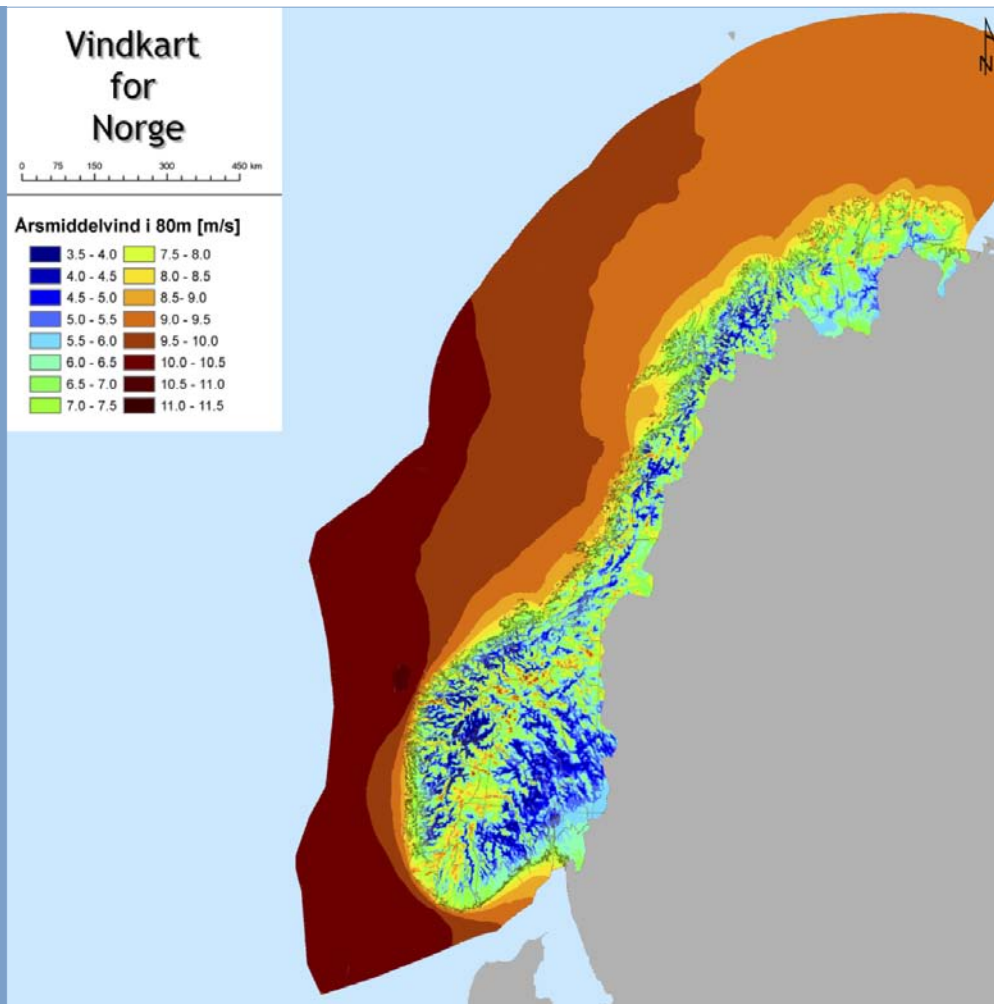


Vindkart for Norge

9
2009



OPPDRAGSRAPPORT A

Vindkart for Norge

Rapport nr 9/2009

Vindkart for Norge

Oppdragsgiver: NVE

Redaktør:

Forfatter: Øyvind Byrkjedal, Espen Åkervik, Kjeller Vindteknikk

Trykk: NVEs hustrykkeri

Opplag: 50

Forsidefoto:

ISSN: 1503-0318

Sammendrag: Ved å benytte mesoskalamodellen Weather Research and Forecast Model har vindressurser for hele Norge blitt kartlagt. Kartleggingen er basert på modellberegninger med en horisontal oppløsning på 1km over landområder og i kystnære områder. Til havs har en grovere oppløsning blitt benyttet. Det har blitt gjort kartbøker som viser normalårskorrigert middelvind og forventet produksjon i høydene 50m, 80m og 120m. I tillegg blir isingskart, RIX kart som viser terrengkompleksiteten og Weibull-parametre vist.

Resultatene er validert mot data fra vinddata fra 50m målemaster langs kystområdene fra Sørlandet til Finnmark. Vi finner generelt godt samsvar mellom observasjoner og modell tatt i betraktning lokale terrengvariasjoner.

Emneord: vindkart, vindressurser

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Telefaks: 22 95 90 00
Internett: www.nve.no

Oktober 2009

Innhold

Forord	2
1 Innledning	3
2 Beskrivelse av modell og inngangsdata	6
2.1 Weather Research and Forecast model (WRF)	6
2.2 Beskrivelse av inngangsdata	6
2.3 Modelloppsett.....	7
3 Normalårskorrigerings	11
3.1 Standardmetode for normalårskorrigerings	11
3.2 Normalårskorrigerings av modelldata	11
3.3 Valg av metode	11
4 Metodikk for produksjonsberegninger	13
4.1 Effektkurver	13
4.2 Hastighetsfordeling og Weibull formfaktor k.....	13
4.3 Brukstimer	14
4.4 Fylkesvis produksjonspotensial.....	14
5 Metodikk for RIX-beregninger	18
6 Metodikk for isingsberegninger	19
6.1 Beregning av isingsintensitet	19
7 Modellvalidering mot observert vindklima	21
8 Diskusjon av usikkerhet	24
8.1 Usikkerhet i årsmiddelvind knyttet til egenskaper ved modellen	24
8.2 Usikkerhet i årsmiddelvind knyttet til normalårskorrigerings	25
8.3 Usikkerhet i isingsberegningene	25
8.4 Usikkerhet i produksjonsestimatene.....	27
9 Presentasjon av resultater	29
9.1 Normalkorrigert middelvind	29
9.2 RIX-kart	30
9.3 Isingskart	30
9.4 Weibull formfaktor	31
9.5 Forventet brukstid for produksjon.....	31
Bibliografi	33

Forord

Av ny fornybar energiproduksjon vil vindkraft utgjøre en betydelig andel. NVE har derfor sett det som en viktig oppgave å kartlegge landets utbyggbare vindkraftressurser.

Tidligere har NVE kartlagt vindressursene langs norskekysten fra Lindesnes til den russiske grensen. Denne avgrensningen reflekterer det forhold at det er her man finner de beste vindkraftressursene, men også at den metoden som er brukt har gjort det vanskelig å kartlegge vindressursene lenger innover i landet.

Nye og bedre metoder samt større datamaskinkapasitet gjør det nå til en overkommelig oppgave å kartlegge vindressursene også i de indre områder av landet. NVE har derfor engasjert Kjeller Vindteknikk til å gjennomføre en ny og landsomfattende kartlegging av vindressursene over fastlands-Norge og havområdene utenfor.

Fra før vet en at vindressursene til havs nærmest er ubegrensede. Det viser seg imidlertid at vindforholdene varierer mye og det foreliggende vindkartet kan bli et viktig verktøy for å klarlegge hvilke områder av Nordsjøen og Norskehavet som er best egnet for vindkraftproduksjon.

Når det gjelder fastlands-Norge, har vindressurskartleggingen avdekket at det også finnes store områder i de indre deler av landet som kan være egnet til kraftutbygging. Dette har tidligere ikke vært kjent.

Kartleggingen viser at de fysiske vindressursene er svært store og at de er fordelt over store deler av landet. Det er i denne undersøkelsen ikke gjort noen vurdering av hvor stor del av disse ressursene som i praksis kan bygges ut. Hvorvidt et område er egnet for kraftutbygging er ikke bare et spørsmål om tilgang på vindressurser. Forhold som gjelder økonomi og miljø vil erfaringsmessig begrense utbyggingen i stor grad og føre til at de økonomisk utbyggbare ressursene blir vesentlig mindre enn de fysiske ressursene som er beregnet her.

Oslo, oktober 2009

Marit Lundteigen Fossdal
avdelingsdirektør

Torodd Jensen
seksjonssjef

1 Innledning

Vindressurskartlegging er viktig for planleggingen av nye vindkraftverk. En slik kartlegging handler om å innhente mest mulig informasjon om vindklimaet i de aktuelle utbyggingsområdene. Vindmålinger er den mest vanlige, og også mest nøyaktige måten, å innhente denne informasjonen på. Ulempen med denne metodikken er at man gjennom en vindmålemast bare får tilgang til vinddata i ett geografisk punkt. Dersom man vil ha informasjon om den romlige variasjonen i vindklimaet må man ty til modeller. I dette arbeidet har den såkalte mesoskalamodellen Weather Research and Forecasting (WRF) blitt brukt for å kartlegge vindressurser i Norge.

Kjeller Vindteknikk har tidligere utført flere arbeider med mesoskalamodeller for vindressurskartlegging over land (se for eksempel (KVT/ØB/2007/010), (KVT/ØB/2007/023), (KVT/ØB/2008/034) og (KVT/ØB/2008/043)) og over hav (KVT/ØB/2009/013). Disse arbeidene har vist at modellen gir gode resultater sammenlignet med observasjoner på land der vi for områder med liten terrengkompleksitet finner at modellresultatene ligger innenfor $\pm 10\%$ av observert verdi. Korrelasjonen for timesdata er typisk i intervallet 0.7-0.9. Sammenlignet med plattformdata i Nordsjøen finner vi også høy korrelasjon på timesbasis (~ 0.9), men avvik i den beregnede middelvinden (KVT/ØB/2008/043). Dette avviket skyldes langt på vei usikkerheter knyttet til observasjonene og hvordan målingene blir påvirket av selve plattformen. Sammenligninger med offshore data fra Fino1 plattformen sør i Nordsjøen har vist meget bra overensstemmelse mellom modellen og observasjoner både når det gjelder korrelasjon og midlere vindhastighet (Berge, et al. 2009). Avviket i middelvinden for en 4 års periode var på 2% i 100m høyde.

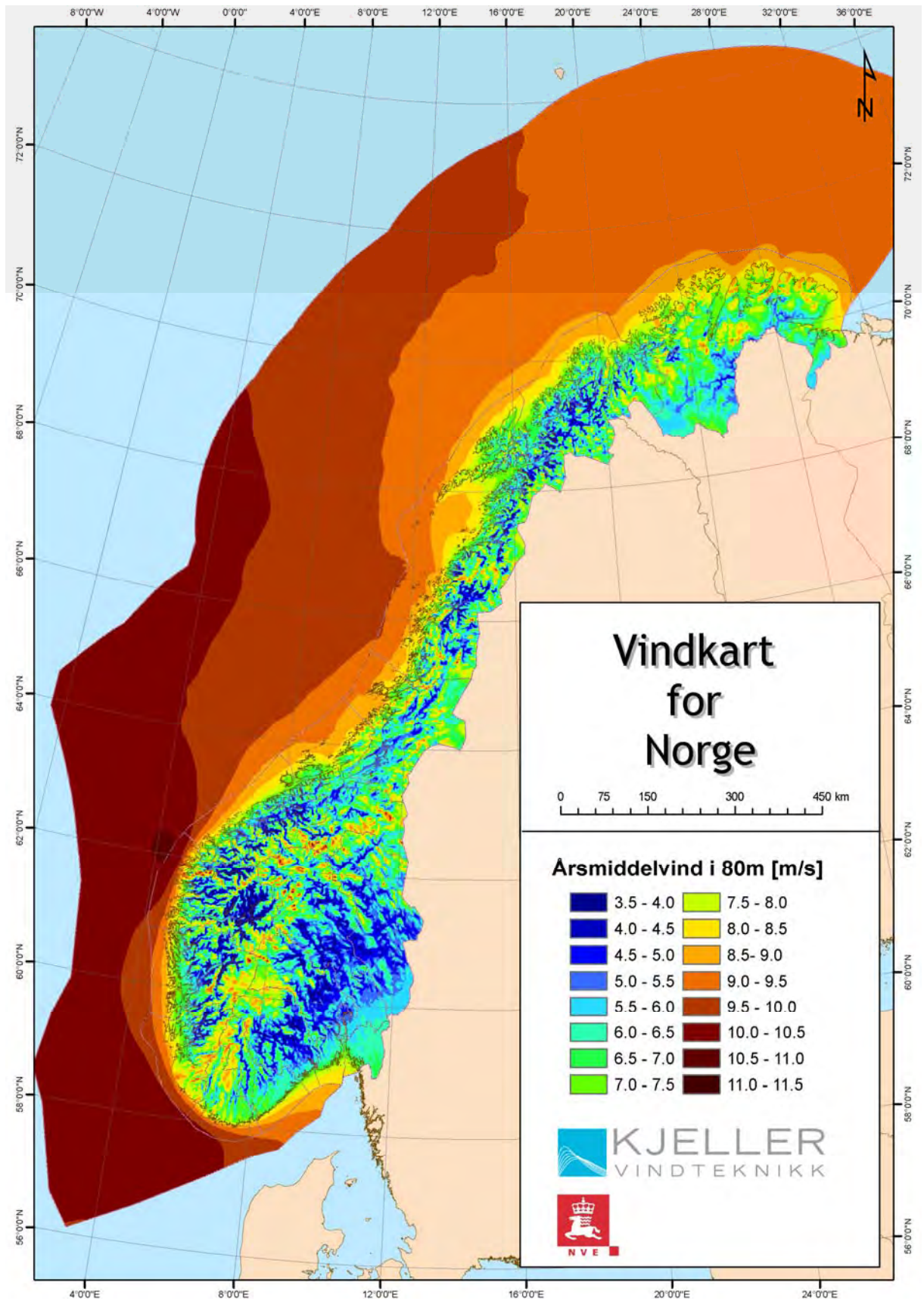
Nøyaktigheten til modellresultatene i dette arbeidet har blitt evaluert gjennom sammenligning med målt vindklima på en rekke lokaliteter i Norge. Kjeller Vindteknikk har fått tilgang til måledata fra 22 ulike master eid av ulike selskaper som utvikler vindparker i Norge. Vinddataene fra disse mastene er anonymisert for bruk i denne studien. Alle mastene måler vindstyrke og vindretning i 50m høyde over bakken. Disse datasettene har betydelig høyere kvalitet enn standard 10m observasjonsdata fra Det Norske Meteorologiske Institutt (met.no). KVTs erfaring fra bruk av kyststasjoner fra met.no er at de ofte er lite representative for vindklimaet i vindparker som kan ligge flere titalls kilometer unna observasjonspunktene. Årsakene til dette kan være at målingene er foretatt i lav høyde (10m) og at det lokalt kan være store variasjoner i terreng og overflateegenskaper. Vi kan heller ikke forvente at disse stasjonene skal være representative for offshore forhold. Det vil være store forskjeller på vindforholdene offshore i kystnære områder og områder lenger til havs. Både vindhastighet og vindretning blir påvirket av landmassene et godt stykke ut fra kysten gjerne til en avstand av 50km og mer.

Vinddata fra numeriske meteorologiske modeller/analyser er tilgjengelige med en horisontal oppløsning på 50-200km globalt. En slik horisontal oppløsning er imidlertid for grov til å gi informasjon om forventede lokale vindforhold. Derimot er slike modelldata likevel godt egnet som inngangsdata til finere skala meteorologiske modeller, såkalte mesoskalamodeller. En database med modellkjøringer fra HIRLAM, den operasjonelle meteorologiske modellen til met.no, med 10km oppløsning finnes også tilgjengelig. For store havområder et stykke ut fra kysten vil slike data gi et godt bilde av vindressursene. I kystnære områder derimot er ikke 10km oppløsning tilstrekkelig for å beskrive lokale variasjoner og påvirkningen fra topografi eller land/hav fordelingen.

I dette arbeidet har vi benyttet meteorologiske data med en oppløsning på ca. 50km som inngangsdata til WRF. Beregningene med WRF er utført for ett kalenderår med en horisontal oppløsning på 1km over land og i kystsonene ut til omtrent 50km fra land. Utenfor dette er det brukt en oppløsning på 4km. Disse simuleringene danner grunnlaget for det utarbeidete vindkart for Norge.

I denne rapporten blir metodikken bak de endelige vindkartene presentert. Vindkartene inneholder ulike vindparametre i tre forskjellige høyder over nullplansforskyvningen. Disse tre høydene er 50m, 80m og 120m. På det nåværende tidspunkt er 80m høyde den mest aktuelle i vindkraftsammenheng, da dagens turbiner ofte har denne navhøyden. For småskala vindkraftverk vil derimot en 50m høyde være mer aktuelt og likeledes vil man fremover se at vindturbiner kan ha en navhøyde opp mot 120m. De ulike vindparametre som blir presentert er; normalårskorrigert middelvind, potensiell ising, terrengvariasjon i form av et såkalt RIX kart og forventet brukstid.

I kapittel 2 blir mesoskalamodellen WRF presentert. Videre blir kapittel 3 brukt til å beskrive hvordan man korrigerer ett års modellsimuleringer til å representere langtidsklima. I de påfølgende kapitlene 4,5 og 6 blir metodikken for produksjonsberegning, RIX beregning og isberegninger gitt. En validering mot målt vindklima er presentert i kapittel 7. Usikkerheten knyttet til de ulike vindkartene er presentert i kapittel 8, mens en beskrivelse av de ulike vindkartene er gitt i kapittel 9. Et sammendrag er gitt i kapittel 10. De ulike vindkartene er for omfattende til å ta med i denne rapporten, og de vil bli gitt i separate dokument. For å underlette lesningen av rapporten blir normalårs middelvind for 80m høyde vist i Figur 1 med en grovere skala enn de endelige vindkartene.



Figur 1: Normalårskorrigert middelvind i 80m høyde.

2 Beskrivelse av modell og inngangsdata

2.1 Weather Research and Forecast model (WRF)

WRF (Weather Research and Forecast) modellen representerer siste generasjons mesoskala numerisk værvarslingsmodell. Modellen blir brukt både som en værvarslingsmodell og til forskning innenfor meteorologi. Modellsystemet er nærmere beskrevet på <http://www.wrf-model.org/> eller i (Skamarock, et al. 2008), mens mer detaljert informasjon om oppbyggingen av modellen, numeriske metoder og fysiske komponenter er beskrevet i (Klemp, Skamarock and Dudhia 2000) og (Michalakes, et al. 2001). Utviklingen av WRF støttes av et stort vitenskapelig miljø i USA samtidig med at antallet brukere av modellsystemet øker hurtig. I tillegg er modellens kildekode åpent tilgjengelig for brukerne. WRF er således et godt dokumentert verktøy med et stort brukermiljø. Modellen benyttes til operasjonell værvarsling av bl.a. National Weather Service ved National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Vi vil her gi en oversikt over hvordan modellen har blitt satt opp for å gjennomføre beregninger av vindklimaet i Norge. Versjon 3 av modellen ble lansert i april 2008 (Skamarock, et al. 2008). I forbindelse med dette prosjektet har WRF v3.01 blitt benyttet.

2.2 Beskrivelse av inngangsdata

Den numeriske mesoskalamodellen WRF trenger relativt store mengder med inngangsdata, og kvaliteten på det resulterende vindklimaet er sterkt avhengig av kvaliteten på disse. I de følgende avsnittene beskriver vi de tre viktigste inngangsparametrene; geografiske data, snødata og meteorologiske data.

Globale geografiske data er tilgjengelige fra NOAA. Dette er statiske data med unntak av en enklere årssyklus for enkelte parametere. Dataene inkluderer topografi, overflateegenskaper, albedo og vegetasjon. Disse dataene har en horisontal oppløsning på ca 1 km. Vindforholdene i de nederste få hundre meter over bakken er særlig følsomme til landoverflatens egenskaper, ved at endringer i overflatens ruhet vil bidra til større eller mindre oppbremsing langs bakken. Erfaringen fra KVTs tidligere prosjekter tilsier at markslagsdata fra NOAA databasen (USGS) er unøyaktige og stedvis feil for områder i Norge. Landoverflateegenskapene og vegetasjonsdata i modellkjøringene er derfor oppdatert med markslagsdata fra N50 kartserien.

Data for snødekke/snødyb fra senorge.no er basert på observasjoner av nedbør og temperatur ved stasjoner rundt om i landet og interpolert til et 1km gitter. Dette datasettet er her inkludert i modelloppsettet. Snødekket påvirker vindforholdene på ulike vis. En direkte effekt av snødekket kan vi forvente å få der hvor snøen er dyp nok til å gi en jevnere overflate enn dersom det er snøfritt. Dette vil være tilfelle f.eks. for steder med lavere buskvekster som vil bli begravd under snødekket. Snøen bidrar dermed til å gi lavere overflate-ruhet og dermed mindre oppbremsing av vinden langs bakken og videre et endret vindprofil. Snøen vil også påvirke energibalansen ved bakken gjennom å bidra til større refleksjon av innkommende stråling (høyere albedo) og hindre varmetransport mellom luft og bakke, og dermed bidra til å redusere temperaturen ved bakken. En lavere bakketemperatur vil videre gi høyere stabilitet i grenselaget og dermed påvirke vindforholdene indirekte gjennom endring av temperatur og stabilitetsforholdene. En metode for bruk av snødata og dens betydning for overflateruheten i modellen ble implementert i forbindelse med prosjektet Vindkart for Finnmark (KVT/ØB/2008/034) og er benyttet for alle modellsimuleringer i vindkart for Norge.

De globale meteorologiske data har ca. en grads horisontal oppløsning og er tilgjengelige fra National Center for Environmental Protection (NCEP). Data er tilgjengelige for 6-timers intervaller fra september 1999-d.d. og stammer fra FNL (Final Global Data Assimilation System) som er analyser basert på observasjonsdata. Dette er samme data som benyttes til operasjonell varslings i USA (National Weather Service/NOAA). FNL er en operasjonell assimilasjonsmodell som tar inn alle tilgjengelige observasjonsdata globalt for et hvert tidspunkt, og bruker modellen til å generere et globalt datasett som beskriver øyeblikkstilstanden i atmosfæren. Observasjonsdata som inngår i assimilasjonsmodellen er bakkeobservasjoner fra flere tusen målestasjoner globalt, radiosondeoppstigninger som beskriver vertikalstrukturen i atmosfæren, observasjonsdata fra flytrafikken i tillegg til satellittdata. En mer detaljert beskrivelse av datagrunnlaget finnes på <http://wwwt.emc.ncep.noaa.gov/gmb/para/parabout.html>. Data fra FNL er gitt med en horisontal oppløsning på en grad og i 28 lag vertikalt og beskriver en rekke atmosfære- og bakkeobservasjoner som; bakkestrykk, geopotensiell høyde, temperatur, sjøtemperatur, bakketemperatur og jordfuktighet, atmosfærisk vandampinnhold og skyer, vindhastighet og retning, vertikalt vindskjær, vertikal bevegelse, virvling og tilgjengelig konvektiv potensiell energi. De globale data har videre blitt interpolert ned til en oppløsning som svarer til den som velges for WRF-modellen og representerer dermed en initialtilstand i modellen. FNL data for atmosfæren blir også benyttet som randdata til det ytterste modelldomenet.

Tilsvarende data er også tilgjengelig fra ECMWF. Det er vist at modellberegninger basert på ECMWF gir lavere middelfeil (mean absolute error) enn ved bruk av FNL data, men at begge kilder statistisk sett gir samme verdi for årsmiddelvind (Tambke 2009). Modellkjøringer basert på ECMWF data kan gi bedre presisjon m.h.p. timing av frontpassasjer noe som er viktig for værvarslingen og som bidrar til lavere middelfeil. Data fra ECMWF blir derfor ofte foretrukket til bruk for varslingsformål. Men brukt til ressurskartlegging viser dette studiet at FNL data vil gi et like godt resultat.

2.3 Modelloppsett

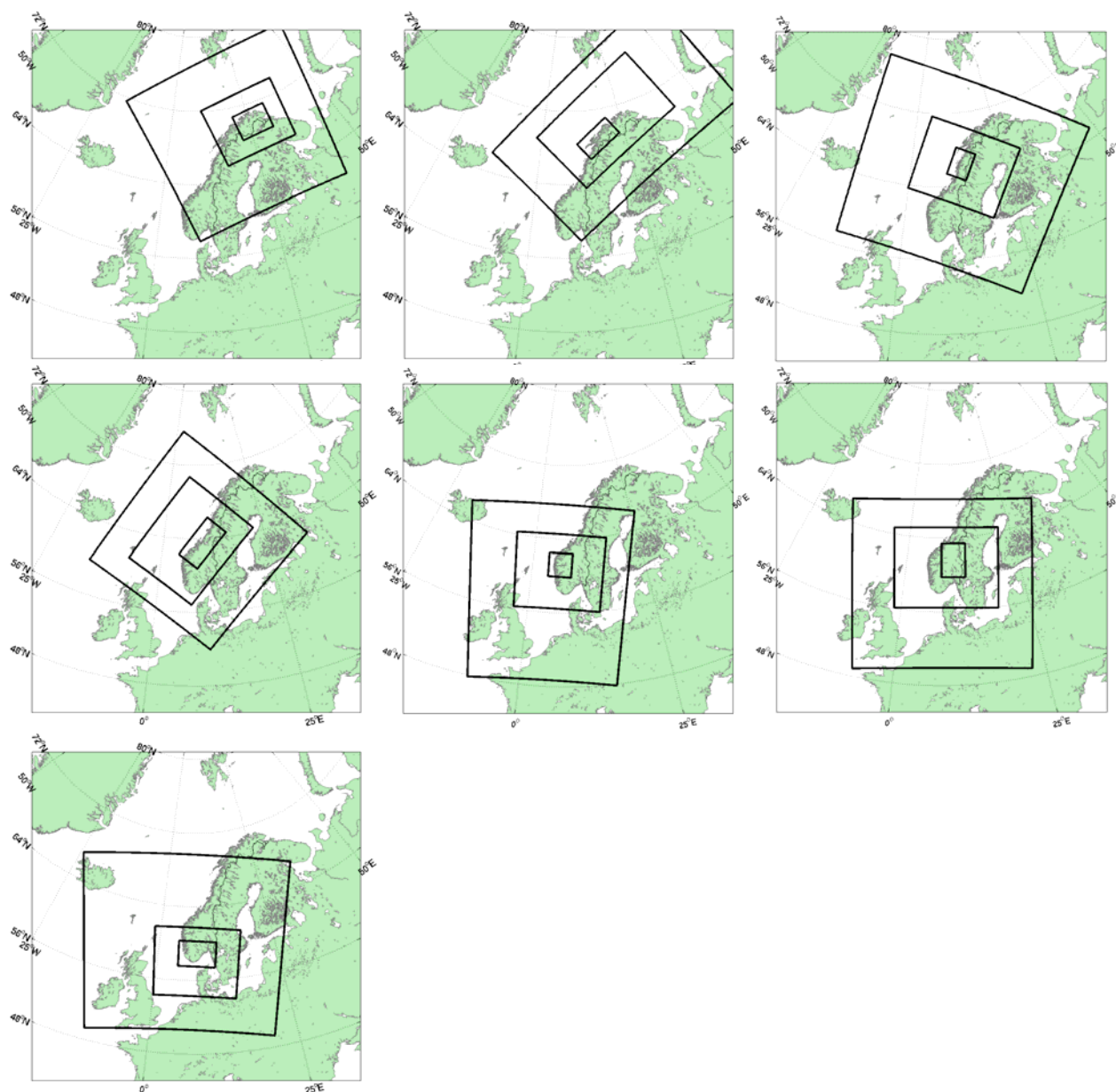
Modellområdene er satt opp slik at hele Norge er dekket med en gitteroppløsning på 1km x 1km. I tillegg er også offshore områder (Norsk Økonomisk Sone, NØS) blitt kartlagt gjennom prosjektet Vindkart for Norge, Offshore(KVT/ØB/2009/013 2009). Simuleringene som inngår i dette arbeidet er listet opp i Tabell 1. Data fra 7 ulike modellsimuleringer inngår i arbeidet. Figur 2 viser oppsettet av modellsimuleringene.

Modellen er for alle modellkjøringer satt opp med nestede domener. I Tabell 1 refererer d01 til det ytre domenet, d02 til domenet som ligger innenfor d01, mens d03 refererer til et domene som ligger innenfor d02. For oppsett med 1km oppløsning velger vi å bruke 3 nestede domener hvor det ytre domenet har en oppløsning på 16km, d02 har oppløsning på 4km og d03 en oppløsning på 1km. For områder en avstand ut fra kysten hvor påvirkningen fra landmassene er mindre, er det benyttet en grovere oppløsning enn over land. Vi har definert slike områder til å ligge mer enn 40km fra kysten og i disse er det benyttet data fra d02-simuleringene med 4km x 4km oppløsning.

Det er også gjennomført en simulering med grovere horisontal oppløsning, kalt Hele Norge. Oppsettet dekker hele Norge med en oppløsning på 5km i tillegg til hele NØS med en oppløsning på 15km. Denne simuleringen er gjort for perioden 1. januar 2000- 31. desember 2008 og danner grunnlaget for normalårskorrigeringen som blir presentert i kapittel 3. Modelloppsettet for hele Norge er vist i Figur 4.

Tabell 1 Modelloppsett for simuleringer som inngår i vindkart for Norge

Modelleksperiment	domene	horisontal oppløsning	periode	gridpunkt
Finnmark	d01	16 km	01.01.2005 - 31.12.2005	123 x 127
	d02	4 km	"	188 x 228
	d03	1 km	"	312 x 404
Troms	d01	16 km	"	99 x 165
	d02	4 km	"	220 x 368
	d03	1 km	"	256 x 472
Nordland	d01	5 km	"	299 x 149
	d02	1 km	"	535 x 220
Trøndelag	d01	16 km	"	119 x 119
	d02	4 km	"	304 x 244
	d03	1 km	"	564 x 292
Vestlandet	d01	16 km	"	119 x 134
	d02	4 km	"	264 x 224
	d03	1 km	"	280 x 284
Sørlandet	d01	16 km	"	134 x 152
	d02	4 km	"	212 x 260
	d03	1 km	"	312 x 460
Østlandet	d01	16 km	"	137 x 129
	d02	4 km	"	316 x 244
	d03	1 km	"	292 x 408
Hele Norge	d01	15 km	01.01.2000 - 31.12.2008	157 x 126
	d02	5 km	"	416 x 212

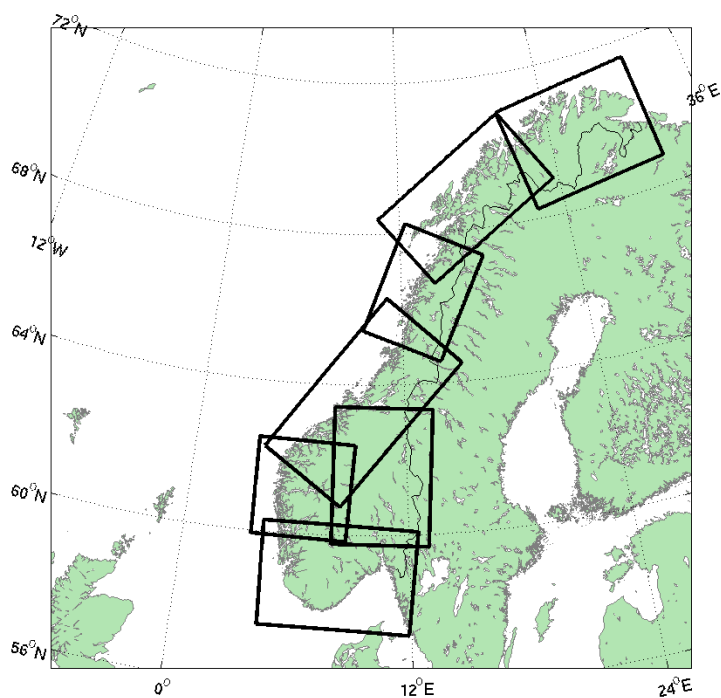


Figur 2 Modelloppsett for 7 modellkjøringer. Figuren viser de ulike modelldomenene for de 7 modelleksperimentene: Finnmark, Troms, Nordland, Trøndelag, Vestlandet, Østlandet og Sørlandet.

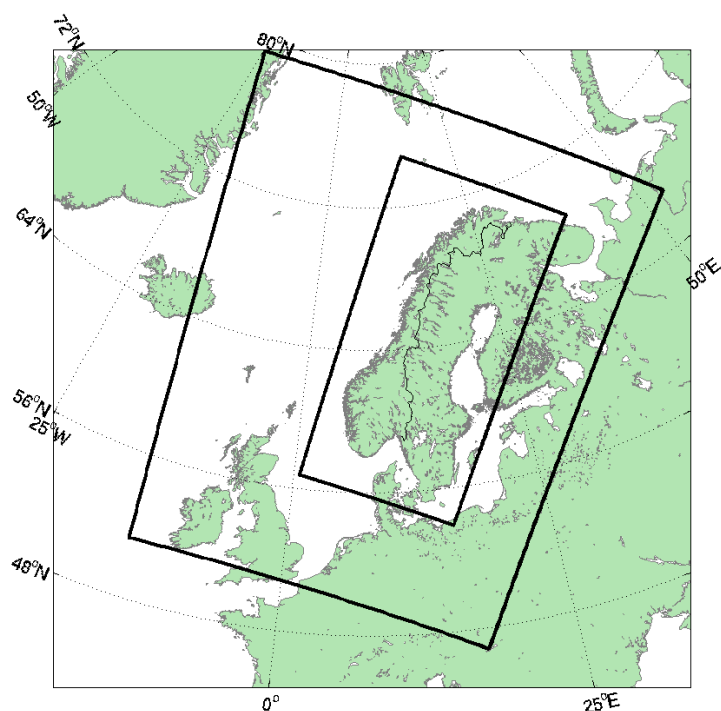
WRF utfører beregninger vha. et koblet likningssett, der alle kjente fysiske atmosfæriske prosesser inngår. Dette inkluderer blant annet beregninger for vind, temperatur, stabilitet, fuktighet, skyer og stråling. Disse beregningene blir utført for hvert gitterpunkt og for hvert vertikalnivå i atmosfæren. I tillegg utføres beregninger for energi og fuktighet for jord og jordoverflaten. Beregningene er initiert fra de globale FNL-data. Simuleringen foregår ved at modellen beregner forandringen i de atmosfæriske feltene i små tidskritt framover i tid om gangen. Tidsskritt som er brukt for 1km simulering er typisk mellom 2-8 sekunder. Data for hvert gitterpunkt blir lagret til disk for hver modellerte time.

Modellen er satt opp slik at simuleringen blir foretatt i 27 timers bolker. Modellkjøringen starter kl 00UTC for hvert døgn og kjøres som et 27 timers værvarels framover i tid, men med

oppdatering av randbetingelsene for hver 3. time. Oppsettet gir oss 3 overlappende timer for hvert døgn. Dette blir gjort siden modellens nøyaktighet ikke er like god i de første timene etter modellens oppstart. Dette skyldes vesentlig at de fysiske prosessene slik som skydannelse, strålingsbalanse, turbulente prosesser osv. vil bruke noe tid på å utvikle seg på modellens skala ut fra initialdataene. De første 3 timene av hver modellkjøring blir derfor ikke benyttet.



Figur 3 Indre modelldomener fra simuleringene med 1km modellopløsning. Hver boks tilsvarer det innerste domenet i de ulike underfigurene i Figur 2.



Figur 4 Modelloppsett for 5km simulering for hele Norge. Simuleringer er gjennomført for perioden 01.01.2000-31.12.2008.

3 Normalårskorrigerering

Vindklimaet i Norge er beregnet for de syv ulike modelldomenene som dekker landet med en gitteroppløsning på 1km. Denne høye oppløsningen er nødvendig for å løse opp mesoskalaeffektene knyttet til den relativt store variasjonen i topografi. Imidlertid fører denne høye oppløsningen til at man med de nåværende beregningsressursene er begrenset til å simulere kun et år. Dette er ikke tilstrekkelig lang tid til å kunne fastslå langtids vindklima; de resulterende middelvindnivåene må normalårskorrigeres. Derfor har det blitt gjort en simulering for hele Norge med en grovere gitteroppløsning som strekker seg over de 9 årene 2000 til og med 2008. I den neste seksjonen blir det beskrevet hvordan man bruker denne langtidsinformasjonen til å normalårskorrigerer de finoppløste resultatene.

Det er verdt å merke seg at det er mulig å direkte beregne normalårskorrigert middelvind også med en fin gitteroppløsning. Dette kan en oppnå ved å løse statistiske versjoner av de beskrivende ligningene (Bergström and Juuso 2006). Ulempen ved denne tilnærmingen er at man ikke har tilgang til tidsserier av hastighetene, noe man har gjennom WRF som løser ligningene i tidsdomenet. KVT forventer at i produksjonsøyemed kommer tilgang på tidsserier til å bli mer og mer etterspurt.

3.1 Standard metode for normalårskorrigerering

Normalårskorrigerering blir ofte brukt når man har utført vindmålinger i en målemast over en relativt kort periode (cirka ett år). Framgangsmåten for en slik korrigerering er i prinsippet enkel. Gitt at man på en lokasjon (en såkalt referansestasjon) nær målemasten har tilgang til en lang tidsserie, kan man sammenligne middelvind og retningsfordeling i en sammenfallende tidsperiode for de to lokalitetene. Dette gir en overgangsfaktor mellom de to stasjonene. Deretter sammenligner man langtids- og korttidsmiddel samt retningsfordeling på referansestasjonen. Basert på denne informasjonen kan man skalere de korte dataene fra målemasten slik at middelerdi og retningsfordeling representerer normalårsklima.

3.2 Normalårskorrigerering av modelldata

En WRF simulering kan ses på som en måte å generere måledata fra en rekke lokaliteter, med en avstand i dette tilfellet på 1km i hver av de horisontale retningene. Derfor blir tidsserier tatt ut fra hvert av disse gitterpunktene. Som referansestasjon for hvert av disse gitterpunktene blir det nærmeste gitterpunktet fra den grovoppløste WRF simuleringen for Norge brukt, og ni års tidsserier blir tatt ut fra hvert av punktene i dette grove gitteret.

3.3 Valg av metode

Selv om det prinsipielt er enkelt å gjøre en slik normalårskorrigerering kan valget av metode være avgjørende for kvaliteten på estimatet. Innenfor små geografiske områder kan langtidsklimaet variere betydelig. I tillegg kan to lokaliteter som ligger nært ha helt forskjellige retningsfordelinger. Den vanligste metodikken er å bruke en såkalt MCP (Measure Correlate Predict) metode, der timeskorrelasjonen mellom den aktuelle målestasjonen og

referansestasjonen blir brukt (Tallhaug and Nygaard 1993). Denne metoden er ikke anbefalt å bruke dersom timeskorrelasjonen mellom stasjonene er mindre enn 0.8. I disse tilfellene kan en metode som baserer seg på sektorielle overføringskoeffisienter (K. Harstveit 2004) være å foretrekke. Dersom timeskorrelasjonen er god, vil den sistnevnte metoden være sammenlignbar med MCP. I denne studien har vi sett at timeskorrelasjonen mellom data fra det fine og det grove gitteret varierer fra 0.4 i fjellområder til 0.9 i kystområder. Derfor har vi i dette arbeidet brukt den sektoriell metoden (K. Harstveit 2004).

4 Metodikk for produksjonsberegninger

De viktigste parametrene for å beregne forventet produksjon for en lokalitet er vinddata (i form av hastighetsfordeling) samt en effektkurve. I dette kapitlet blir metodikken for å beregne produksjon ut fra vindkartene presentert. Videre blir et fylkesvis produksjonspotensial gitt i seksjon 4.4.

4.1 Effektkurver

Effektkurven er den effekten en vindturbin kan levere som funksjon av hastighet. Denne er fremarbeidet av vindturbinleverandøren. Valget av turbin er avhengig av middelvind, hastighetsfordeling og turbulensnivå på lokaliteten. Turbinene blir delt inn i tre klasser. En klasse I turbin skal ifølge IEC-61400-1 anbefalingen (IEC-61400-1 2005) brukes dersom middelvinden ligger mellom 8.5 og 10m/s. Videre skal en klasse II turbin brukes ved middelvind mellom 7.5 og 8.5m/s og klasse III ved hastigheter under 7.5m/s. Effektkurvene fra de ulike produsentene i de ulike klassene varierer mye. For å ikke favorisere noen produsent har vi tatt et representativt utvalg av produsenter og midlet alle effektkurvene. Videre har den resulterende effektkurven blitt normalisert. I venstre ramme av Figur 5 blir effektkurvene for de tre ulike turbinklassene vist. En ser tydelig at en klasse III turbin produserer bedre for lave hastigheter enn en klasse I turbin.

4.2 Hastighetsfordeling og Weibull formfaktor k

Gitt at man har en effektkurve tilgjengelig kan man finne produksjonen F fra uttrykket

$$F = \int_u P(u) p(u) du.$$

Her er $P(u)$ effektkurven som funksjon av hastigheten u og $p(u)$ er hastighetsfordelingen. I mange tilfeller kan man approksimere den reelle hastighetsfordeling med en Weibulltilpasning

$$p(u) = \begin{cases} \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{u}{c}\right)^{k-1}, & u \geq 0 \\ 0, & u < 0 \end{cases}$$

Sammenhengen mellom Weibullparametrene c , k og middelhastigheten \bar{u} er $\bar{u} = c \gamma(1 + 1/k)$, der γ er gammafunksjonen.

I den midtre delen av Figur 5 blir Weibullfunksjonen vist for tre ulike formfaktorer og en konstant middelvind på 9m/s. Produktet av effektkurven for en klasse I turbin og de tre ulike Weibullkurvene er vist i den høyre figure. Det er tydelig at en formfaktor på 2.1 gir høyere produksjon enn en formfaktor på 1.9. Dette illustrerer at i tillegg til middelvinden, spiller også hastighetsfordelingen en avgjørende rolle i vindkraftsammenheng.

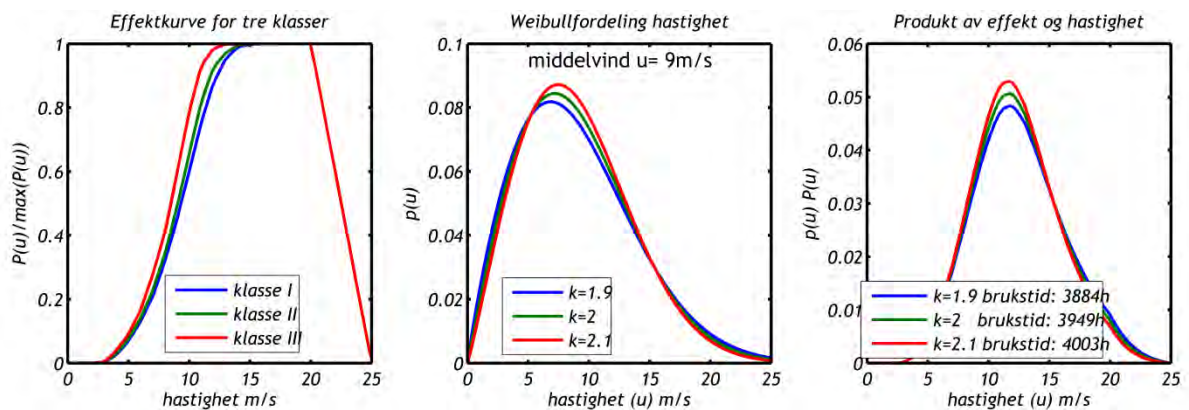
4.3 Brukstimer

Brukstimer eller fullasttimer er et mål på den årlige kraftproduksjonen ved et vindkraftverk og tilsvarer tiden et vindkraftverk må operere med full effekt for å oppnå samme årsproduksjon. Med den normaliserte effektkurven gitt ovenfor får man dette ved å multiplisere produksjonen F med antall timer i et år

$$B = F T_{\text{år}} = F 8760\text{h}$$

I Figur 5 kan man i den høyre rammen som viser produksjon også finne brukstimerne for de ulike formfaktorene.

I dette arbeidet har vi for hvert av modellpunktene beregnet Weibullparametre. Disse er deretter brukt til å estimere forventet brukstid for hele Norge.



Figur 5: Venstre figur viser midlere normaliserte effektkurver for de tre ulike klassene. Den midtre figuren viser hvordan hastighetsfordelingen varierer med formfaktoren gitt en middelvind på 9m/s. I den høyre figuren blir produktet av effektkurven for en klasse I turbin med de tre hastighetsfordelingen vist. Dette produktet danner grunnlaget for produksjonsestimatet.

4.4 Fylkesvis produksjonspotensial

En beregning av fylkesvis potensial for vindkraft er gjennomført ved å benytte vind og produksjonstall fra modellsimuleringene. En tilsvarende potensialberegning ble gjennomført i Hofstad et al. (Hofstad, Mølmann and Tallhaug 2005) ved å benytte data fra et tidligere vindatlas. I Hofstad et al. (2005) var vindkraftpotensialet beregnet for ca 12,5% av Norges areal som var den andelen av Norge som ble dekket av det tidligere vindatlas. Med utarbeidelsen av nytt vindatlas åpner det for muligheten å gjøre beregningen på ny med hele Norges areal som grunnlag.

Potensialberegningene ble gjennomført med samme metodikk som er dokumentert i Hofstad et al. (2005). ArcGIS er først blitt benyttet for å finne de områdene som er uegnet for utbygging av vindkraft etter følgende kriterier:

- Terrengforhold. Sterkt kupert område unntas vindkraftutbygging. Dette gjelder områder med en terrenghelning på mer enn 25%, noe som tilsvarer en helningsvinkel på 14,0°.
- Skog. Skog er i seg selv ikke et eksklusjonskriterium da det teknisk er mulig å bygge ut vindkraft i skog. Skog vil bidra til reduksjon av vindhastighetene gjennom høyere ruhet og nedbremsing langs bakken. Det har ikke vært tilgjengelig observasjonsdata av vind

fra skogsområder for å validere modellen i dette prosjektet. Det vil derfor være knyttet en større usikkerhet til resultatene over skog i mesoskala modellberegningene.

- Områder med vernestatus. Dette gjelder nasjonalparker, naturreservater, landskapsvernområder og fredningsområder. Også skytefeltområder er ekskludert.
- Bebyggelse. Det er benyttet en minsteavstand til hus på 600m. Dette inkluderer alle former for bolighus, fritidsboliger, hotell, restaurantbygning, skoler, barnehage og lekeparks, bygninger for religiøse aktiviteter, sykehus og sykehjem. Det er benyttet en minsteavstand til tettsteder på 1000m.
- Strandsone. Det er byggeforbud i en strandsone på 100m. Dette gjelder også for strandsonen til innsjøer med areal større enn $0,04\text{km}^2$.
- Innsjøer. Grensen for hvilke innsjøer som blir ekskludert fra utbyggingsområdet er satt til $0,04\text{km}^2$. Mindre innsjøer vil lett kunne innpasses i en vindpark.

Størrelsen på områdene som ikke er ekskludert ved å benytte de nevnte kriteriene er listet opp fylkesvis i Tabell 2 under "Utnyttbart areal". Det er ikke gjort noen ekskludering på bakgrunn av vindforhold i disse tallene. Totalt areal i Norge som ikke ekskluderes av kriteriene listet ovenfor er ca 128.000 km^2 tilsvarende ca 40% av hele Norges landareal. Store deler av arealene som er gitt som utnyttbart areal vil ha for dårlige vindressurser til at disse vil kunne utnyttes i særlig grad. Det er videre gjort en vurdering av arealer som har tilstrekkelig gode vindressurser ved å beregne størrelsen av utnyttbare areal som har vindhastighet høyere enn hhv 6 m/s, 7m/s og 8m/s.

For områdene med utnyttbare ressurser er middelproduksjonen til alle punkter som ikke ekskluderes blitt beregnet. Dette er vist i Tabell 3. I Hofstad et al. (2005) ble det antatt en utbyggingstetthet på $15\text{MW}/\text{km}^2$, dette tallet er nok noe høyt. Vi har i de videre beregningene antatt en utbyggingstetthet for vindkraft på $8\text{MW}/\text{km}^2$. Dette tilsvarer en innbyrdes turbinavstand i utbyggingsområdene på 500m for en 2MW turbin. Det er viktig å være klar over at det ideelt kan være fordelaktig å plassere ut et annet antall turbiner enn anslått her avhengig av lokale forhold. I Tabell 4 vises fylkesvis teoretisk potensial for vindkraft ved ulike nivå for utnyttelse av vindressursene.

Teoretisk potensial ved å utnytte alle områder med årsmiddelvind høyere enn 6 m/s som ikke faller inn under ekskluderingskriteriene nevnt ovenfor er på 1847 TWh årlig produksjon. Dette forutsetter utnyttelse av 27% av Norges totale landareal. Ved kun å se på områdene med årsmiddelvind høyere enn 7 m/s finner vi et potesial på 1243 TWh som forutsetter utnyttelse av 17 % av Norges landareal. Ved kun å utnytte områdene med vindhastigheter over 8m/s finner vi et potesial på 419 TWh årlig produksjon, som forutsetter utnyttelse av 5% av Norges landareal.

I beregningene er det ikke tatt hensyn til ising og turbulens. Store deler av potensialet ligger i områder der ising eller turbulens kan være et problem. Både ising og turbulens vil bidra til tap av produksjon og dermed redusere tallene. Turbiner tilpasset kaldt klima kan gjerne ha teknologiske løsninger som reduserer tap knyttet til ising.

De beregnede tallene for produksjonspotensial er teoretiske. Det er en rekke videre faktorer som ikke er tatt hensyn til i beregningene. Det er ikke tatt hensyn til økonomi og lønnsomhet av utbygging ulike steder. Det vil være begrensninger knyttet til nettkapasitet. Roterende vindturbiner kan forstyrre radiokommunikasjon og radaranlegg. Det vil være begrensninger i mulig vindkraftutbygging knyttet til slike hensyn. Vindkraftutbygging innebærer miljøinngrep. Det vil være begrensninger knyttet til hvilke miljøinngrep en er villig til å akseptere i forbindelse med en vindkraftutbygging i Norge. Norges totale årlige energibruk ligger på ca 120TWh årlig. Behovet for utbygging av vindkraft vil også begrenses av etterspørselen etter ny energiproduksjon.

Tabell 2 Fylkesvis oversikt over arealer. "Totalt areal" er fylkets totale areal. "Utnyttbart areal" er den andelen av fylkets areal hvor det vil være mulig å bygge ut vindkraft etter at GIS analysen med utvalgsriterier er gjennomgått. "Areal med U>6 m/s" er andelen av utnyttbart areal hvor vindressursene er tilstrekkelig gode (årsmiddelvind > 6 m/s). "Areal med U>7 m/s" er det utnyttbart areal med årsmiddelvind større enn 7 m/s. "Areal med U>8 m/s" er det utnyttbart areal med årsmiddelvind større enn 8 m/s. Tallene er oppgitt i km².

Fylke	Totalt areal	Utnyttbart areal	Areal med U>6	Areal med U>7	Areal med U>8
Østfold	4170	24	23	0	0
Akershus	4910	47	10	0	0
Oslo	454	0	0	0	0
Hedmark	27400	5300	3630	1790	430
Oppland	25230	6670	4980	2430	790
Buskerud	14930	2560	2340	1520	540
Vestfold	2210	5,7	5,0	0,9	0
Telemark	15330	1680	1530	1010	370
Aust-Agder	9170	510	460	290	66
Vest-Agder	7280	1540	1480	1250	440
Rogaland	9400	2760	2440	1960	940
Hordaland	15420	5150	3840	2180	420
Sogn og Fjordane	18660	8470	5580	3590	1670
Møre og Romsdal	15100	5880	4280	2570	750
Sør-Trøndelag	18790	4820	4470	3150	1120
Nord-Trøndelag	22350	5940	5380	3520	1140
Nordland	38180	16600	13710	8550	2720
Troms	25880	12680	9880	4850	770
Finmark	48790	26030	24060	15050	4810
Hele landet	323600	128200	88100	53700	16980

Tabell 3 Fylkesvis oversikt over gjennomsnittelig antall fullasttimer for de områdene som er mulig å utnytte for vindkraft. "Fullasttimer U>6" gir gjennomsnittelig antall fullasttimer for utnyttbare områder med årsmiddelvind høyere enn 6 m/s. Tilsvarende er gjennomsnittelig antall fullasttimer oppgitt for utnyttbare områder med årsmiddelvind høyere enn 7 m/s og 8 m/s. Det er ikke tatt hensyn til eventuelle tap som følge av ising i beregningen av fullasttimer.

Fylke	Fullasttimer U>6	Fullasttimer U>7	Fullasttimer U>8
Østfold	2230	2980	
Akershus	2050		
Oslo	2010		
Hedmark	2510	2880	3130
Oppland	2530	2840	3050
Buskerud	2630	2900	3090
Vestfold	2550	2890	
Telemark	2690	2960	3130
Aust-Agder	2650	2930	3090
Vest-Agder	2760	2950	3140
Rogaland	2830	2980	3130
Hordaland	2650	2880	3060
Sogn og Fjordane	2690	2920	3080

Møre og Romsdal	2540	2790	2930
Sør-Trøndelag	2740	2930	3100
Nord-Trøndelag	2690	2940	3100
Nordland	2630	2880	3060
Troms	2560	2820	2980
Finmark	2600	2900	3130

Tabell 4 Beregnet fylkesvis vindkraftpotensial ved å anta en utbyggingstetthet på 8MW/km². "Potensiale U>6" angir fylkets vindkraftpotensiale ved utbygging av alle utnyttbare arealer innenfor fylket med årsmiddelvind større enn 6 m/s. Beregningene er også gjort for områdene med årsmiddelvind høyere enn 7 m/s og 8 m/s. Tallene er gitt i TWh produksjon per år. Det er ikke tatt hensyn til eventuelle tap som følge av ising i produksjonsberegningene.

Fylke	Potensiale U>6	Potensiale U>7	Potensiale U>8
Østfold	0,4	0	0
Akershus	0,2	0	0
Oslo	0	0	0
Hedmark	72,9	41,3	10,8
Oppland	101	55,2	19,1
Buskerud	49,1	35,4	13,3
Vestfold	0,1	<0,1	0
Telemark	32,9	23,9	9,2
Aust-Agder	9,8	6,8	1,6
Vest-Agder	32,6	29,4	11,1
Rogaland	55,1	46,8	23,7
Hordaland	81,3	50,3	10,4
Sogn og Fjordane	120	84,0	41,2
Møre og Romsdal	86,9	57,4	17,5
Sør-Trøndelag	97,8	74,1	27,7
Nord-Trøndelag	116	82,7	28,3
Nordland	289	197	66,6
Troms	202	109	18,4
Finmark	500	349	120
Hele landet	1847	1243	419

5 Metodikk for RIX beregninger

Et vindkart produsert med en mesoskalamodell som WRF vil som tidligere nevnt ikke inkludere de detaljerte finskalaeffektene som oppstår i komplekst terreng, og dette vil i enkelte områder føre til større usikkerhet i vindnivået. Komplexiteten i terrenget blir ofte beskrevet ved hjelp av en såkalt RIX (Ruggedness Index) kvantifisering (Bowen og Mortensen 1996). RIX verdien beskriver hvor stor prosentdel av terrenget innenfor en gitt radius som har helning på mer enn 30%. Denne kvantifisering har tradisjonelt blitt brukt til å finne områder der lineære mikroskalamodeller som WAsP (WAsP Manual 1993) ikke forventes å gi tilstrekkelig nøyaktige resultat, men også til å korrigere resultatene fra disse modellene.

I denne rapporten presenterer vi et RIX kart for Norge beregnet fra N50 kartserien med en radius på 2.0km (som anbefalt i (Berge, et al. 2006)). N50 kartserien, som har høydekonturer med 20m ekvidistanse, er interpolert inn til et gitter med 25m oppløsning. Merk at inputdata som er brukt i beregningene i denne rapporten skiller seg fra de data som er benyttet i rapportene (KVT/ØB/2007/010) og (KVT/EB/2007/023), hvor høydedata fra terrengmodell ligger til grunn for beregningene. For hvert punkt i Norge er det regnet ut en helning mot de nærmeste gitterpunktene. I hvert av disse punktene definerer man videre en radius på 2km. Alle punktene innenfor denne radien som har en helning på over 30% blir merket. De merkede punktene blir vektet etter den inverse distansen til det aktuelle datapunktet og summert. Den resulterende summen gir RIX verdien i et punkt. Denne prosedyren blir repetert for alle punktene i Norge.

Man skal være forsiktig med hvordan man tolker RIX verdier. En legitim tolkning vil være at modellusikkerheten i forenklede modeller, altså modeller som ikke eksplisitt regner ut det turbulente atmosfæriske grensesjiktet, vil være høyere i områder med høy RIX verdi. Både mikroskalamodeller som WAsP og mesoskalamodeller som WRF faller inn under denne kategorien. En annen tolking som blir hyppig brukt er at høye RIX verdier faller sammen med et nivå på turbulensintensiteten. Dette er ikke nødvendigvis tilfellet. En åskam kan oppleve lav turbulensintensitet dersom vinden kommer langsmed åskammen, men oppleve høy turbulensintensitet dersom vinden kommer på tvers av åskammen. RIX verdie gitt her er de samme uavhengig av vindretning. Turbulensnivået avhenger derimot også av hvordan vindrosa er fordelt i forhold til lokal topografi, derfor er ikke høy RIX verdi ensbetydende med mye turbulens. Dette illustrerer at man skal utvise forsiktighet med å bruke et RIX kart til å avgjøre hvor det er gangbart å bygge ut vindkraft, da dette er en vurdering man må gjøre basert på mer lokal informasjon i form av klimatologiske data og lokal topografi.

6 Metodikk for isingsberegninger

Ising representerer en utfordring som bør vurderes i planleggingsfasen av vindkraftverk. Det er derimot gjort lite direkte målinger av ising, men en har erfart at enkelte steder kan være svært utsatte. Ising på en vindmølle vil representere en sikkerhetsrisiko. Når en betydelig mengde is er blitt dannet på rotorbladene medfører det en fare for at isen kan falle av eller slynges av dersom rotoren er i bevegelse. I områder hvor en har mye ising kan det oppstå driftsmessige problemer for et vindkraftverk. Dette kan enten skyldes at vindkraftverket tidvis må stoppes på grunn av at is medfører en sikkerhetsrisiko eller bidrar til vibrasjoner og for stor belastning eller slitasje på vindkraftverket. Eller en kan oppleve at is på bladene reduserer de aerodynamiske egenskapene til bladene og bidrar til lavere produksjon ved samme vindhastigheter og en lavere utnyttelsesgrad av vindenergien. I begge tilfeller vil ising bidra til tap av produksjon for et vindkraftverk. Økt slitasje som følger av mye ising kan også medføre kortere levetid på turbinene.

Det finnes ulike tiltak en kan iverksette når is er i ferd med å dannes på rotorbladene. Bladene kan avises på ulike måter, eller en kan velge å stoppe turbinen mens isingen pågår. Begge disse løsningene medfører tap av produksjonstid for turbinen eller krever bruk av energi for å bruke avisingsystemene.

Atmosfærisk ising kan deles inn i flere kategorier. Ising kan dannes fra vann, våt snø eller vanddamp i lufta. Vanninnholdet i lufta kan enten bestå av små skydråper, slik som tåke, eller som større regndråper. I beregningene i denne rapporten fokuserer vi på ising som skyldes små skydråper som treffer en overflate med temperatur under 0 °C. Det er antatt å være denne type ising som er den største utfordringen i utnyttelse av vindenergi i Norge. Selv om temperaturen er under 0 °C vil skyer (og tåke) ofte bestå av små underkjølte vanddråper. Disse vil umiddelbart fryse til is når de treffer en overflate.

I oppsettet av WRF benyttes det såkalte Eta Ferrier skjemaet (Rogers, et al. 2001) for mikrofysikk (skyer og nedbør). Skjemaet tar utgangspunkt i luftens vanddampinnhold, og når metning oppnås beregnes kondensat i form av vann eller is. Skjemaet gir mulighet for skyer av ulike blandinger av vann og is. Ved temperaturer under -30 °C finnes kun is, og ved temperaturer over 0 °C finnes kun vann. For temperaturer mellom -30 °C og 0 °C vil den totale vannmengden i skya være summen av vann og is. Skjemaet gjør videre beregninger av den andelen skyvann eller is som faller ut og gir nedbør i form av snø eller regn. Forholdet mellom vann og is for temperaturer mellom -30 °C og 0 °C er avhengig av temperaturen og er basert på observasjonsestimater fra Ryan (Ryan 1996).

6.1 Beregning av isingsintensitet

Mengden med is som vil avsettes på et objekt vil være avhengig av mengden med underkjølt vann som tilføres objektet. I tillegg vil objektets form også være av betydning for mengden av is som akkumuleres. For å si noe om hyppigheten for kraftig, moderat eller lett ising kan en beregne isingsintensiteten. Isingsintensiteten angir hvor stor masse is som avsettes på et standardlegeme per tidsenhet og kan i følge (ISO12494 2001) beregnes ved:

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \cdot w \cdot A \cdot V \quad (1)$$

Her er dM/dt isingsintensiteten, w er masse vann per m^3 luft, A er arealet av tverrsnittet for standardlegemet vinkelrett på vindretningen og V er vindhastighet. Isingsintensiteten avhenger i første rekke av luftens vanninnhold og vindhastighet. Høy vindhastighet og høyt vanninnhold vil gi høy isingsintensitet. Ved lave vindhastigheter vil isingsintensiteten bli lavere. Koeffisientene α_1, α_2 og α_3 representerer prosesser som kan redusere isingsintensiteten. Se for øvrig (ISO12494 2001) for en mer detaljert beskrivelse av koeffisientene.

- α_1 representerer kollisjonseffektiviteten, denne vil være lavere enn 1 dersom vanndråpene blir presset rundt objektet i stedet for å kolliderer med objektet. Små dråper og lave vindhastigheter vil gi lavere verdier for α_1 .
- α_2 representerer den andelen av skyvann som fester seg til legemet. Vi vurderer her underkjølte skydråper som gir $\alpha_2=1$.
- α_3 tar hensyn til latent og kinetisk energi som vil bidra til oppvarming av standardlegemet når vanndråper avsettes som is. Ved temperaturer godt under 0°C vil som regel $\alpha_3=1$. Dersom temperaturen er nær 0°C vil nedkjølingen av vanndråpene kunne være for liten til at de festes til legemet før de blir blåst bort. α_3 vil kunne være redusert til under 1 ved temperaturer nær 0°C .

Eta Ferrier skjemaet (Rogers, et al. 2001) har en tendens til å gi for stort innhold av is i skyene. Spesielt vil dette være tilfellet for kystnære områder hvor andelen av skyis kan være ganske lavt selv ved lave temperaturer. I beregningene av isingsintensiteten har vi derfor benyttet det totale skyvanninnholdet, det vil si summen av skyvann og skyis fra modellen. Dette vil kunne bidra til en viss overestimering av ising, men gir bedre overensstemmelse med observasjonene enn kun å benytte andelen av skyvann beregnet fra modellen.

Beregningen av isingsintensitet (dM/dt) er gjort for hvert gitterpunkt, for hvert modellnivå og for hver time med modelldata. Fra dette kan vi beregne antall timer hvor en har isingsintensitet høyere enn den foreslåtte grensen på 10g/time . Dette har gitt utgangspunkt for å lage et kart som viser hyppigheten av ising.

Hyppighet av ising viser en klar sammenheng med høyde over havet lokalt. Dette vises i f.eks (KVT/ØB/2008/005 2008) hvor sammenhengen mellom ising og høyde over havet er plottet for et utvalg av modellpunkter og også for beregninger basert på METAR data fra flyplassene i Nordland. Siden topografi ofte er underestimert og utglattet i modellen har vi benyttet en høydekorrigering av isingsberegningene basert på N50 høydedata. Dette betyr at vi tar ut data fra WRF i en høyde som tilsvarer 80m over terrenget basert på N50 høydedata og ikke som 80m over modellterrenget.

Modellberegninger for Nordland og Rogaland er tidligere validert mot METAR data fra flyplassene i de to fylkene, se (KVT/ØB/2007/024 2007, KVT/ØB/2008/005 2008). Beregningene for Nordland er også oppdatert og presentert i Harstveit et al. (Harstveit, Byrkjedal and Berge 2009). Resultatet av valideringen viser at modellen har en tendens til å overestimere hyppigheten av ising under 500 m.o.h. i forhold til isingsberegninger basert på METAR data, samtidig som vi finner bra samsvar mellom de to datasettene for høyder over 500 m.o.h. Det må bemerkes at dette er en sammenligning mellom modellberegninger, og at det ikke finnes tilgjengelige observasjoner av ising for validering av modellkjøringer.

7 Modellvalidering mot observert vindklima

Kjeller Vindteknikk har fått tilgang til måledata fra 22 ulike master i Norge. Alle mastene måler vindstyrke og vindretning i 50m høyde over bakken. Disse stasjonene ligger i hovedsak langs kysten fra Sørlandet til Finnmark. Siden man fra WRF kan ta ut tidsserier på timesformat har de målte dataene blitt sammenlignet med tidsseriene fra WRF på timesbasis.

På grunn av at WRF er en diskret numerisk modell vil det ikke være mulig å hente ut data direkte fra målestasjonspunktet. I modellkjøringene som er foretatt i sammenheng med denne rapporten er en gitteravstand på 1km brukt. Dette fører til de underliggende høydekonturene også vil være definert i dette gitteret. På denne måten vil ikke modellen kunne gjengi den nøyaktige høyden over bakken som målestasjonen ligger på, og en glattingseffekt oppstår. Resultatet er at modellen ikke vil kunne modellere den lokale akselerasjonseffekten (også kalt "speed-up") som oppstår ved lokale terrengformasjoner. For best å kunne sammenligne de observerte og modellerte vindklimaene har de fire WRF gitterpunktene som ligger nærmest den aktuelle målestasjonen blitt tatt ut. Disse fire punktene vil ligge innenfor en 1km avstand fra målestasjonen. Siden det er viktig å få med akselerasjonseffekten, har det punktet som har minst avvik i høyde over havet i forhold til observasjonspunktet blitt brukt for sammenligning med de observerte dataene.

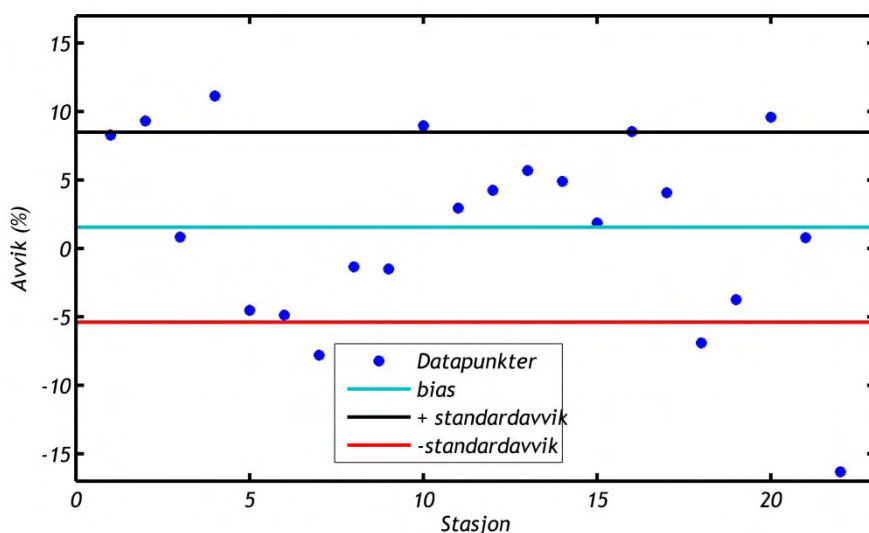
De målte dataene er anonymisert og perioder med ising har blitt filtrert bort. Tabell 5 viser en sammenligning av middelvind for 2005. Denne informasjonen er også vist grafisk i Figur 6. Ved inspeksjon av avvikene mellom observert og modellert vindklima kan en se at 91 % av stasjonene opplever et avvik innenfor 10 %, mens 55 % ligger innenfor et avvik på 5 %. Et positivt avvik vil si at det observerte vindklimaet ligger høyere i middelværdi enn det modellerte. Standardavviket mellom observert og modellert årsmiddelvind for de 22 stasjonene er på 7 %. Det er verdt å merke seg at for 65 % av stasjonene ligger de observerte verdiene over de modellerte, dette gir et midlere avvik eller positiv bias på 1.6 %. Dette kan forklares ut fra lokale akselerasjonseffekter som modellen ikke tar hensyn til. Den siste kolonnen i Tabell 5 viser høydeforskjellene mellom modellpunktet og målestasjonen. To stasjoner har mer enn 10 % avvik i middelvind. Interessant nok viser den ene av disse at modelldataene ligger 16 % over den observerte verdien. Dette kan forklares med at terrenget i dette området har stor ruhet; resultatet er at turbulensnivået øker og energi vil bli overført fra middelvinden til fluktuerende virvler. Denne effekten blir ikke korrekt gjengitt av modellen. Dersom man kombinerer mesoskala modellen WRF med en mikroskalamodell som WAsP vil forskjellen mellom målt og modellert middelvind kunne bli betydelig redusert (Berge, et al. 2006). Det er verdt å merke seg at en slik kombinasjon av metodikk også vil redusere forskjellene som oppstår som følge av høydeakselerasjon. Denne type korrigering ligger utenfor dette arbeidet. Det er videre verdt å merke seg at timeskorrelasjonen for alle stasjonene er meget god, med en median på 0.85. En timeskorrelasjon på 1 betyr det at datasettene samvarierer perfekt, mens en korrelasjon på 0 betyr at de ikke har noen samvariasjon. Kjeller Vindteknikk har erfaring fra forskjellige måleprogram, og denne erfaringen tilsier at selv for to målemaster som står i størrelsesorden 1km fra hverandre vil korrelasjonen sjelden ligge over 0.9.

I tillegg til middelvind og korrelasjon er det viktig å gjengi både retningsfordeling og hastighetsfordeling i modellen. Figur 7 viser observert og modellert vindrose for to av lokalitetene. I venstre kolonne blir to observerte vindroser vist, mens de tilsvarende modellerte vindrosene er gitt i høyre kolonne. Vindrosen er skapt ved å dele inn datasettene i 12 retningssektorer på 30 grader og 30 hastighetssektorer på 1m/s. For alle stasjonene har vi observert at vindrosen stemmer bra mellom de målte og modellerte vinddataene. Dette er

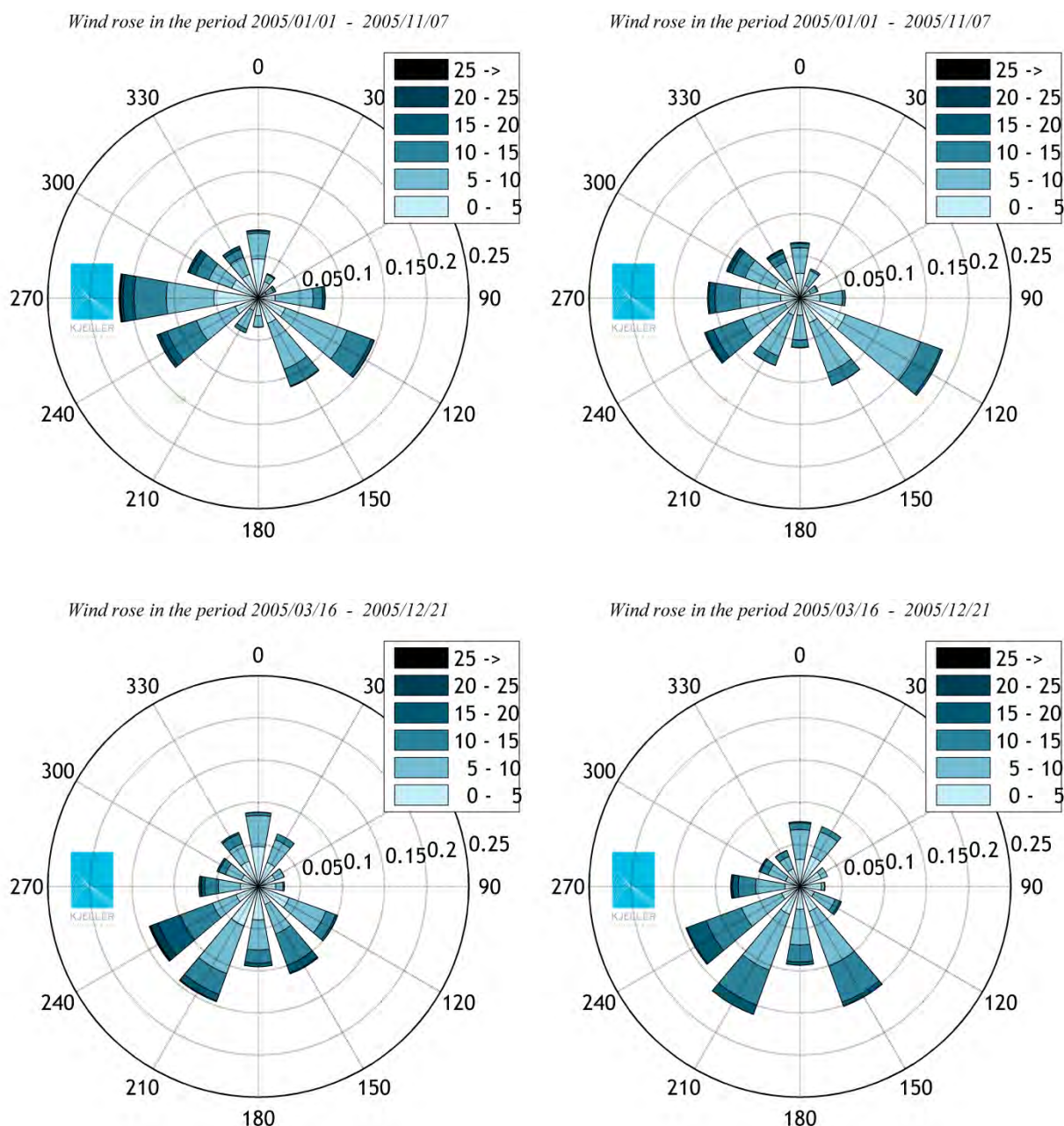
slående, da tilsvarende rapport for offshore forhold i Norge (KVT/ØB/2009/013), viste et mindre bra samsvar mellom observert og modellert vindrose. I den rapport ble modelldata sammenlignet med 10m stasjoner fra meteorologisk institutt, og den relativt dårlige overensstemmelsen ble forklart med at 10m stasjoner er veldig følsomme for lokale forhold slik som bygninger og vegetasjon. I denne rapporten har modelldata blitt sammenlignet med data fra 50m master hvor både datakvalitet og overensstemmelsen er bedre.

Tabell 5: Sammenligning av målt og modellert vindklima. Stasjonene er anonymisert. Korrelasjonen er gjort på timesbasis. Korrelasjonen mellom målt og modellert tidsserie varierer fra 0.68 til 0.91.

Stasjon	Avvik	Korrelasjon	Høydeforskjell
1	8 %	0.86	72
2	9 %	0.87	97
3	1 %	0.86	52
4	11 %	0.86	89
5	-5 %	0.85	67
6	-5 %	0.85	25
7	-8 %	0.85	-34
8	-1 %	0.85	33
9	-2 %	0.86	37
10	9 %	0.91	68
11	3 %	0.86	93
12	4 %	0.88	74
13	6 %	0.86	65
14	5 %	0.85	-2
15	2 %	0.87	16
16	9 %	0.7	53
17	4 %	0.68	43
18	-7 %	0.79	17
19	-4 %	0.78	-2
20	10 %	0.83	22
21	1 %	0.81	41
22	-16 %	0.8	-2



Figur 6: Blå punkter viser avvik mellom observert og modellert middelvind. De heltrukne linjene viser standardavvik og bias i datasettet.



Figur 7: Venstre kolonne viser observert vindrose for to stasjoner, mens den høyre kolonnen viser tilsvarende modellert vindrose.

8 Diskusjon av usikkerhet

Selv en avansert meteorologisk modell som WRF bygger på en rekke forenklinger og antakelser om fysiske og dynamiske prosesser i atmosfæren og hvordan atmosfæren påvirkes av forholdene ved bakken. Dette gir bakgrunn for usikkerheter i det endelige vindkartet. Dette er forhold en må ta i betraktning når en vurderer resultatene som framkommer i vindkartet. I det følgende vil vi beskrive de ulike kildene til usikkerhet i vindkartet. I middelvindkartet er det usikkerhetene knyttet til selve modellen og til normalårskorrigeringen som er av betydning. Dette blir behandlet i seksjonen 8.1. Usikkerheter knyttet til produksjonstap grunnet ising og metoden for produksjonsberegning er gitt separat i seksjonene 8.2 og 8.3.

8.1 Usikkerhet i vindkartet

Det vil være flere elementer som bidrar til den totale usikkerheten i vindkartet. Den totale usikkerheten i vindkartet er anslått å være 12%. Den totale usikkerheten kan i hovedsak deles i to punkter:

1. Usikkerhet knyttet til egenskaper ved modellen. Selve modellverktøyet bidrar til usikkerhet i vindestimatene. Denne usikkerheten er anslått til 10%. Bakgrunnen for usikkerheten er gitt i avsnitt 8.1.1.
2. Usikkerhet knyttet til normalårskorrigerering og beregning av årsmiddelvind. Metoden som benyttes for å korrigere vindberegningene til forventet langtidsklima vil bidra til usikkerhet. Usikkerheten er anslått til 5%. Bakgrunnen for usikkerhetsanslaget er gitt i avsnitt 8.1.2.

8.1.1 Usikkerhet til årsmiddelvind knyttet til egenskaper ved modellen

En meso-skala modell slik som WRF, vil utføre beregningene i et numerisk gitter med et endelig antall gridruter. Ideelt sett ville man ønske at avstanden mellom gitterpunktene skulle være så liten som mulig for dermed å gi best mulig nøyaktighet i beregningene. Dette vil imidlertid stille svært store krav til regnekapasitet og gjøre at praktiske beregninger ikke er gjennomførbare. Liten avstand mellom gitterpunktene stiller også større krav til modellformuleringene og tilgangen til initialdata. For en vindressurskartlegging av Norge er 1 km horisontal oppløsning et godt kompromiss mellom krav til nøyaktighet, regneressurser og hva dagens state-of-the-art meteorologiske modeller er i stand til å levere av nøyaktighet.

Modellen gir derfor middelverdier av vind, trykk, temperatur, skyer, nedbør etc for arealer som er 1km*1km og for 32 ulike høydenivåer (18m, 58m 113m, 190m osv.). Dette fører til en viss glatting av modellens resultater på horisontal og vertikal skala, og småskala effekter av terreng, ruhet, temperaturkontraster osv. vil ikke bli oppløst av modellgitteret. Fysiske prosesser på skalaer som er mindre en gitteroppløsningen vil bli parameterisert i modellen. Dette gjelder for eksempel turbulente prosesser, skyprosesser og lignende. En del av usikkerheten i modellen skyldes denne glattingen av de fysiske prosessene i gitterruter. I tillegg vil det være usikkerheter knyttet til initialverdier, randverdier etc. Det er også verdt å nevne at i 1-2 km over bakken vil vindene i stor grad være styrt av trykkgradienter, med den følge at man kan se bort ifra oppbremsingen som følge av friksjon langs bakken og bakkenær turbulens. I disse høydene vil en meso-skala modell være mer nøyaktig enn nær bakken.

Et mål på usikkerheten knyttet til egenskaper ved modellen har vi skaffet tilveie ved å sammenligne samtidige data fra 50 m høye vindmålemaster og modellen. I Kapittel 7 ble det

fastslått at standardavviket mellom observert og modellert vindklima lå på 7%. Dette gir en god pekepinne på hvor stor usikkerheten i vindkartet blir som følge av at man modellerer vindklimaet med en numerisk meso-skala modell. Det bør merkes at de 22 målestasjonene som er anvendt i valideringen er plassert i områder hvor det er interesse for å bygge ut vindkraft, og stasjonene er dermed ikke representative for hele landet. Mastene er generelt plassert på steder som er godt eksponert og gjerne i kystnære områder. For østlandsområdene generelt, i tillegg til skogsområder og områder som ligger lavere i terrenget og mindre eksponert er det ikke tilgjengelig data av god kvalitet å validere mot. Usikkerheten i vindkartet kan derfor være større i slike områder. Den totale usikkerheten knyttet til modellberegningene er anslått til 10%.

8.1.2 Usikkerhet i årsmiddelvind knyttet til normalårskorrigerings

Usikkerheten i normalårskorrigeringsen som er utført er først og fremst knyttet til lengden på tidsserien tatt fra referansedata og hvor bra den valgte korrigeringsmetoden klarer å sammenligne de to tidsseriene:

- Lengden på referansedata. Vi benytter et referansedatasett på 9 år. Det vil være en usikkerhet i hvor godt disse 9 årene representerer forventet langtidsklima.
- I Rogers et al. (Rogers, Rogers og Manwell 2005) blir en test av 12 ulike målestasjoner gjennomført. Alle målestasjonene har minst 9000 timer med data tilgjengelig. Usikkerheten i normalårskorrigeringsen blir evaluert som funksjon av timer på målestasjonen brukt for sammenligning med referansestasjonen. Ved å benytte 9000 timer (ca ett år) med data finner de at standardavviket samlet for stasjonene er på omtrent 5%. Egne undersøkelser viser at dersom timeskorrelasjonen mellom målestasjon og referansestasjonen er god (0.8 eller bedre) vil usikkerheten være så lite som 2 %, mens for en korrelasjon på 0.5 vil usikkerheten være på opp mot 6 %. Korrelasjonen mellom de finoppløste WRF punktene og den grovoppløste referansetidsserien ligger i de fleste tilfeller på over 0.8. Men med lavere verdier for områder med store terrengvariasjoner

På bakgrunn av dette anslår vi at usikkerheten knyttet til normalårskorrigeringsen av vindkartet å være 5%.

8.2 Usikkerhet i isingsberegningene

Usikkerheten knyttet til isingskartet er klart større enn usikkerhetene i vindkartet. Oppsummert er de viktigste usikkerhetene knyttet til isingsberegningene:

- Tidligere validering (KVT/ØB/2007/024 2007) og (KVT/ØB/2008/005 2008) viser at ising gjerne er overestimert for områder opp til 500 m.o.h.
- I innlandsområder kan ising være overestimert som følge av:
 - skydråpene har mindre diameter enn for kystnære områder,
 - skyene har større andel av skyis enn for kystområdene,
 - dråpeavsetning over skog og for eksponerte høydedrag kan være underestimert, noe som bidrar til mer skyvann tilgjengelig for ising.

I avsnittene nedenfor har vi beskrevet disse usikkerhetene i noe mer detalj.

Skydanning og utfelling av nedbør er koblet til fenomener på veldig liten skala i atmosfæren og en del av usikkerhetene er knyttet til parameteriseringen av disse effektene i modellen. For WRF finnes det flere mulige parameteriseringer av mikrofysikken til skyer og nedbørsprosesser, med ulik grad av kompleksitet. Enkelte av disse parameteriseringene er så komplekse at det vil gi en betydelig økning i den totale beregningstiden for modellen. Vi har i denne simuleringen benyttet Eta Ferrier skjemaet for mikrofysikk (Rogers, et al. 2001). Denne parameteriseringen beregner skyer som blandet fase av både flytende vann og is. Vår erfaring viser at dette skjemaet gir et godt kompromiss mellom regnetid og kompleksitet.

Vi har benyttet inngangsdata fra FNL for hver 6. time i modellkjøringen. Dette er data med forholdsvis grov horisontal oppløsning på 1 grad. Modellsimuleringene tar inn data fra FNL som randverdier. Eventuelle usikkerheter i fuktighetsinnholdet fra FNL dataene vil også bidra som usikkerhet i modellberegningene. FNL data er basert på observasjoner som er matet inn i en numerisk modell. Det blir derimot gjort lite observasjoner av den vertikale fuktighetsfordelingen. For randverdiene vil det derfor være større usikkerhet knyttet til fuktighetsprofiler enn for profiler av vind og temperatur (Kistler, et al. 2001). En viktig årsak til at vi lar modellberegningene kjøre med 3 timer spin-up tid er at det er viktig for å etablere mer realistiske fuktighetsfelt og dermed også realistiske skyfelter før modellresultater hentes ut for vindressurskartleggingen.

Beregning av ising følger (ISO12494 2001). Denne standarden vil gi en del tilfeller med svært små verdier for isingsintensitet. Den er derfor naturlig å sette en nedre grense for isingsintensiteten. I denne rapporten har vi benyttet en nedre grense for isingsintensiteten (dM) på 10g/h for at det skal regnes som en isingsepisode. Dette tilsvarer at det dannes et islag på ca 0.5mm på et standardlegeme i løpet av en time. Det vil også være en følsomhet i valget av denne grensen i datasettet. Dersom vi velger en høyere grenseverdi vil ising inntreffe sjeldnere, dersom vi velger en lavere verdi vil ising inntreffe mer hyppig.

Det er en klar sammenheng mellom topografi og hyppighet av ising, men det er også geografiske forskjeller. Områder i samme høyde over havet kan være mer eller mindre eksponert for ising. Fjell som ligger nær kysten vil ofte være mer eksponert for ising enn fjell som ligger i le av disse. Modellen er satt opp med en horisontal oppløsning på 1km * 1km. Dette bidrar til en glatting av modellterrenget. Dette vil videre medføre at eksponerte høydedrag ofte vil få en lavere høyde i modellen enn i virkeligheten, modellen vil derfor gi noe mindre ising på disse eksponerte høydedraga. For lite utfelling av skyvann ved de eksponerte høydedraga vil også medføre at det er mer skyvann tilgjengelig for utfelling for høyder som ligger mer i le av de eksponerte høydedraga og følgelig bidra til større verdier av ising disse stedene. Eksponerte høydedrag vil relativt sett få for lite ising, mens høydedrag som ligger mer i le vil få for mye ising. Vi korrigerer til en viss grad for dette ved å benytte en justering av topografien mot N50 data.

I landskap over dalfører og skog vil gjerne dråpeavsetning på underlaget være en effektiv prosess som fjerner skyvann fra atmosfæren. Dette er en effekt som ikke er implementert i WRF. Dette kan bidra til at WRF gir for mange isingstimer i terreng med stor overflateruhet slik som skogslandskap.

Kystnære områder karakteriseres ofte av en stor andel nydannede skyer med høyt vanninnhold og lite skyis. Skydråper er i gjennomsnitt også større i maritime skyer sammenlignet med skyer over innlandsområder. Vi har i denne rapporten benyttet det totale innholdet av skypartikler i væskefase og isfase for å beregne skyer og ising. Dette fordi det enkle empiriske forholdet mellom temperatur og andel skyvann og skyis som er benyttet i Eta Ferrier skjemaet har en tendens til å gi for stor andel skyis. Underkjølt skyvann vil veldig lett fryse fast til enhver overflate, mens iskrystaller vil i mindre grad feste seg og bidra til isingen. Å benytte det totale

innholdet av skypartikler kan derfor bidra til en overestimering av skyvannet tilgjengelig for ising, da særlig i innlandsområder hvor andelen av skyis vil være større.

Det er i beregningene benyttet et dråpetall på 100 dråper per cm^3 . Dette er basert på enkelte observasjoner i kystnære områder. Dette er ekvivalent med store skydråper. For innlandsområder vil typisk dråpetallet være større og diameteren til skydråpene vil være tilsvarende mindre. Store skydråper vil gi en høyere verdi for kollisjonseffektiviteten (α_1) enn mindre skydråper. Dette kan bidra til en overestimering av isingen i innlandsområder.

Parameteriseringen av vertikal blanding av luftmassene i grenselaget vil bidra til usikkerhet i isingsberegningene. Dette er knyttet til den vertikale profilen av temperatur og fuktighet. Graden av vertikal blanding avhenger av stabilitetsforholdene, og særlig i tilfeller med stabile grenselag kan parameteriseringen ha vanskeligheter med å beregne den vertikale blandingen korrekt. Dette kan bidra til feil også i isingsberegningene. Det er i Harstveit et al. (2009) vist at hyppigheten av ising er overestimert av under 500 m.o.h. Dette kan være et resultat av for stor vertikal blanding i modellen.

8.3 Usikkerhet i produksjonsestimatene

Det er flere momenter som bidrar til usikkerhet i produksjonsestimatene. Den totale usikkerheten i produksjon anslås til å være av størrelsesorden 25%. Oppsummert vil flere momenter bidra til usikkerhet i produksjonsestimatene:

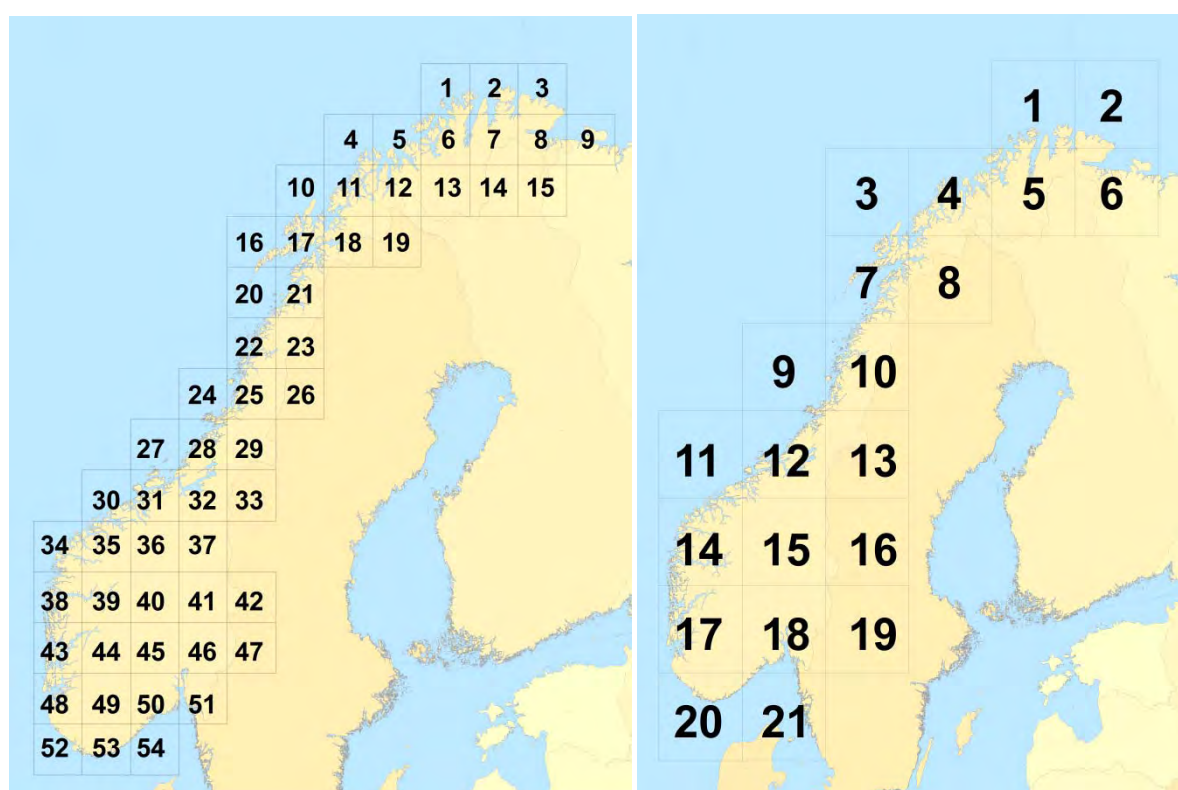
- Usikkerheten i beregning av vindhastighet og normalårskorrigerering av denne. Usikkerhetene knyttet til vindberegningene er gitt i avsnitt 8.1 og 8.1.2. Sammenhengen mellom produksjon og vindhastighet er ikke lineær. I området mellom 5-13 m/s vil effekten være veldig følsom for vindhastigheten. Dette gir at 10% usikkerhet knyttet til vindhastighet kan gi 20% usikkerhet i produksjon.
- Weibulltilpasning. Produksjonsberegningene er basert på en Weibulltilpasning av hastighetsfordelingen for hvert modellpunkt. Hastighetsfordelingen følger typisk en weibullfordeling, men det kan også være tilfeller hvor hastighetsfordelingen er dårlig Weibulltilpasset og denne da ikke er representativ for hastighetsfordelingen. Weibulltilpasningen er gjort for en relativt kort tidsserie på ett år. Det vil være forskjeller i hastighetsfordelingen for ett år i forhold til et annet, som kan gi ulik verdi for de estimerte weibullparametrene fra ett år til et annet.
- Det er i beregningene benyttet en fiktiv turbin med en fiktiv effektkurve hvor det også er tatt hensyn til at en kan benytte en turbin med høyere IEC klasse i områder med lavere middelvind. En videre vurdering av ulike lokaliteter med hensyn på f.eks ekstremvind kan bidra til at en likevel må benytte en turbin med lavere IEC klasse som dermed gir lavere produksjon.
- Ising og turbulens. Det er i kartene over produksjon ikke beregnet tap som følge av ising eller turbulens. Områder med stor terrengkompleksitet er områder hvor turbulens kan være et problem og kan bidra til produksjonstap. Det vil være knyttet produksjonstap også til ising, dette er ikke beregnet i produksjonsestimatene. For områder med hyppig ising kan produksjonstapene være store dersom det ikke benyttes avising eller antiisingssystemer.
- Skog. Det er knyttet større usikkerhet til produksjonsestimatene over skog. KVTs erfaring viser at det kan være en del turbulens knyttet til vind over skog. Eventuelt

produksjonstap på grunn av høyere turbulens over skogsområder er ikke tatt med i produksjonsberegningene.

- Tap. I en operativ vindpark vil oppleve ulike typer tap. Vi har i beregningene lagt til grunn et gjennomsnittelig tap på 15% som kan relateres til vaketap i en vindpark, elektrisk tap, slitasje og stans i forbindelse med vedlikehold. Dette er verdier som vil variere fra en enkelt vindpark til en annen, men er et estimat som er i overensstemmelse med erfaringene en har fra norske vindparker.

9 Presentasjon av resultater

Hovedresultatene i dette arbeidet blir presentert i form av kartbøker, og derfor er de ikke inkludert i denne rapporten. I underseksjonene nedenfor blir hver enkelt av de ulike kartbøkene kort beskrevet og referanse til den aktuelle filen blir gitt. Det er laget to sett med kartbøker, ett med målestokk 1:600.000 og ett med målestokk 1:1.200.000. For å dekke hele Norge med kart i målestokk 1:600.000 har det blitt nødvendig med 54 kartblad, for målestokk 1:1.200.000 har vi benyttet 21 kartblad. Figur 8 viser en oversikt over kartbladene for to kartbøker av ulik målestokk.

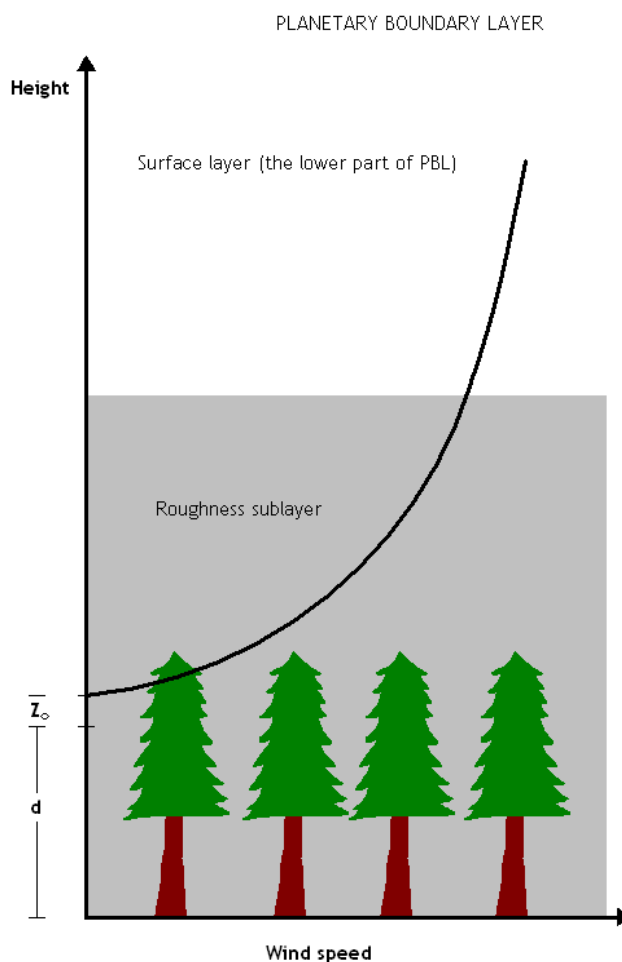


Figur 8 Oversikt over kartblad i kartbok med målestokk 1:600.000 (venstre), og for kartbok med målestokk 1:1.200.000 (høyre).

9.1 Normalårskorrigert middelvind

I kartbok 1a-1c blir normalårskorrigert middelvind presentert for høydene 50m, 80m og 120m. Metoden for normalårskorrigering av middelvinden fra 2005 er beskrevet i Kapittel 3. Høyden representerer en høyde over nullplansforskyvningen. Vegetasjon tar ikke opp plass i vertikalen i modellen og er kun definert ved hjelp av en overflateruhet. Nullplansforskyvningen representerer derfor modellens bakkenivå. Over nullplansforskyvningen kan vindprofilen beskrives av klassisk vindprofilteori, mens det under denne høyden fortsatt råder stor usikkerhet til beskrivelse av vindprofilen. Nullplansforskyvningen er typisk antatt å være i størrelsesorden 80% av vegetasjonshøyden (Kaimal 1994). En illustrasjon av dette er gitt i Figur 9. I områder med høy skog på for eksempel 15m, vil nullplansforskyvningen derfor tilsvare en 12m høyde. Vindkartet som er gitt som 80m over nullplansforskyvningen vil her representere 80m over skogtoppene eller ca 92 m over bakkenivå. For områder med lite og lav vegetasjon

har vi antatt at nullplansforskyvningen er nær null. Vindkartet som er vist som 80m over nullplansforskyvningen vil derfor da tilsvare 80m over bakkenivå. Det er først og fremst i områder med mye skog at nullplansforskyvningen vil påvirke tolkningen av den faktiske høyden til vindkartet over bakken.



Figur 9: Illustrasjon av nullplansforskyvning som følge av skog. Nullplansforskyvningen d er ofte antatt å være omtrent 80% av vegetasjonshøyden.

9.2 RIX kart

I kartbok 2a blir RIX verdier for Norge gitt. Beskrivelse av metode for RIX beregning og tolkning av RIX verdier blir gitt i Kapittel 5.

9.3 Isingskart

I kartbok 3a er hyppigheten (antall timer per år) av ising i 80m høyde over bakkenivå vist. Ising er definert som de periodene hvor vi har beregnet en isingsrate eller isvekst på mer enn 10g/time på et standardlegeme definert etter (ISO12494 2001). Dette tilsvarer dannelse av et islag på ca 0.5mm i løpet av en time på standardlegemet. Metoden som er brukt for å beregne ising er presentert i Kapittel 6.

9.4 Forventet brukstid for produksjon

Produksjon er beregnet fra estimert weibullfordeling gitt en effektkurve som beskrevet i Kapittel 4. Gitt at man har tilgang til en effektkurve, middelvindnivå og Weibull formfaktor, kan en beregne forventet produksjon. Fra denne forventede produksjonen kan man beregne forventet brukstid. Forventet produksjon i 80m høyde er vist i kartbok 4a.

10 Sammendrag

Vindressursene for hele Norge er kartlagt ved hjelp av mesoskala modellen WRF med en horisontal oppløsning på 1km * 1km. Resultatene er presentert som kart for normalårskorrigert middelvind i 50 m, 80 m og 120m høyde. Modellresultatene er validert ved å sammenligne med 22 målemaster med 50m høyde. Valideringen viser at midlere vindhastighet beregnet fra modell har en usikkerhet (ett standardavvik) på 7% for kystområdene. Vindhastigheten beregnet i modellen representerer en middelværdi over kvadratkilometer stor gridruter. Innenfor hver gridrute kan det da gjerne være områder som har høyere vindhastighet en beregnet for gridruta, men også områder knyttet til lavere vindhastigheter. Dette er variasjoner av mindre skala enn det modellen kan beskrive og skyldes finere skala variasjoner i topografi eller overflate (markslag). Valideringen er gjort på bakgrunn av stasjoner i kystområdene hvor det har vært interesse for utbygging av vindkraft. Modellen er ikke validert mot observasjoner for innlandsområder og skogsområder. Det forventes å være større usikkerhet knyttet til vindkartet for slike områder. Den totale usikkerheten i det normalårskorrigerte vindkartet er anslått å være 12%.

Det er utarbeidet kart som illustrerer terrengkompleksitet ved hjelp av såkalte RIX verdier. Usikkerheten i modellresultatene forventes å være større i områder med store RIX verdier hvor terrengvariasjonene er store. RIX verdiene kan også illustrere potensialet for turbulens ved at områder med store terrengvariasjoner potensielt kan ha større problemer med turbulens. Turbulensnivået avhenger derimot også av hvordan vindrosa er fordelt i forhold til lokal topografi, derfor er ikke høy RIX verdi ensbetydende med mye turbulens.

Modellberegningene er videre benyttet for å anslå hyppigheten av ising. Det er utarbeidet kart som viser hyppigheten av ising beregnet til 80m over bakkenivå. Det er tidligere vist at isingsberegningene har gjerne overestimerer hyppigheten av ising opp til 500 m over havet. Mens sammenligning av ising med beregninger gjort på bakgrunn av flyplassobservasjoner viser god overensstemmelse for høyder større enn 500m over havet. For innlandsområder og skogsområder antas det at isingskartet overestimerer hyppigheten av ising noe. Det er derfor knyttet klart større usikkerhet til isingskartet enn til vindkartet.

Forventet produksjon for hele landet er beregnet ved å benytte en Weibulltilpasning av data i alle gitterpunkter og å benytte en konstruert effektkurve som representerer en typisk turbin for tre turbinklasser. Det er knyttet større usikkerhet til kartene som viser produksjon enn til vindkartene. Den totale usikkerheten i produksjonskartet er anslått å være 25%. Produksjonsberegningene er videre benyttet i en potensialstudie hvor fylkesvis vindkraftpotensial er blitt beregnet. Potensialstudiet identifiserer alle områder som er egnet for vindkraft med hensyn på verneområder, avstand til bebyggelse, terrenghelning, landskapstyper, i tillegg til å vurdere om områdene er egnet for en vindkraftutbygging med hensyn til selve vindressursene.

Bibliografi

- Berge, E, F Nyhammer, L Tallhaug, og O Jacobsen. «An evaluation of the WASP model at a coastal mountainous site in Norway.» *Wind Energy*, 9, 2006: 131-140.
- Berge, E., Ø. Byrkjedal, Y. Ydersbond, og D. Kindler. «Modelling of offshore wind resources. Comparison of a meso-scale model and measurements from FINO 1 and North Sea oil rigs.» *EWECC, 19th of March*. Marseille, France, 2009.
- Bergström, H., and N. Juuso. "A study of valley winds using the MIUU meso-scale model." *Wind Energy* 9, 2006: 109-129.
- Bowen, A. J., og N. G. Mortensen. «Exploring the limits of WASP the wind atlas analysis and application program.» *Proceedings of EWECC*. Gothenburg, Sweden, 1996.
- Harstveit, K. "Estimating long-term wind distribution from short-term data set using a reference station." *European Community Wind Energy Conference, EWECC*. London, 2004. 87-90.
- Harstveit, Knut, Øyvind Byrkjedal, og Erik Berge. «Validation of Regional In-Cloud Icing Maps in Norway.» *IWAIS2009, Andermatt, September 8 to 11*. 2009.
- Hofstad, Knut, Kjersti Mølmann, og Lars Tallhaug. *Vindkraftpotensialet i Norge*. NVE rapport 17-2005, NVE, 2005, 41.
- IEC-61400-1. *Wind turbines - Part 1: Design requirements*. IEC, 2005.
- ISO12494. «Atmospheric Icing on Structures.» 2001.
- Kaimal, J.C., Finnigan, J.J. *Atmospheric Boundary Layer Flows - Their Structure and Measurements*. New York: Oxford University Press, 1994.
- Kistler, R, et al. «The NCEP-NCAR 50 year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation.» *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001: 247-267.
- Klemp, J. B., W. C. Skamarock, and J. Dudhia. *Conservative split-explicit time integration methods for the compressible non-hydrostatic equations*. 2000. <http://www.wrf-model.org>.
- KVT/EB/2007/023. "Vindkart for Nordland." KVT Report; Berge, E., Kjeller, Norge, 2007.
- KVT/ØB/2007/010. «Vindkart for Rogaland.» KVT Report; Byrkjedal, Ø. and Berge, E., 2007.
- KVT/ØB/2007/024. *Isingskart for Rogaland*. KVT report, Ø. Byrkjedal, KVT, 2007.
- KVT/ØB/2008/005. «Isingskart for Nordland.» KVT Report, Byrkjedal Ø., 2008.
- KVT/ØB/2008/034. «Vind- og isingskart for Finnmark.» KVT Rapport, Byrkjedal, Ø, Kjeller, Norge, 2008.
- KVT/ØB/2008/043. «Offshore vindkart for Nordsjøen og kyststrekningen Lista-Stadt.» KVT Rapport: Byrkjedal, Ø., Kjeller, Norge., 2008.
- KVT/ØB/2009/013. *Vindkart for Norge: Offshore vindressurser*. KVTRapport, Byrkjedal, Ø., Åkervik, E. and Berge, E., 2009.
- Michalakes, J., S., Dudhia, J. Chen, L. Hart, J. Klemp, J. Middlecoff, og W. Skamarock. «Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model.» *Developments in Teracomputing: Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use*

- of High Performance Computing in Meteorology*. Singapore: Eds. Walter Zwiefelhofer and Norbert Kreitz. World Scientific, 2001. 269-27.
- Rogers, A. L., J. W. Rogers, og J. F. Manwell. «Uncertainties in Results of Measure-Correlate-Predict Analyses.» *American Wind Energy Association*. Denver, 2005.
- Rogers, E, T Black, B Ferrier, Y Lin, D Parrish, og G DiMego. «Changes to NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis.» *Technical Prosedures Bulletin*, November 2001.
- Ryan, B F. «On the global variation of precipitating layer clouds.» *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996: 53-70.
- Skamarock, W. C., et al. *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. Technical Note NCAR/TN-475+STR, Boulder, U.S.: NCAR, 2008.
- Tallhaug, L., and T. A. Nygaard. "The potential of wind energy in Sør-Trøndelag, Norway." *European Community Wind Energy Conference*. Travemünde, Germany, 1993. 8-12.
- Tambke, J. «Micro- & Meso-Scale Models for Offshore Wind Speed Profiles.» 2009. <http://www.ewec2009proceedings.info/proceedings/>.
- WASP Manual. «WASP Users Guide Vol 2: Wind Analysis and Application Program (WASP).» 1993.

Denne serien utgis av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)

Utgitt i Oppdragsrapportserie A i 2009

- Nr. 1 Kristin Skei (red.): Nidelva og Gaula. Tilstandskartlegging av elvebredden innen Trondheim kommune (301 s.)
- Nr. 2 Erik Holmqvist: Flomberegning for Middøla, 016.H1Z (29 s.)
- Nr. 3 Erik Holmqvist: Flomberegning for Busneselva, 016.G2 (18 s.)
- Nr. 4 Kari Svelle Reistad og Demissew Kebede Ejibu: Hydraulisk beregning av Busneselva fra RV 37 til Tinnsjø (42 s.)
- Nr. 5 Kjetil Melvold: Kvennfossen kraftverk. Virkninger på isforhold
- Nr. 6 Per Ludvig Bjerke: Hydrologisk undersøkelse i forbindelse med bygging av ny gang- og sykkelbru over Fjelna ved Vinjeøra (14 s.)
- Nr. 7 Jim Bogen, Truls Erik Bønsnes, Margrethe Elster, Hans Christian Olsen: Faktorer som har betydning for sandflukt i Vestre Vågåvatn (38 s.)
- Nr. 8 Kari Svelle Reistad: Hydraulisk beregning av Middøla ved Middøla bru (36 s.)
- Nr. 9 Knut Hofstad: Vindkart for Norge (43 s.)