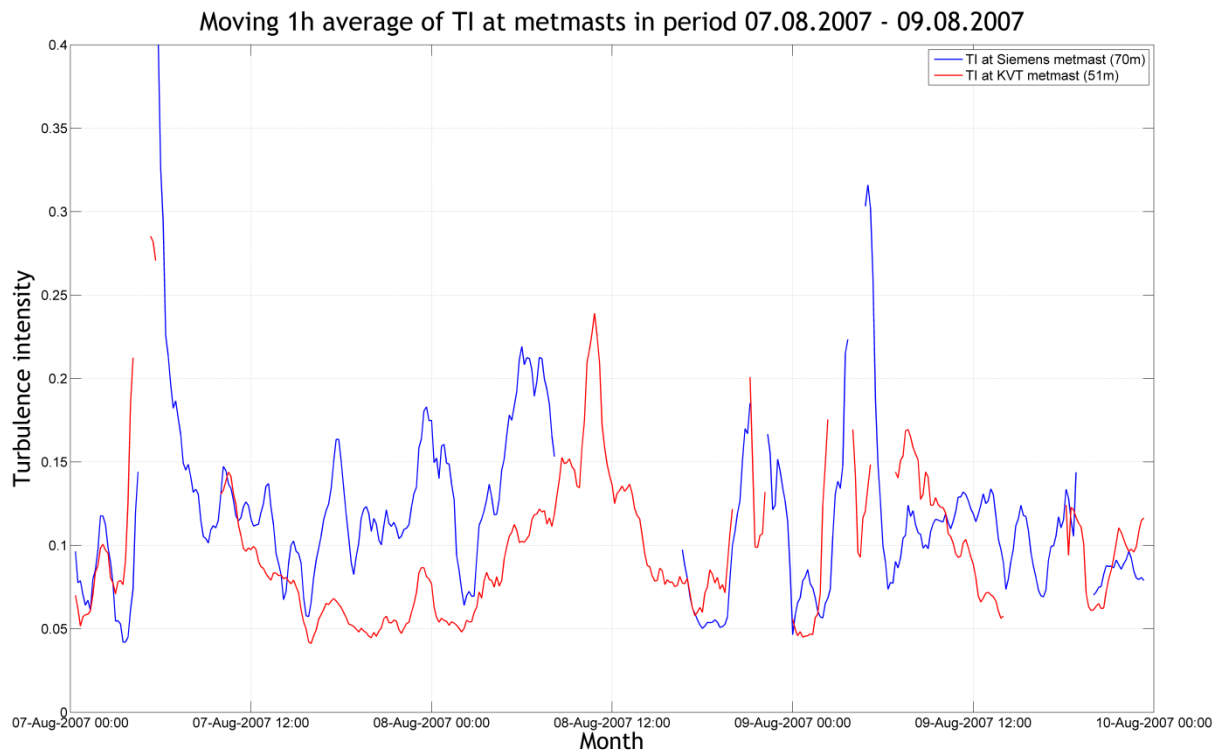
Figur 7.52 viser glidende timesmiddelverdier for turbulensintensiteten i KVT-masten sammenlignet med turbulensintensiteten i Siemens-masten.



Figur 7.50: Vindhastighet i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Differansen er vist som den oransje linjen.



Figur 7.51: Glidende timesmiddel for vindskjæret i KVT-masten (rød linje) og i Siemens-masten (blå linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007. Differansen er vist som den oransje linjen.



Figur 7.52: Glidende timesmiddel for turbulensintensiteten i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 07.08.2007 til 09.08.2007.

7.5.5 DISKUSJON AV RESULTATER FRA CASEPERIODE 4

Vindhastigheten i begge master er lav gjennom perioden, som er typisk for sommersesongen på Kjøllefjord. Differansen mellom mastene og WRF er veldig lik for begge master, med en topp i vindhastigheten fra WRF den 7. august som ikke er observert i mastene. Noen målinger i hver mast er filtrert ut fordi mastene tidvis ligger i vake fra vindparken.

Det er observert veldig skiftende vindretning i begge master, som stemmer overens med vurderingen av de meteorologiske kartene fra perioden i kapittel 11.3. WRF klarer ikke alltid å følge trendene i observasjonene, og i noen tidsrom er differansen så stor som 150°.

Det er vanskelig å peke på trender i vindskjær gjennom perioden, da mesteparten av målingene har blitt filtrert bort på grunn av vake eller for lave vindhastigheter.

Målingene av temperatur i mastene viser en klar døgnvariasjon, med 10-12 °C ved midnatt, og 18-20 °C midt på dagen. Dette er som forventet da strålingsbalansen ved bakken vil forandre seg gjennom døgnet. Døgnvariasjonen mellom 7. og 8. august er noe mindre enn i resten av caseperioden. I denne tidsperioden viste observasjoner fra Gamvik 2 at det var skyet, noe som indikerer lignende forhold over Kjøllefjord. Skyer

over halvøya vil påvirke strålingsbalansen, og gi mindre variasjoner gjennom døgnet. WRF følger stort sett trendene i mastene, med noen avvik helt i starten av perioden.

Grenselagshøyden fra de to WRF-punktene varierer mellom 750 m og 100 m gjennom perioden, og viser en klar døgnvariasjon med størst PBL-høyder midt på dagen og lavest høyder rundt midnatt.

Døgnvariasjonene observeres også i de vertikale temperaturprofilene og Pasquill-klassifiseringen. Pasquill-klassifiseringen viser i større grad enn temperaturprofilene at det er veldig ustabile forhold i løpet av dagen, og veldig stabile forhold rundt midnatt. Denne utviklingen gjennom døgnet stemmer overens med inndelingen av strukturen i grenselaget i et blandet lag, et residuallag og et stabilt grenselag.

Målingene av vindhastighet i mastene følger hverandre godt gjennom perioden. Sett sammen med plottet av stabiliteten kan man se en tendens til høyere vindhastighet i begge master ved nøytrale forhold i WRF. Hastigheten i KVT-masten er høyere enn i Siemens-masten i perioden fra ca. kl 12 den 7. august til kl 6 den 8. august. Dette er en periode med svakt til sterkt stabile forhold i WRF, og mest vind fra sektor 8.

Det er vanskelig å kommentere differanser i vindskjær mellom mastene, da en stor del av målingene har blitt filtrert bort grunnet vake eller for lave vindhastigheter.

En del målinger av turbulensintensiteten har blitt filtrert bort på grunn av vake. Det er høy turbulensintensitet i begge master gjennom perioden, men det er observert høyere turbulensintensitet i Siemens-masten spesielt før og etter midnatt den 8. august. Dette er innenfor perioden der hastigheten ved KVT-masten er høyest.

7.6 CASE 5: 06.07.2007 – 08.07.2007

I dette delkapittelet vil resultater fra caseperiode 5 presenteres og drøftes.

7.6.1 BESKRIVELSE AV CASEPERIODE 5

Caseperiode 5 vil beskrives på tilsvarende måte som caseperiode 1, basert på meteorologiske kart som viser bakkestrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa i Figur 11.18-Figur 11.20 i kapittel 11.3.

Strålingsbalansen ved bakken vil endre seg gjennom døgnet på grunn av solinnstråling, og man forventer en døgnsyklus med varierende grenselagshøyde og stabilitet. Isobarene på kartene indikerer at denne caseperioden vil være dominert av østlig vind med lav hastighet.

Det har det blitt innhentet observasjoner av skydekke fra nærmeste værstasjon; Gamvik 2 (stasjonsnr. 96560) på Nordkinnhalvøya. Observasjoner fra Gamvik 2 viser at det var skyet gjennom hele caseperioden.

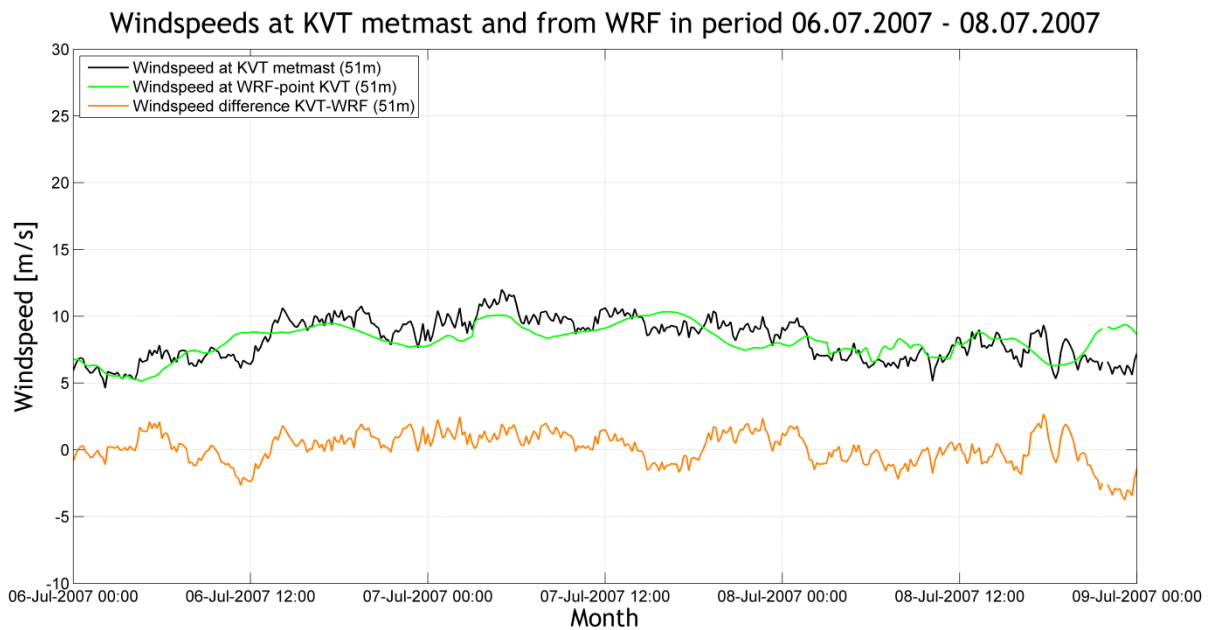
7.6.2 RESULTATER: SAMMENLIGNING MÅLINGER OG WRF

Figur 7.53 og Figur 7.54 viser vindhastigheten i mastene sammenlignet med simulerte verdier fra WRF.

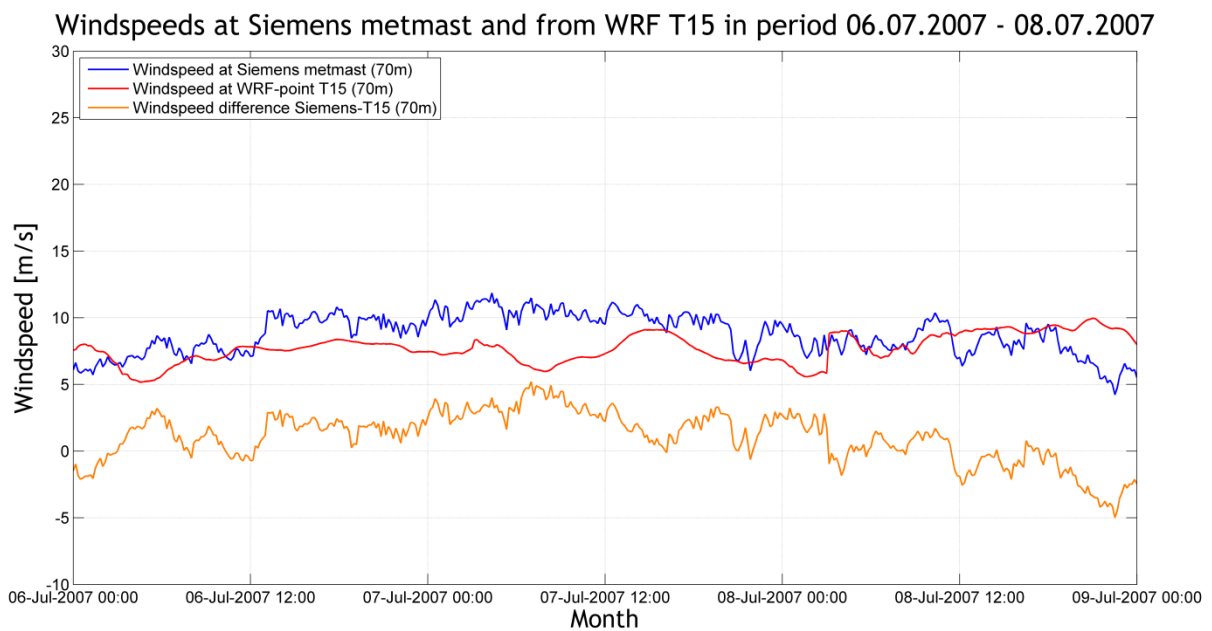
Figur 7.55 og Figur 7.56 viser målt vindretning i mastene, og simulert vindretning fra WRF.

Figur 7.57 og Figur 7.58 viser glidende timesmiddel for vindskjæret i målemastene og fra WRF.

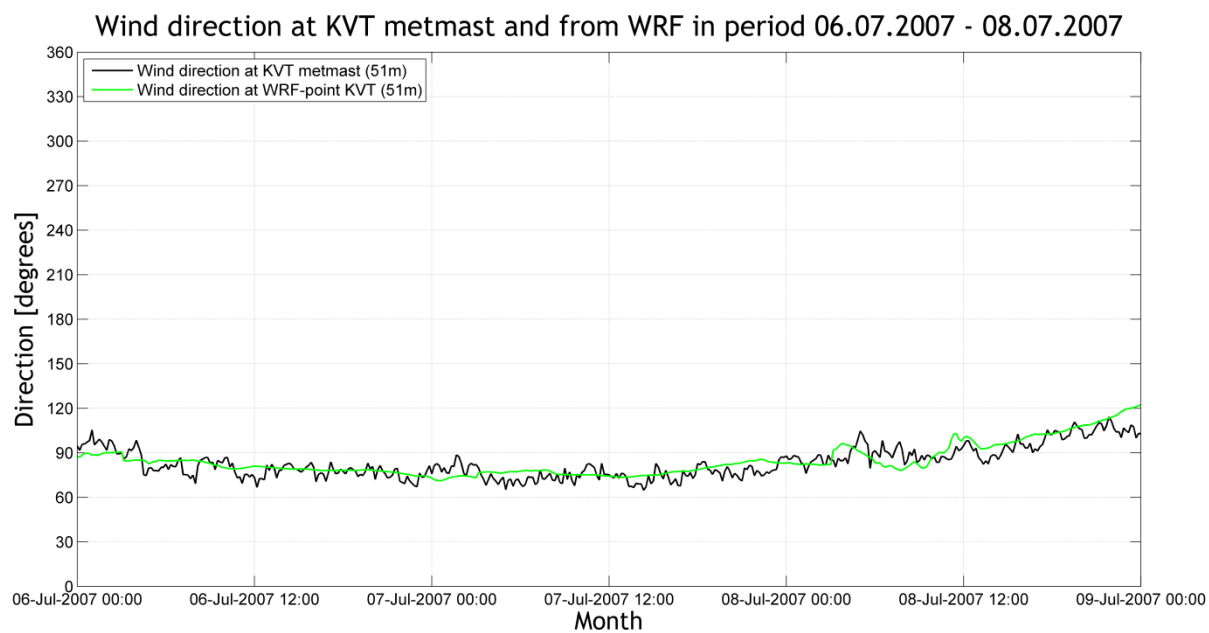
Figur 7.59 viser målt temperatur i 2 m høyde i KVT-masten og fra WRF, og temperatur i 10 m høyde i Siemens-masten og fra WRF.



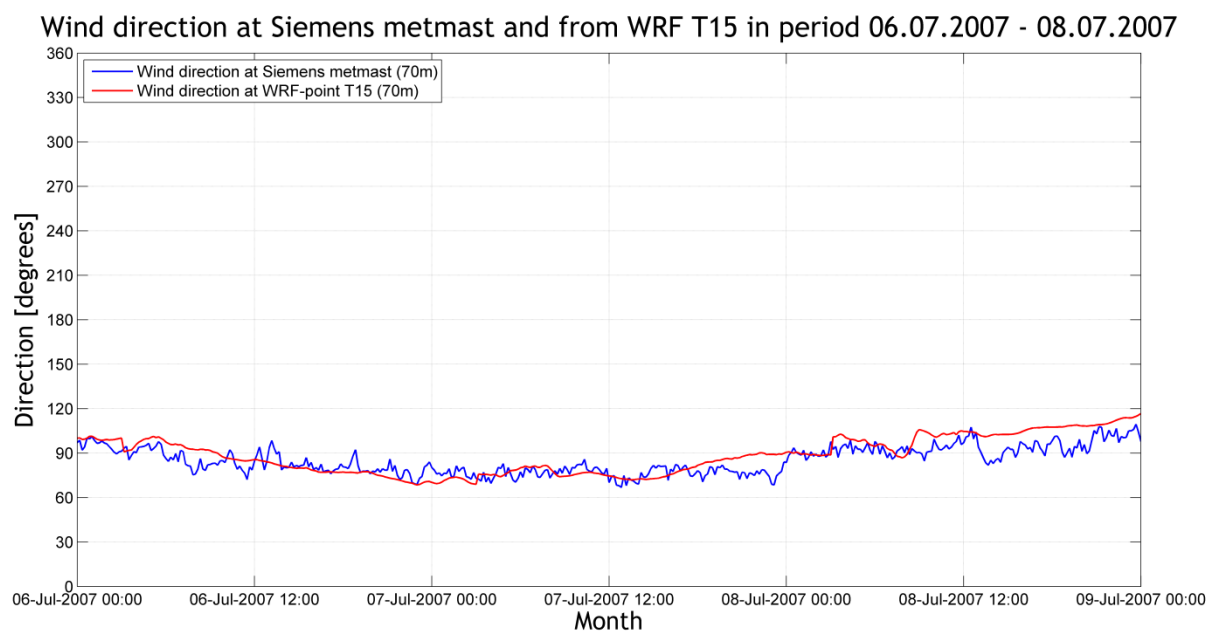
Figur 7.53: Vindhastigheten i 51 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.



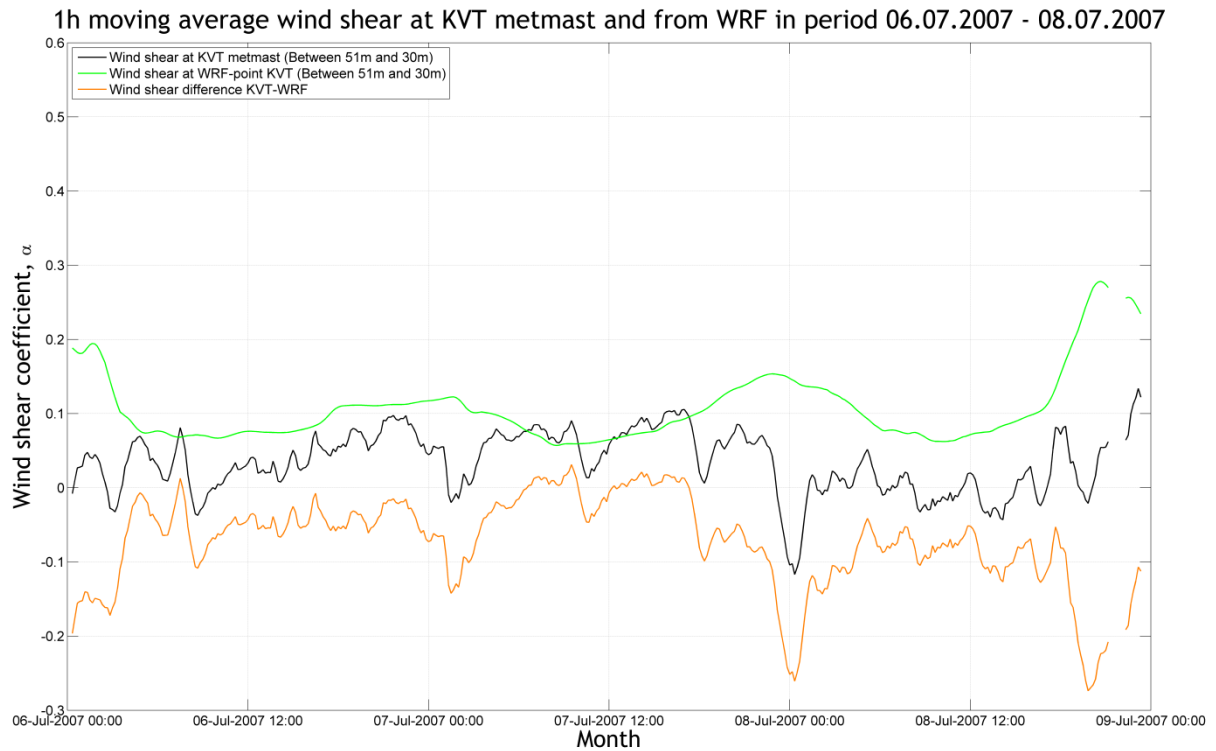
Figur 7.54: Vindhastigheten i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.



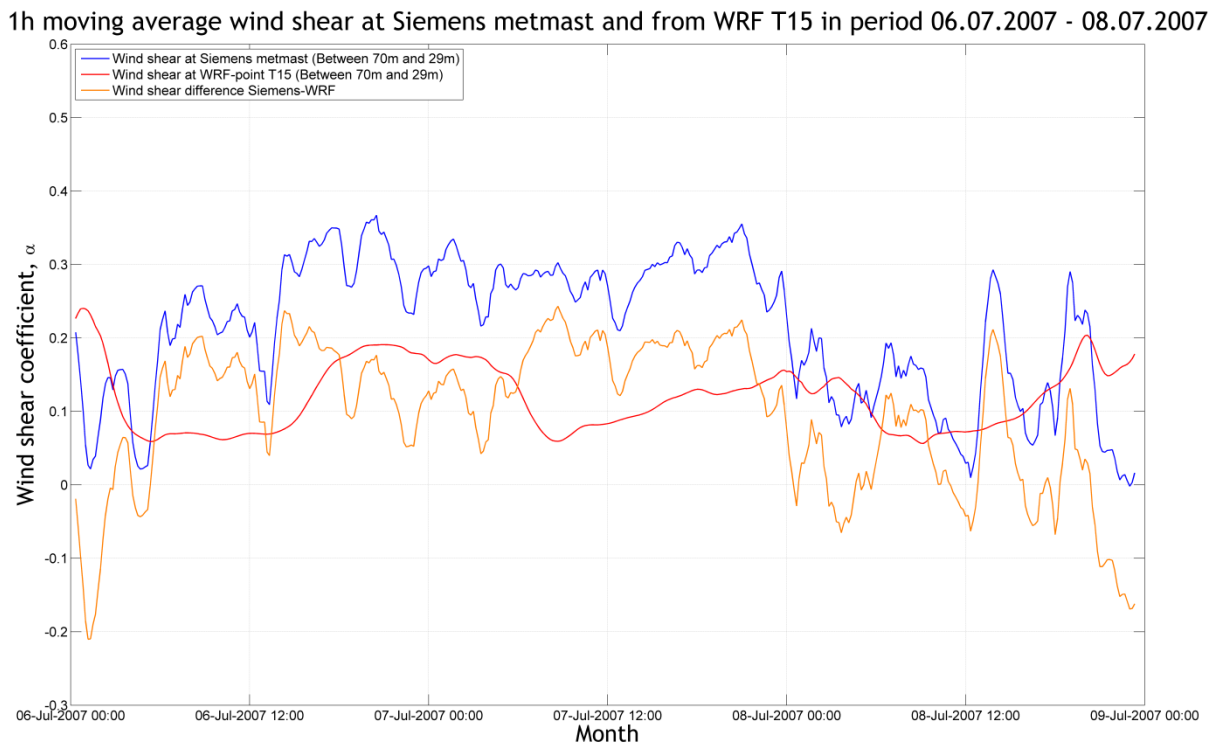
Figur 7.55: Vindretning i 43/48 m høyde i KVT-masten (svart linje) og 61 m høyde fra WRF-punktet KVT (grønn linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007.



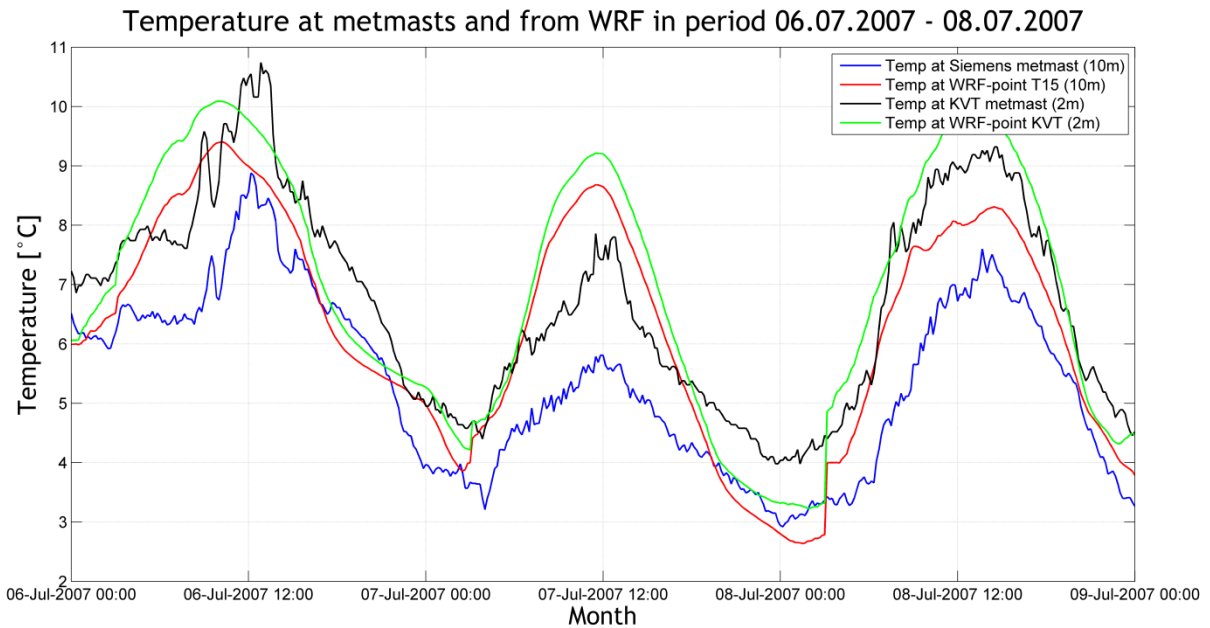
Figur 7.56: Vindretningen i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og i 61 m høyde fra WRF-punktet T15 (rød linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007.



Figur 7.57: Glidende tidsmiddelverdi for vindskjæret i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punktet KVT (grønn linje) for perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.



Figur 7.58: Glidende tidsmiddelverdi for vindskjæret i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punktet T15 (rød linje) for perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Differansen mellom masten og WRF er vist som den oransje linjen.



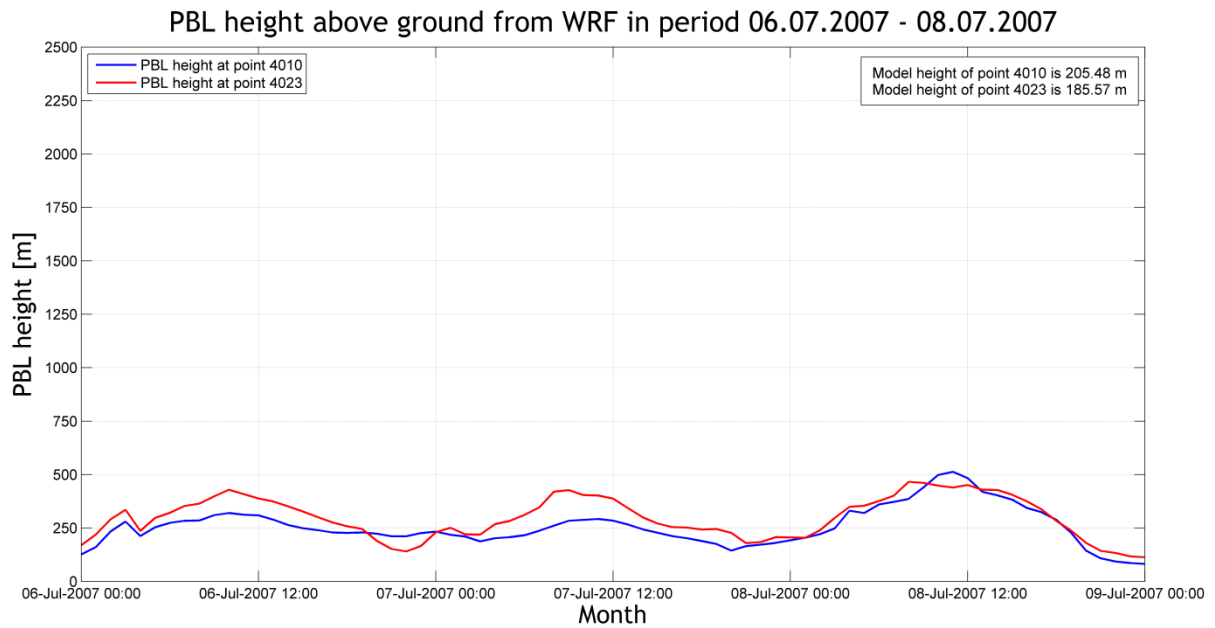
Figur 7.59: Temperaturen i 10 m høyde i Siemens-masten (blå linje) og fra WRF-punkt T15 (rød linje). Temperaturen i 2 m høyde i KVT-masten (svart linje) og fra WRF-punkt KVT (grønn linje). Perioden er 06.07.2007 til 08.07.2007.

7.6.3 RESULTATER: GRENSELAGSHØYDE OG STABILITET

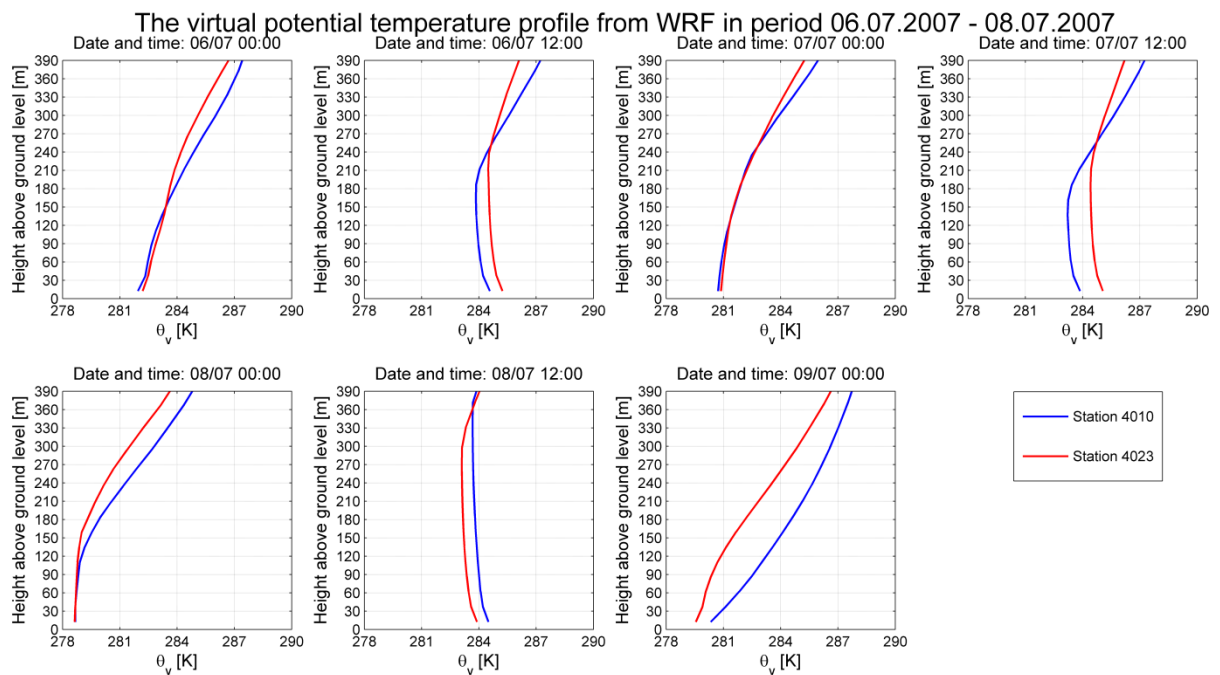
Figur 7.60 viser grenselagshøyden fra WRF-punkt 4010 og 4023.

Figur 7.61 viser de vertikale profilene opp til 390 m for den virtuelle potensielle temperaturen fra WRF-punkt 4010 og 4023.

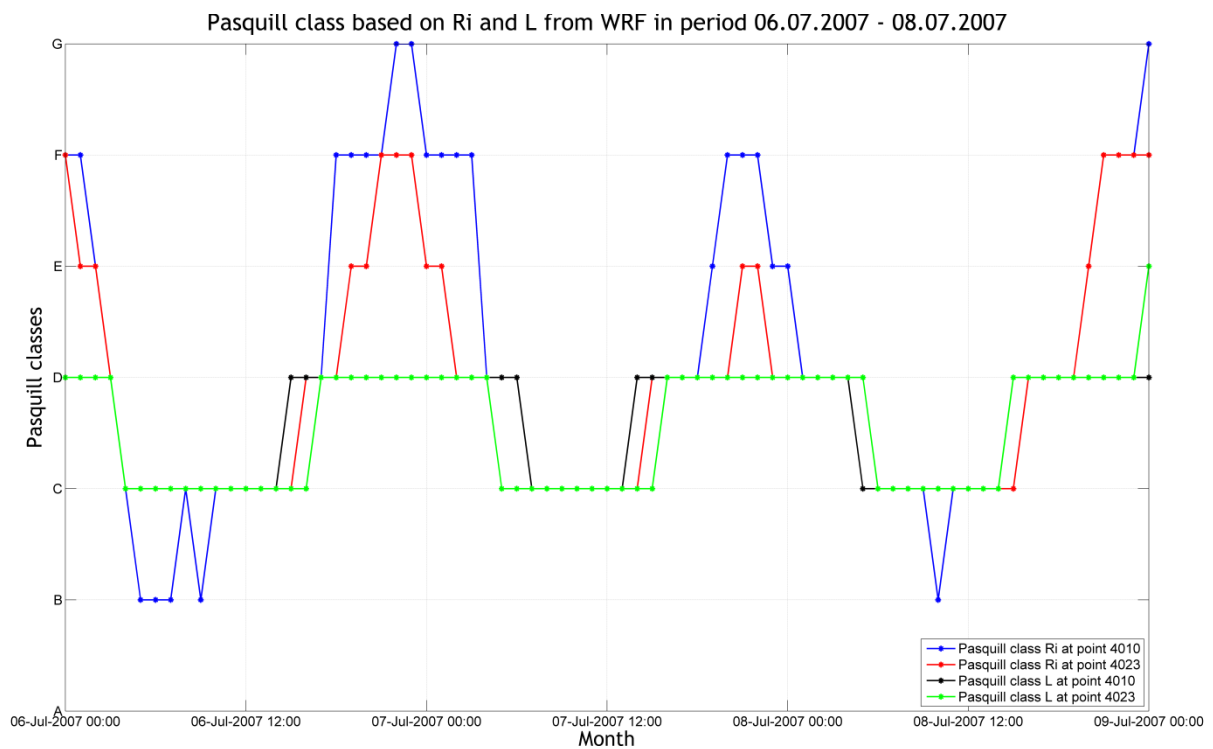
Figur 7.62 viser Pasquill-klassifiseringen gjennom caseperioden basert på beregnede verdier for Ri og L fra WRF-punkt 4010 og 4023.



Figur 7.60: Grenselagshøyde fra WRF-punkt 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007.



Figur 7.61: Vertikale profiler for den virtuelle potensielle temperaturen fra WRF-punktene 4010 (blå linje) og 4023 (rød linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Profilene er plottet for hver sjette time gjennom perioden.



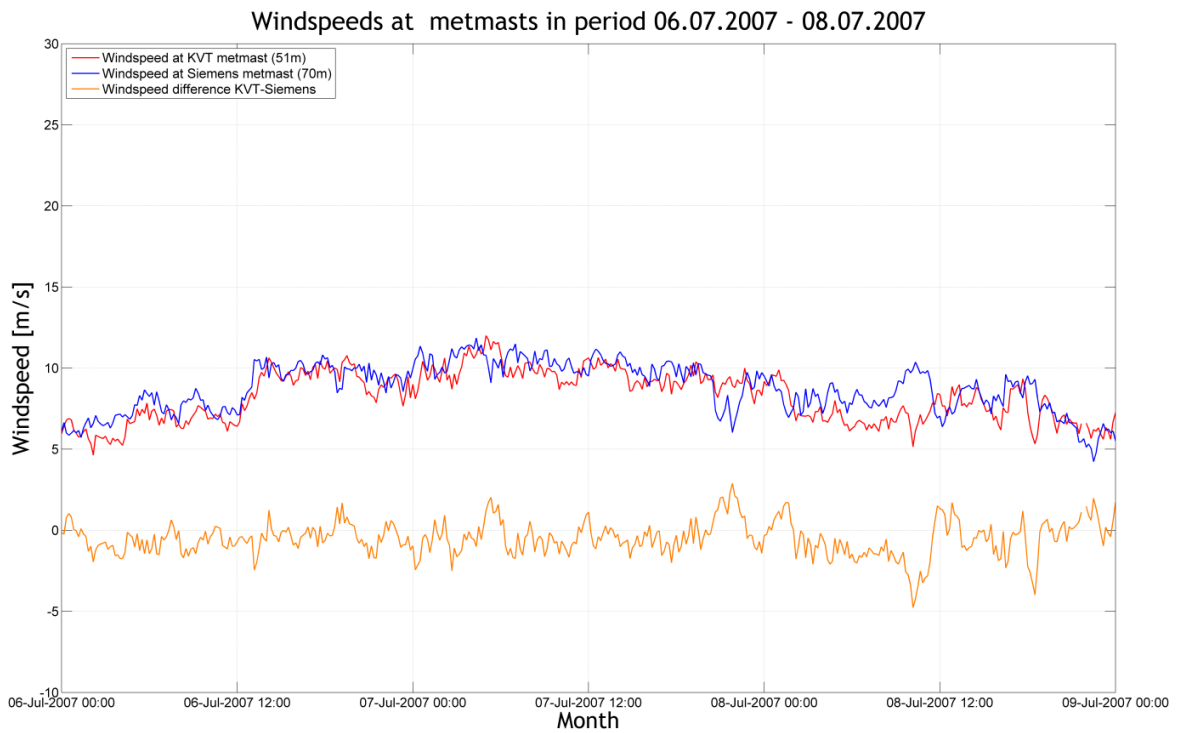
Figur 7.62: Pasquill-klasser i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Klassene basert på Ri fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som blå og rød linje, mens klassene basert på L fra WRF-punktene 4010 og 4023 er vist som svart og grønn linje.

7.6.4 RESULTATER: SAMMENLIGNING MELLOM MÅLEMASTENE

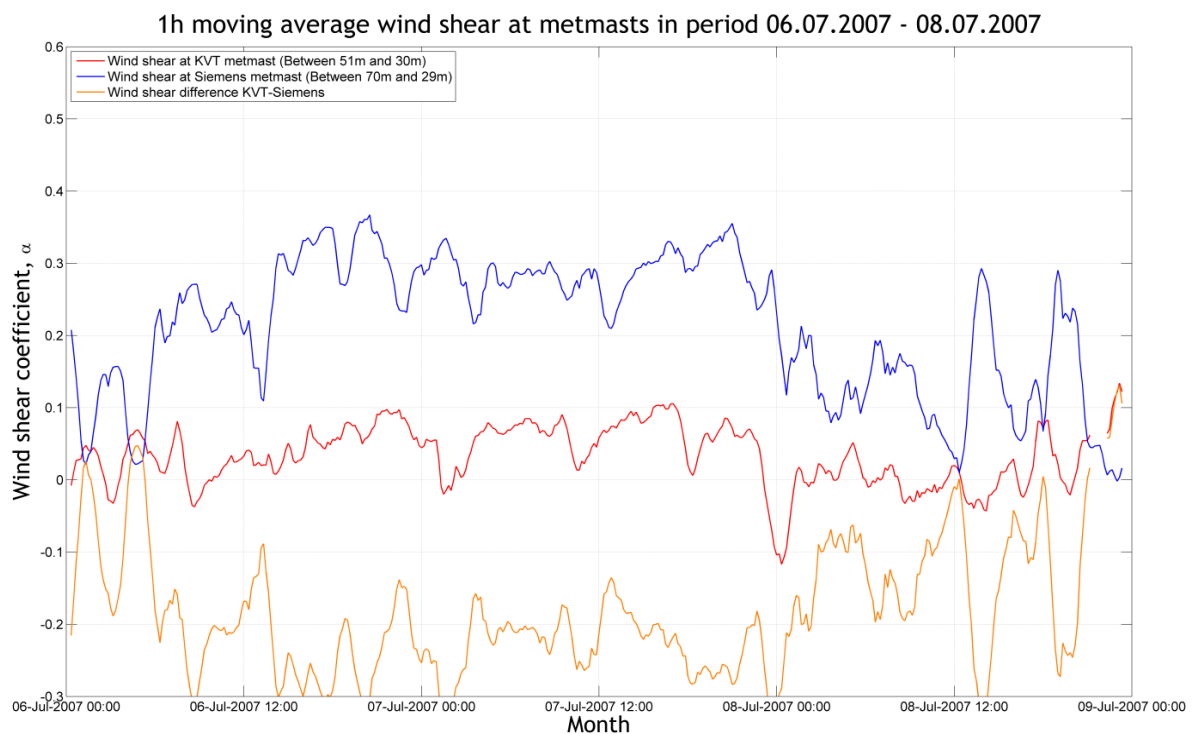
Figur 7.63 viser vindhastigheten i KVT-masten sammenlignet med vindhastigheten i Siemens-masten gjennom caseperioden.

Figur 7.64 viser glidende timesmiddelverdier for vindskjæret i KVT-masten sammenlignet med vindskjæret i Siemens-masten gjennom caseperioden.

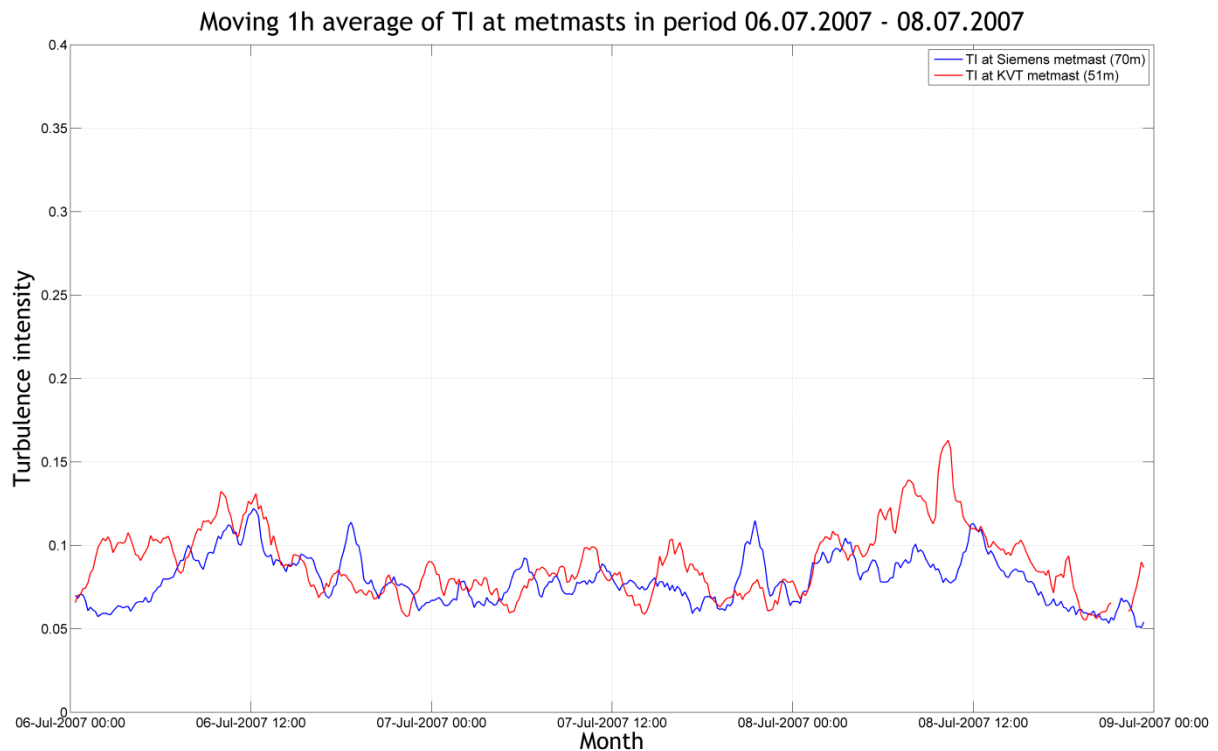
Figur 7.65 viser glidende timesmiddelverdier for turbulensintensiteten i KVT-masten sammenlignet med turbulensintensiteten i Siemens-masten.



Figur 7.63: Vindhastighet i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Differansen er vist som den oransje linjen.



Figur 7.64: Glidende timesmiddel for vindskjæret i KVT-masten (rød linje) og i Siemens-masten (blå linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007. Differansen er vist som den oransje linjen.



Figur 7.65: Glidende tidsmiddel for turbulensintensiteten i 51 m høyde i KVT-masten (rød linje) og i 70 m høyde i Siemens-masten (blå linje) i perioden 06.07.2007 til 08.07.2007.

7.6.5 DISKUSJON AV RESULTATER FRA CASEPERIODE 5

Vindhastigheten i begge master er lav, og varierer mellom 5-10 m/s. WRF følger hastighetsnivået i KVT-masten, men ligger under nivået i Siemens-masten i midten av perioden.

Vindretningen i begge master er fra sektor 4 gjennom mesteparten av perioden, det vil si at vinden kommer fra rett øst. Dette er i samsvar med vurderingen av de meteorologiske kartene. WRF viser de samme trendene som målingene.

WRF gir for høyt vindskjær i forhold til målingene i KVT-masten gjennom store deler av perioden. Man kan likevel observere en viss døgnvariasjon i WRF som stemmer overens med døgnvariasjonen i stabilitet. Den samme døgnvariasjonen kan observeres i WRF-punkt T15, men her ligger nivået lavere enn målingene fra Siemens-masten.

Temperaturen i mastene varierer gjennom døgnet, med rundt 4-5 °C om natten og opp mot 8-10 °C om dagen. Observasjonene fra Gamvik 2 viste at det var skyet gjennom hele caseperioden, noe som kan forklare hvorfor variasjonene i temperatur ikke er så store. WRF ligger opp mot 2 °C høyere enn målingene om dagen, og nærmere 1 °C lavere om natten. Her kan det være parametriseringen av skyer i WRF som resulterer i en større døgnvariasjon i modellen.

Grenselagshøyden er generelt lav gjennom perioden, men følger typisk døgnvariasjon med større grenselagshøyde på dagtid og lavere høyde gjennom natten. Dette er i samsvar med temperaturprofilene og Pasquill-klassifiseringen, som viser stabile forhold i de laveste høydene rundt midnatt, og nøytrale og svakt ustabile forhold på dagtid.

Vindhastigheten i begge master er lav gjennom perioden, og det er kun små forskjeller mellom mastene.

Det er stor forskjell mellom observert vindskjær i de to mastene, med langt høyere vindskjær i Siemens-masten. Differansen mellom mastene varierer stort sett mellom -0,1 og -0,3. Den samme differansen mellom mastene kan ikke observeres for turbulensintensiteten.

7.7 SAMLEDE RESULTATER FRA CASEPERIODENE

For å identifisere mulige trender i middelvind og vindskjær med stabilitet, retning og grenselagshøyde, har resultater fra alle fem caseperioder og hele måleperioden blitt sammenfattet i tabeller.

Karakteriseringen av stabiliteten i caseperioden er basert på beregninger av Richardson-tallet fra WRF-punkt 4010. Stabiliteten er delt inn i ustabil, nøytralt og stabilt, og hyppigheten av hver klasse er regnet som andel (%) av den totale caseperioden. Grenselagshøyden er delt i klassene vist i Tabell 6.10, og andelen (%) av hver klasse i caseperioden er beregnet. Resultatene er vist i Tabell 7.3, og er basert på data fra WRF-punktet 4010.

Hyppigheten av hver sektor gjennom caseperioden er også beregnet, og de tre mest dominerende sektorene målt i hver mast er vist i Tabell 7.4.

Middelvinden og middelvindskjæret i mastene og hver av WRF-punktene KVT og T15 er vist i Tabell 7.5 og Tabell 7.7. For beregningen av middelvinden og middelvindskjæret har alle data fra tidsperioder med vake i en av mastene blitt filtrert bort. For vindskjæret er også perioder med vindhastighet lavere enn 4 m/s i de øverste høydene og 2 m/s i de laveste høydene blitt filtrert bort.

Korrelasjon mellom timinuttersverdiene av vindhastighet i hver caseperiode og hele måleperioden er beregnet for mastene og WRF. Dette er vist i Tabell 7.6.

Tabell 7.3: Stabiliteten basert på Ri og grenselagshøyden (PBLH) fra WRF-punkt 4010, gitt som andel [%] av hver caseperiode. Stabiliteten er delt i klassene ustabil, nøytral og stabil, og PBLH er delt i klasse 1-5.

Caseperiode	Stabilitet fra Ri (ustabil:nøytral:stabil)	PBLH (1:2:3:4:5)
01.03.2007 - 30.06.2009	16,4% : 48,1% : 35,4%	12,4%: 28,6%: 42,3%: 14,2%: 2,58%
04.01.2008 - 06.01.2008	0% : 83,6% : 16,4%	4,10%: 79,5%: 16,4%: 0%: 0%
09.02.2008 - 11.02.2008	0% : 52,0% : 48,0%	12,3%: 21,9%: 65,8%: 0%: 0%
26.12.2008 - 28.12.2008	0% : 94,5% : 5,5%	0%: 0%: 48,0%: 30,1%: 21,9%
07.08.2007 - 09.08.2007	28,8% : 13,7% : 57,5%	35,6%: 35,6%: 28,8%: 0%: 0%
06.07.2007 - 08.07.2007	43,8% : 23,3% : 32,9%	56,2%: 42,5%: 1,37%: 0%: 0%

Tabell 7.4: De tre mest dominerende sektorene målt i 43/48 m høyde i KVT-masten, og 67,5 m høyde i Siemens-masten i hver caseperiode og hele måleperioden. Andelen [%] av hver av sektorene er gitt i parentes.

Caseperiode	Dominerende sektorer KVT	Dominerende sektorer Siemens
01.03.2007 - 30.06.2009	7 (13,6%), 8 (23,0%), 10 (10,2%)	8 (17,3%), 9 (11,1%), 10 (11,3%)
04.01.2008 - 06.01.2008	7 (0,92%), 8 (98,6%), 9 (0,46%)	7 (0,92%), 8 (73,9%), 9 (25,2%)
09.02.2008 - 11.02.2008	8 (36,5%), 9 (58,0%), 10 (16,2%)	8 (25,2%), 9 (58,0%), 10 (16,2%)
26.12.2008 - 28.12.2008	10 (25,9%), 11 (46,2%), 12 (22,6%)	10 (24,5%), 11 (56,4%), 12 (15,9%)
07.08.2007 - 09.08.2007	4 (17,6%), 7 (18,0%), 8 (24,7%)	4 (13,9%), 5 (13,9%), 9 (18,9%)
06.07.2007 - 08.07.2007	3 (22,6%), 4 (73,0%), 5 (4,4%)	3 (12,9%), 4 (84,8%), 5 (2,30%)

Tabell 7.5: Middelvind i hver caseperiode og hele måleperioden for 51 m høyde i KVT-masten og WRF-punkt KVT, og for 70 m høyde i Siemens-masten og WRF-punkt T15.

Caseperiode	Middelvind KVT- mast 51m [m/s]	Middelvind Siemens- mast 70m [m/s]	Middelvind WRF KVT 51m [m/s]	Middelvind WRF T15 70m [m/s]
01.03.2007 - 30.06.2009	8,87	8,28	7,90	7,88
04.01.2008 - 06.01.2008	18,14	14,60	13,05	12,39
09.02.2008 - 11.02.2008	12,91	12,92	12,29	12,38
26.12.2008 - 28.12.2008	16,41	19,26	16,04	18,20
07.08.2007 - 09.08.2007	5,18	4,78	5,33	5,41
06.07.2007 - 08.07.2007	8,27	8,78	8,14	7,70

Tabell 7.6: Korrelasjon i vindhastigheten mellom målemastene og WRF-punktene KVT og T15 i hver caseperiode og hele måleperioden.

Caseperiode	Korrelasjon målemast (Siemens og KVT)	Korrelasjon WRF (WRF T15 og Siemens)	Korrelasjon WRF (WRF KVT og KVT)
01.03.2007 - 30.06.2009	0,840	0,841	0,839
04.01.2008 - 06.01.2008	0,783	0,787	0,753
09.02.2008 - 11.02.2008	0,592	0,834	0,688
26.12.2008 - 28.12.2008	0,819	0,542	0,591
07.08.2007 - 09.08.2007	0,854	0,597	0,713
06.07.2007 - 08.07.2007	0,764	-0,050	0,651

Tabell 7.7: Middelvindskjær i hver caseperiode mellom 51 m og 30 m høyde i KVT-masten og WRF-punkt KVT, og mellom 70 m og 29 m høyde i Siemens-masten og WRF-punkt T15.

Caseperiode	Middelvindskjær KVT-mast (51m - 30m)	Middelvindskjær Siemens-mast (70m - 29m)	Middelvindskjær WRF KVT (51m - 30m)	Middelvindskjær WRF T15 (70m - 29m)
01.03.2007 - 30.06.2009	0,1337	0,1024	0,1418	0,1344
04.01.2008 - 06.01.2008	0,1077	0,0545	0,1265	0,1071
09.02.2008 - 11.02.2008	0,1271	0,0993	0,1431	0,1721
26.12.2008 - 28.12.2008	0,0877	0,0967	0,1687	0,1300
07.08.2007 - 09.08.2007	0,1739	0,2540	0,1452	0,1722
06.07.2007 - 08.07.2007	0,0345	0,2137	0,1088	0,1204

7.7.1 DISKUSJON AV SAMLEDE RESULTATER FRA CASEPERIODENE: VURDERING AV VINDKLIMA I WRF-MODELLEN

For å vurdere hvor godt WRF simulerte vindklimaet på Kjøllefjord, var det nødvendig å sammenligne målingene i hver caseperiode med verdier beregnet i modellen. Hvis WRF klarer å modellere forskjellene i vindhastighet og vindskjær mellom mastene, vil modellen være et langt viktigere verktøy når man skal forklare det observerte vindklimaet. Man kan da undersøke hvordan ulike initialbetingelser påvirker vinden i mastepunktene i modellen, og man kan lete etter forholdene som gir forskjellene i parken.

Vinden fra WRF representerer gjennomsnittsverdier som er representative for hele området innenfor en gridrute, noe som gjør det vanskelig å direkte sammenligne WRF-verdier med observasjoner i en målemast. Modellen har likevel gitt gode resultater sammenlignet med observasjoner i områder med lav terrengkompleksitet, med korrelasjon for timesdata mellom 0,7-0,9 (Byrkjedal & Åkervik 2009a). Modellen har også vist svært gode resultater for vinden offshore (Hahmann et al. 2012).

For mer komplekst terreng, som på Kjøllefjord, vil WRF i mindre grad kunne simulere de lokale vindforholdene, da finskalaeffekter ikke vil være oppløst i modellen. Med en horisontal oppløsning på 1 km, vil høydekonturene i modellen også være definert i dette rutenettet. Dette fører til at modellen ikke vil gjengi nøyaktige høyder i terrenget, og speed-up-effekten over lokale høydeformasjoner vil ikke bli modellert. For mest nøyaktig sammenligning med observasjoner på stedet, bør man anvende data fra WRF-punkter som er nærme målemasten og som har lite avvik i høyde (Byrkjedal & Åkervik 2009a).

I denne oppgaven var kun timinuttersdata fra to WRF-punkter tilgjengelig, og disse lå opptil 1 km unna mastepunktene med nær 15 m høydeforskjell. Vindhastigheten fra WRF i hvert timinuttersintervall forventes derfor ikke å være riktig, men middelvinden i hver caseperiode forventes å være nærmere middelvinden i mastene.

Det har vært tidvis store avvik mellom simulerte verdier fra WRF og målingene gjennom alle caseperiodene, og det har vært vanskelig å identifisere noen fellesnevner for når avvikene er størst. Det er klart at både den lave oppløsningen av terrenget og verdier som brukes for overflateruhet og albedo vil påvirke det simulerte vindklimaet, og gi avvik i forhold til faktiske målinger på Kjøllefjord. For eksempel ruhetsforskjellen i overgangen mellom hav og land er noe som vil påvirke grenselaget over halvøya, og utviklingen av det interne grenselaget over slike overganger vil ikke nødvendigvis modelleres riktig i WRF. Modellen har dessuten bare brukt en ruhetslengde i parkområdet, mens området i virkeligheten sannsynligvis vil bestå av flere områder med noe forskjellig ruhet.

Det kan også være feil i parametriseringen av for eksempel varmekraften fra bakken, som kan være med på å forklare forskjellen mellom R_i og L og temperaturen fra WRF og målingene. Feil i rand- og initialbetingelsene kan også gi avvik fra faktiske observasjoner.

Korrelasjonen mellom vindhastighet fra vindmålemastene og WRF, vist i Tabell 7.6, er omtrent lik for begge master når man vurderer hele måleperioden, på 0,841 og 0,839 for henholdsvis Siemens- og KVT-masten. Korrelasjonen i hver av caseperiodene er lavere, med lavest korrelasjon i caseperiode 3 og 5. Det er ingen signifikant korrelasjon mellom WRF og målinger fra Siemens-masten i caseperiode 5, men dette kan være tilfeldig.

Underprediksjonen av vindhastigheten ved KVT-masten i caseperiode 1 er av særlig interesse, da dette er en av periodene med store hastighetsforskjeller mellom de to

målemastene. Selv om WRF også gir for lav hastighet i Siemens-masten gjennom perioden, er denne differansen mindre. Caseperiode 1 har lav grenselagshøyde, mellom 250 og 500 m. Ved sammenligning med de andre caseperiodene kan det virke som WRF har en tendens til å underpredikere hastigheten i begge mastene ved lav grenselagshøyde i modellen, men dette bør undersøkes nærmere med en større del av måleserien.

Den simulerte temperaturen og vindskjæret vil påvirke stabiliteten fra WRF, og validering av disse parametrene med målinger fra parken er en viktig måte å få sannsynliggjort stabiliteten fra modellen. Valideringen av temperaturen gir en indikasjon på om temperaturen i luftmassene som WRF transporterer inn og energibalansen ved bakken stemmer. Ved sammenligning av temperaturen fra modellen og målingene i caseperiodene var det noen små avvik, men modellen viste i stor grad den samme temperaturutviklingen som målingene gjennom perioden.

WRF har en tendens til å overpredikere vindskjæret i vintercasene, men avviker mest ved Siemens-masten. Dette kan forventes hvis modellen ikke fanger opp det bratte terrenget og speed-up-effekten ved Siemens-masten. Vindskjæret i KVT-masten er høyere i periodene med stabil sjiktning, noe som tyder på at det er en sammenheng mellom vindskjæret i masten og stabiliteten i modellen. Denne sammenhengen, og den gode korrelasjonen med temperaturen i caseperiodene, indikerer at stabiliteten i WRF er riktig.

7.7.2 DISKUSJON AV SAMLEDE RESULTATER FRA CASEPERIODENE: SAMMENLIGNING MELLOM MASTENE

For å forsøke å forklare forskjellene mellom vindmålemastene på Kjøllefjord, var det nødvendig å sammenligne målingene fra caseperiodene med hverandre. Det var dermed mulig å vurdere om trender innenfor en caseperiode var forenelig med vurderingen av de andre periodene, og det kunne i større grad trekkes konklusjoner som kan være med på å forklare observasjoner innenfor hele måleserien.

For å diskutere målingene fra caseperiodene, må kvaliteten på målingene i hver mast først vurderes. Det er god datatilgjengelighet i begge master gjennom hele måleperioden, på 98,6 % og 99,2 % etter isfiltrering. I Siemens-masten er 78,3 % av målingene gjort utenfor vakeregionen til masten, mens 91,2 % av målingene fra KVT-masten er utenfor vakeregionen. Turbulens fra parken når en mast ligger i vake vil kunne påvirke målingene, derfor har målingene av vindhastighet, vindskjær og turbulensintensitet fra disse sektorene ikke blitt brukt i analysen. Målingene har ikke blitt korrigert for eventuell masteskygge.

Instrumentene i KVT-masten har blitt kontrollert to ganger gjennom måleperioden, og sensorene ble byttet ut i september 2008. Instrumentene i Siemens-masten har ikke

blitt kontrollert gjennom måleperioden. Det har ikke blitt gjort noen vurdering av de ulike instrumentene i målemastene, da lite informasjon om instrumentene i Siemens-masten har vært tilgjengelig. Det festes imidlertid lit til målingene da måleseriene i hver mast er lange, og har blitt analysert flere ganger gjennom forskningsprosjektet til KVT, UiO og Statkraft. Analyse av produksjonsdata i Undheim (2013) viste også at produksjonen i hver ende av parken var i god overensstemmelse med vindmålingene i den nærmeste masten.

Beregnet middelvind i KVT-masten og Siemens-masten basert på målinger fra hele måleperioden er henholdsvis 8,87 m/s og 8,28 m/s, som vist i Tabell 7.5. Vindkartet utarbeidet for Norge i Byrkjedal og Åkervik (2009b) viser en årsmiddelvind på 7,5-8,0 m/s i 80 m høyde på Kjøllefjord, men dette kartet er utarbeidet ved hjelp av WRF og fanger nok ikke opp lokale effekter på halvøya. Den beregnede middelvinden i de to WRF-punktene, 7,90 m/s og 7,88 m/s, er innenfor intervallet i vindkartet.

Korrelasjonen mellom de to mastene i hele måleperioden er på 0,840. Korrelasjonen varierer gjennom caseperiodene, og er på sitt laveste, 0,592, i caseperiode 2. Det er liten forskjell i middelvind mellom mastene i denne perioden, men vindhastigheten veksler mellom å være høyest ved KVT-masten og høyest ved Siemens-masten.

Ved sammenligning av vindhastigheten i de to mastene, er det noen trender som skiller seg ut. De største forskjellene forekommer på vinteren, noe som også tidligere analyser har vist (Østreng 2013). Vindhastigheten ved KVT-masten er større enn ved Siemens-masten i alle caseperiodene når vinden kommer fra hovedvindretningen, altså sørvest. Dette er perioder som er karakterisert som stabile ut fra Richardson-tallet, eller har lav grenselagshøyde.

Økt stabilitet eller et lavt grenselag kan tvinge vinden til å gå rundt lokale høyder i terrenget, noe som har blitt observert i modelleringer av områder i Nord-Troms (Simonsen 2005). Vind fra sørvest kommer fra Laksefjorden, og en større del av vinden kan bli tvunget til å gå rundt Gartefjellet under disse forholdene. I retning 210° ut fra KVT-masten går det en dal ned mot Gartebukta som ligger lavere enn terrenget rundt. Hvis vinden tvinges til å gå i denne dalen med økt stabilitet og lavere PBL-høyde, kan det være med på å forklare hvorfor høyere vindhastighet blir observert i KVT-masten.

En interessant periode å se på er før ca. kl 6 den 4. januar (i caseperiode 1). Da er vindhastigheten noe lavere enn i resten av caseperioden, og det er stabile forhold. Ved lave vindhastigheter vil vinden i større grad være tvunget til å gå rundt Gartefjellet, og man ser at differansen mellom mastene er forholdsvis konstant og stor i forhold til hastighetsnivået.

Ut fra de utvalgte caseperiodene er det vanskelig å peke på én bestemt faktor som gir høyest observert hastighet ved KVT-masten. Det virker som en kombinasjon av vind fra sørvest, stabile forhold og lav grenselagshøyde i størst grad beskriver periodene med forskjeller mellom mastene. Ved stabile forhold og lav grenselagshøyde er forskjellen

mellom mastene mer konstant over lengre perioder. Ved nøytrale forhold og lav grenselagshøyde er det observert store differanser, men det finnes også perioder der vindforholdene i de to mastene er like. Ved stabile forhold og noe større grenselagshøyde er vindhastigheten høyest ved KVT-masten, men forskjellen mellom mastene er ikke like stor.

I disse periodene er også turbulensintensiteten i Siemens-masten høyere enn i KVT-masten. Terrenget sør og sørvest for Siemens-masten er svært bratt, og det kan være at vinden som treffer dette høydepartiet opplever speed-up i de laveste høydene og blir mer turbulent når den når toppen. Dette kan forklare de observerte trendene med høyere turbulensintensitet og lavere vindskjær i Siemens-masten.

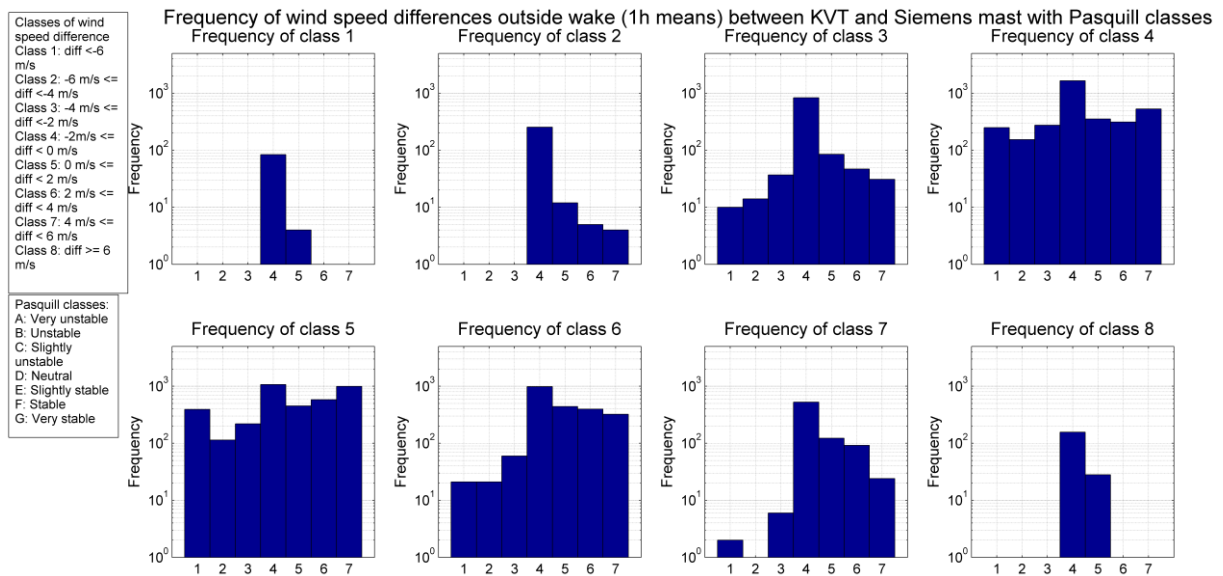
Når vinden kommer fra mer vestlige og nordvestlige sektorer er bildet et annet. Under disse periodene er sjiktningen nøytral, og det blir observert høyere vindhastighet ved Siemens-masten enn ved KVT-masten. I disse tilfellene må vinden passere over en del lokale topper langs kysten av halvøya, og det kan oppstå en slags vakeeffekt ved KVT-masten da denne ligger lavere i terrenget. I disse periodene er det også observert lavere vindskjær og høyere turbulensintensitet ved masten, noe som er i samsvar med en vakeeffekt.

7.8 HASTIGHETSFORSKJELLER OG STABILITET

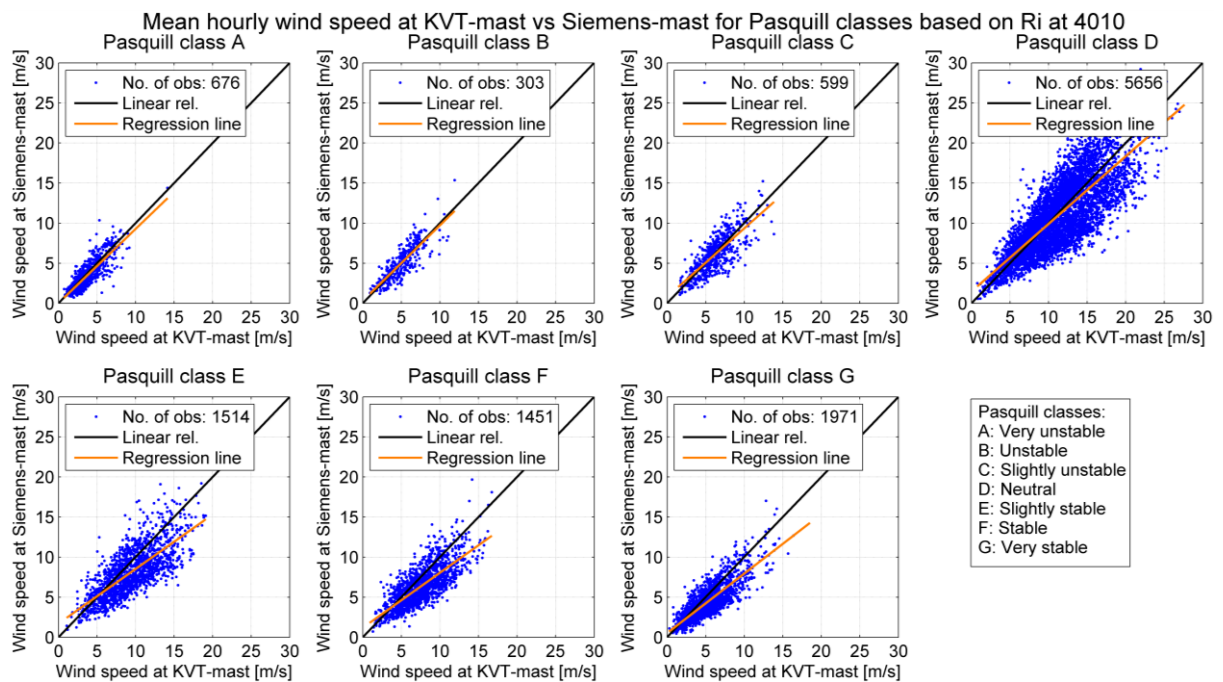
For å finne sammenhenger mellom hastighetsforskjeller gjennom hele måleperioden og stabiliteten, ble hastighetsforskjellene mellom mastene delt opp i åtte klasser, disse er vist i Tabell 6.9. Hastighetsforskjellene representerer forskjellen i middelvind hver time mellom KVT- og Siemens-masten. Fordelingen av Pasquills stabilitetsklasser ble deretter plottet for hver av de åtte klassene, dette er vist i Figur 7.66. For å sammenligne hyppigheten av de ulike stabilitetsklassene har histogrammene en logaritmisk Y-akse. Stabilitetsklassene er basert på beregnede Richardson-tall fra WRF-punkt 4010.

Middelvinden hver time ved KVT-masten er plottet mot middelvinden hver time i Siemens-masten i Figur 7.67. Dataene har blitt sortert i forhold til Pasquill-klassene A-G, basert på det beregnede Richardson-tallet hver time fra WRF-punkt 4010.

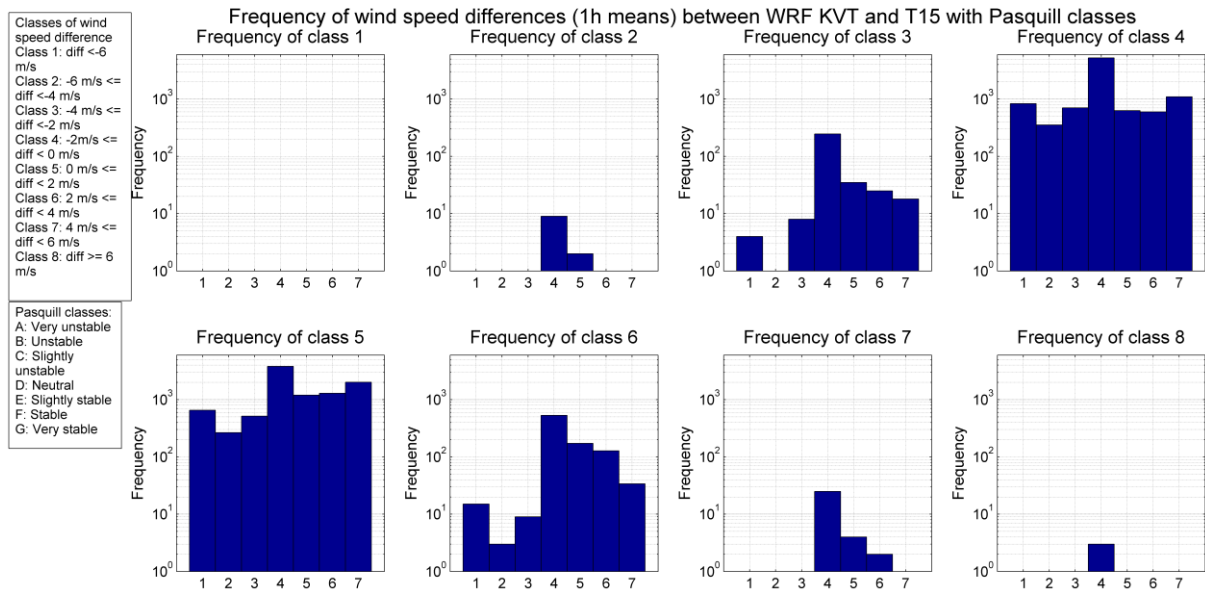
For å vurdere hvor godt WRF fanger opp hastighetsforskjellene gjennom hele måleperioden har tilsvarende plott blitt laget for WRF-punktene KVT og T15, disse er vist i Figur 7.68 og Figur 7.69. I disse plottene har ikke tidsperioder da målemastene er i vake blitt filtrert ut, siden det kun er en sammenligning av WRF-data.



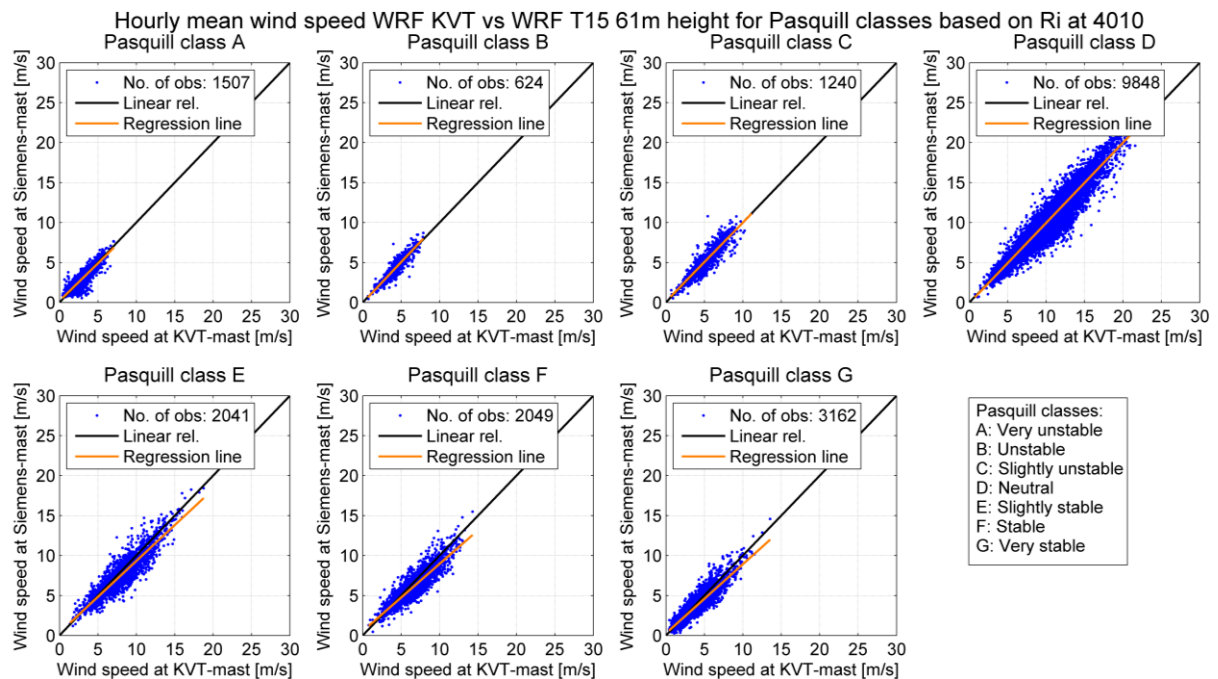
Figur 7.66: Hyppigheten av de 8 klassene for hastighetsforskjell mellom KVT-masten og Siemens-masten, fordelt ut fra stabilitetsklassene A-G. Skalaen på Y-aksen er logaritmisk.



Figur 7.67: Middelvinden hver time ved KVT-masten plottet mot middelvinden ved Siemens-masten. Dataene er sortert ut fra Pasquill-klassene A-G, basert på grensene for Ri fra WRF-punkt 4010.



Figur 7.68: Hyppigheten av de 8 klassene for hastighetsforskjell mellom WRF-punkt KVT og T15, fordelt ut fra stabilitetsklassene A-G. Skalaen på Y-aksen er logaritmisk.



Figur 7.69: Middelvinden hver time fra WRF-punkt KVT plottet mot middelvinden ved WRF-punkt T15. Dataene er sortert ut fra Pasquill-klasse A-G, basert på grensene for Ri fra WRF-punkt 4010.

7.8.1 DISKUSJON: HASTIGHETSFORSKJELLER OG STABILITET

Ut fra Figur 7.66 kan man se at det er langt flere tilfeller med høyere vindhastighet ved KVT-masten enn Siemens-masten gjennom måleperioden.

For hastighetsklasse 5-8, det vil si høyest vindhastighet ved KVT-masten, kan man se større hyppighet av stabile enn ustabile forhold. Det kan styrke hypotesen om at vinden tenderer til å gå rundt Gartefjellet når grenselaget er stabilt. Det er likevel en klar overvekt av nøytrale forhold, noe som betyr at stabil sjiktning ikke er en forutsetning for høyere vindhastighet ved KVT-masten. Dette observerte man også i caseperiodene.

Ved høyest vindhastighet ved Siemens-masten er det klart størst hyppighet av nøytrale forhold. Dette ble også observert i caseperiodene.

For å bedre beskrive tidsperiodene med høyest differanse mellom mastene bør plottene skilles ut fra retningssektor. I caseperiodene fant man at høyest hastighet ved KVT-masten forekom for vind fra sektor 8, og det bør undersøkes om stabiliteten påvirker strømmingen også fra andre sektorer.

Ut fra plottene i Figur 7.67 ser man at det er mange tilfeller av svakt til sterkt stabil sjiktning, og regresjonslinjene viser en tendens til høyere middelvind i KVT-masten enn i Siemens-masten under stabile forhold. For nøytrale forhold er det tilfeller av høyere hastighet på begge master, og regresjonslinjen viser kun en lineær sammenheng.

Man ser også at vindhastigheten i begge master er generelt lavere for mer stabile enn for nøytrale forhold, som betyr at hastighetsforskjellene som forekommer ved stabil sjiktning skjer særlig ved lave hastigheter. Vind med lav hastighet vil i større grad måtte gå rundt Gartefjellet under stabile forhold.

WRF viser langt færre tilfeller av store hastighetsforskjeller mellom mastene, noe som tyder på at en del terreng effekter ikke er fanget opp. Man kan likevel se en svak trend med større hyppighet av stabile forhold ved størst vindhastighet i KVT-masten i Figur 7.68. Det indikerer at stabiliteten påvirker strømningsmønsteret også i WRF.

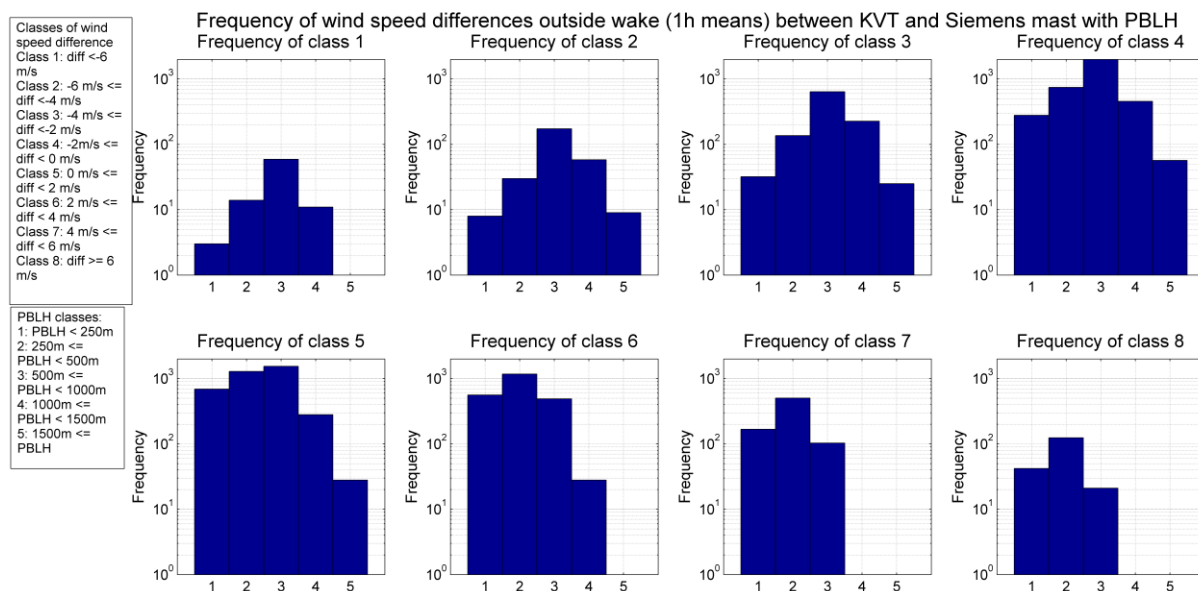
Regresjonslinjene i Figur 7.69 viser en trend med større vindhastighet i KVT-masten enn i Siemens-masten for Pasquill-klasse E-G, men i mindre grad enn målingene. Det kan bety at WRF har en tendens til å underpredikere hastigheten ved KVT-masten ved stabil sjiktning, men det kan også være noe avhengig av vindretning.

7.9 HASTIGHETSFORSKJELLER OG GRENSELAGSHØYDE

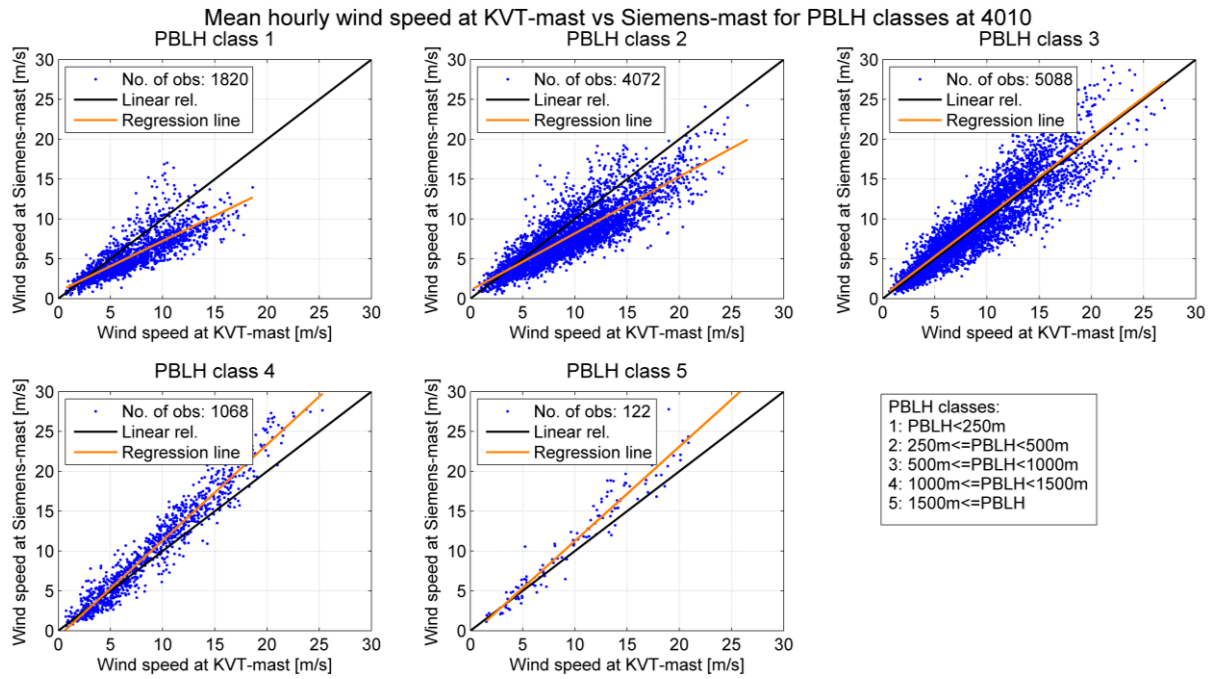
For å utforske sammenhenger mellom hastighetsforskjeller og grenselagshøyden gjennom hele måleperioden, ble fordelingen av de fem klassene for grenselagshøyde (se Tabell 6.10) plottet for hver av de åtte hastighetsklassene. Dette er vist i Figur 7.70, med en logaritmisk Y-akse. Grenselagshøyden er hentet fra WRF-punkt 4010.

Middelvinden hver time ved KVT-masten er plottet mot middelvinden hver time i Siemens-masten i Figur 7.71. Dataene har blitt sortert i forhold til de fem klassene for grenselagshøyde, basert på verdier for grenselagshøyden hver time fra WRF-punkt 4010.

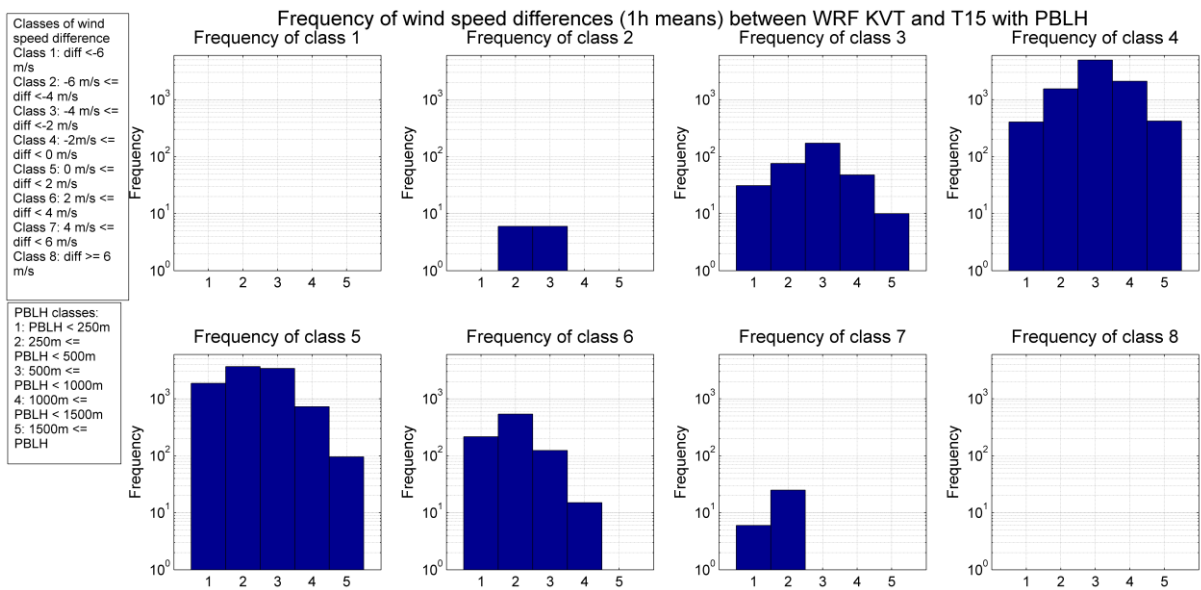
Tilsvarende plott er laget for WRF-punktene KVT og T15, disse er vist i Figur 7.72 og Figur 7.73. I disse plottene har ikke tidsperioder da målemastene er i vake blitt filtrert ut, siden det kun er en sammenligning av WRF-data.



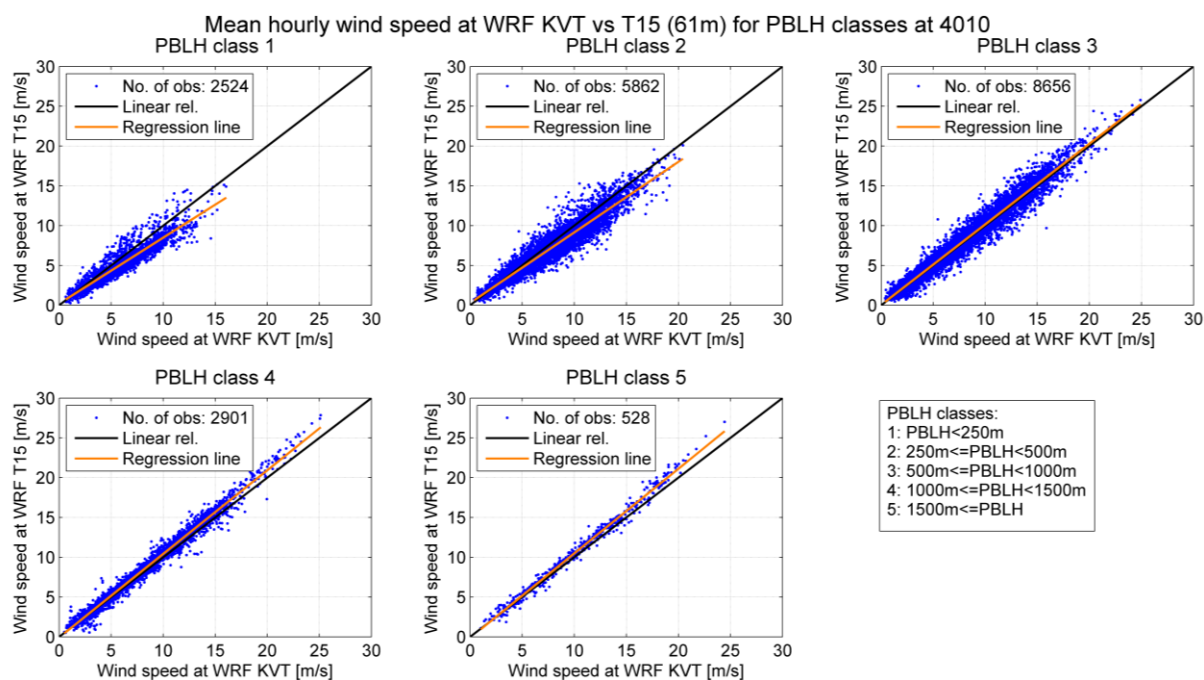
Figur 7.70: Hyppigheten av de 8 klassene for hastighetsforskjell mellom KVT-masten og Siemens-masten, fordelt ut fra klassene for grenselagshøyde (PBLH) 1-5. Skalaen på Y-aksen er logaritmisk.



Figur 7.71: Middelvinden hver time ved KVT-masten plottet mot middelvinden ved Siemens-masten. Dataene er sortert ut fra klassene for grenselagshøyde (PBLH) 1-5.



Figur 7.72: Hyppigheten av de 8 klassene for hastighetsforskjell mellom WRF-punkt KVT og T15, fordelt ut fra klassene for grenselagshøyde (PBLH) 1-5. Skalaen på Y-aksen er logaritmisk.



Figur 7.73: Middelvinden hver time fra WRF-punkt KVT plottet mot middelvinden fra WRF-punkt T15. Dataene er sortert ut fra klassene for grenselagshøyde (PBLH) 1-5.

7.9.1 DISKUSJON: HASTIGHETSFORSKJELLER OG GRENSELAGSHØYDE

Grenselagshøyden bestemmer den vertikale utstrekningen av turbulens i grenselaget, og er slik en viktig parameter å vurdere på Kjøllefjord. Det er ikke mulig å beregne grenselagshøyden fra observasjoner i parken, så det har ikke vært mulig å validere grenselagshøyden fra WRF.

I WRF er grenselagshøyden kun en diagnostisk parameter, og den brukes ikke i beregningene i modellen. De ulike PBL-skjemaene i WRF bruker en rekke definisjoner på høyden til det atmosfæriske grenselaget, blant annet høyden til inversjonssonen og høyden der TKE er mindre enn en gitt verdi (Krogsæter & Reuder 2014).

I denne oppgaven brukes grenselagshøyden fra en WRF-kjøring med PBL-skjemaet MYNN2. MYNN2-skjemaet definerer grenselagshøyden som høyden der det lokale Richardson-tallet overstiger $R_c = 0,25$. Denne verdien har vært omdiskutert, og flere artikler argumenterer for at R_c burde være nærmere 1 ved stabile forhold i grenselaget (Krogsæter & Reuder 2014). Det vil gi større PBL-høyder ved stabile forhold enn beregnet i WRF-kjøringen i denne oppgaven.

Krogsæter og Reuder (2014) har sammenlignet PBL-høyder fra WRF-kjøringer med MYNN2-skjemaet med to andre PBL-skjemaer som definerer grenselagshøyden ut fra verdier for TKE. Kjøringerne var gjort for forhold offshore, men viste at skjemaene gav tilnærmet like resultater for grenselagshøyden.

Hastighetsforskjellene i hele måleperioden er vurdert opp mot klasser for grenselagshøyden i Figur 7.70. I perioder med høyest vindhastighet i Siemens-masten kan man ikke observere noen utpreget trend i grenselagshøyden, og en høyde mellom 500 m og 1000 m er det mest vanlige.

Ved høyest vindhastighet ved KVT-masten går PBL-høyden mot lavere verdier. For de største forskjellene, klasse 6-8, er en PBL-høyde mellom 250 m og 500 m det mest vanlige. Det virker dermed som at differansen mellom mastene påvirkes av grenselagshøyden.

Figur 7.71 viser at det er generelt lavere middelvind i begge master for de laveste PBL-høydene, mens middelvinden er større når PBL-høyden er større. Det betyr at de store hastighetsforskjellene som forekommer ved lav grenselagshøyde, skjer ved lave vindhastigheter. Vind med lav vindhastighet vil i større grad tvinges til å gå rundt høyder i terrenget. Regresjonslinjene viser en tendens til høyere middelvind ved KVT-masten enn ved Siemens-masten for de laveste PBL-høydene.

Også her vil det være et poeng å skille ut bestemte vindretninger. Det kan tenkes at det ved vind fra sørvest vil være stor hyppighet av stabile forhold og/eller lav grenselagshøyde, og det kan derfor bli vanskelig å identifisere hvilken effekt som er viktigst. Grenselagshøyden og stabiliteten henger dessuten sammen, og det er gjort få studier som tar for seg effekten av begge disse parametrene over et komplekst terreng som på Kjøllefjord.

Tilsvarende plott basert på WRF-data er vist i Figur 7.72 og Figur 7.73. Modellen viser klart lavere frekvens av store hastighetsforskjeller, som tidligere diskutert. Man kan observere en lignende trend som i målingene, med lavere grenselagshøyde ved høyest vindhastighet ved KVT-masten.

WRF viser også generelt lavere vindhastighet ved begge master ved lav PBL-høyde, men det kan virke som modellen underpredikerer hastigheten, spesielt i KVT-masten. Dette fant man også i caseperiodene.

Modellen klarer med andre ord å fange opp noen av trendene i vindhastigheten med både stabilitet og grenselagshøyde, men det er også en del lokale effekter som ikke er oppløst i modellen.

8 KONKLUSJONER

Det har blitt gjort en karakterisering av stabiliteten basert på beregnede Richardson-tall og Obukhov-lengder fra WRF gjennom hele måleperioden på Kjøllefjord. I beregningen av Obukhov-lengden benyttes overflateverdier for varmefluks og friksjonshastighet. Dette er to parametere som studier har vist at modellen har problemer med å beregne. Selv om varmefluksen også vil påvirke Richardson-tallet, vil adveksjon fra andre gridruter lengre opp i luftlaget gjøre Ri mer robust mot parametriseringsfeil innenfor en gridrute. Det festes derfor størst lit til denne stabilitetsparameteren. Basert på Richardson-tallet er stabilitetsforholdet på Kjøllefjord 16,5 % : 48,1 % : 35,4 % (ustabil : nøytral : stabil) i perioden mars 2007 til juni 2009.

Klassifiseringen av stabiliteten er basert på en ruhetslengde på 0,10 m, som anses som realistisk i parkområdet på Kjøllefjord. WRF-kjøringer med MYNN2-skjemaet har vist at dette grenselagsskjemaet har en tendens til å gi overprediksjon av stabile forhold. Det kan bety at det er færre tilfeller av stabile forhold enn resultatene tilsier. Det er ingen målinger av varmefluks eller temperatur i flere høyder i vindmålemastene på Kjøllefjord, så den beregnede stabiliteten fra WRF kan ikke bli validert med observasjoner fra parken.

Fem caseperioder som representerte forskjellige stabilitets- og retningsforhold har blitt analysert nærmere. Det ble funnet tidvis store forskjeller mellom målinger fra vindmålemastene og simulerte verdier fra WRF i caseperiodene. Forskjellene skyldes nok i stor grad den lave terrengoppløsningen og verdier for overflateruhet som ble brukt i modellen. Dessuten var WRF-punktene som ble anvendt i analysen opptil 1 km unna mastepunktene.

Modellen klarte periodevis å gjenskape hastighetsforskjellene mellom mastene, men viste langt færre tilfeller av store forskjeller. Dette tyder på at det er en del lokale effekter som ikke blir oppløst i modellen.

Under sammenligningen av målingene i de to mastene i caseperiodene, var det noen trender som skilte seg ut. Det var høyest vindhastighet ved KVT-masten når det var vind fra sektor 8, som er hovedvindretningen i parken. Ved vind fra denne sektoren var det også stabile forhold eller lav grenselagshøyde, noe som kan bety at vinden presses rundt Gartefjellet, der Siemens-masten ligger, og gjennom dalen opp fra Gartebukta, mot der KVT-masten ligger. Ut fra caseperiodene er det vanskelig å peke ut hvilken faktor som gir de største observerte forskjellene mellom mastene, men det virker som forskjellene forekommer oftest ved vind fra sørvest, stabile forhold og lav grenselagshøyde.

I caseperiodene har det også blitt observert perioder der vindhastigheten ved Siemens-masten er størst. Disse periodene kjennetegnes av vind fra vestlige og nordvestlige sektorer, og nøytral sjiktning. Vind fra disse retningene må passere over flere lokale topper på kysten av halvøya og nær KVT-masten, noe som kan gi en slags vakeeffekt ved

denne masten. Dette stemmer overens med lavere observert vindskjær og høyere turbulensintensitet ved KVT-masten i disse periodene.

Hastighetsforskjeller gjennom hele måleperioden ble klassifisert ut fra Richardson-tallet og Pasquills stabilitetsklasser, for å se om trendene fra caseperiodene også beskrev vindklimaet i lengre tidsperioder. Vurderingen av data fra hele måleserien viste en større hyppighet av stabile forhold når hastigheten var størst ved KVT-masten, men det var også stor hyppighet av nøytrale forhold. Stabil sjiktning er dermed ikke en forutsetning for at det skal være hastighetsforskjeller mellom mastene.

Resultatene viste at det var lavere vindhastigheter i begge master ved sterkt stabile og stabile forhold, noe som betyr at hastighetsforskjellene som oppstår under disse stabilitetsforholdene skjer særlig ved lave hastigheter. Vind med lav hastighet vil i større grad presses rundt lokale høyder i terrenget, noe som kan være med på å forklare de observerte forskjellene ved stabil sjiktning.

Hastighetsforskjellene mellom mastene i hele måleperioden ble også klassifisert ut fra grenselagshøyden fra WRF. Her viste resultatene en større hyppighet av lave PBL-høyder ved størst hastighet i KVT-masten, noe som også ble observert i caseperiodene. Det kan bety at lav grenselagshøyde også tvinger vinden rundt lokale høyder i terrenget.

Ved lave PBL-høyder var det observert lavere middelvind i begge master. På tilsvarende måte som ved særlig stabile forhold, betyr det at hastighetsforskjellene ved lav PBL-høyde forekommer oftest ved lave vindhastigheter.

De simulerte verdiene fra WRF viste noen av de samme trendene som målingene, men viste langt færre tilfeller av store hastighetsforskjeller mellom punktene. Modellen hadde også en tendens til å underpredikere hastigheten, spesielt ved KVT-masten, ved lav grenselagshøyde og stabile forhold.

Det er vanskelig å validere trendene som har blitt diskutert ovenfor når stabiliteten og grenselagshøyden fra WRF ikke kan bekreftes med observasjoner fra parken. Det virker likevel som den beregnede stabiliteten og grenselagshøyden vil kunne gi et strømningsmønster gjennom parken som kan forklare noen av de observerte forskjellene.

Grenselagshøyde og stabilitet er to parametere som er tett knyttet sammen, og det virker som både lav grenselagshøyde og stabile forhold er noe som karakteriserer flere av periodene med høyest hastighet ved KVT-masten. Ut fra resultatene er det ikke mulig å peke på hvilken faktor som eventuelt påvirker hastighetsforskjellene mest, og om dette er effekter som påvirker vinden også fra andre retninger enn sør og sørvest.

9 FORSLAG TIL VIDERE ARBEID

Det er flere problemstillinger som kan jobbes videre med for å forklare det observerte vindklimaet på Kjøllefjord:

- Effekten av stabilitet og grenselagshøyde for hver sektor bør analyseres, for å undersøke om det er mange tilfeller av høyere hastighet ved KVT-masten også for andre retninger enn sør og sørvest.
- Mesoskalaforskjellene i vinden på Kjøllefjord bør undersøkes nærmere. Vind fra de sørlige sektorene kommer opp langs Laksefjorden, og det kan være forskjeller i vindfeltet som når Dyfjordhalvøya. For å undersøke dette kan det tas ut data fra to WRF-punkt i fjorden sørvest for mastene, slik at terrengeffektene fra halvøya ikke påvirker verdiene.
- Man bør validere stabiliteten fra WRF med målinger fra værstasjoner i nærheten av vindparken.
- Valg av PBL-skjema kan påvirke beregningen av parametrene som Ri og L bygger på, og slik stabilitetsforholdene beregnet for Kjøllefjord. For en vurdering av om stabiliteten fra WRF kan anvendes, bør WRF-kjøringer med ulike PBL-skjema sammenlignes. Verdier for PBL-høyden fra ulike skjema bør også sammenlignes.

10 KILDER

- Aguado, E. & Burt, J. E. (2010). *Understanding Weather and Climate*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, Inc.
- American Meteorological Society. (2012). *Monin-Obukhov similarity theory*. Meteorology Glossary.
- Angevine, W. M. (2011, 20.06.-24.06.2011). *An Overview of Planetary Boundary Layer Physics and Parametrization*. 12th Annual WRF Users' Workshop, National Center for Atmospheric Research.
- Arya, S. P. (2001). *Introduction to Micrometeorology*. 2. utg. International Geophysics Series, b. 79. 525 B Street, Suite 1900, San Diego, California, 92101-4495 USA: Academic Press.
- Beaucage, P., Robinson, N., Brower, M. & Alonge, C. (2012). *Overview of six commercial and research wake models for large offshore wind farms*. EWEA, Online conference.
- Beljaars, A. (1992). The parametrization of the planetary boundary layer: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
- Byrkjedal, Ø. & Åkervik, E. (2009a). Vindkart for Norge: NVE.
- Byrkjedal, Ø. & Åkervik, E. (2009b). Vindkart for Norge. Kartbok 1a: Årsmiddelvind i 80m høyde.: Kjeller Vindteknikk.
- Byrkjedal, Ø. (2013). *Vindkart for Norge. Datastruktur for modelldata. [Personlig korrespondanse]*. Kjeller Vindteknikk AS (30.05.2013).
- Dudhia, J. (1989). Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46 (20): 3077-3107.
- Dudhia, J. (1996). *A multi-layer soil temperature model for MM5*. Preprints, The Sixth PSU/NCAR mesoscale model users' workshop. 22-24 s.
- Encyclopedia Britannica. (2014). *Climate*. Encyclopedia Britannica Online Academic Edition: Encyclopedia Britannica Inc.
- Energi- og miljøkomiteen. (2011). *Innstilling fra energi- og miljøkomiteen om samtykke til deltakelse i en beslutning i EØS-komiteen om innlemmelse i EØS-avtalen av direktiv 2009/28/EF om å fremme bruken av energi fra fornybare kilder (fornybardirektivet)*. (Innstilling til Stortinget). 4 s.
- Finnemore, E. J. & Franzini, J. B. (2009). *Fluid Mechanics with Engineering Applications*. 10. utg. 1221 Avenue of the Americas, New York, NY 10020.
- Floors, R., Vincent, C. L., Gryning, S. E., Peña, A. & Batchvarova, E. (2013). The Wind Profile in the Coastal Boundary Layer: Wind Lidar Measurements and Numerical Modelling. *Boundary-Layer Meteorology*, 147 (3): 469-491.
- Golder, D. (1972). Relations among stability parameters in the surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 3 (1): 47-58.
- Hahmann, A. N., Lange, J., Peña, A. D. & Hasager, C. B. (2012). The NORSEWInD numerical wind atlas for the South Baltic. *DTU Wind Energy*. 53 s.

- IEC. (2005). *Wind Turbines Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*.
- Krogsæter, O. & Lisæter, K. (2013). *New two-way coupled atmosphere-wave model system for improved wind speed and wave height forecasts for offshore wind energy applications*. 10th Deep Sea Offshore Wind R&D Conference, Trondheim: SINTEF.
- Krogsæter, O. & Reuder, J. (2014). Validation of boundary layer parametrization schemes in the Weather Research and Forecasting Model (WRF) under the aspect of offshore wind energy applications - Part 2: Boundary layer height and atmospheric stability. *Wind Energy*, [In print].
- MathWorks. (2014). *MATLAB - The language of technical computing* (lest 12.03.2014).
- Michalakes, J., Chen, S., Dudhia, J., Hart, L., Klemp, J., Middlecoff, J. & Skamarock, W. (2001). Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast model. I: Zwiefelhofer, W. & Kreitz, N. (red.) *Developments in Teracomputing: Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, s. 269-276. Singapore: World Scientific.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J. & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102 (D14): 16663-16682.
- Mohan, M. & Siddiqui, T. A. (1998). Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability classification. *Atmospheric Environment*, 32 (21): 3775-3781.
- Monin, A. S. & Obukhov, A. M. (1954). Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Tr. Akad. Nauk SSSR Geoph. Inst*, 24 (151): 163-187.
- Mørken, K. (2007). Numerisk derivasjon og integrasjon, utledning av feilestimer. Tilgjengelig fra: <http://www.uio.no/studier/emner/matnat/math/MAT-INF1100/h07/undervisningsmateriale/forelesningsnotater/feil.pdf> (lest 27.03.2014).
- Nakanishi, M. & Niino, H. (2009). Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 87 (5): 895-912.
- Norsk Vindkraftforening. (2013). *Vind i Norge*. Tilgjengelig fra: <http://www.vindportalen.no/vind-i-norge.aspx> (lest 03.02.2014).
- Ormestad, H. (2014). *Gasskonstant*. Store norske leksikon.
- Simonsen, A. H. (2005). *Potensialet for utnyttelse av vindkraft på Vannøya i Nord-Troms*: Universitetet i Bergen, Geofysisk Institutt.
- Statkraft. (2012). *Statkraft overtar driften av Kjøllefjord vindpark*. Tilgjengelig fra: <http://www.statkraft.no/pressepenter/nyheter/2012/statkraft-ovtar-driften-av-kjollefjord-vindpark.aspx> (lest 04.02.2014).
- Stull, R. B. (1989). *An introduction to boundary layer meteorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. xii, 666 s. : ill. s.
- Stull, R. B. (2005). *Meteorology for Scientists and Engineers*. 3. utg.: Brooks/Cole.
- Tande, J. O. G. & Støa, P. (2004). Norge som ledende vindkraftnasjon. *HORISONT* (1).

- The European Parliament and the Council of the European Union. (2009). Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. *Official Journal of the European Union* (140): 16-62.
- Thompson, G., Field, P. R., Rasmussen, R. M. & Hall, W. D. (2008). Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Monthly Weather Review*, 136 (12): 5095-5115.
- Twidell, J. & Weir, T. (2006). *Renewable Energy Resources*. 2. utg. 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon: Taylor & Francis.
- UCAR. (2002). *How Mesoscale Models Work*. Tilgjengelig fra: <http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/models/print.htm-intro> (lest 07.02.2014).
- Undheim, O. (2013). Wind and Production Data Kjøllefjord. Development and Validation Data "Wind Farm Simulator", Part 1. (Begrenset tilgjengelighet). Kjeller: Kjeller Vindteknikk AS.
- Undheim, O. (2014). *Datasett Kjøllefjord [E-post]*. (07.03.2014).
- Wan, Y.-H., Ela, E. & Orwig, K. (2010, 23.05 - 26.05.2010). *Development of an Equivalent Wind Plant Power-Curve*. WindPower 2010, Dallas, Texas.
- Wharton, S. & Lundquist, J. K. (2012). Assessing atmospheric stability and its impacts on rotor-disk wind characteristics at an onshore wind farm. *Wind Energy*, 15 (4): 525-546.
- Wildland Fire Modeling. (2012). *How to interpret WRF-variables*. Tilgjengelig fra: http://www.openwfm.org/wiki/How_to_interpret_WRF_variables (lest 24.03.2014).
- Wilkes, J. & Moccia, J. (2013). Wind in power: 2012 European statistics: The European Wind Energy Association,.
- Østreng, E. (2013). Wind and Production Data Kjøllefjord. Development and Validation Data "Wind Farm Simulator", Part 2. (Begrenset tilgjengelighet). Kjeller: Kjeller Vindteknikk AS.

11 VEDLEGG

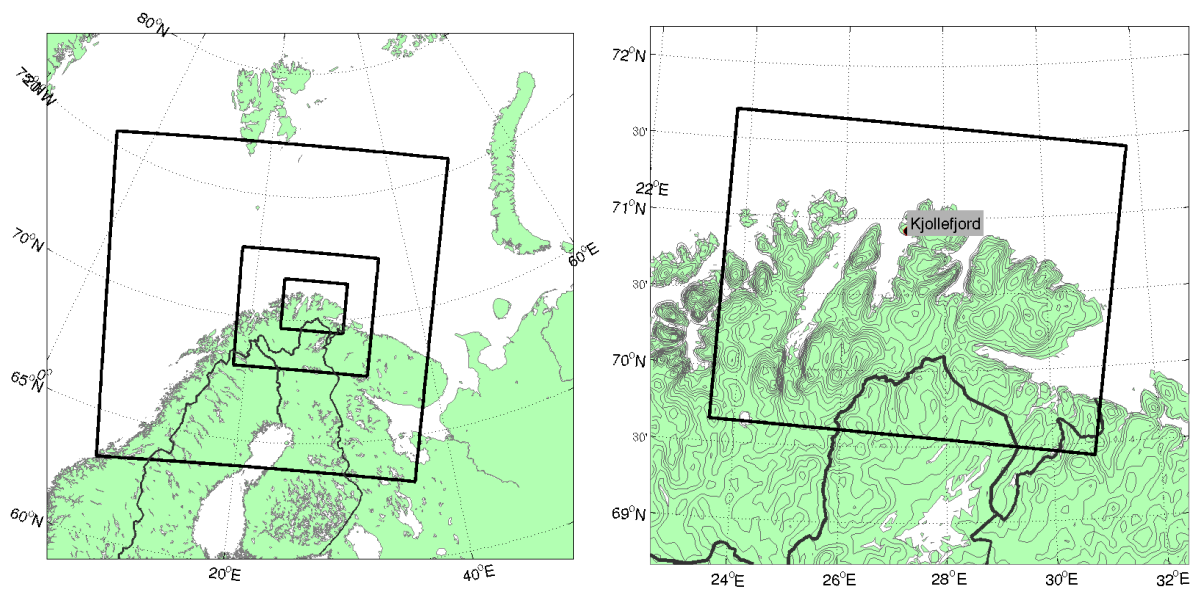
11.1 OVERSIKTSKART OG MODELLOMENE I WRF



Figur 11.1: Oversiktskart av området rundt Dyfjordhalvøya i Finnmark. Hentet fra www.norgeskart.no.



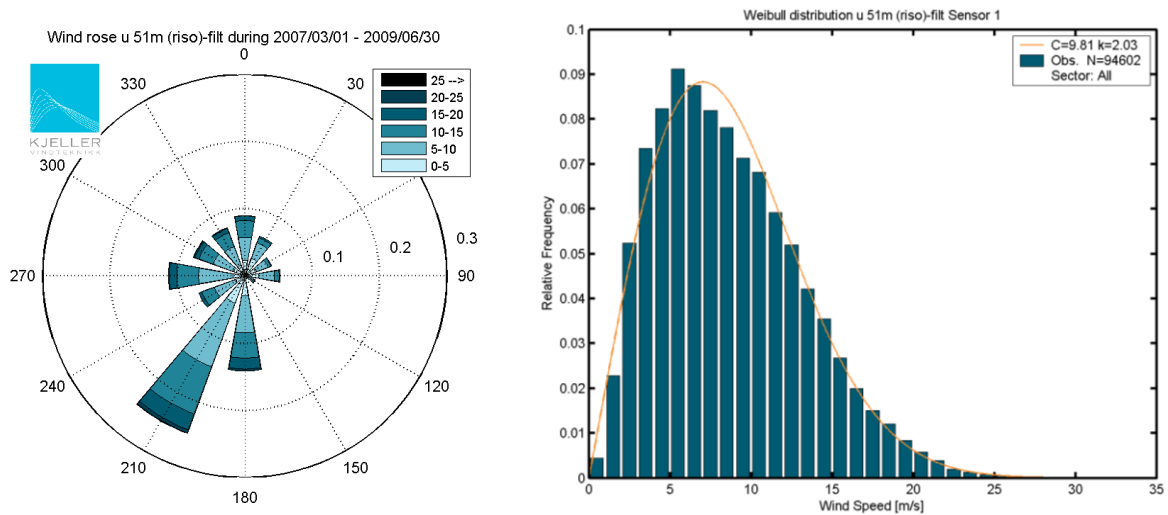
Figur 11.2: Kartet viser Dyfjordhalvøya i Finnmark med 20 m ekvidistanse. Vindmålemastene og WRF-punktene KVT, T15, 4010 og 4023 er markert med blått. Hentet fra www.norgeskart.no.



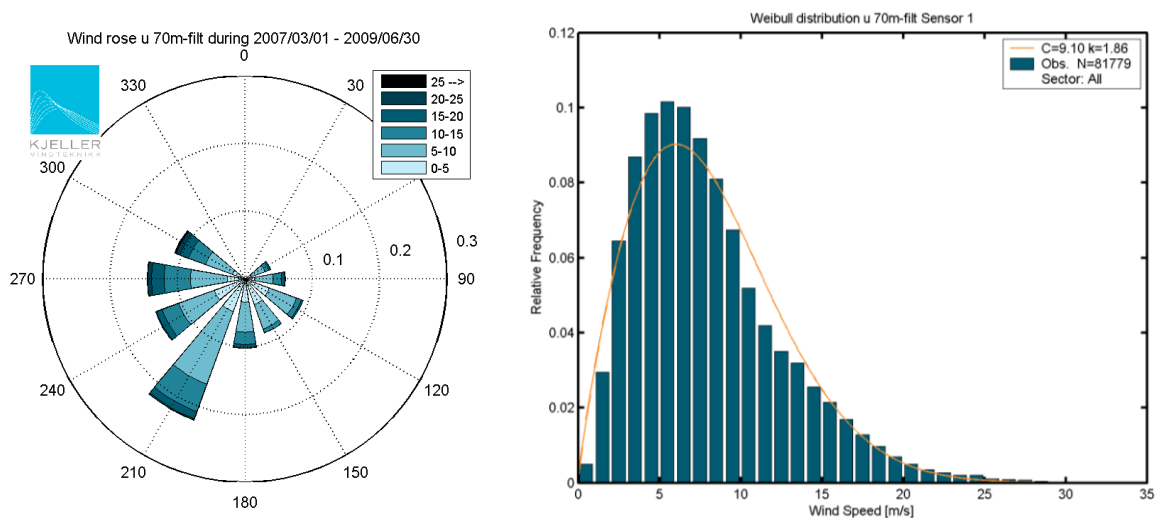
Figur 11.3: Nestede modelldomener brukt i WRF. Den ytterste svarte firkanten representerer domenet d01 med oppløsning 16 km, og den nest innerste svarte firkanten representerer domenet d02 med oppløsning 4 km. Den innerste svarte firkanten representerer domenet d03 med oppløsning 1 km. Dette domenet er vist i større format i figuren til høyre. Figurene er utarbeidet av Kjeller Vindteknikk.

11.2 VINDROSE OG WEIBULL-FORDELING

Vindrose og Weibull-fordeling i 51 m høyde for KVT-masten og 70 m høyde for Siemens-masten er gitt i Figur 11.4 og Figur 11.5. Data fra de vakepåvirke regionene er fjernet. Figurene er utarbeidet av Kjeller Vindteknikk AS.



Figur 11.4: Vindrose og Weibull-fordeling i 51 m høyde i KVT-masten. Hentet fra Undheim (2013 s. 7).



Figur 11.5: Vindrose og Weibull-fordeling i 70 m høyde i Siemens-masten. Hentet fra Undheim (2013 s. 12).

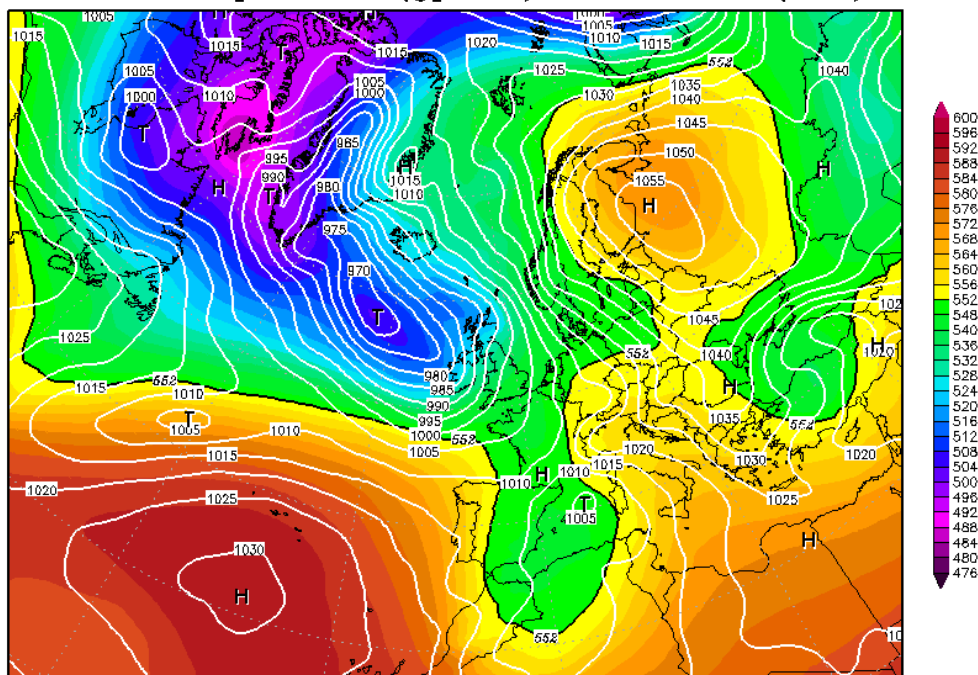
11.3 METEOROLOGISKE KART FRA CASEPERIODENE

Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa for hver av caseperiodene er vist i figurene under. Kartene er for tidspunktet kl 12 på hver av dagene i caseperioden. De hvite isobarene gir verdier for bakketrykk i hPa, mens fargeskalaen gir geopotensiell høyde ved 500 hPa i meter. Figurene er hentet fra <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsreaeur.html>.

Case 1: 04.01.2008 til 06.01.2008

04JAN2008 12Z

500hPa Geopotential (gpdam), Bodendruck (hPa)

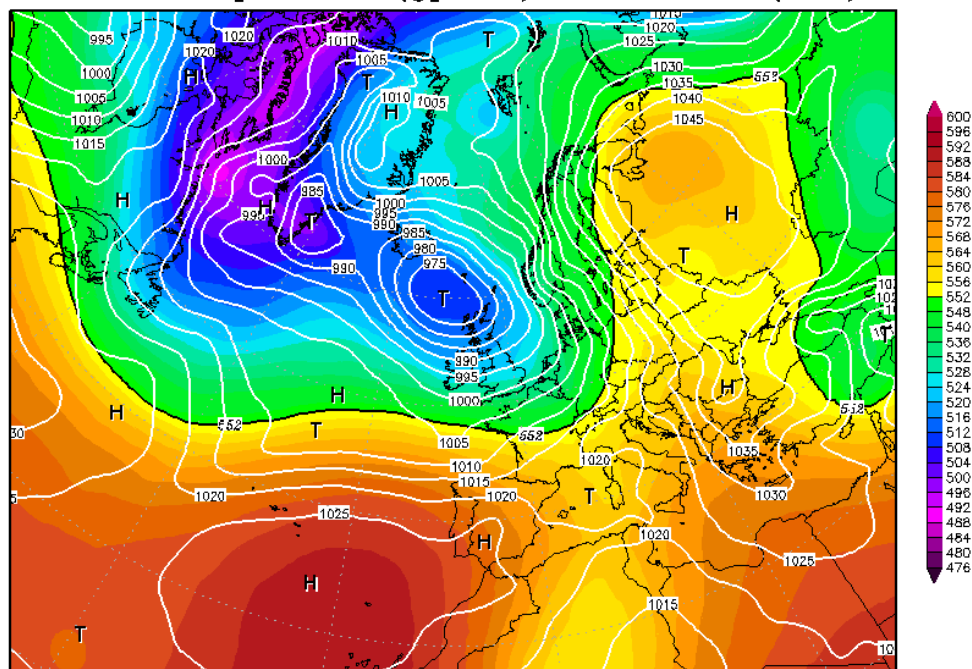


Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figur 11.6: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 04. januar 2008.

05JAN2008 12Z

500hPa Geopotential (gpdam), Bodendruck (hPa)

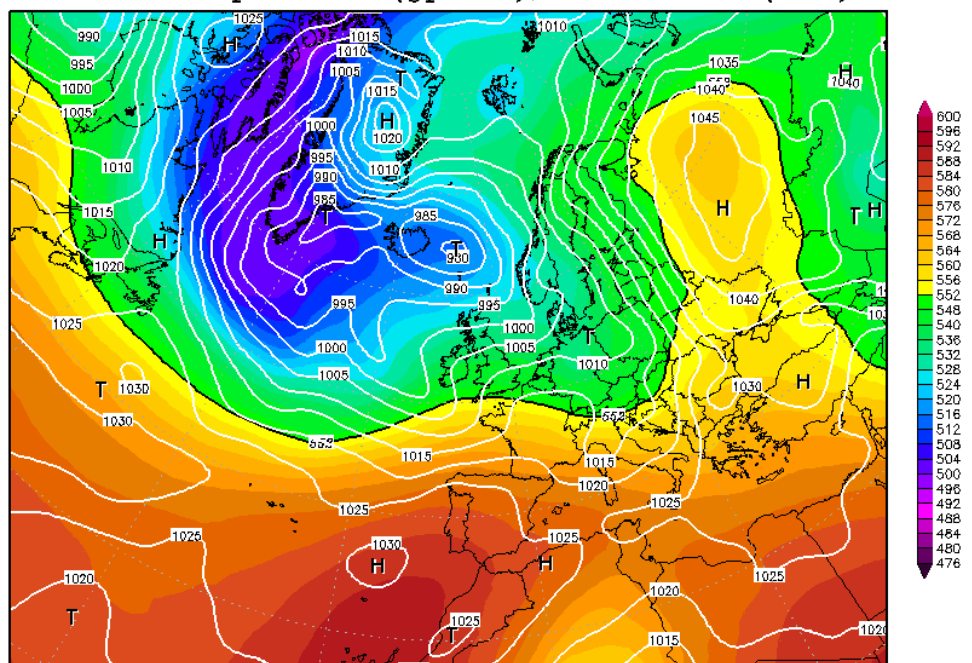


Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figur 11.7: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 05. januar 2008.

06JAN2008 12Z

500hPa Geopotential (gpdam), Bodendruck (hPa)



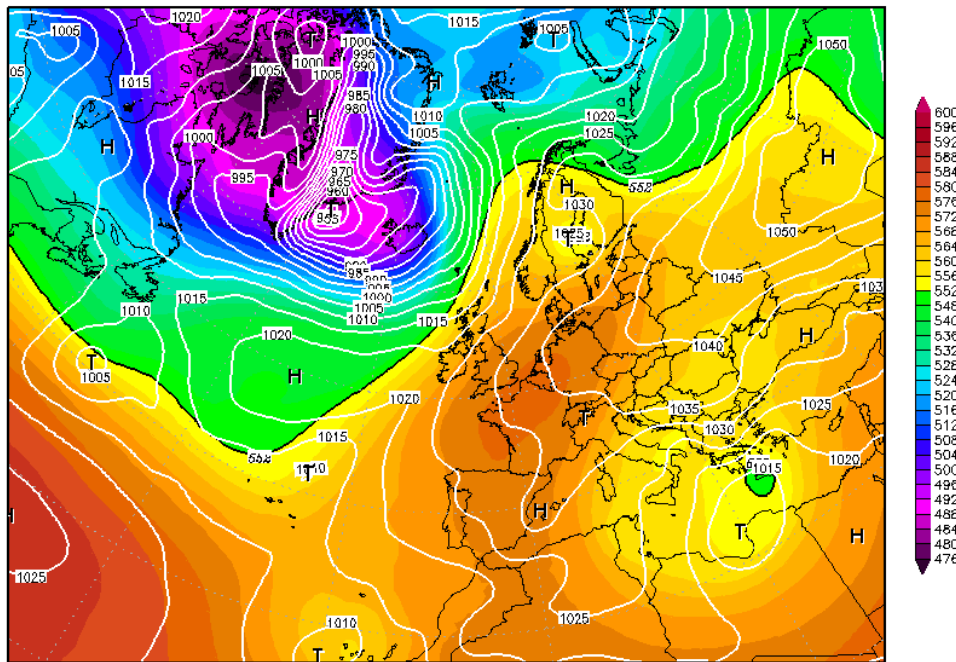
Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figur 11.8: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 06. januar 2008.

Case 2: 09.02.2008 til 11.02.2008

09FEB2008 12Z

500hPa Geopotential (gpdam), Bodendruck (hPa)

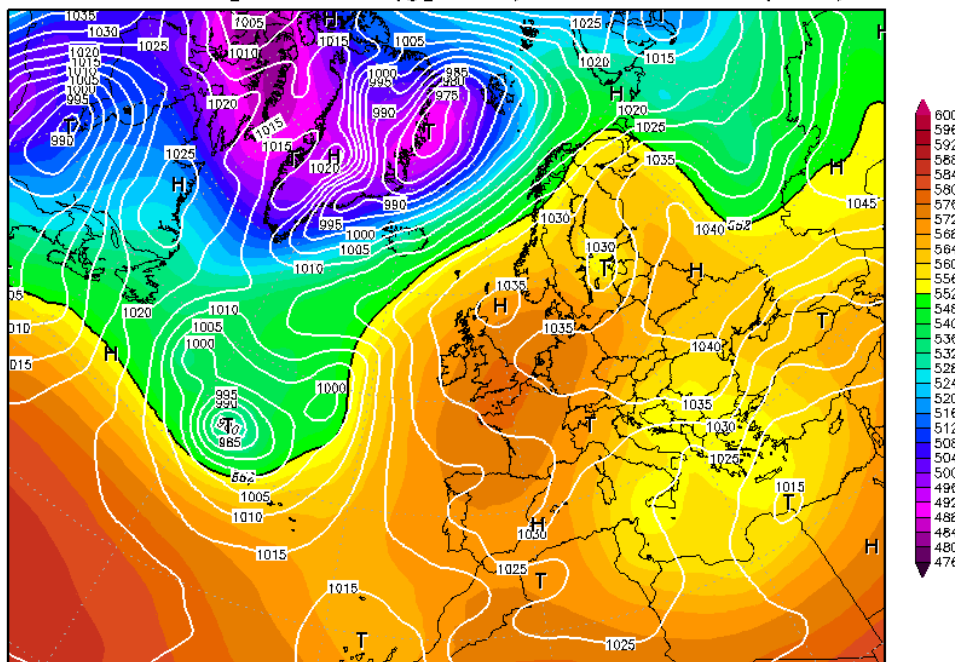


Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figur 11.9: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 09. februar 2008.

10FEB2008 12Z

500hPa Geopotential (gpdam), Bodendruck (hPa)

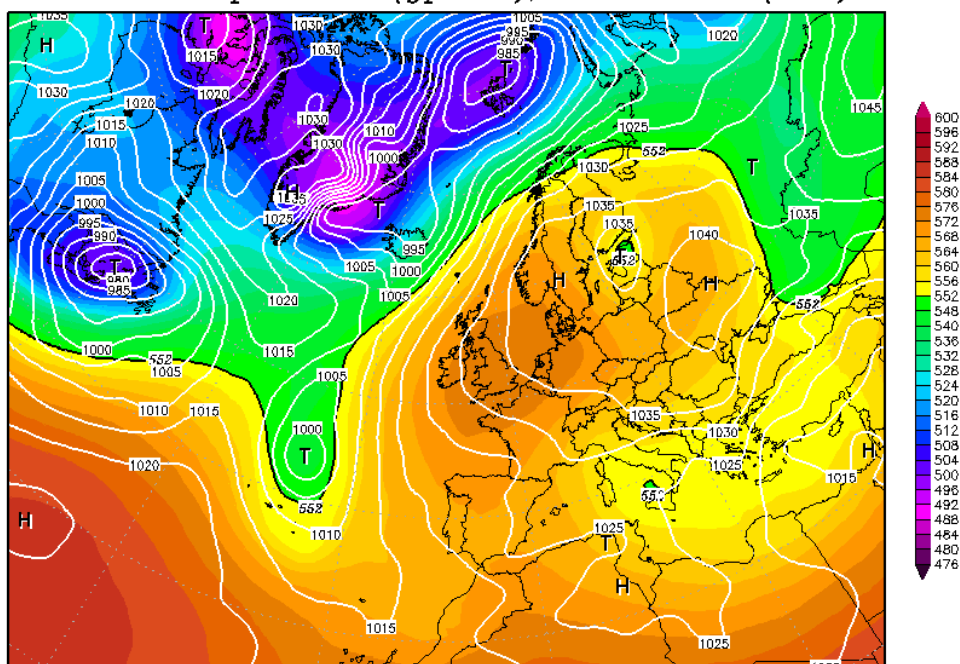


Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figur 11.10: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 10. februar 2008.

11FEB2008 12Z

500hPa Geopotential (gpdam), Bodendruck (hPa)



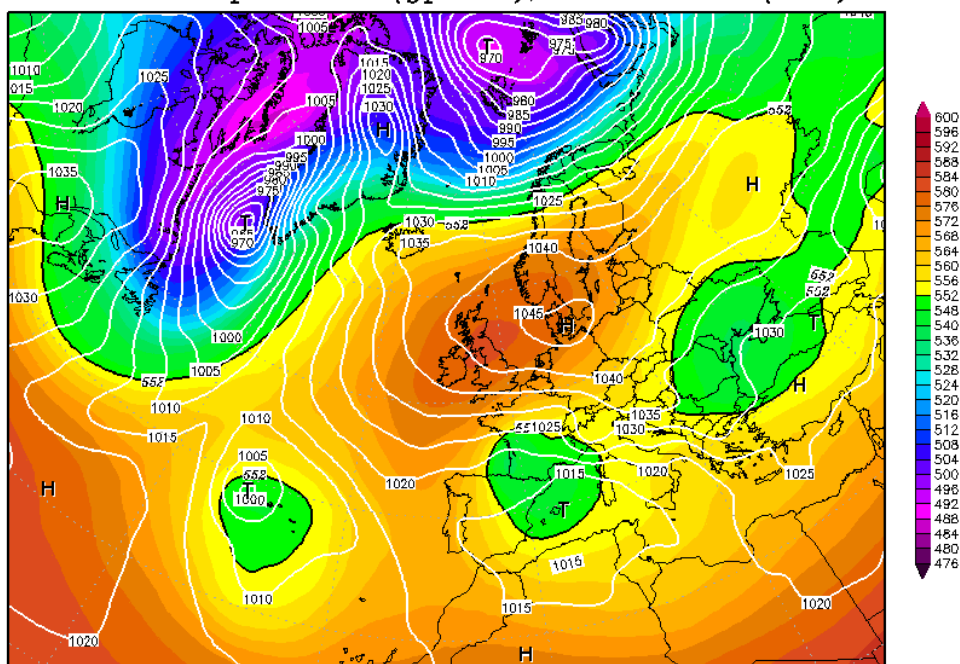
Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figur 11.11: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 11. februar 2008.

Case 3: 26.12.2008 til 28.12.2008

26DEC2008 12Z

500hPa Geopotential (gpdam), Bodendruck (hPa)

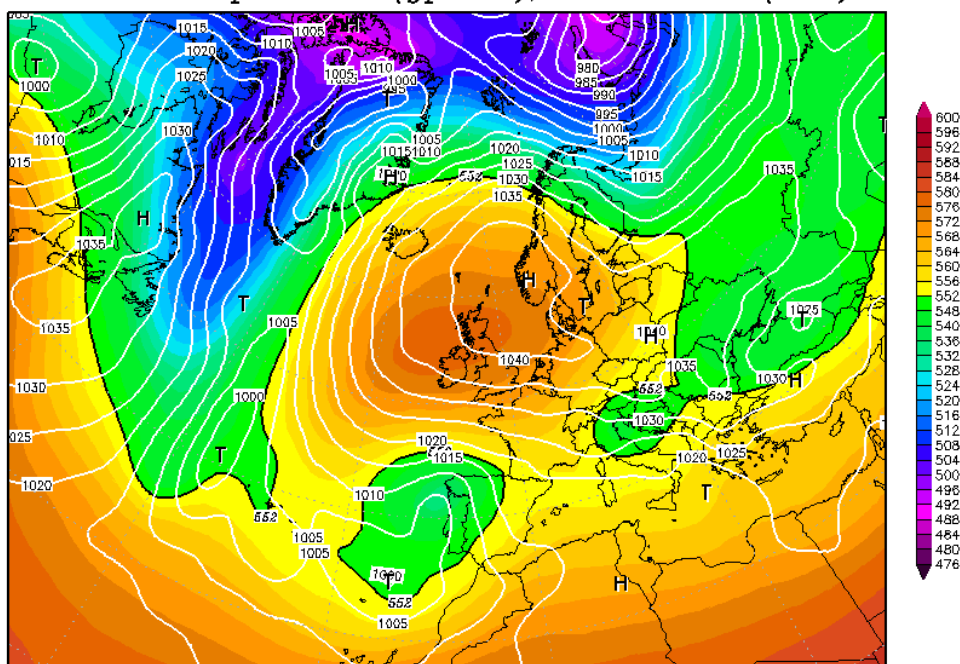


Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figur 11.12: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 26. desember 2008.

27DEC2008 12Z

500hPa Geopotential (gpdam), Bodendruck (hPa)

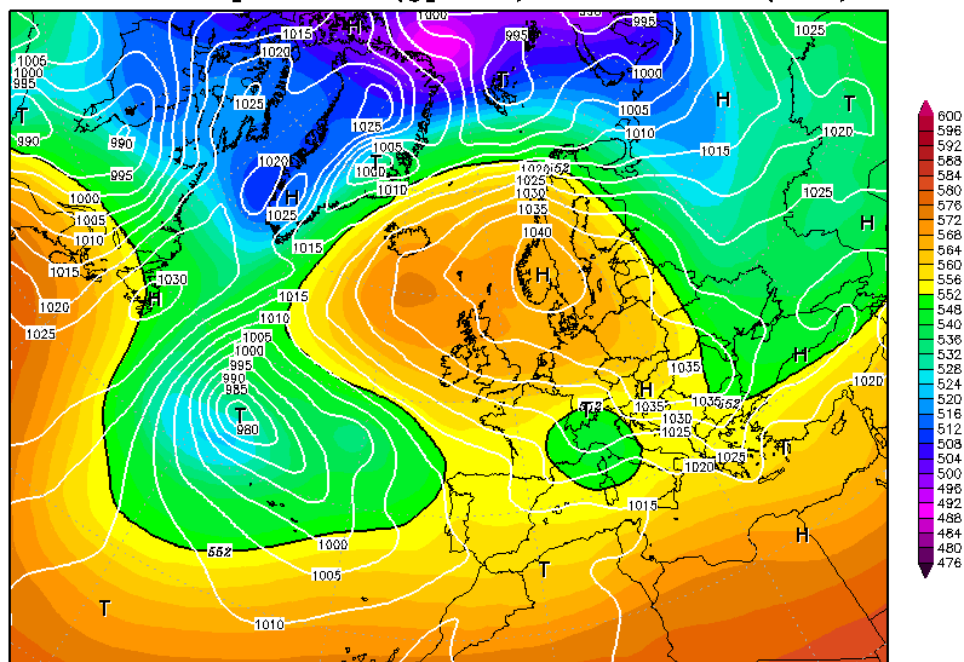


Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figur 11.13: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 27. desember 2008.

28DEC2008 12Z

500hPa Geopotential (gpdam), Bodendruck (hPa)



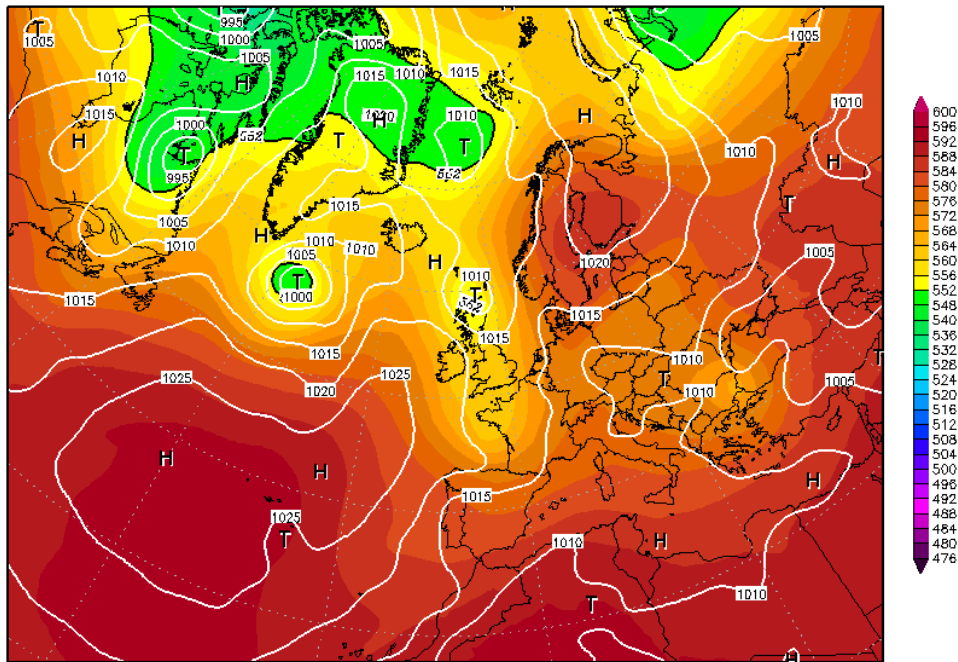
Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figur 11.14: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 28. desember 2008.

Case 4: 07.08.2007 til 09.08.2007

07AUG2007 12Z

500hPa Geopotential (gpdam), Bodendruck (hPa)

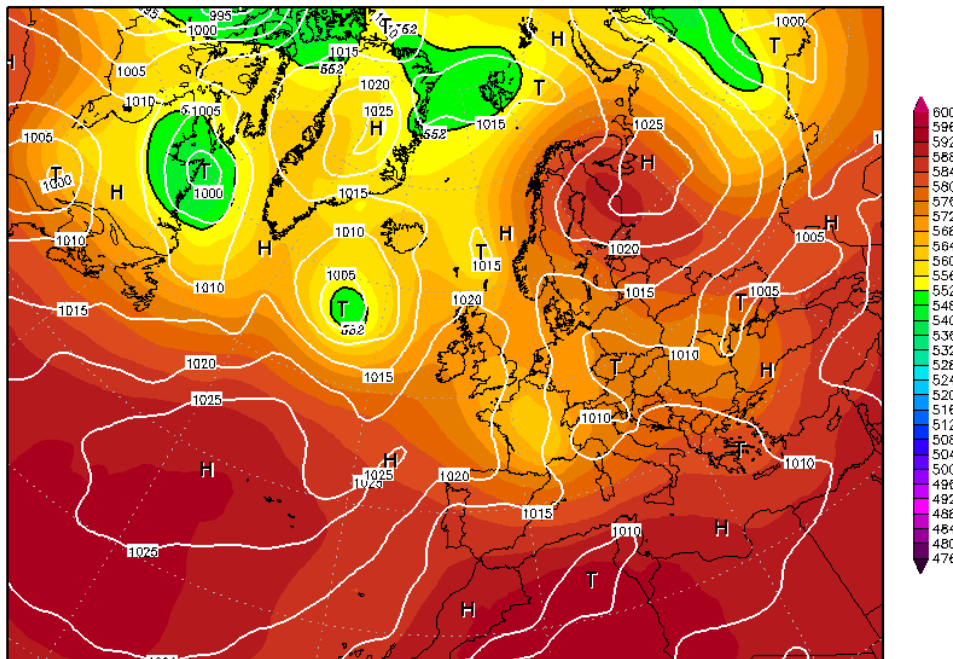


Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figur 11.15: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 07. august 2007.

08AUG2007 12Z

500hPa Geopotential (gpdam), Bodendruck (hPa)

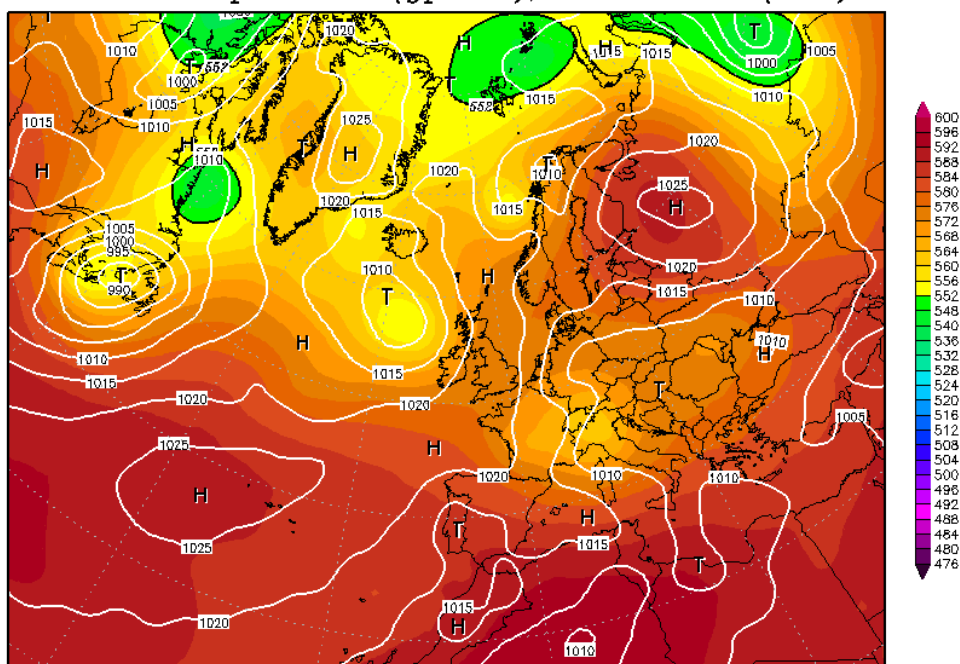


Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figur 11.16: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 08. august 2007.

09AUG2007 12Z

500hPa Geopotential (gpdam), Bodendruck (hPa)



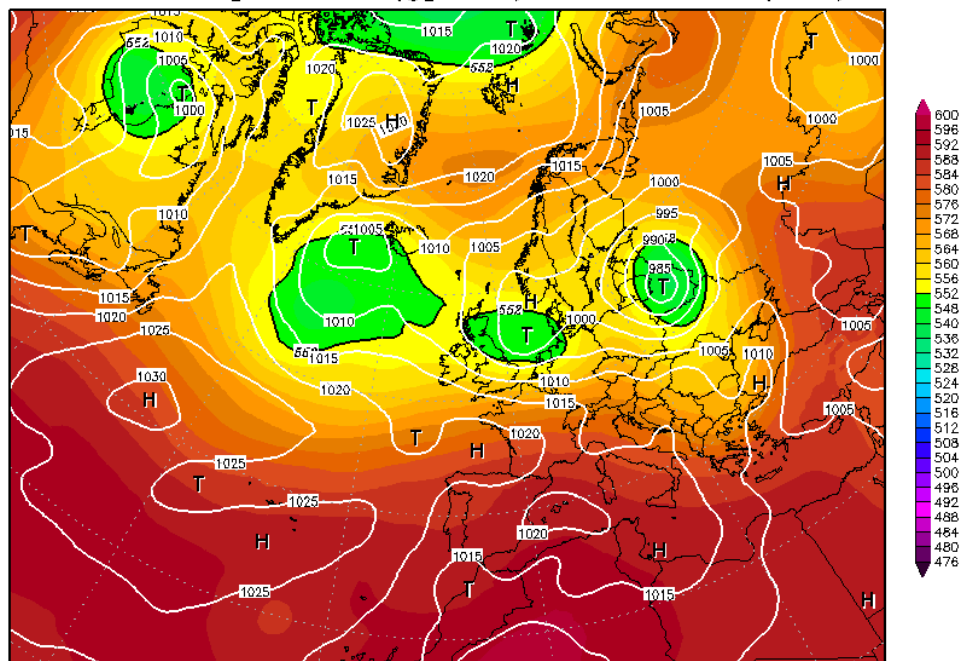
Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figur 11.17: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 09. august 2007.

Case 5: 06.07.2007 til 08.07.2007

06JUL2007 12Z

500hPa Geopotential (gpdam), Bodendruck (hPa)

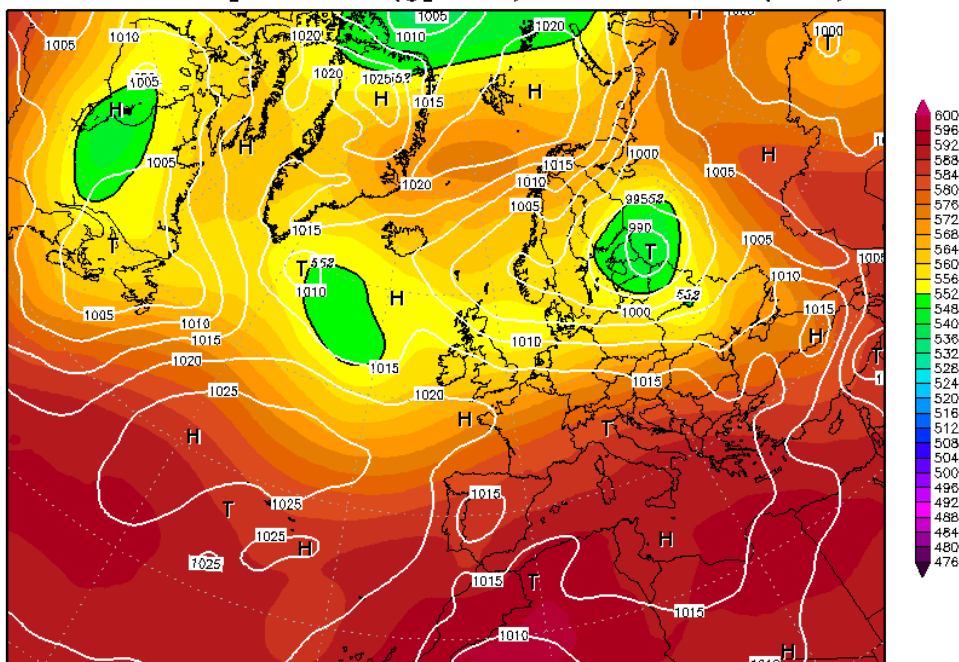


Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figur 11.18: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 06. juli 2007.

07JUL2007 12Z

500hPa Geopotential (gdam), Bodendruck (hPa)

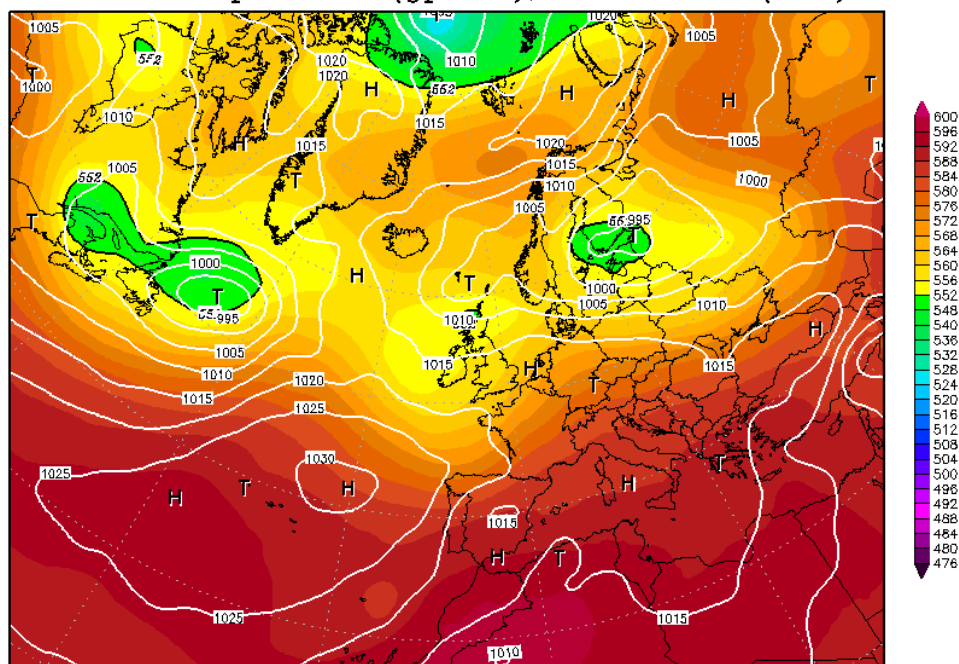


Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figur 11.19: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 07. juli 2007.

08JUL2007 12Z

500hPa Geopotential (gdam), Bodendruck (hPa)



Daten: CFS Reanalysis
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figur 11.20: Bakketrykk og geopotensiell høyde for trykkflaten tilsvarende 500 hPa kl 12:00 på 08. juli 2007.