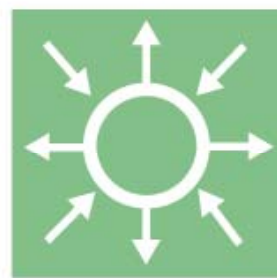


Konsekvenser för vindkraften i Sverige av klimatförändringar

Elforsk rapport 07:33



Gunnar Hovsenius, Erik Kjellström

Maj 2007

Konsekvenser för vindkraften i Sverige av klimatförändringar

Elforsk rapport 07:33

Gunnar Hovsenius, Erik Kjellström

Maj 2007

Förord

Denna studie har bekostats av Statens Energimyndighet men bygger också i väsentliga delar på data som framtagits som ett uppdrag inom Elforsks projekt 6304, "Tänkbara konsekvenser för den svenska energisektorn av klimatförändringar - effekter, sårbarhet och anpassning".

De beräkningar som presenteras i rapporten över hur vindens energiinnehåll kan förändras till följd av en pågående klimatförändring har genomförts vid Rossby Centre vid SMHI. Erik Kjellström vid Rossby Centre har ansvarat för beräkningarna av vinddata samt givit värdefulla textförslag och kommentarer i utarbetningen av denna rapport som i övrigt sammanställts av Gunnar Hovsenius, Hovsenius Konsult AB.

Sammanfattning

I en tidigare studie för Elforsk har SMHI beräknat att en sammanlagd installerad vindkrafteffekt på 4000 MW i medeltal skulle generera 10 TWh el per år med en beräknad osäkerhet av ± 5 % för perioden 1992 – 2001. Detta bygger på ett scenario där 56 större anläggningar ingår och där den installerade effekten har en tydlig tyngdpunkt i havsbaserade anläggningar och till södra Sverige.

För att utreda om en klimatiförändring på 20 – 30 års sikt påverkar förutsättningarna för vindkraft har jämförelser gjorts med ovan nämnda studie. De framtidsbilder över vindens energiinnehåll som tagits fram här bygger dels på beräkningar som gjorts vid Rossby Centre, SMHI, dels på utblickar mot andra studier.

Beräkningarna vid Rossby Centre utgår från tre av de emissionsscenarier för växthusgaser som framtagits av FN: s klimatpanel, IPCC. Scenarierna som benämns A1B, A2 och B2 skiljer sig endast marginellt åt fram till 2030. Vidare bygger beräkningarna på en regional klimatmodell som framtagits vid Rossby Centre och som har fått stor vetenskaplig acceptans. Den regionala modellen har i detta fall utgått från randvillkor som genererats av två globala klimatmodeller vilka tagits fram av Max-Planckinstitutet för meteorologi i Hamburg.

De lärdomar som gjorts i denna studie kan sammanfattas i följande fyra punkter:

1. Den producerade elenergin kan på årsbasis bli 5 – 20 % högre om 20 – 30 år än den som tidigare beräknats för åren 1992 – 2001; d.v.s. öka från cirka 10 TWh upp till möjligen 12 TWh per år. Ett långsiktigt ökande energiinnehåll i vinden för Östersjöregionen förefaller vara en trend i flera av de globala klimatmodeller som fått stor vetenskaplig betydelse.
2. Vindens energiinnehåll har under 1900-talet för Sverige och för Östersjöregionen varierat med ungefär ± 10 % runt dess medelvärde. Åren 1992 – 2001 utgörs av en period där vindens energiinnehåll minskat. Om den beräknade relativa ökningen om 20 – 30 år kan hänföras till en följd av klimatutvecklingen eller till naturliga variationer i vädret är svårt att uttala sig om. Att de flesta globala modeller visar att vindens energiinnehåll i Östersjöregionen långsiktigt kan komma att öka får, tillsammans med den här gjorda studien, tas som en indikation på att vindens energiinnehåll snarare kan komma att öka än att minska.
3. Förekomsten av så höga vindstyrkor att vindkraftanläggningar behöver stängas av (25 m/s eller däröver) har för kontrollperioden 1961 – 1990 beräknats till storleksordningen 0,1 % av årets timmar. De beräkningar som gjorts för i denna studie ger ett något osäkert underlag när det gäller att bedöma risken för hård vind. Det kan vara så att frekvensen av vindar på över 25 m/s om 20 – 30 år är ungefär densamma som idag, men det kan också vara så att den är ända upp till fördubblad.

De effektbortfall som kan uppkomma på grund av hård vind har i en tidigare studie beräknats till mellan 400 och 750 MW och är i princip förutsägbara med några timmars framförhållning.

4. Nedisning av vindkraftanläggningar kan för kontrollperioden 1961 – 1990 uppgå till ett par hundra timmar per år i södra Sverige. I takt med ökad uppvärmning och därigenom ett mindre antal dagar med temperatur under fryspunkten minskar risken för nedisning. För perioden 2050 – 2100 kan risken för nedisning vara helt försumbar såväl i södra Sverige som runt Östersjön. För den period om 20 – 30 år framåt som är i fokus för denna studie har några nedisningsprognoser inte gjorts. En gissning är dock att nedisningen successivt kommer att minska och närma sig den situation som antyds för den senare hälften av detta sekel.

Summary

In an earlier report to Elforsk SMHI has calculated that a total installed effect of 4000 MW in wind mills in Sweden will as an annual average generate approximately 10 TWh of electricity during the period of 1992 – 2001. These estimates has an uncertainty of ± 5 %. The calculations are related to a scenario with 56 larger wind mill farms of which an assential part is located to the southern part of Sweden and to off shore installations.

This study is aimed to investigate if a climate change in a future of 20 – 30 years from now will influence the wind power generation compared to the earlier study. The views of the future wind energy which are presented in this study are partly based on calculations performed at Rossby Centre, SMHI, partly on other reported studies.

The calculations performed at Rossby Centre originate from three of the emission scenarios – A1B, A2 and B2 - presented by the International Panel on Climate Change, IPCC. The differences between these scenarios are marginal for the next 20-30 years. The calculations are also based on a regional climate model developed at the Rossby Centre, which has been widely accepted in the science. The boundary conditions used to the regional model are generated from two global circulation models developed at Max-Planck Institute for Meteorology in Hamburg.

The learnings in this study is concluded in the following four points:

1. The generation of electricity from wind mills may increase by 5 – 20 % within a period of 20 – 30 years from now, compared to the period 1992 – 2001 or from 10 up to about 12 TWh per annum. A long-term increase of the wind energy in the region of the Baltic Sea seems to be a trend in several of the scientific well reputed global circulation models.
2. The energy content of the wind has during the last century varied approximately with ± 10 % in Sweden and in the region of the Baltic Sea. For the period of 1992- 2001 the energy content of the wind however decreased. If the estimated increase in wind energy can be related to a climate change or to natural weather variations is difficult to have a clear opinion about. The number of global circulation models which predict a long-term increase in the wind energy for the region of the Baltic Sea, together with the results in this study, is here considered as an indication of an increased energy content.
3. The occurence of wind speeds of such a magnitude that the wind mills must shut down (25 m/s or more) has for the period of 1992 - 2001 been calculted to about 0,1 % of the hours during a year. The calculations performed in this study give an uncertain answer concerning the risks of such high wind speeds. The frequence may be as it is today, but can also be the double.

4. The occurrence of icing on wind turbines is for the period 1961-1990 in the range of a few hundred hours per year in the southern part of Sweden. A consequence of an increased temperature is a reduction in the number of days with temperatures below the freezing point. This will reduce the risk for icing on wind turbines and for the period of 2050 – 2100 the risk may be negligible both in the southern part of Sweden and in the region of the Baltic Sea.

Innehåll

1	Bakgrund, avgränsning och jämförelseobjekt	1
2	Målet för denna studie	3
3	Beräknad produktion idag om den installerade effekten var 4000 MW	3
3.1	Databas med hög upplösning	3
3.2	Beräknad vindkraftproduktion	3
3.2.2	Beräknad varaktighet av den producerade effekten	5
3.2.3	5	
	Den beräknade produktionen är störst under senhösten och vintern.....	5
3.2.4	Effektändringarna på timbasis har beräknats bli stora i södra och mellersta Sverige	7
4	Vindens energiinnehåll har varierat mellan årtiondena	9
4.1	Området som närmast motsvarar Danmark.....	11
4.2	Området D som motsvarar södra Götaland.....	11
4.3	Delar av området B	12
4.3.1	Delområdet Härnösand – Bergen – Stockholm	12
4.3.2	Delområdet Härnösand – Göteborg – Stockholm	13
5	Kommer ändringar i klimatet att påverka vindens energiinnehåll till 2030?	14
5.1	Scenarier som kan påverka det framtida klimatet.....	14
5.2	Globala modeller beskriver de storskaliga förändringarna och ger grunden till att regionala förändringar kan beräknas	16
5.3	Framtida förändring i vind över norra Europa från tidigare beräkningsexperiment.....	17
5.3.1	Vindändring enligt globala klimatmodeller	17
5.3.2	Vindändring enligt en regional klimatmodell	18
5.4	SMHI: s beräkningar för denna studie över hur vindarna förändras	19
5.4.1	Utvärdering av den regionala klimatmodellen i dagens klimat ...	19
5.4.2	Avgränsningar och förutsättningar	20
5.4.3	Beräknad förändring av vindens energiinnehåll	21
5.4.4	Beräknad risk för driftavbrott på grund av hård vind.....	23
6	Risk för nedisning av svenska vindkraftverk	24
6.1	Vad vi vet om förekomsten idag av nedisning	24
6.2	Olägenheter av nedisning	25
6.3	Möjlighet finns att minska nedisningen genom uppvärmning av rotorbladen	26
6.4	Hur förändras riskerna för nedisning om klimatet ändras?	26
7	Lärdomar som denna studie givit	28
8	Referenser	30

BILAGA A

VINDENS BERÄKNADE ENERGIINNEHÅLL

BILAGA B

BERÄKNAD RISK FÖR VINDSTYRKOR ÖVER 25 RESPEKTIVE 21METER PER SEKUND

1 Bakgrund, avgränsning och jämförelseobjekt

Riksdagens etappmål för vindkraft är att elproduktionen år 2015 ska kunna uppgå till 10 TWh el. I början av år 2006 fanns det cirka 760 vindkraftverk i Sverige. Utgående från den senast tillgängliga driftstatistiken producerade dessa verk på årsbasis cirka 0,94 TWh.

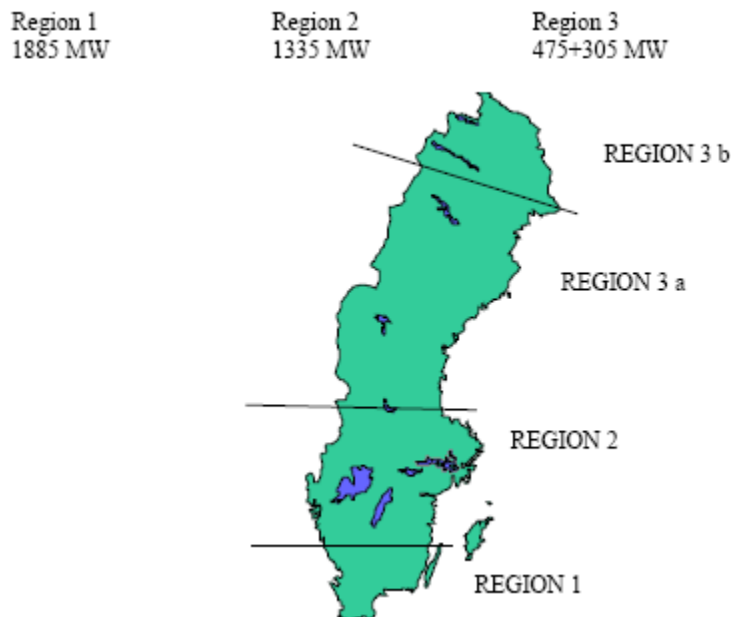
De anläggningar som hittills byggts har i betydande grad lokaliserats till södra Sverige och kustområdena. Detta framgår av figur 1.1 och förklaras dels av att vindarna där ofta har ett högre energiinnehåll än inne i landet, dels av att elförbrukningen har sin tyngdpunkt i Götaland och Svealand.



Figur 1.1. Vindkraften i Sverige har hittills koncentrerats till södra Sverige och dess kustområden.

I Elforsks rapport 04:34 [Ref.1] definieras ett huvudscenario för vindkraftens utbyggnad till en installerad effekt av 4000 MW. I scenariet ingår 56 större anläggningar, definierade som en stor grupp eller flera mindre närbelägna grupper av vindkraftverk. Den fördelning av installerad effekt på olika regioner som ingår i huvudscenariot framgår av figur 1.2. Omkring 40 % av anläggningarna är havslokaliserade med en installerad effekt på mellan 50 och 300 MW vardera och svarar i scenariet för 75 % av den totalt installerade effekten. I lokaliseringen har förutom tillgång på vindenergi också hänsyn tagits till de tre nationella överföringssnitten för överföring av elektrisk effekt.

I nämnda studie [Ref. 1] har det antagits att vindkraftanläggningarnas navhöjd är 70 m för landbaserade anläggningar och 80 m för havsbaserade.



Figur 1.2 Den fortsatta vindkraftutbyggnaden kommer enligt ett huvudscenario i rapporten 04:34 från Elforsk att i huvudsak växa till i södra Sverige och dess kustområden.

De beräkningar som gjordes i Elforsks rapport 04:34 för huvudscenariot visade att man kan producera cirka 10 TWh el per år; d.v.s. uppfylla de politiska målen för år 2015.

De jämförelser som görs i denna studie över vindkraftens eventuella förändringar till följd av ett annat klimat utgår från Elforsks rapport 04:34 och dess huvudscenario enligt figur 1.2 ovan.

Att inkopplingen av vindkraftanläggningarna sker mot ett regionnät har varit en förutsättning för denna studie, som således inte innehåller några analyser över hur en förändrad vindkraftssituation påverkar stabiliteten för mindre nät och vilka konsekvenser detta kan få.

2 Målet för denna studie

Målet för denna studie är att beskriva om och hur en klimatförändring på 20 – 30 års sikt påverkar vindarna över Sverige och därmed förutsättningarna för vindkraft. De faktorer som belyses är tänkbara förändringar dels för årsproduktionen, dels för riskerna för driftavbrott i form av hård vind samt nedisning.

3 Beräknad produktion idag om den installerade effekten var 4000 MW

3.1 Databas med hög upplösning

I Elforsks rapport 04:34 har vindens energiinnehåll på olika platser beräknats med en databas som framtagits av SMHI och som täcker åren 1992 – 2001. Den rumsliga upplösningen är 11x11 km och tidsupplösningen 1 timma. Osäkerheten i enskilda värden av vindhastigheten har av SMHI bedömts vara ca $\pm 10\%$.

I databasen har vindens hastighet beräknats för vindkraftanläggningarnas navhöjd, som antagits vara 70 m för landbaserade anläggningar och 80 m för havsbaserade.

3.2 Beräknad vindkraftproduktion

Vindens effektinnehåll per ytenhet kan enligt Elforsks rapport 04:34 uttryckas som

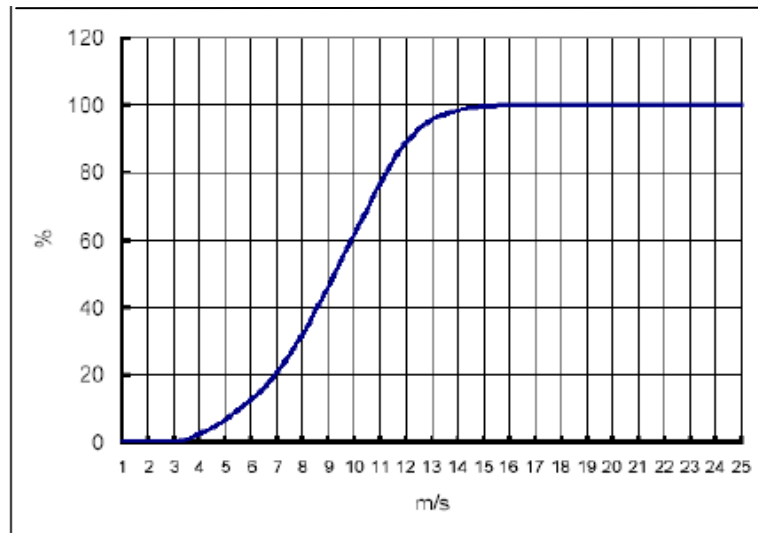
$$E = \frac{\rho}{2} \cdot U^3 \text{ Whm}^{-2}$$

och den potentiella energiproduktionen under hela året beskrivas genom sambandet.

$$E_{\text{pot}} = 3 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \sum U^3 \text{ Whm}^{-2} \text{ year}^{-1}$$

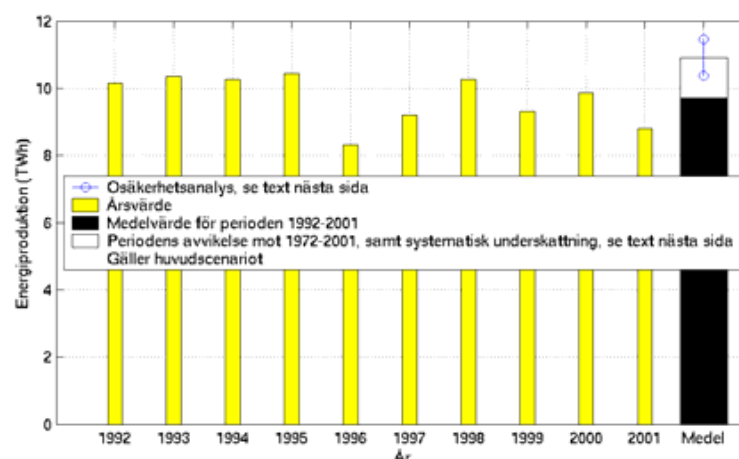
I dessa samband betecknar U vindhastigheten i m/s och ρ luftens densitet i kg/m^3 .

Vid beräkningen av vindkraftproduktionen i de olika anläggningslägena användes i den tidigare studien [Ref. 1] en schabloniserad effektkurva enligt figur 3.1.



Figur 3.1 Sambandet mellan vindhastighet på aktuell navhöjd och verkningsgrad i beräkningarna av producerad vindkraft. Elforsks rapport 04:34

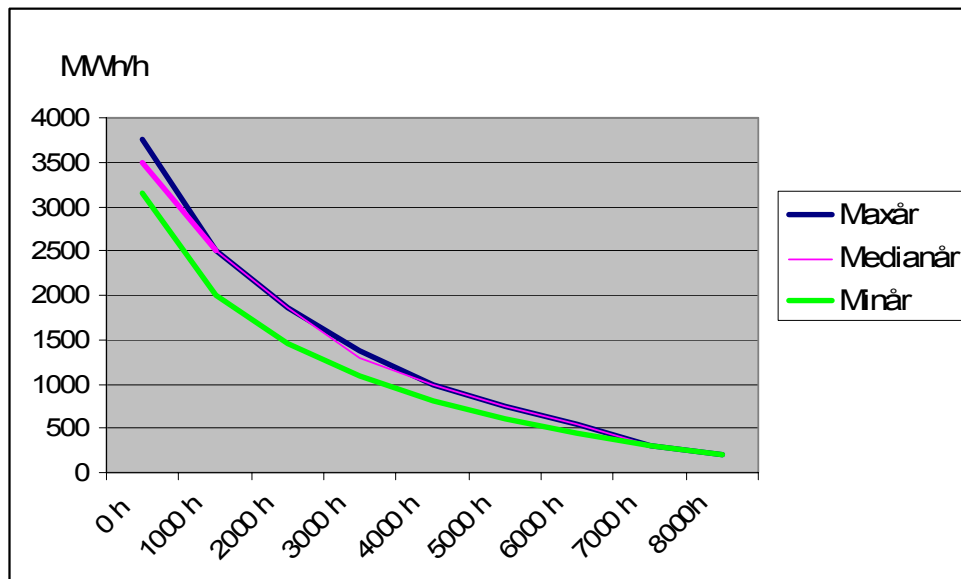
Den hypotetiska produktionen varierar enligt beräkningarna mellan cirka 8,5 och 11,5 TWh under nämnda 10-årsperiod med ett medeltal på knappt 10 TWh och med en beräknad osäkerhet av ± 5 %. Produktionen under olika år samt dess medelvärde redovisas i figur 3.2. Vid jämförelse mellan beräknad och uppmätt produktion för olika anläggningar har det visat sig att beräkningarna ger en underskattning med cirka 5 % för hela perioden.



Figur 3.2 Beräknad vindkraftproduktion om vindkraften redan från år 1992 hade varit utbyggd till en installerad effekt av 4000 MW enligt Elforsks rapport 04:34.

3.2.2 Beräknad varaktighet av den producerade effekten

Den beräknade varaktigheten för den producerade effekten för hela Sverige återges i figur 3.3.



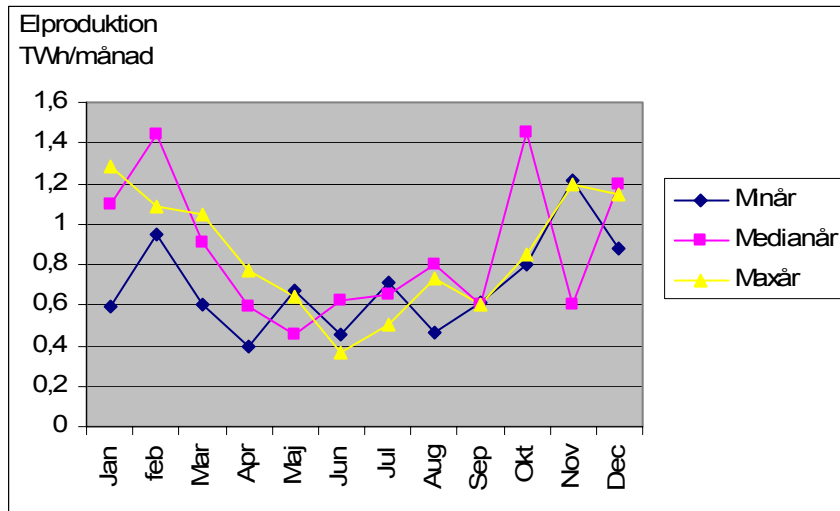
Figur 3.3 Beräknad varaktighet av producerad vindkrafteffekt för hela Sverige under ett max, median- och minår enligt Elforsks rapport 04:34.

För perioden 1992-2001 kan den producerade effekten i medeltal beräknas till 1140 MW av installerade 4000 MW. Den ackumulerade andel X av vindstyrkorna under ett år, som ger medeleffekten 1140 MW, kan med stöd av sambanden i avsnitt 3.2 och för de lokaliseringar som redovisats i figur 1.2 beräknas som

$$X^3 * 4000 = 1140 \text{ med lösningen att } X = 2/3$$

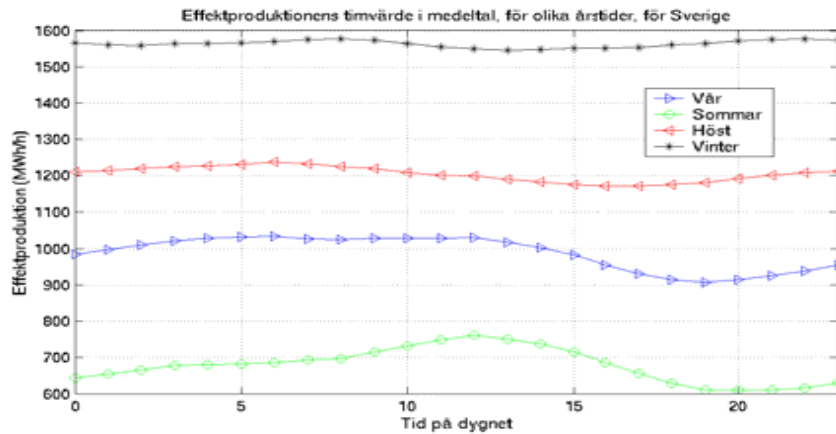
3.2.3 Den beräknade produktionen är störst under senhösten och vintern

Den beräknade vindkrafteffekten varierar nästan med en faktor tre mellan lågproduktionen som är under försommaren och den högsta produktionen som är under senhösten och vintern. Detta framgår av figur 3.4. Att medianåret har en beräknat hög produktion under en kort period på senhösten respektive vintern har troligen sin orsak i att det då förekommer kortare perioder med höga vindstyrkor. Detta årstidsmönster uppvisar samtliga fyra kontrollplatser för vilka beräkningar gjorts, nämligen Kriegers Flak till havs i södra Sverige, Värmland, Finngrundet utanför Sveriges ostkust och Jämtlands kalfjäll.



Figur 3.4 Vindkraftproduktionen är enligt beräkningarna i Elforsks rapport 04:34 högst under senhösten och vintern och lägst under sommaren. Figur 3.4 är omritad från nämnda rapport

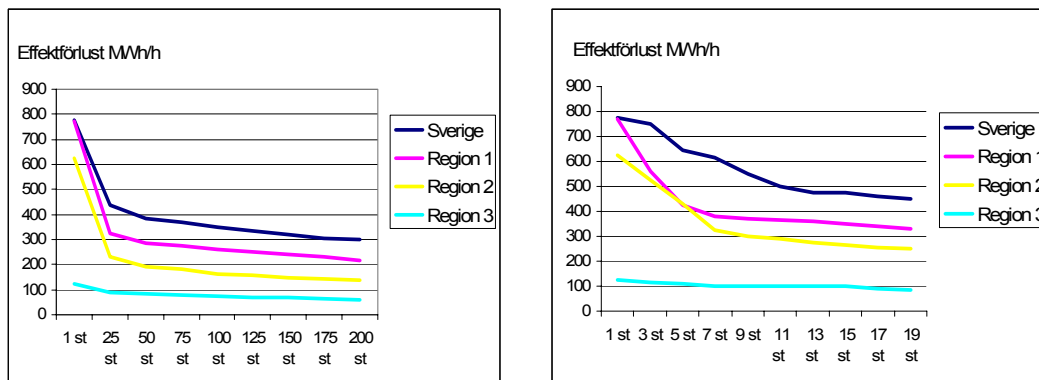
Beräkningarna visar också att den producerade effekten under dygnet uppvisar mycket små variationer under hösten och vintern medan den under sommaren har en mer varierad bild. Detta framgår av figur 3.5.



Figur 3.5 Vindkraftseffekten under dygnets timmar är tämligen konstant under vintern och hösten medan variationerna under sommaren är väsentligt större enligt Elforsks rapport 04:34.

3.2.4 Effektändringarna på timbasis har beräknats bli stora i södra och mellersta Sverige

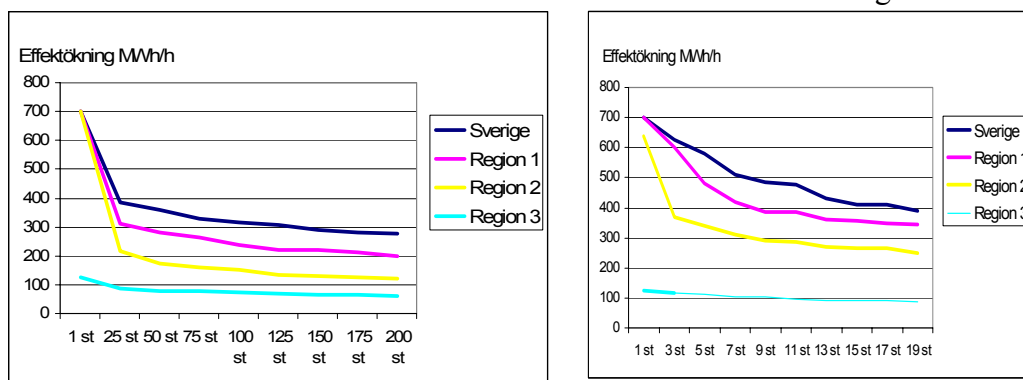
De effektändringar som beräknats är generellt sett något större för minskning än för ökning. Detta beror på att aggregaten stängs av vid vindstyrkor på 25 m/s, då effekten går från maxproduktion till noll. Sådana situationer kan enligt Elforsks rapport 04:34 förekomma vid storm med relativt stor geografisk omfattning. I figur 3.6 återges de beräknade effektminskningarna under en timma.



Figur 3.6 Antal beräknade tillfällen under en 10-årsperiod för större effektminskningar på timbasis. Den högra figuren är en förstoring av vänstra delen av den vänstra figuren. Figuren är omritad från Elforsks rapport 04:34.

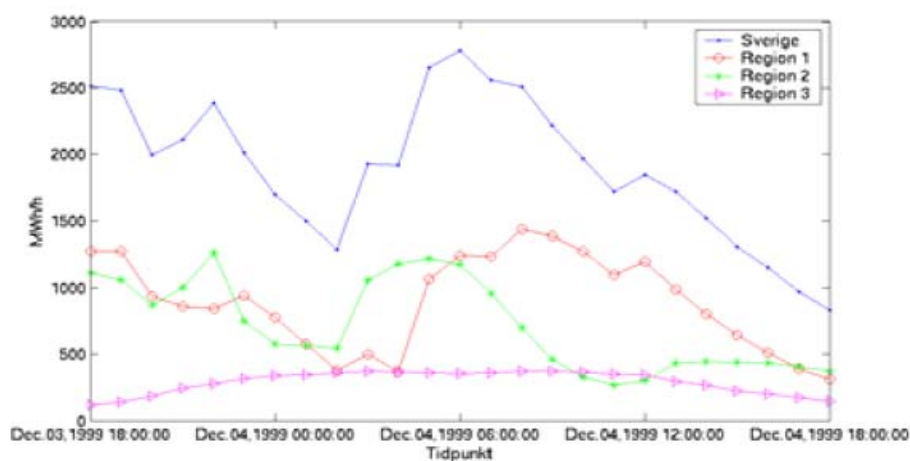
De största effektminskningarna skall enligt figur 3.6 förekomma i den sydligaste regionen och där uppgå till mellan 400 och som mest 750 MW av den där installerade effekten 1885 MW. Sådana effektvariationer beräknas uppträda med en förekomst av fem till femton tillfällen per tioårsperiod.

Av figur 3.7 framgår att också effekttökningarna beräknas bli betydande men att absolutvärdet av en sådan variation är mindre än vid effektminskningar.



Figur 3.7 Antal beräknade tillfällen under en 10-årsperiod för större effekttökningar på timbasis. Den högra figuren är en förstoring av vänstra delen av den vänstra figuren. Figuren är omritad från Elforsks rapport 04:34.

Under den studerade 10-årsperioden förekom i december 1999 en storm över södra Sverige med vindstyrkor på över 25 m/s, vilken innebar att flera av vindkraftanläggningarna slogs ut och att effektvariationerna både där och för Sverige sammantaget blev påtagliga. För region 3 var dock påverkan av den hårda vinden i södra Sverige mycket begränsad. Detta framgår av figur 3.8.

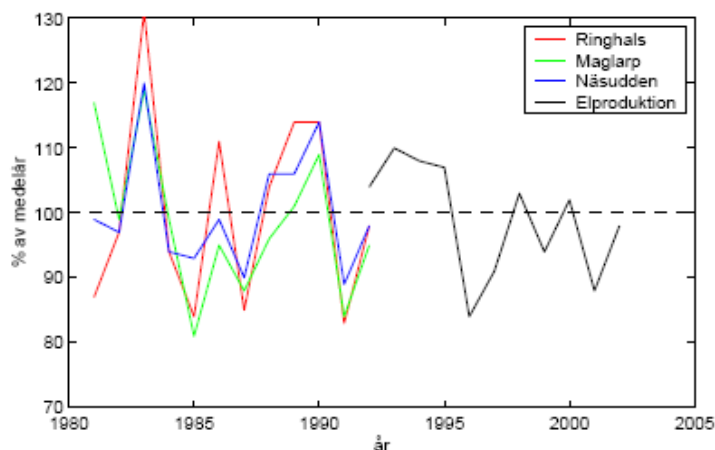


Figur 3.8 Den beräknade konsekvensen av en storm över södra Sverige i december 1999 innebär stora variationer i producerad vindkrafteffekt. Data ur Elforsks rapport 04:34.

4 Vindens energiinnehåll har varierat mellan årtiondena

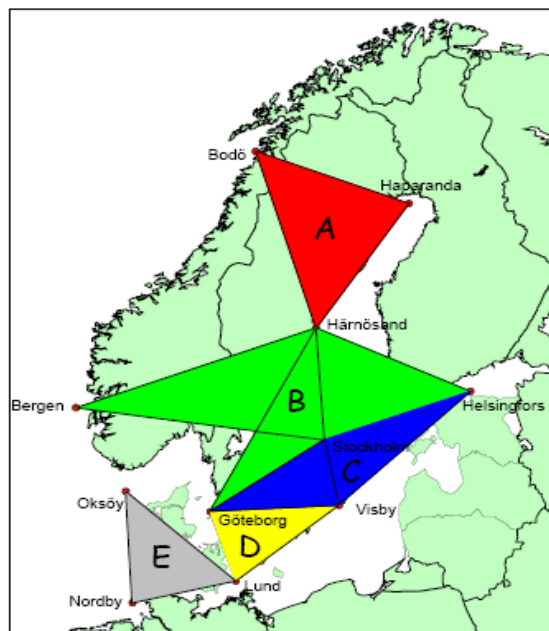
Förändringar i vindhastigheter är inte så entydiga som förändringar i temperatur och därigenom svårare att upptäcka och fastlägga. Dessutom är vindobservationer i regel mindre tillförlitliga och sträcker sig inte heller lika långt tillbaka i tiden som temperaturobservationer. När det gäller vindklimatet så rapporterar IPCC om generellt ökande västvindar på mellanbreddgraderna sedan 1960-talet [Ref. 3]. För Nordatlanten, inklusive svenska farvatten, finns det studier som visar på att den signifikanta våghöjden ökat de senaste 50 åren, något som är förknippat med ökade vindhastigheter [Ref 3]. Stor variabilitet i lågtrycksbanorna, både för intensitet och frekvens hos lågtrycken, gör det svårt att slå fast några trender i vindhastigheterna då det blåser mycket.

Data från danska vindkraftanläggningar visar på att vindens energiinnehåll har minskat från början av 1990-talet och att det år 2003 bara var 80 % av medeltalet under 1980-talet. Data från anläggningar och mätmaster i södra Sverige visar på liknande samband, men att nedgången inte varit lika tydlig som i Danmark [Ref. 2]. De svenska data som presenteras i Elforsks rapport 04:36 återges i figur 4.1 och gäller för södra Sverige. Även i figur 4.3 presenteras data för södra Sverige, som visar på god överensstämmelse med trenden i figur 4.1.



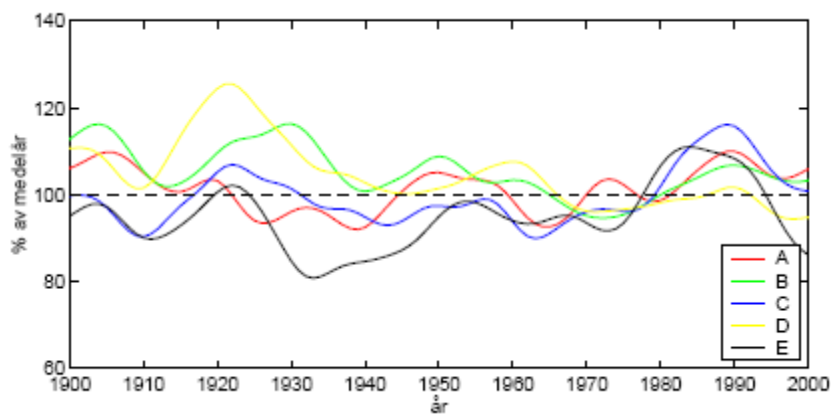
Figur 4.1 Årsmedelvärde av vindens energiinnehåll i södra Sverige i % av medelårets. Från år 1992 baseras sambandet på uppmätt produktion för anläggningar i södra Sverige.

I Elforsks rapport 04:36 ingår också analyser över vindens energiinnehåll under hela 1900-talet för fem områden enligt figur 4.2.



Figur 4.2 Vindens energiinnehåll under 1900-talet har i Elforsks rapport 04:36 beräknats för fem olika områden.

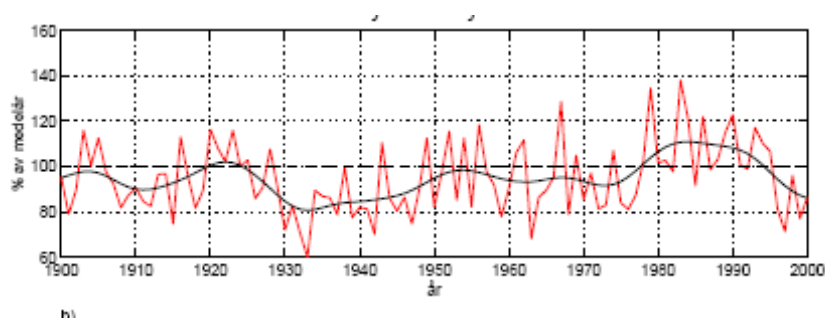
De områden i figur 4.2 som främst har intresse i jämförelsen med det huvudscenario som behandlas i kapitel 3 är D, C och B i figur 4.2 medan området E ungefär motsvarar Danmark. Variationerna i vindens energiinnehåll mellan olika år för dessa områden sammanfattas i figur 4.3.



Figur 4.3 Årsmedelvärde av vindens relativa energiinnehåll jämfört med perioden 1961-1990 för de fyra områdena i figur 4.2 enligt Elforsks rapport 04:36.

4.1 Området som närmast motsvarar Danmark

För område E, som ungefär motsvarar Danmark, har vindens energiinnehåll under 1900-talet varierat mellan 80 och 110 % av normalvärdet med ett maximum under 1980-talet enligt figur 4.4.

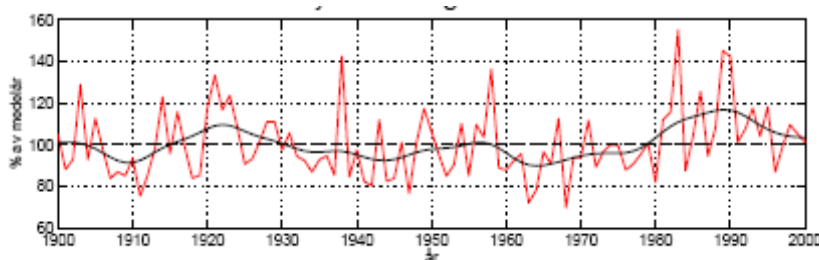


Figur 4.4 Vindens energiinnehåll över Danmark har haft ett maximum under 1980-talet, men 1990-talets produktionspotential har inte varit unikt låg enligt Elforsks rapport 04:36. Den röda linjen representerar årsmedelvärden av vindens energiinnehåll jämfört med perioden 1961-1990 medan den svarta kurvan är det löpande 10-årsmedelvärdet.

Den nedåtgående trend som man noterat för vindkraftproduktionen i Danmark under 1990-talet i jämförelse med 1980-talets produktion kan med beaktande av figur 4.3 sägas vara en återgång till mera normala situationer och att 1980-talet varit extremt blåsig.

4.2 Området D som motsvarar södra Götaland

Område D har stor geografisk överensstämmelse med det som kallas region 1 i avsnitt 3 av denna rapport. Även för detta område har vindens relativa energiinnehåll varit som högst under 1980-talet. Av figur 4.5 går det dock knappast att utläsa någon långsiktig trend. Även här förekommer måttliga förändringar av vinden i perioder som har en utsträckning i tiden på 10- 20 år.



Figur 4. 5 För södra Götaland har förändringarna i vindens energiinnehåll under 1900-talet, jämfört med perioden 1961-1990, varit måttliga. Under 1980 talet noteras dock ett maximum. Data ur enligt Elforsks rapport 04:36. Den röda linjen representerar årsmedelvärden av vindens energiinnehåll jämfört med perioden 1961-1990 medan den svarta kurvan är det löpande 10-årsmedelvärdet.

4.3 Delar av området B

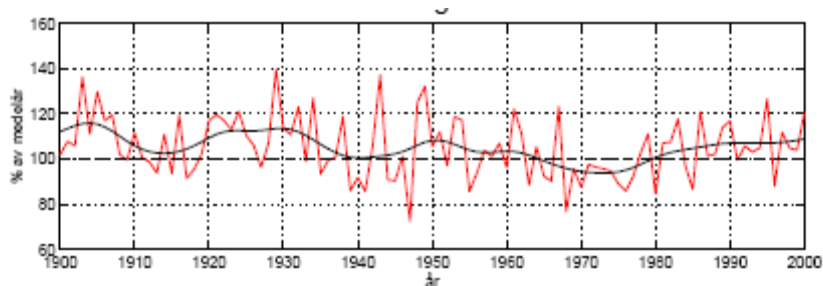
Området B består av tre delområden, nämligen:

1. Härnösand – Bergen – Stockholm
2. Härnösand – Göteborg – Stockholm
3. Härnösand – Helsingfors – Stockholm

I första hand är det delområdena 1 och 2 som här har intresse, då de till stor del sammanfaller med det som benämns region 2 i avsnitt 3 av denna rapport.

4.3.1 Delområdet Härnösand – Bergen – Stockholm

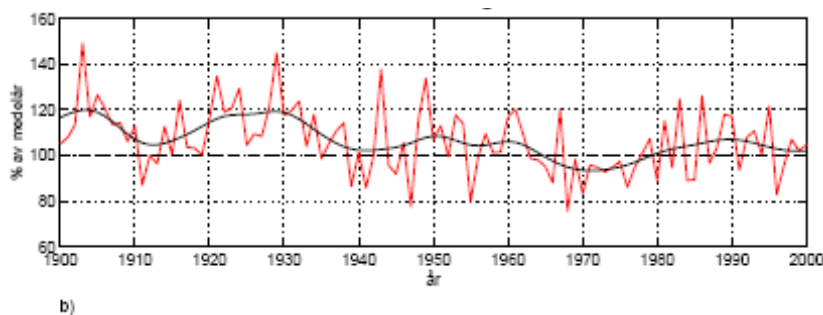
För rubricerade delområde har vindens energiinnehåll under 1900-talet, relativt medelvärdet för perioden 1961- 1990, varierat mellan 95 och 115 %. Även här har det förekommit tidstrender med en längd av cirka 20 år, vilket framgår av figur 4.6.



Figur 4.6 Vindens energiinnehåll för området Härnösand – Bergen – Stockholm uppvisar mindre tidstrender med en varaktighet av cirka 20 år. Data ur Elforsks rapport 04:36. Den röda linjen representerar årsmedelvärden av vindens energiinnehåll jämfört med perioden 1961-1990 medan den svarta kurvan är det löpande 10-årsmedelvärdet.

4.3.2 Delområdet Härnösand – Göteborg – Stockholm

För rubricerade delområde har vindens energiinnehåll under 1900-talet, relativt medelvärdet för perioden 1961- 1990, varierat mellan 90 och 120 %. För detta område antyds en tendens till minskat energiinnehåll i vinden, men från 1940-talet har förändringarna varit mycket små, vilket framgår av figur 4.7.



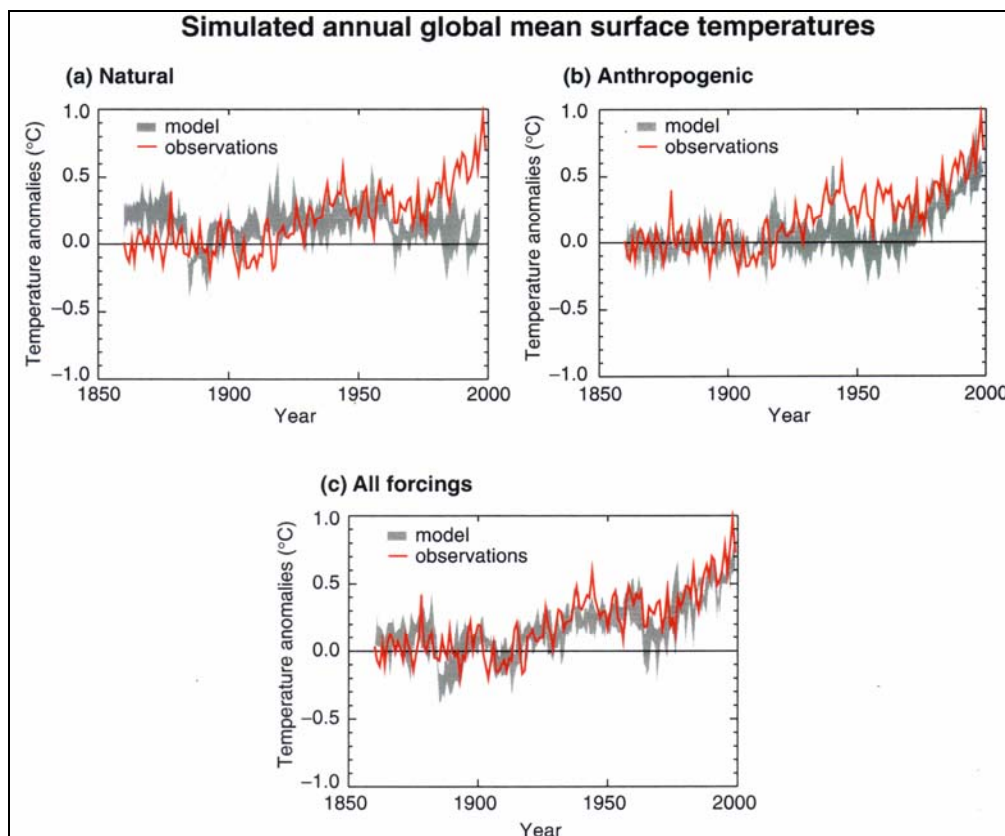
b)

Figur 4.7 Vindens energiinnehåll för området Härnösand –Göteborg – Stockholm var högre i början av 1900-talet, men efter år 1940 har förändringarna varit små. Data ur Elforsks rapport 04:36. Den röda linjen representerar årsmedelvärden av vindens energiinnehåll jämfört med perioden 1961-1990 medan den svarta kurvan är det löpande 10-årsmedelvärdet.

5 Kommer ändringar i klimatet att påverka vindens energiinnehåll till 2030?

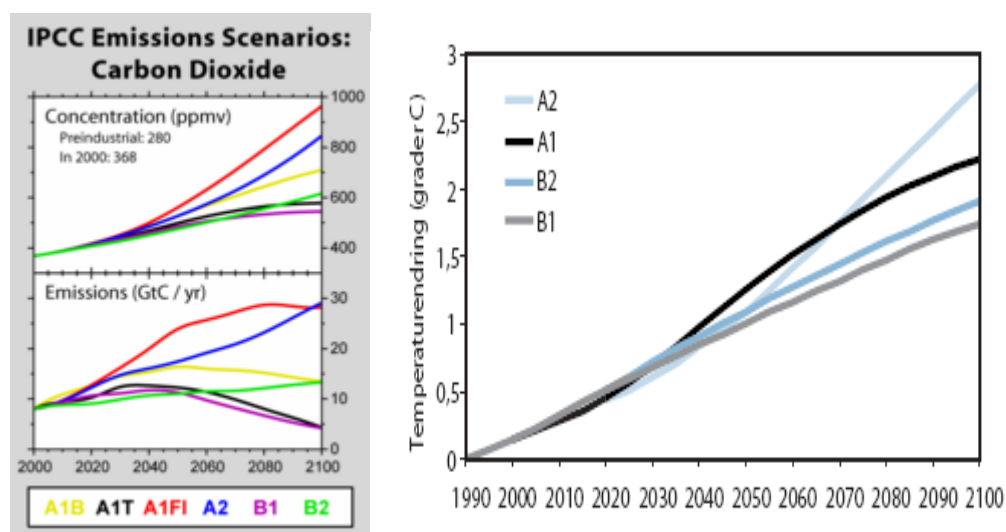
5.1 Scenarier som kan påverka det framtida klimatet

De antropogena utsläppen av växthusgaser leder till en förändring av atmosfärens kemiska sammansättning och påverkar därigenom dess strålningsbalans. FN:s klimatpanel (IPCC) anger i sin fjärde huvudrapport [Ref.3] att det pågår en uppvärmning av jorden och att den globala temperaturen ökat med $0,74 \pm 0,18^\circ\text{C}$ under 1900-talet. Förändringarna kan för seklets första hälft förklaras med naturliga variationer i solinstrålning m.m., medan uppvärmningen därefter måste förklaras av naturliga variationer i kombination med mänsklig påverkan. Detta åskådliggörs i figur 5.1 som är hämtad ur IPCC:s tredje huvudrapport [Ref.4]. Detta gäller inte bara för globala medelförhållanden utan även för alla kontinenter var för sig med undantag för Antarktis [Ref.3].



Figur 5.1. Jämförelse av modellerade och observerade temperaturer med hänsyn till (a) naturliga variationer (b), antropogen påverkan samt (c) bådaddera.

De pågående utsläppen av växthusgaser framstår i ovanstående sammanhang som en väsentlig och modellerbar drivkraft för klimatförändringar. FN: s klimatpanel har genom scenarieanalyser försökt att bedöma hur stora utsläppen av växthusgaser kan bli under detta sekel [Ref. 5]. Scenariebilderna går vida isär, vilket förklaras av att de har vitt skilda förutsättningar bl. a. när det gäller befolkningstillväxt och hur användningen av förnybar energi utvecklas och successivt ersätter fossila bränslen. Spännvidden för några av scenarierna illustreras i figur 5.2 tillsammans med deras betydelse för hur den globala medeltemperaturen förändras.

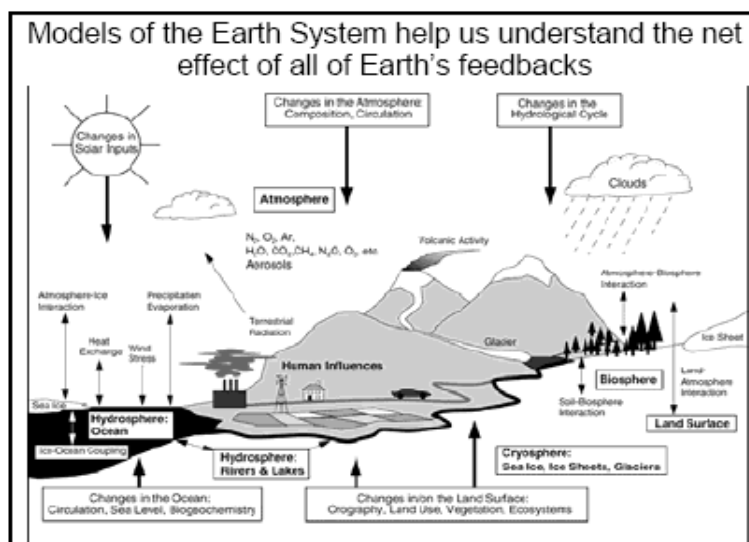


Figur 5.2 Några av de olika scenarier som FN: s klimatpanel utarbetat och dessas klimatkonsekvenser i form av ökad global medeltemperatur

De utsläppsscenarioer som legat till grund för de beräkningar som genomförts i detta projekt är A2, B2 och A1B i ett tidsperspektiv som sträcker sig fram till år 2030. Enligt figur 5.2 är den klimatomfattade skillnaden i form av hur den globala medeltemperaturen utvecklas marginell mellan de tre scenarierna för de närmaste decennierna. Regionalt kan dock skillnaderna vara större vilket hänger samman med skillnader mellan scenarierna i utsläpp av andra klimatpåverkande gaser och partiklar. Sammantaget gör detta att B2 i det tidsperspektiv som här är aktuellt kan ha en något större påverkan än A2. I ett senare skede har emellertid A2 genom sina större utsläpp en betydligt större påverkan på temperaturen.

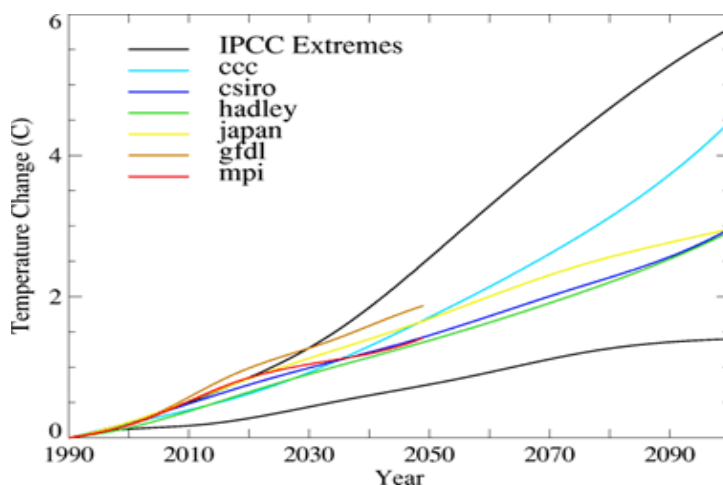
5.2 Globala modeller beskriver de storskaliga förändringarna och ger grunden till att regionala förändringar kan beräknas

För att beräkna de storskaliga förändringarna när det gäller temperatur, nederbörd m.m. som en konsekvens av allt högre halter av växthusgaser i atmosfären används globala klimatmodeller som har utvecklats vid ett tiotal forskningscentra i världen. Modellerna kräver mycket stora datorresurser då klimatsystemet är komplext vilket innebär att många processer som verkar på olika rums- och tidsskalor måste beskrivas. I figur 5.3 finns en förenklad bild av klimatsystemets olika delar samt något om hur dessa samverkar.



Figur 5.3 Några av de faktorer som man försöker ta hänsyn till i de globala modeller som beskriver klimatets förändringar. Från [Ref.11]

Stora krav på beräkningsresurser gör att man måste nöja sig med modeller med relativt grov upplösning där beräkningarna görs i rutor som är några 100 km i fyrkant. Förenklningar i processbeskrivningar och den relativt låga upplösningen gör tillsammans med olika initialvärden och randvillkor att resultaten skiljer sig en hel del mellan olika modeller. Detta visas i figur 5.4 för förändringar av den globala medeltemperaturen för det scenario som benämns A2. I litteraturen finns flera bilder som har samma budskap som figur 5.4.



Figur 5.4 Olika globala klimatmodeller ger tämligen olika bilder av hur temperaturen kommer att förändras trots att alla utgår från IPCC: s scenario A2. Källan till figuren från [Ref.12].

Osäkerheter i klimatscenarierna hänger alltså samman med osäkerheter både i utsläppsscenarioer och i modellformulering. Dessutom finns en naturlig variabilitet i klimatsystemet som också ger upphov till en viss osäkerhet i uppskattningarna, framförallt på den regionala skalan. Alla dessa faktorer gör att olika klimatscenarier kommer att skilja sig åt. Det är därför önskvärt att använda sig av flera olika utsläppsscenarioer och olika klimatmodeller vid studier av framtida klimatförändringar.

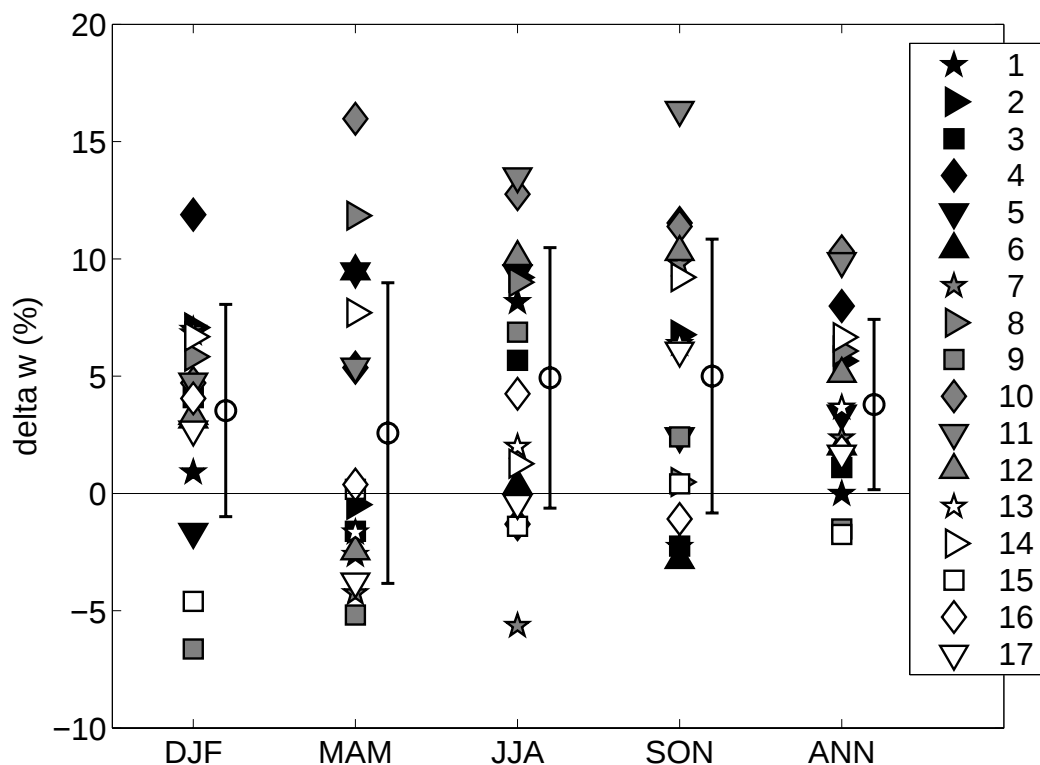
5.3 Framtida förändring i vind över norra Europa från tidigare beräkningsexperiment

5.3.1 Vindändring enligt globala klimatmodeller

I det här avsnittet redovisar vi resultat från ett modelljämförelseprojekt där 17 globala klimatmodeller ingått. Vid Göteborgs universitet har man [Ref. 6] gjort en studie över hur vindsituationen kan förändras för Östersjöregionen om atmosfärens koldioxidhalt har fördubblats på 70 år i dessa modeller. Resultaten av detta arbete sammanfattas i figur 5.5.

Den påtagligaste informationen i figur 5.5 är att olika globala cirkulationsmodeller ger vitt spridda utfall där resultaten sträcker sig från ökad till minskad vindhastighet. Detta gäller såväl för olika årstider som för hela året. Det är dock en övervikt av modeller som tyder på att vindhastigheterna över Östersjöregionen

kommer att öka. På årsbasis finns en knapp statistik signifikant skillnad (därmed menas att skillnaden överstiger en standardavvikelse) till fördel för ökad vindhastighet.



Figur 5.5 Beräknad förändring av den geostrofiska vinden i Östersjöregionen om atmosfärens halt av växthusgaser har fördubblats om 70 år. De olika symbolerna representerar olika globala klimatmodeller. Ringen och den vertikala linjen visar på medelvärde och standardavvikelse baserat på de 17 olika modellerna. DJF står för december, januari och februari. MAM betyder mars, april och maj osv.

Med geostrofisk vind menas den vindhastighet som råder då det är balans mellan den av jordrotationen orsakade corioliskraften och den kraft som beror på horisontella tryckskillnader. Den geostrofiska vinden representerar en höjd över marken där förhållandena är opåverkade av friktionen från jordytan.

5.3.2 Vindändring enligt en regional klimatmodell

I en tidigare studie [Ref. 7] har vinden på 10 meters höjd i norra Europa beräknats för perioden 2071 -2100 för scenarierna A2 och B2. De globala modeller som användes som randvillkor i detta sammanhang var ECHAM4/OPYC3 och

HadAM3H. De regionala beräkningarna gjordes med en kopplad klimatmodell som utvecklats vid Rossby Centre, SMHI. De beräknade resultaten, som kan jämföras med kontrollperioden 1961 – 1990 sammanfattats här i följande punkter

- När simuleringen utgår från ECHAM4/OPYC3 blir resultatet att alla parametrar som beskriver vindfördelning och energiinnehåll ökar i förhållande till kontrollperioden. Skillnaderna är större för scenariet A2 än för B2. När simuleringarna däremot utgår från HadAM3H är de beräknade förändringarna små över norra Europa och försumbara över landområdena i Skandinavien. Trots detta ger de ändå en ökning av vindhastigheten över delar av Östersjön till följd av ändrade stabilitetsförhållanden i atmosfären. Detta förklaras av att havsisen till stor del beräknas försvinna [Ref. 7].
- För de simuleringar som utgår från ECHAM4/OPYC3 finner man ett ökat energiinnehåll i vinden och då särskilt under vintermånaderna december – februari. Hur den rumsliga fördelningen av vindenergin förändras är dock osäkert.

5.4 SMHI: s beräkningar för denna studie över hur vindarna förändras

I det här avsnittet beskrivs först den regionala klimatmodellen som använts vid Rossby Centre och hur den klarar av att reproducera dagens klimat. Därefter beskrivs de beräkningsstudier som gjorts och till sist resultaten i form av hur vindenergin förändras.

5.4.1 Utvärdering av den regionala klimatmodellen i dagens klimat

Vid Rossby Centre har en regional klimatmodell för atmosfären och dess utbyte med landytan, RCA, utvecklats. RCA har sitt ursprung i den numeriska väderprognosmodellen HIRLAM som används operationellt vid SMHI. Både HIRLAM och RCA är hydrostatiska modeller där alla beräkningar görs på ett diskret rutnät över ett område. I de experiment som ligger till grund för Klimat- och Sårbarhetsutredningen och denna studie har en horisontell upplösning av ca 50 km använts och området har täckt in större delen av Europa och delar av Nordatlanten. Den senaste versionen av RCA är RCA3 som är beskriven i SMHI-rapporten RMK108 [Ref. 8].

Utvärdering av RCA görs huvudsakligen där så kallade återanalyser används för att driva RCA. Återanalyser, som inkluderar både modellresultat och olika sorters väderobservationer, är det bästa tillgängliga verktyget för att beskriva atmosfärens tillstånd under de senaste decennierna. Resultaten från RCA, när den drivits av återanalysdata, kan alltså jämföras direkt mot observerat klimat. När RCA tar randvärden från en global klimatmodell kan man inte jämföra direkt mot observationer för någon särskild tidpunkt. Istället får man undersöka

klimatologiska medelvärden och variabiliteten kring dessa. Fel i den storskaliga cirkulationen i den globala modellen förs med till den regionala modellen och försvårar utvärderingen av den regionala modellen.

Utvärderingarna av RCA visar att modellen, given realistiska randvärden, kan återskapa huvuddragen i det observerade klimatet i Europa under de senaste decennierna med hög tillförlitlighet. Detta gäller både långtidsmedelvärden, säsongsvariationer och mellanårsvariabilitet. En del problem finns dock, t.ex. så är RCA3s vintertemperatur i norra Skandinavien, norra Finland och norra Ryssland överskattad med 1-4 grader. I övrigt simuleras säsongstemperaturerna i stora drag inom $\pm 1^\circ\text{C}$ med en viss underskattning under sommarmånaderna. En tendens finns också till att dessa fel accentueras för de riktigt kalla vinterdagarna och för de varmaste sommardagarna.

När det gäller vindklimatet så har enbart begränsade utvärderingar gjorts (se SMHI-rapporten RMK108) och tidigare inte för navhöjd. Slutsatserna från denna utvärdering är att vindhastigheterna i 10m-nivån i stort överensstämmer med dem som ges i återanalysen som använts som randvärden för RCA3 med vissa undantag över höglänt terräng och över hav. Generellt underskattar modellen höga vindhastigheter mer än låga (detta visas för den tidigare modellversionen RCA2 i SMHI-rapporten RMK109) och uppvisar till exempel alldeles för sällan stormvindar. Detta är ett fundamentalt problem som delvis hänger samman med skalan. Även om den regionala modellen är högupplöst i förhållande till den globala så är en ruta så stor som ca 2500 kvadratkilometer.

5.4.2 Avgränsningar och förutsättningar

De beräkningar som gjorts vid Rossby Centre, SMHI, i denna studie har, som tidigare omtalats, sin utgångspunkt i de IPCC-scenarier som benämns A2, B2 och A1B. De sammanlagda emissionerna av växthusgaser är i scenariet A2 och A1B större än i B2 fram till år 2100. Till år 2030, som är sluttidpunkten för den här gjorda studien, är dock skillnaderna små. Detta har tidigare redovisats i avsnitt 5.1.

Planerna var att de regionala beräkningarna skulle utgå från tre globala klimatmodeller, där två framtagits av Max-Planckinstitutet för meteorologi, ECHAM4 samt ECHAM5, och den tredje vid Hadley Centre, HadCM3. Hadley Centre kunde emellertid inte leverera randdata från sin modell under den tid som var aktuell för de beräkningar som gjorts i denna studie. Därför har beräkningar endast genomförts med de globala modellerna ECHAM4 och ECHAM5 som randvillkor för RCA3.

Här vill vi poängtera att även om de två versionerna av ECHAM har mycket gemensamt så finns också fundamentala skillnader mellan modellerna, exv. använder de helt olika cirkulationsmodeller för haven. Det bör också noteras att

simuleringarna med de två globala modellerna inte startar från exakt samma tillstånd. Denna skillnad leder till att klimatutvecklingen blir olika mellan de olika simuleringarna oavsett modellformulering. Det här är ett utslag av den naturliga variabiliteten i klimatsystemet. Här uttrycks den på så sätt att ECHAM4 visar på en snabb övergång till ett mer zonalt klimat i norra Europa än i ECHAM5.

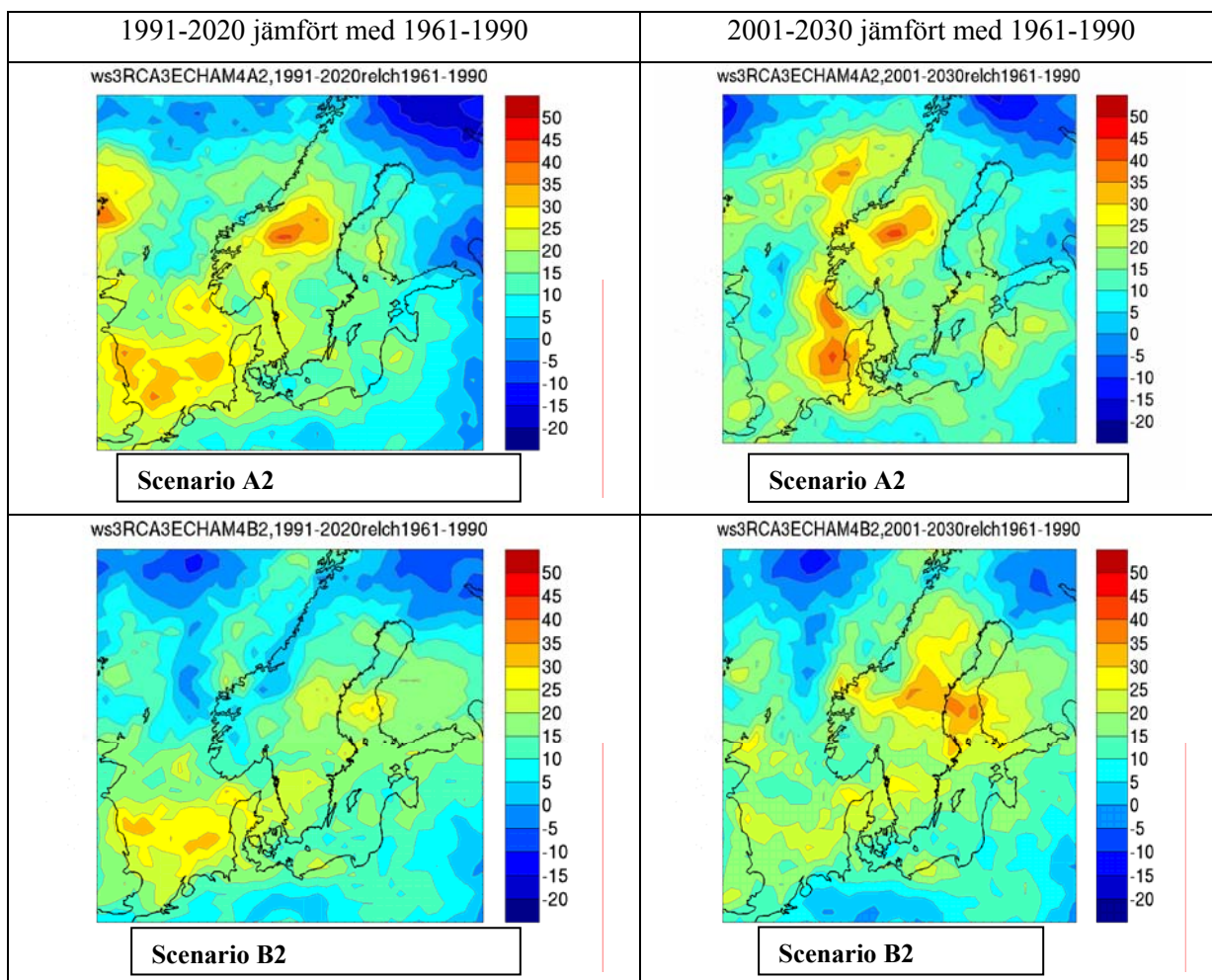
För att tolka resultaten av de beräkningar som här gjorts för framtidens klimat görs jämförelser med de vindar som beräknats för 30-årsperioden 1961 – 1990 i de respektive simuleringarna.

5.4.3 Beräknad förändring av vindens energiinnehåll

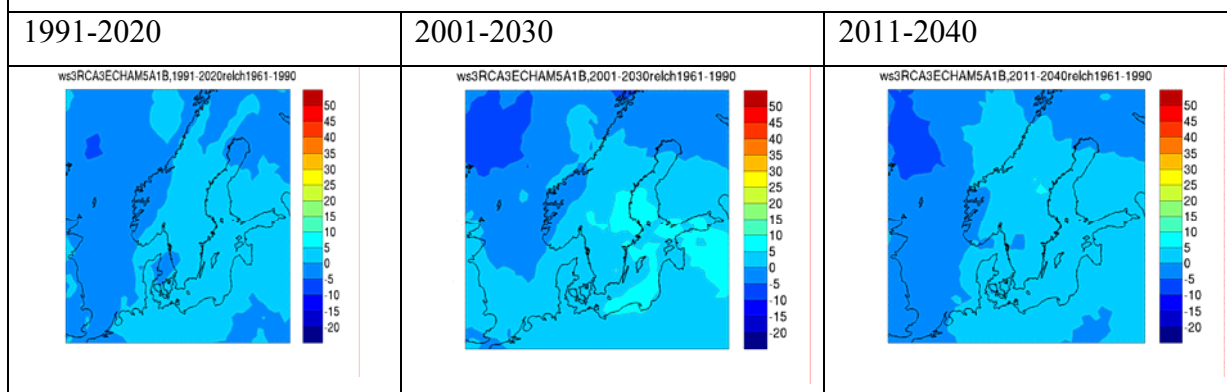
Den vind, som på årsbasis svarar mot vindens energiinnehåll, kan enligt avsnitt 3 approximeras med 2/3-delar av den ackumulerade vindstyrkan vid en navhöjd på mellan 70 och 80 m och för de vindkraftlägen som här är aktuella.

I bilaga A redovisas grafiskt resultaten av SMHI: s beräkningar dels i form av skillnader mellan beräknat energiinnehåll i vinden för olika perioder och för jämförelseperioden 1961-1990, dels i form relativa förändringar. I figur 5.6 sammanfattas denna information för de två utsläppsscenarierna A2 och B2 och med den globala cirkulationsmodellen ECHAM4 som randvillkor. I figur 5.7 redovisas motsvarande information för emissionsscenario A1B för vilken den globala modellen ECHAM5 utgjort randvillkor.

För de båda scenarierna A2 och B2 med ECHAM4 som randvillkor visar figur 5.6 att vindens energiinnehåll kommer att öka. I scenariot A2 med mellan 10 och 20 % fram till år 2030 och i scenariet B2 kan ökningen bli upp mot 25 %. I scenariet A1B, som till en början endast avviker marginellt från A2 och B2, har det med den globala klimatmodellen ECHAM5 som randvillkor däremot beräknats att energiinnehållet endast ökar marginellt eller med upp till 5 %. De stora skillnaderna mellan de tre simuleringarna kan till stor del kopplas till hur modellerna beskriver den naturliga variabiliteten i klimatsystemet, se 5.4.2.



Figur 5.6 Den beräknade relativa förändringen av vindens energiinnehåll för scenarierna A2 och B2 när den globala cirkulationsmodellen ECHAM4 använts som randvillkor.



Figur 5.7 Den beräknade relativa förändringen gentemot 1961-1990 av vindens energiinnehåll för scenariet A1B med den globala cirkulationsmodellen ECHAM5 som randvillkor.

5.4.4 Beräknad risk för driftavbrott på grund av hård vind

När vinden når en hastighet av 25 m/s vid en anläggning stängs driften av och effekten går då från maximal produktion till noll. Riskerna för detta i dagsläget har beskrivits i avsnitt 3.2.2.

De beräkningar som gjorts vid Rossby Centre, SMHI, för denna studie över vindhastigheter på 25 m/s eller däröver vid navhöjden 70 m återges i bilaga B. I Bilaga B redovisas även den beräknade förekomsten av vindhastigheter över 21 m/s. Av bilaga B kan man dra slutsatserna att:

1. Vindstyrkor på 21-25 m/s eller däröver förekommer enligt beräkningarna i upp till 0,1 % av årets timmar för jämförelseperioden 1961 – 1990.
2. För åren fram till 2030 – 2040 tyder beräkningarna på att förekomsten av vindstyrkor på 25 m/s eller däröver ökar marginellt, men att de fortfarande befinner sig i intervallet 0 – 0,1 % av årets timmar. För vindar på upp till 21 m/s syns däremot inga tendenser till att förekomsten ökar.

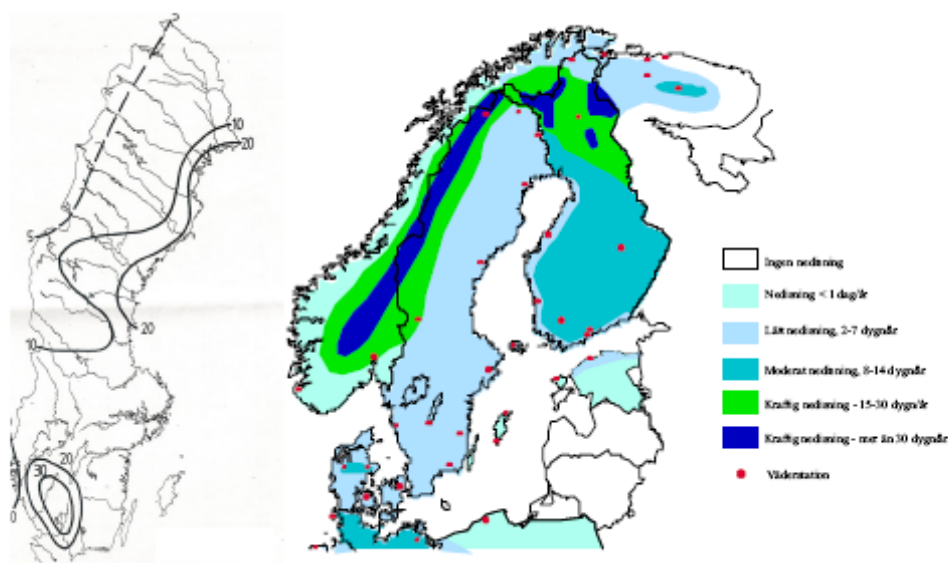
Det ovan sagda gäller för samtliga tre scenarier och är inte kopplat till vilken global klimatmodell som de regionala beräkningarna utgår från.

6 Risk för nedisning av svenska vindkraftverk

Riskerna för nedisning av vindkraftverk har behandlats i en tidigare rapport från Elforsk [Ref. 10]. Rapporten behandlar såväl de grundläggande orsakerna till nedisning, vilka problem som nedisning kan leda till för vindkraftverk, erfarenheter från Sverige och Finland samt hur man tekniskt kan minska riskerna för nedisning.

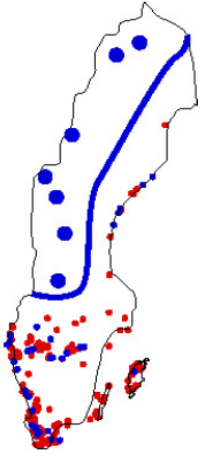
6.1 Vad vi vet om förekomsten idag av nedisning

I den ovan nämnda Elforskrapporten refereras till ett arbete vid SMHI, där dels det genomsnittliga antalet timmar med underkyllt duggregn under perioden 1961-1990 anges, dels antalet dygn/år när det förekommer nedisning. Den bild över underkyllt duggregn respektive nedisning som förmedlades av SMHI återges i figur 6.1



Figur 6.1 I den vänstra figuren återges antalet timmar med underkyllt duggregn under perioden 1961-1990 och i den högra figuren antalet dygn/år när nedisning förekommer. Data ur Elforsks rapport 04:13.

I Elforsks driftstatistik för vindkraftverk finns information om var nedisning rapporterats. Den tillgängliga informationen finns samlad i figur 6.2



Figur 6.2 Ringar på kartan markerar att nedisning har rapporterats.

Risk för nedisning förekommer inte bara vid underkyllt duggregn. Vattenångan i luften kan nämligen direkt övergå till iskristaller och orsaka så kallad klaris eller dimfrost. Nedisning rapporteras också vid temperaturer både

- under 0°C från Finland (ner till -6°C vid ett vindkraftverk i Pori) och från Kanada (ner till -30°C).
- över 0°C i samband med snöblandat regn, som kan ge en mycket besvärlig isbildning.

6.2 Olägenheter av nedisning

Nedisning av rotorbladen kommer i de allra flesta fall att minska lyftkraften och att öka motståndet. Detta minskar det drivande momentet och därmed också effekten. Om nedisningen orsakas av underkyllt regn kring 0°C finns det dock en möjlighet att isen lägger sig som en jämn hinna runt framkanten på vingen, vilket inte orsakar några plötsliga störningar.

Det finns exempel på nedisning av vindkraftverk som varat i nästan två månader (Äppelbo, vintern 2002/2003). Så långa nedisningsperioder förutsätter upprepade perioder av nedisning.

För havsförlagda vindkraftverk kan nedisning också innebära problem med att komma upp på kraftverket och sköta underhållsarbetet [Ref. 10].

En allmänt känd olägenhet med nedisning är risken för så kallade iskast, som innebär att isbitar slits loss och kan kastas iväg och orsaka person- och saksador.

6.3 Möjlighet finns att minska nedisningen genom uppvärmning av rotorbladen

Det finns redan idag möjligheter att installera rotorblad med elektrisk uppvärmning. Detta har prövats vid prototypanläggningar för nordliga vindkraftverk såväl i Sverige som i Finland.

Vid två aggregat vid Sourva har 0,82 % av den på årsbasis producerade elen använts för uppvärmning av bladen. Vid en anläggning i Jämtland har motsvarande siffra varit 2,3 %. Från en högt belägen anläggning i norra Finland rapporteras att den elektriska effekten för uppvärmning är cirka 5 % av märkeffekten medan energibehovet på årsbasis är 1-3 %.

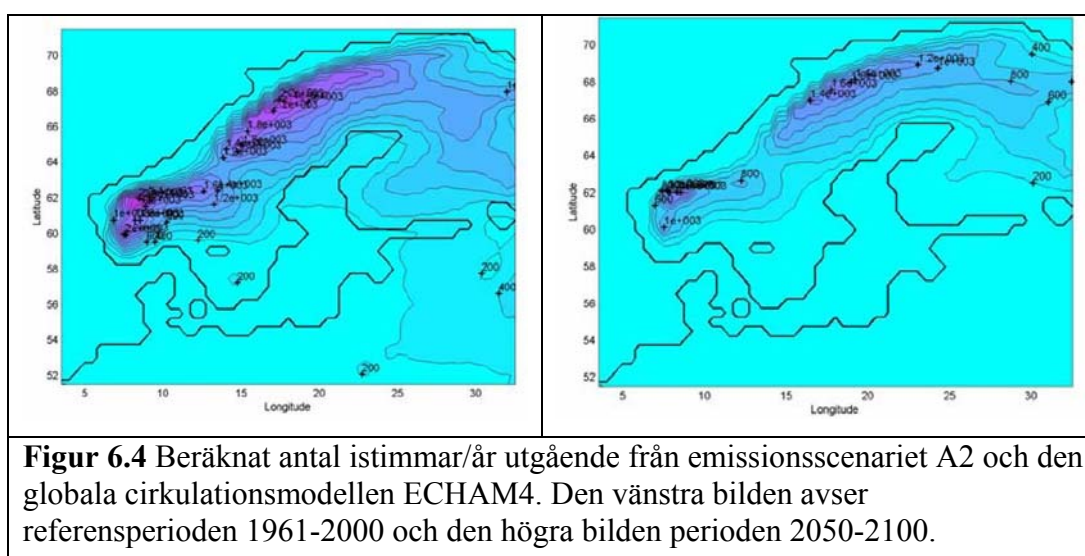
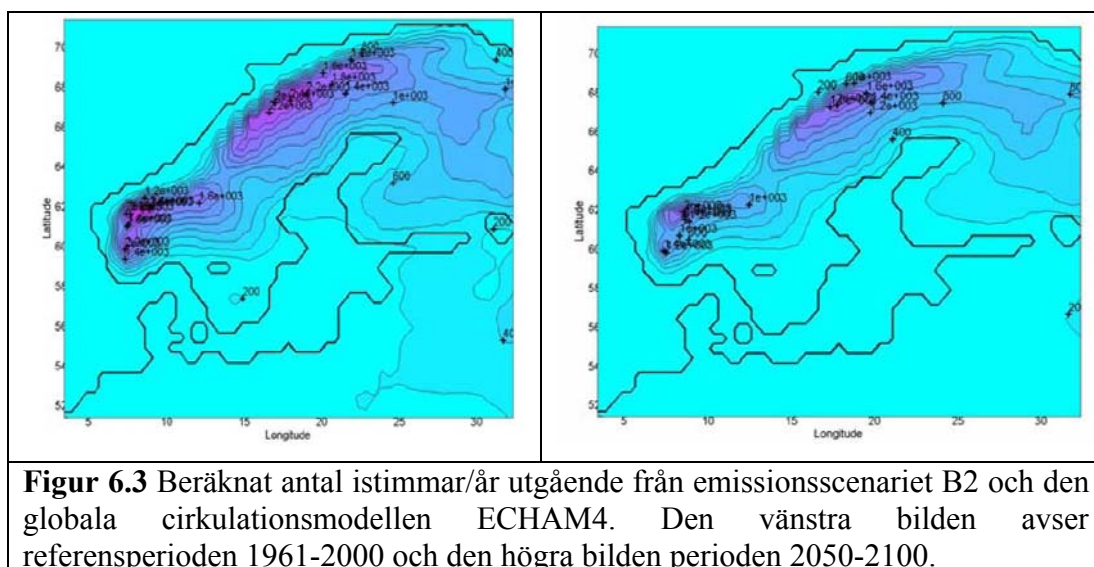
6.4 Hur förändras riskerna för nedisning om klimatet ändras?

Betydelsen av vad ett ändrat klimat betyder för nedisningsrisken har studerats av Timo Laakso et al [Ref.9] Studien grundas på regional modellering med två versioner av RCA, som här använts av Rossby Centre för att beskriva vindarnas förändring, på de globala cirkulationsmodellerna ECHAM4 och HadAM3H samt på de scenarier som benämns A2 och B2 av FN: s klimatpanel. Som jämförelseperiod används i detta fall 1961-2000 till skillnad mot 1961-1990 som använts för att beskriva vindarnas förändring.

Som kriterium för att nedisning skall uppkomma har temperaturer under fryspunkten använts när den relativa luftfuktigheten 95 % överskrids.

Resultatet av studien är att risken för nedisning minskar påtagligt i hela Skandinavien och att det i framtiden blir mycket osannolikt att nedisning skall uppkomma utefter Östersjöns kuster.

I figurerna 6.3 och 6.4 jämförs antalet istimmar per år för perioden 1961-2000 med perioden 2050-2100 för det fall att den globala modellen ECHAM4 använts som randvillkor.



7 Lärdomar som denna studie givit

De lärdomar som denna studie lett fram till kan sammanfattas i följande punkter:

1. Om den installerade vindkrafteffekten blir så stor som 4000 MW med anläggningar, som är placerade enligt huvudscenariot i Elforsks rapport 04:34, kan den producerade elenergin på årsbasis bli 5 – 20 % högre om 20 – 30 år än den som beräknats för åren 1992 – 2001; d.v.s. öka från cirka 10 upp mot 12 TWh per år. Ett långsiktigt ökande energiinnehåll i vinden i Östersjöregionen förefaller vara en trend i flertalet av de globala klimatmodeller som fått stor vetenskaplig betydelse. Man måste dock komma ihåg att det finns modeller som istället ger minskade vindhastigheter i framtiden.
2. Vindens energiinnehåll har under 1900-talet varierat med ungefär ± 10 % runt medelvärdet för Sverige och för Östersjöregionen. Åren 1992 – 2001 utgörs av en period där vindens energiinnehåll minskat. Om den beräknade relativa ökningen om 20 – 30 år kan hänföras till en följd av klimatutvecklingen eller till naturliga variationer i vädret är svårt att uttala sig om. Att de flesta globala modeller kommer till att vindens energiinnehåll i Östersjöregionen långsiktigt kan komma att öka får, tillsammans med den här gjorda studien, tas som en indikation på att vindens energiinnehåll snarare kommer att öka än att minska.
3. Förekomsten av så höga vindstyrkor att vindkraftanläggningar behöver stängas av (25 m/s eller däröver) har för kontrollperioden 1961 – 1990 beräknats till storleksordningen 0,1 % av årets timmar. De beräkningar som gjorts i denna studie ger ett osäkert underlag när det gäller att bedöma risken för hård vind. Det kan vara så att frekvensen av vindar på över 25 m/s om 20 – 30 år är ungefär densamma som idag, men det kan också vara så att den är ända upp till fördubblad.

De effektbortfall som kan uppkomma på grund av hård vind har i en tidigare studie för Elforsk [Ref. 1] beräknats till mellan 400 och 750 MW och är i princip förutsägbara med några timmars framförhållning.

4. Nedisning av vindkraftanläggningar kan för kontrollperioden 1961 – 1990 uppgå till ett par hundra timmar per i södra Sverige. För perioden 2050 – 2100 kan risken för nedisning vara helt försumbar såväl i södra Sverige som runt Östersjön samt kraftigt reducerad i norra Sverige samt kraftigt reducerad i norra Sverige.

8 Referenser

- Ref.1 Elforsk rapport 04:34 Effektvariationer av vindkraft. Mikael Magnusson, Roland Krieg, Margitta Nord, Hans Bergström
- Ref. 2 Elforsk rapport 04:36 Cecilia Johansson och Hans Bergström. Variabilitet i vindens energiinnehåll över Skandinavien mellan 1990 – 2000
- Ref.3 Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden and P. Zhai, 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ref.4 IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.F., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., and Johnson, C.A. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 881pp.
- Ref. 5 Nakićenović, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., et al., 2000. Emission scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 599 pp
- Ref. 6 Chen, D and C. Aschberger, 2006. Past and future atmospheric circulation over the Baltic region based on observations, reanalysis and GCM simulations. Research report C74, Earth Science Centre, Göteborg university
- Ref. 7 S.C. Pryor, R.J. Barthelmie, E. Kjellström Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: analyses using a regional climate model. Climate Dynamics (2005) 25:815-835
- Ref. 8 Meier, H.E.M., Andréasson, J., Broman, B., Graham, L.P., Kjellström, E., Persson, G. and Viehauser, M. (2006). Climate

change scenario simulations of wind, sea level, and river discharge in the Baltic Sea and Lake Mälaren region – a dynamical downscaling approach from global to local scales. SMHI, Reports Meteorology and Climatology, 109. SMHI, 60176 Norrköping, Sweden

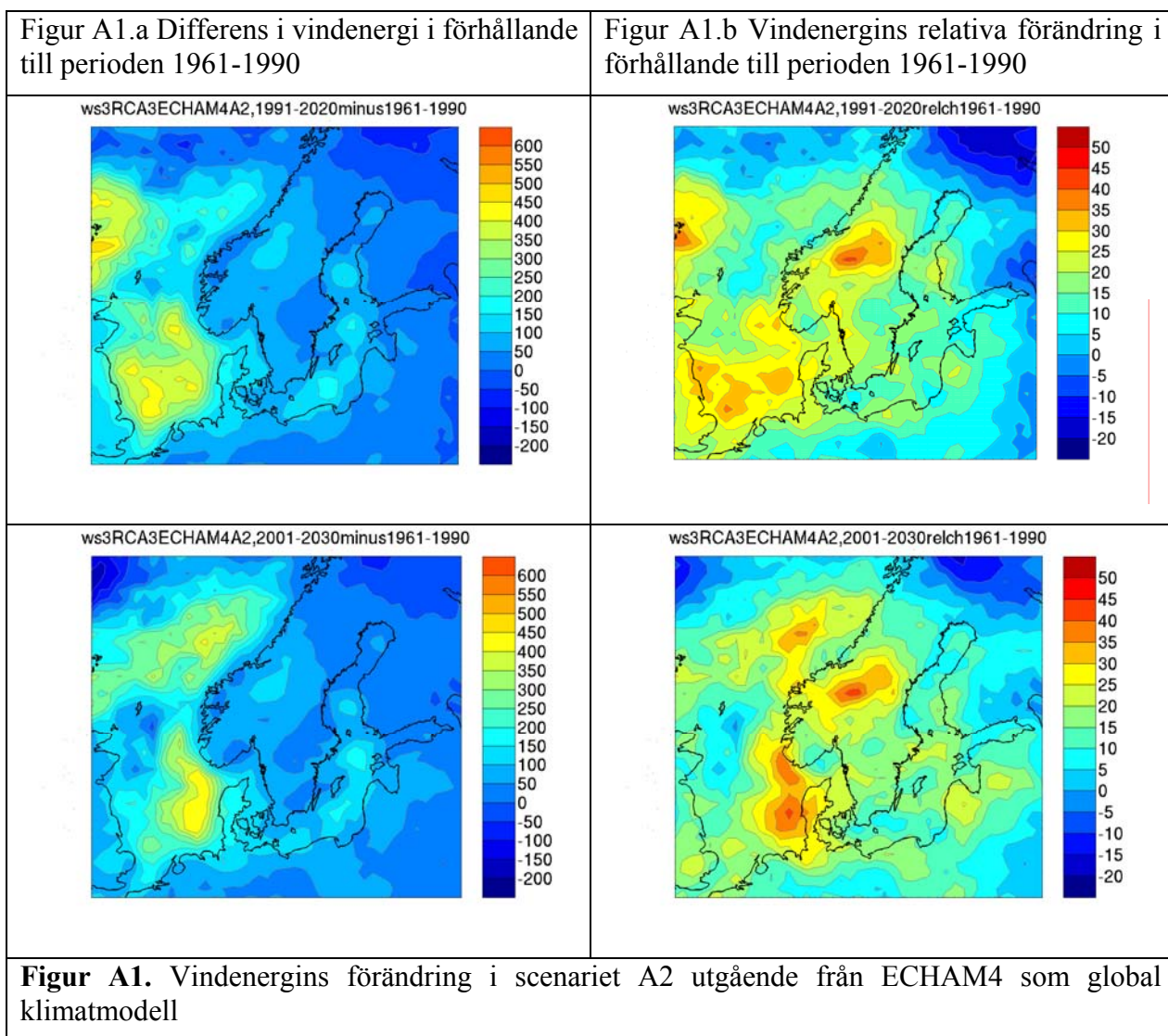
- Ref. 9 Kjellström, E., Bärring, L., Gollvik, S., Hansson, U., Jones, C., Samuelsson, P., Rummukainen, M., Ullerstig, A., Willén U. and Wyser, K., 2005. A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). Reports Meteorology and Climatology, 108, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden, 54 pp
- Ref.10 Elforsk rapport 04:13 Göran Ronsten, FOI. Svenska erfarenheter av vindkraft i kallt klimat – nedisning, iskast och avisning
- Ref.11 Envisat.esa.int/envschool.2006
- Ref. 12 Cubasch U, Meehl GA, Boer GJ, et al. 2001. Projections of future climate change. In JT Houghton, Y Ding, DJ Griggs, et al (eds) *Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 525-82

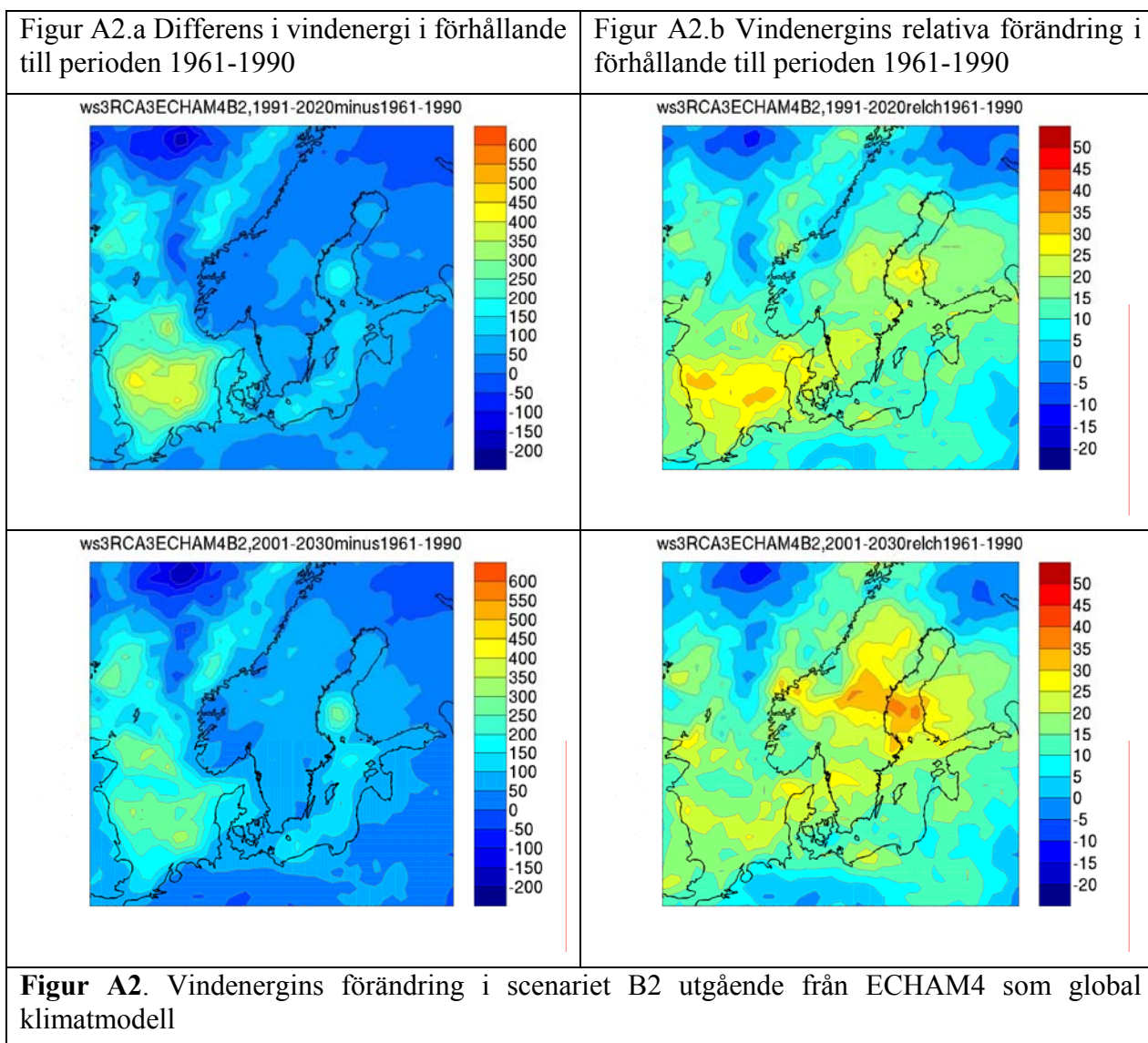
BILAGA A

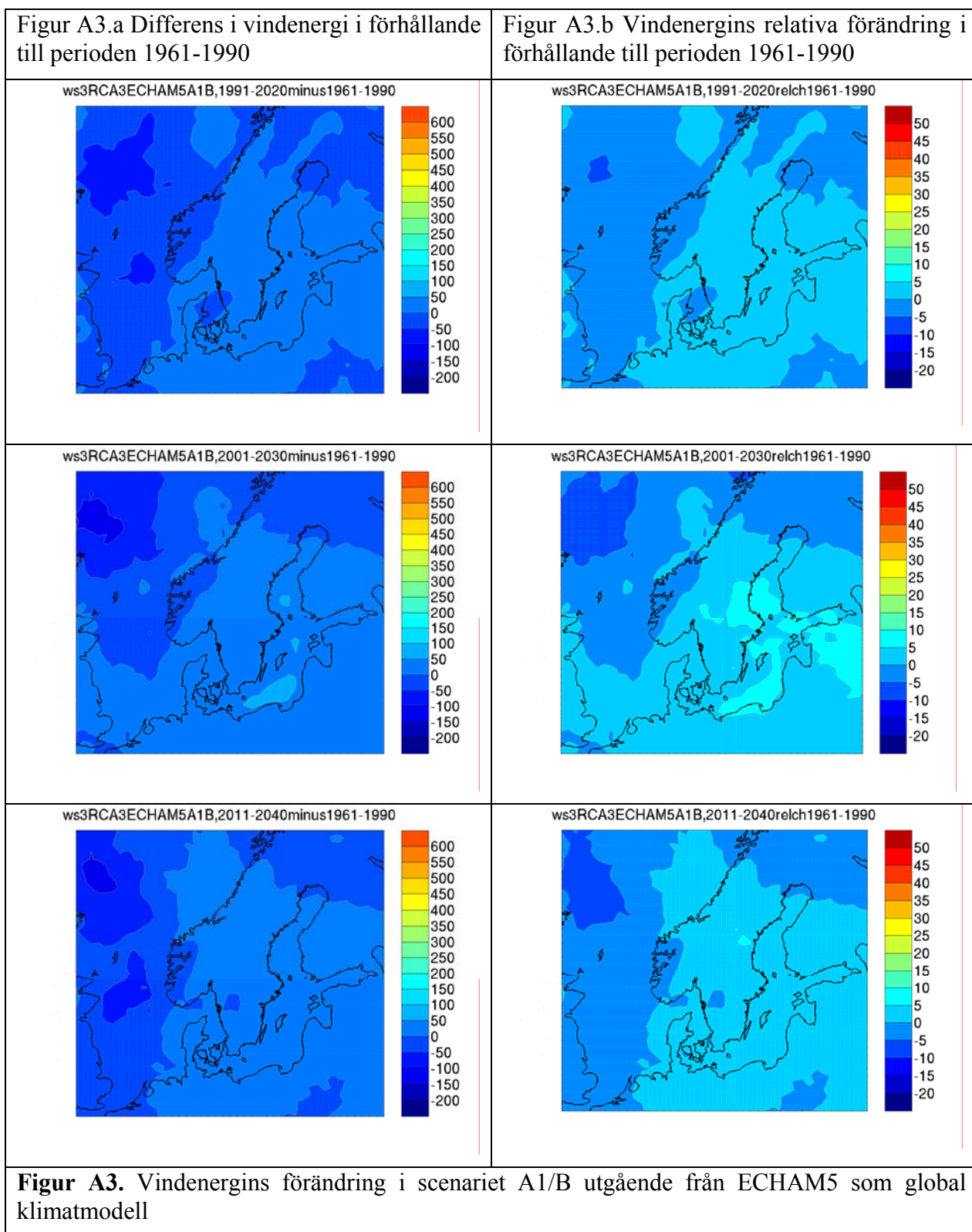
VINDENS BERÄKNADE ENERGIINNEHÅLL

De beräkningar som Rossby Center, SMHI, gjort med hjälp av den regionala klimatmodellen RCA3 över hur vindenergin vid 70m höjd över marken förändras från jämförelseperioden 1961 – 1990 sammanfattas i nedanstående matris, som hänvisar till efterföljande kartbilder.

Emissions-scenario	Global modell	Vindenergin	
		Differens till 1961-1990	Relativt 1961-1990
A2	ECHAM4	Figur A1.a	Figur A1.b
B2	ECHAM4	Figur A2.a	Figur A2.b
A1B	ECHAM5	Figur A3.a	Figur A3.b







BILAGA B

BERÄKNAD RISK FÖR VINDSTYRKOR ÖVER 25 RESPEKTIVE 21 METER PER SEKUND

De beräkningar som Rossby Center, SMHI, gjort med hjälp av det regionala simuleringsprogrammet RCA3 över hur frekvensen av vindstyrkor på 25 m/s och däröver förändras från jämförelseperioden 1961 – 1990 sammanfattas i nedanstående matris, som hänvisar till efterföljande kartbilder.

Emissions-scenario	Global modell	Frekvensen av vindstyrkor > 25 m/s	
		Absolut mått	Differens till 1961-1990
A2	ECHAM4	Figur B1.a	Figur B1.b
B2	ECHAM4	Figur B2.a	Figur B2.b
A1B	ECHAM5	Figur B3.a	Figur B3.b

Emissions-scenario	Global modell	Frekvensen av vindstyrkor > 21 m/s	
		Absolut mått	Differens till 1961-1990
A2	ECHAM4	Figur C1.a	Figur C1.b
B2	ECHAM4	Figur C2.a	Figur C2.b
A1B	ECHAM5	Figur C3.a	Figur C3.b

När det gäller hur frekvensen av vindstyrkor på 21 m/s eller däröver förändras i relativa mått kan modellberäkningarna inte ge svar på detta när det gäller Sverige och dess kustområden. Detta beror på att den beräknade differensen mellan ”då och nu” utgör en skillnad mellan två nästan lika små tal. Detta gör att det relativa måttet på förändring blir mycket osäkert.

