

Vindpotentialen i Sverige på 1 km-skala

Beräkningar med MIUU-modellen

Version 2007

Hans Bergström
Institutionen för geovetenskaper, luft och vattenlära
Uppsala universitet
hans.bergstrom@met.uu.se

1. Inledning

Den s.k. MIUU-modellen (*Meteorologi Uppsala Universitet*) har använts för att beräkna vindpotentialen över Sverige med 1 km horisontell upplösning. Kartläggningen utgör en del av Energimyndighetens projekt 'Kartläggning av vindpotentialen i Sverige'. Metoderna som använts för vindkarteringen har utvecklats inom programmen för vindenergiforskning i Sverige och finns beskriven i ett antal referenser [1,2,3,4]. Den aktuella metodiken finns beskriven mer i detalj i ett bidrag till den europeiska vindenergikonferensen EWEC2004, se [5].

2. Bakgrund

Användandet av avancerade s.k. mesoskale-modeller för att beräkna vindpotentialen har ökat under senare år. Speciellt i komplex terräng är behovet ofta uppenbart av mer avancerade modeller än vad som tidigare ofta använts. Men även till havs har observationer i Östersjöområdet visat en högre grad av komplexitet och inhomogenitet än vad som tidigare förväntats avseende vindarna till havs.

Beräkningar med en högre ordningens mesoskale-modell, MIUU-modellen utvecklad vid Meteorologiska Institutionen, Uppsala universitet, visar att en sådan modelltyp kan återge den observerade komplexiteten och inhomogeniteten i vindfälten, både till havs och i fjällterräng. En högre ordningens modell är emellertid krävande att köra vad det gäller datortid, varför det är av vikt att begränsa antalet modellkörningar så mycket som möjligt då en sådan modell används för vindklimatberäkningar.

En metod för att beräkna den klimatologiska medelvinden med användande av MIUU-modellen har utvecklats vid Uppsala universitet. Metoden reducerar det totala antalet modellkörningar som behövs. Ett begränsat antal klimatologiskt relevanta simuleringar görs för olika vind- och temperaturförhållanden. För att beräkna vindklimatet görs sedan en sammanvägning av resultaten baserad på klimatologisk statistik över den geostrofiska vinden, d.v.s. den horisontella lufttrycksgradienten. Metoden medger en kartering av vindklimatet med en horisontell upplösning på 0.5-10 km. För att kunna utnyttja metoden krävs information om geostrofisk vind (styrka

och riktning), havs- och marktemperaturer, topografi, ytråhet och markanvändning. Inga observationer av vindar i gränsskiktet behövs för en vindkartering annat än för verifiering av resultaten. Jämförelser mellan modellberäkningar och observationer visar generellt sett på god överensstämmelse.

3. MIUU-modellen

MIUU-modellen är en tredimensionell hydrostatisk mesoskale-modell, som har utvecklats vid Meteorologiska institutionen vid Uppsala universitet (Enger, 1990). Modellen har prognostiska ekvationer för vind, temperatur, luftfuktighet och turbulent kinetisk energi. Turbulensen är parameteriserad med ett 'level 2.5' schema enligt Mellor och Yamada (1974). Metoden beskrivs i detalj i Andrén (1990). MIUU-modellen har ett terränginfluerat koordinatsystem (Pielke, 1984), som i stort följer terrängen nära markytan och som gradvis övergår till ett horisontellt koordinatsystem vid modelltoppen. För att begränsa inflytandet från modellens yttre begränsningar, är det modellerade området betydligt större än det området som är av intresse. Det medger också att man kan ta hänsyn till inflytanden från t.ex. bergsområden och havsområden eller stora sjöar utanför det undersöka området, som ändå kan ha betydelse för vindarna i området som är av intresse. För att begränsa antalet beräkningspunkter i horisontell led, ökas ofta avstånden mellan beräkningspunkterna teleskopiskt mot modellränderna, men den högsta upplösningen endast inom det område som är av intresse. I vertikal led är avstånden mellan de nedre nivåerna logaritmiska, medan de övre nivåerna är linjärt fördelade. Den nedersta beräkningspunkten ligger på höjden z_0 , där z_0 är den s.k. skrovlighetslängden (ytråheten, även benämnd råhetslängden eller 'skrovligheten'), och modelltoppen ligger typiskt på 10000 m höjd. Vanligen har modellen åtta beräkningsnivåer upp till 100 m höjd.

Vid modellens nedre rand måste skrovlighet och jordytans höjd över havet ges för varje beräkningspunkt. Information om topografi och landanvändning hämtas från digitala kartor med en upplösning på 30" (the U.S. Geological Survey, the University of Nebraska-Lincoln, and the European Commission's Joint Research Centre 1-km resolution global land cover characteristics database, 1999, version 2.0). Skrovligheten över land är klassindelat med utgångspunkt från markanvändning. Över vatten beräknas z_0 enligt Charnocks relation. Under vintern sätts skrovlighetslängden till 0.001 m över öppen terräng för att representera snötäckts land. Även temperaturen måste ges eller beräknas vid modellens nedre rand. Över land beräknas denna med hjälp av en energibalansrutin vilken som indata utnyttjar solstrålningen och landanvändningen. Över vatten utnyttjas de observerade månadsmedelvärdena av ytvattentemperaturen.

MIUU-modellen har tidigare använts i många undersökningar i olika landskapstyper, och resultaten har visat god överensstämmelse med observationer. I Källstrand et al. (2000) studerades vindarna till havs över Östersjön. Modellerings av vindar i bergsterräng har genomförts bl.a. runt Mohavesjön i Colorado-floden dalgång (Enger et al., 1993; Koracin och Enger, 1994). Vindklimatologiska undersökningar har gjorts för ett fjällområde i norra Sverige (Bergström och Källstrand, 2000 och 2001). I Bergström (1996) och i Sandström (1997) har MIUU-modellen använts för att

beräkna vindklimatet över Östersjön. Bergström (2002) ger en allmän beskrivning av metodiken att beräkna vindklimatet med hjälp av en högre ordningens modell som MIUU-modellen, och i Bergström (2003) presenteras resultat från tester av det beräknade vindklimatets sensitivitet för valet och omfånget av modellkörningar som används för den klimatologiska sammanvägningen.

4. Modellområde

När vindklimatet i ett område ska modelleras är det viktigt att inte enbart inkludera lokala influenser av t.ex. terrängen. Det lokala vindklimatet påverkas också i varierande grad av förhållanden på stora avstånd från det område som är av primärt intresse. T.ex. påverkar närvaron av den Skandinaviska fjällkedjan och Österjön/Bottenhavet vindklimatet i stora delar av Sverige. För att ta hänsyn till sådana externa effekter på vindklimatet har resultat med en horisontell upplösning på 5 km först utnyttjats.

Eftersom 5 km horisontell upplösning är alltför grov för att tillfredställande lösa upp vindfältet i terrängen, har därefter modellkörningar gjorts med en horisontell upplösning på 1 km. För att i dessa körningar med högre upplösning också inkludera effekter av topografi och land/hav-skillnader på en större skala, har modellkörningarna med den högre upplösningen 'vävts' in i (*engelska* 'nested') resultaten från 5 km körningarna, d.v.s. värdena på ränderna i de högupplösta modellområdena hämtas från resultaten av modellkörningarna med 5 km upplösning. Allt som allt har Sverige delats in i 14 st delområden när modellberäkningarna med 1 km upplösning gjorts. Kartan över Sverige i Figur 1 visar uppdelningen i dessa 14 delområdena .

Vertikalt har modellberäkningarna gjorts med 29 beräkningsnivåer. Den lägsta nivån ligger på höjden z_0 , där z_0 är den s.k. skrovlighetslängden. Avstånden mellan de nedre nivåerna är logaritmiskt fördelade, medan de övre nivåerna är linjärt fördelade. Modelltoppen ligger typiskt på 10000 m höjd där den vertikala upplösningen är 760 m. Beräkningarna har gjorts med 8 beräkningsnivåer upp till 100 m höjd.

5. Medelvindklimatet

För att kunna beräkna vindklimatet kommer totalt 192 modellkörningar att göras, vilka ska representera de för klimatet mest betydelsefulla meteorologiska förhållandena. Modellkörningar görs för de fyra årstiderna (representerade av förhållandena i januari, april, juli och oktober), samt för 3 styrkor och 16 riktningar för den geostrofiska vinden (den horisontella lufttrycksgradienten). Samtliga modellkörningar har efter en initialisering på 6 modellerade timmar låtit löpa över en 24 timmars dygnscykel.

Med utnyttjande av statistik över geostrofiska vindens fördelning till styrka och riktning, och dess variation över året, viktas resultaten från de 192 modellkörningarna samman till ett vindklimatologiskt resultat för varje beräkningspunkt och varje modellnivå av intresse. Underlaget för bestämningen av de statistiska egenskaperna

hos den geostrofiska vinden har utgjorts av lufttrycksmätningar korrigerade till havsytans nivå utnyttjats. Data från Visby, Göteborg och Lund 1900-2000 har använts vad det gäller södra delen av Sverige, medan data från Bodö, Härnösand och Haparanda använts för norra Sverige. Därefter har återanalysdata från en databas i USA ('NCEP/NCAR reanalysis data', NCEP = National Centers for Environmental Prediction, NCAR = National Center for Atmospheric Research, <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml>) utnyttjats för att korrigera för den geografiska variationen av den geostrofiska vinden över landet. De statistiska egenskaperna för den geostrofiska vinden bestämd från NCEP/NCAR återanalysdata har då först visats stämma väl överens med data från de markbaserade lufttrycksmätningarna.

6. Resultat

De här redovisade resultaten av vindkarteringen (version 2007) är den slutliga versionen inom vindkarteringsprojektet. De är baserade på modellkörningar representerande alla fyra årstiderna (till skillnad från version 2006 som enbart baserades på årstiderna vår och höst). Resultaten redovisas dels i form av tre rikstäckande kartor som visar årsmedelvindhastigheten på höjderna 49 m, 72 m och 103 m (Figur 2 - Figur 4). Differensen i årsmedelvind mellan version 2007 och version 2006 (

Figur 5) visar att generellt små skillnader, men i vissa områden har vinden ökat eller minskat med 0.2-0.4 m/s. Årsmedelvindarna på 72 m höjd åskådliggörs även i mer detaljerade kartor över landets södra, mellersta och norra delar (Figur 6 - Figur 8). Ännu mer detaljerade kartor finns för de tre höjderna 49 m, 72 m och 103 m framtagna dels för 27 delområden, dels för 15 delområden på höjden 72 m, som täcker hela Sverige. Delområdenas omfattning kan ses i Figur 9 och Figur 10. De detaljerade kartor över 27 delområden finns tillgängliga via internet hos Uppsala universitet på <http://www.geo.uu.se/luva/default.aspx?pageid=13152&lan=0>. Kartorna över 15 delområden finns hos Energimyndigheten (www.stem.se).

Det bör noteras att höjderna avser höjden ovan den s.k. nollplansförskjutningen, vilken tar hänsyn till höjden av vegetation och bebyggelse. Typiskt är denna nollplansförskjutning ca $\frac{3}{4}$ av t.ex. trädens höjd i en skog. För fallet med en skog som består av 20 m höga träd, kommer således de beräknade medelvindarna att gälla för höjder som är 15 m högre över markytan än vad som anges i figurerna. Alltså kommer i detta fall höjden 48 m (som avser höjden ovan nollplansförskjutningen) att motsvaras av höjden $48+15=63$ m ovan markytan.

När överensstämmelsen mellan modellresultat och observationer bedöms är det viktigt att komma ihåg den upplösning på 1 km^2 som använts i modellberäkningarna. Den topografi och ytråhet som använts i modellen är medelvärden över 1 km^2 stora ytor. Den verkliga topografin varierar ofta även på mindre skalor. Ett exempel visas i Figur 11. Formen och den generella storleken på berget fångas även av modelltopografin, men den småskaliga toppen missas med modellens upplösning som ger en 40 m för låg topp. Detta kan förväntas påverka beräkningarna och mycket riktigt ger modellen i detta fall en medelvind på endast 5.6 m/s medan en vindmätning ger 7.2 m/s. En motsvarande typ av beräkning med MIUU-modellen som gjorts inom karteringsprojektet har lokalt gjorts över området runt berget med den dubbla upplösningen, d.v.s. 500 m. Bergets topografi löses då upp betydligt bättre och

modellresultatet ger i detta fall medelvinden 6.7 m/s. Även med 500 m upplösning kan dock effekterna av den mindre bergstoppen inte helt förväntas lösas upp i modellberäkningen.

Beräkningarna har jämförts med vindmätningar i höga master på 66 platser över hela landet. Mäthöjderna varierar mellan 20 m och 145 m med flest mätningar i intervallet 30-60 m och runt 100 m. Medeldifferensen mellan observerad och modellberäknad vind låg på -0,02 m/s, d.v.s. ingen systematisk skillnad finns mellan de två och korrelationen är god med en korrelationskoefficient på 0.98 (Figur 12). En viss spridning kan dock noteras, men för 88 % av jämförelserna ligger differensen inom ± 0.4 m/s. Medelkvoten mellan observerad och modellerad årsmedelvind ligger på 1,00 och för 46 % av data är avvikelserna inom ± 3 % (0.97–1.03), 79 % ligger inom ± 6 % och 96 % av jämförelserna ligger inom ± 9 %.

En jämförelse mellan modellberäknade och observerade vindprofiler på 4 platser (3 i Skåne och 1 i Småland, Figur 13) visar att karteringsresultaten väl fångar avtagandet i vinden med ökande avstånd från en kust. Vid Maglarp 1.5 km från skånska sydkusten finns vindmätningar på flera nivåer och överensstämmelsen är god mellan modell och observationer. I Bösarps 7 km från kusten har vinden enligt modellen avtagit med ca 0,2 m/s, vilket stöds av vindmätningar på 2 nivåer, 54 m och 88 m. Vid Slimminge 15 km från kusten har vinden avtagit ytterligare 0,4 m/s enligt både modell och observation. I Emmaboda i sydöstra Smålands skogsland 40-50 km från kusterna har vinden på 100 m höjd minskat nästan 2 m/s jämfört med Maglarp. Både modell och observation ger här medelvinden 6.7-6.8 m/s.

7. Angående vindens energiinnehåll

Antag att årsmedelvinden är 7.0 m/s och att vindfördelningen följer Weibullfördelningen. Det betyder att vindfördelningen ges av ekvationen

$$f(U) = \frac{c}{A} \left(\frac{U}{A} \right)^{(c-1)} \cdot e^{-\left(\frac{U}{A} \right)^c}.$$

Den beskrivs alltså av två parametrar: skalfaktorn A och formfaktorn c. Med medelvinden 7.0 m/s och med antagande om att formfaktorn $c = 2.0$, ger detta att skalfaktorn $A = 7.9$ m/s. Vindens energiinnehåll fås genom att integrera, eller summera, över alla vindhastigheter i vindfördelningen:

$$E_p = 8760 \cdot \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^{25} U_i^3 f_i(U_i).$$

Med de ovan givna förutsättningarna och med en summering upp till 25 m/s (vanlig stoppvind för vindkraftverk) fås då ett energiinnehåll i vinden på 3512 MWh/m²/år.

Men energiinnehållet är starkt beroende på vindfördelningens utseende. Formfaktorn c varierar en hel del mellan olika platser. Om vi antar att $c = 1.7$ fås för en årsmedelvindhastighet på 7.0 m/s att skalfaktorn $A = 7.85$ m/s, vilket ger ett

energiinnehåll på 4144 MWh/m²/år. Med antagandet att formfaktorn $c = 2.3$, får på motsvarande sätt att $A = 7.9$ och energiinnehållet blir då 3094 MWh/m²/år. Att variera formfaktorn c mellan värdet 1.7 och 2.3, vilket inte är extremt enligt de observationer som finns att tillgå i Sverige, innebär alltså att vindens energiinnehåll varierar mellan 3094 och 4144 MWh/m²/år, d.v.s. med 34 %.

En uppskattning av vindens energiinnehåll kan fås genom att anta att vinden är Weibullfördelad och beräkna vindens energiinnehåll för några olika årsmedelvindhastigheter. Resultatet från sådana beräkningar redovisas i tabellen nedan.

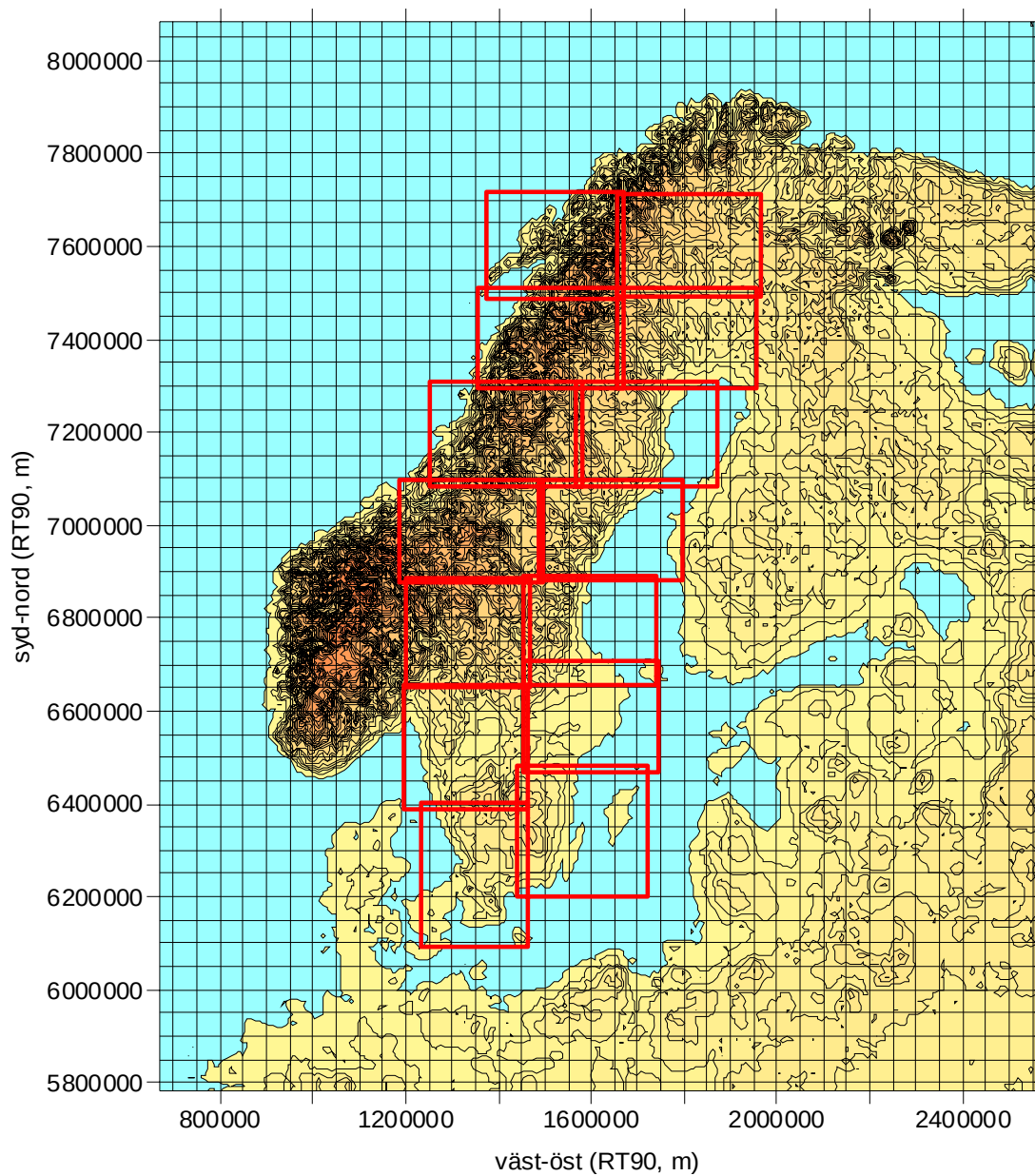
De stora skillnaderna i vindens energiinnehåll beroende på vindfördelningens form (34% om vi jämför förhållandena vid en årsmedelvind på 7 m/s med formfaktorena 1.7 och 2.3), reduceras dock kraftigt om vi istället jämför den faktiska energiproduktionen från en vindturbin. Om vi t.ex. använder en Vestas V90 på 2 MW, reduceras skillnaden från 34% till 5%.

Tabell 1: Några samhörande värden på årsmedelvindhastighet, Weibullfördelningens parametrar (formfaktor, c , och skalfaktor, A), samt vindens energiinnehåll, E , och energiproduktionen med en Vestas V90 2 MW vindturbin, E_{prod} .

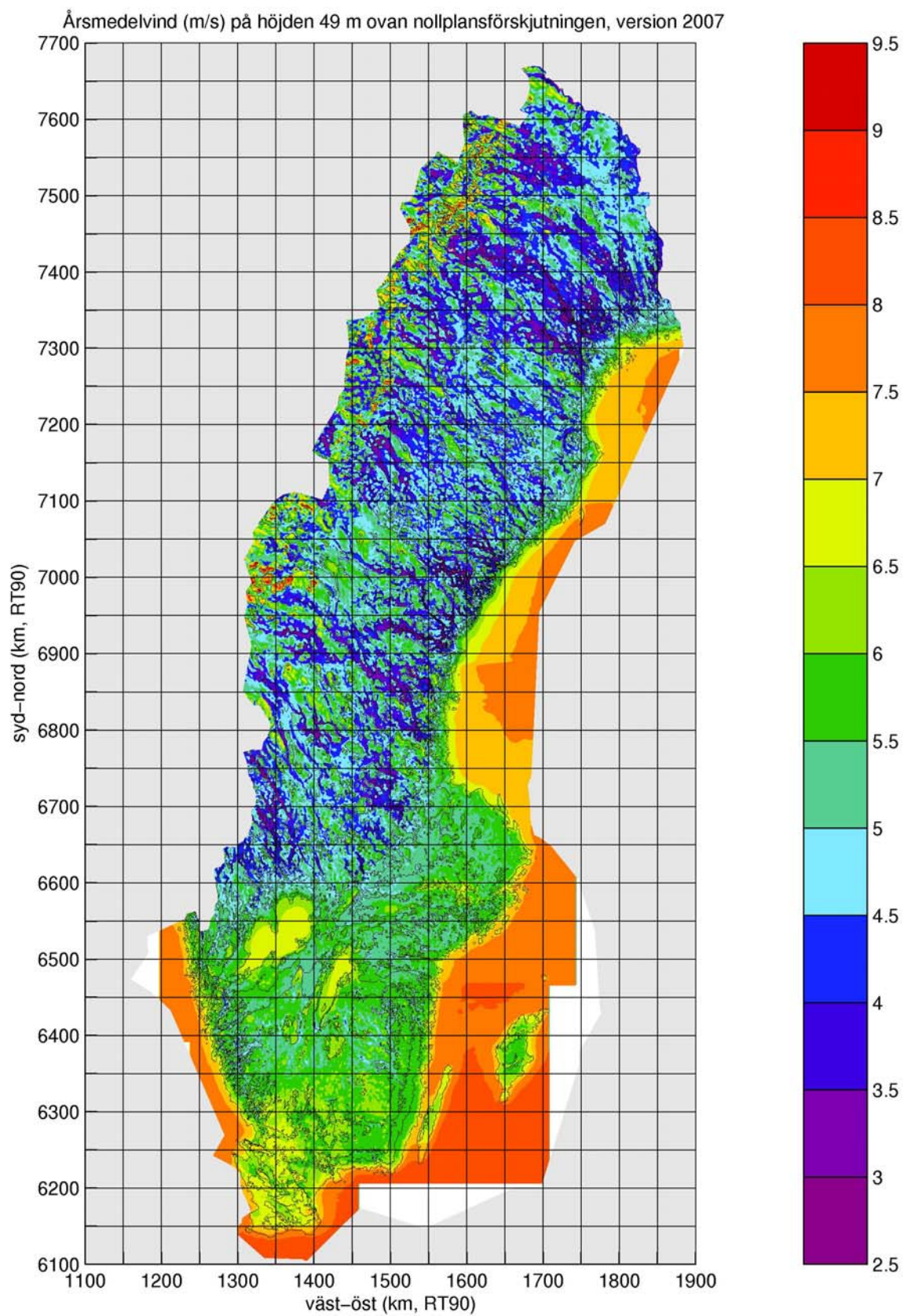
Års-medelvind (m/s)	$c = 1.7$			$c = 2.0$			$c = 2.3$		
	A (m/s)	E (kWh/m ² /år)	E_{prod} (MWh/år)	A (m/s)	E (kWh/m ² /år)	E_{prod} (MWh/år)	A (m/s)	E (kWh/m ² /år)	E_{prod} (MWh/år)
6.0	6.72	2642	5558	6.77	2213	5234	6.77	1948	4914
7.0	7.85	4144	7537	7.90	3512	7382	7.90	3094	7169
8.0	8.97	5935	9359	9.03	5206	9479	9.03	4619	9453

Referenser

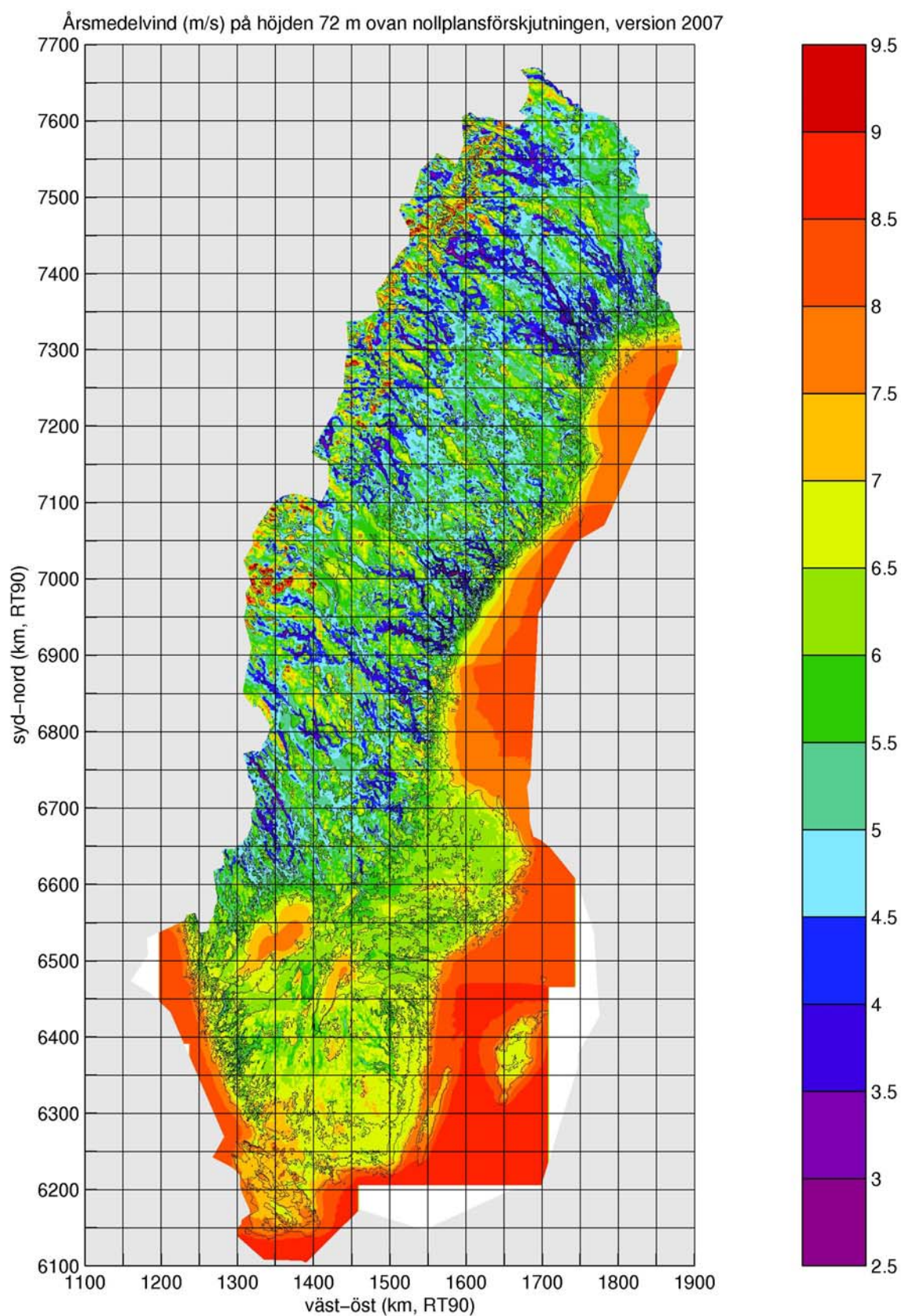
- [1]. Bergström, H., 1996: A climatological study of boundary layer wind speed using a meso- γ -scale higher-order closure model. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 1291-1306.
- [2]. Sandström, S., 1997: Simulations of the Climatological Wind Field in the Baltic Sea Area using a Mesoscale Higher-Order Closure Model, *J. Appl. Meteor.*, **36**, 1541-1552.
- [3]. Bergström, H., 2002: 'Boundary-layer modelling for wind climate estimates'. *Wind Engineering*, vol. 25, No. 5, 289-299.
- [4]. Bergström, H., and Lindholm, M., 2003: Higher-order closure meso-scale modelling for wind climate estimates. Proceedings from World Wind Energy Conference, WWEC2003, 23-26 November 2003, Cape Town, South Africa.
- [5]. Bergström, H., 2004: Higher-order closure meso-scale modelling for wind resource estimates in Sweden. Proceedings from European Wind Energy Conference EWEC2004, London 22-25 November 2004.



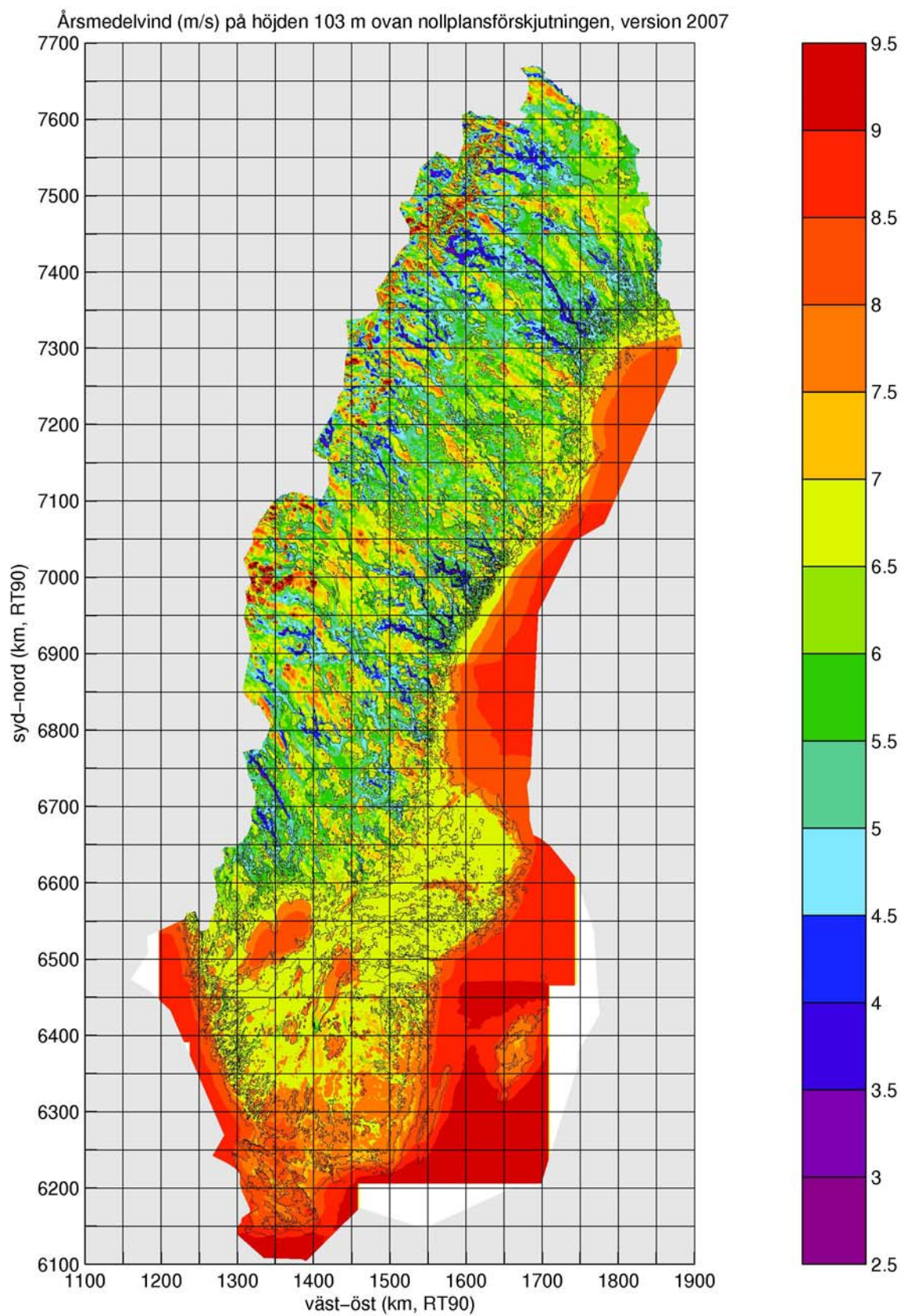
Figur 1: Topografisk karta som visar de 14 delområden vari Sverige delats upp för modellkörningarna med 1 km horisontell upplösning.



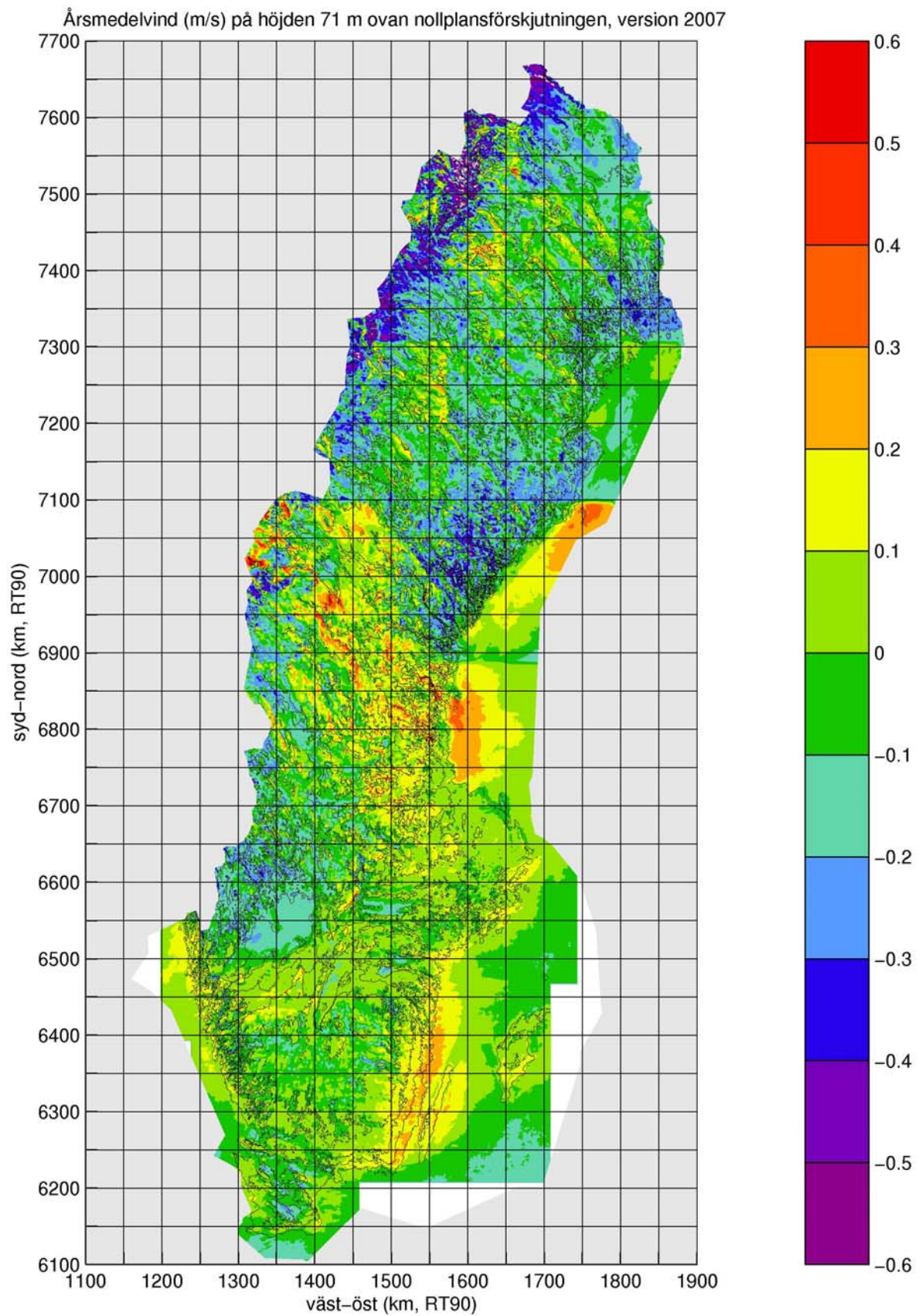
Figur 2: Årsmedelvinden på 49 m höjd ovan nollplansförskjutningen beräknad med MIUU-modellen med 1 km horisontell upplösning.



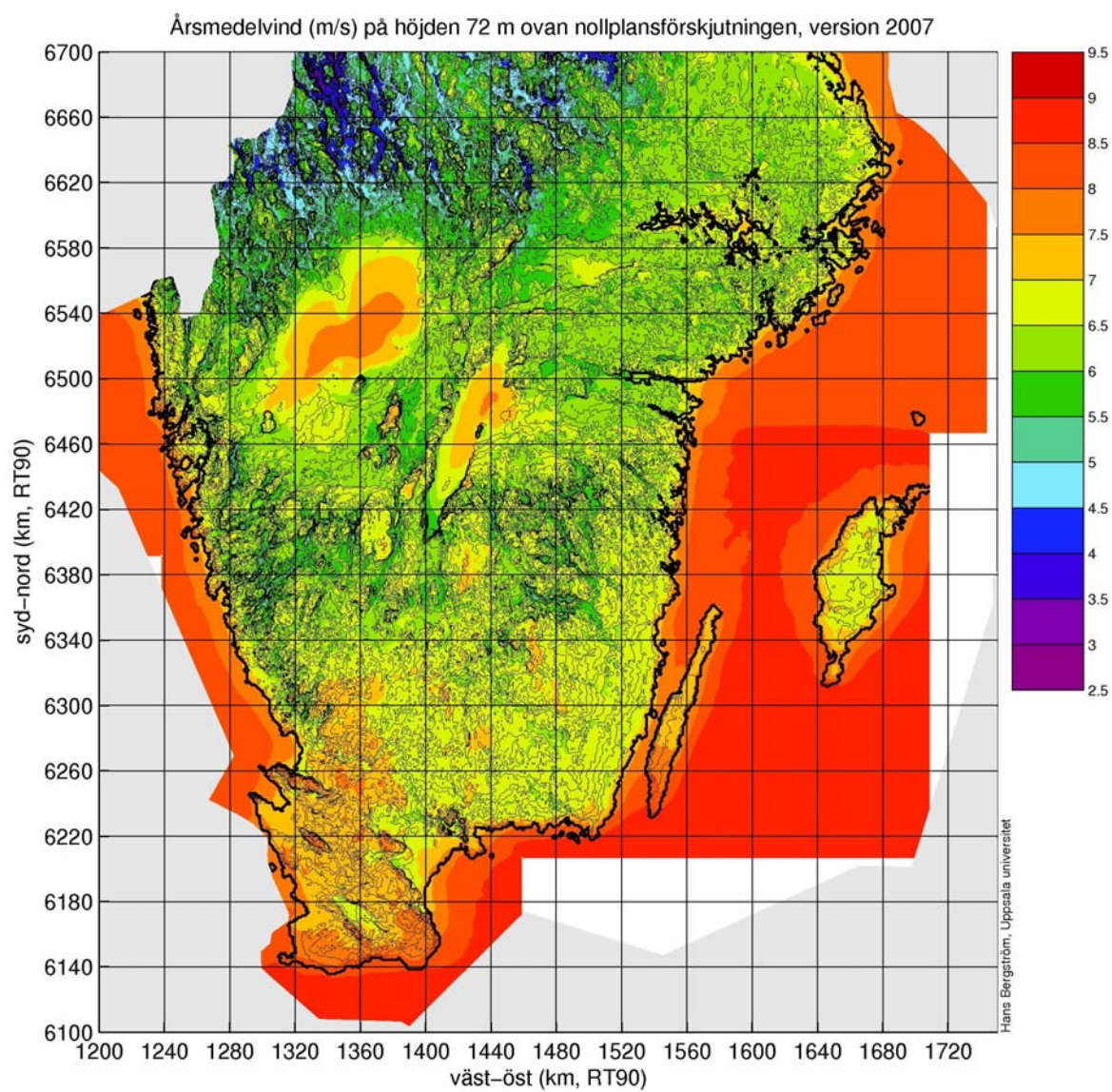
Figur 3: Årsmedelvinden på 72 m höjd ovan nollplansförskjutningen beräknad med MIUU-modellen med 1 km horisontell upplösning.



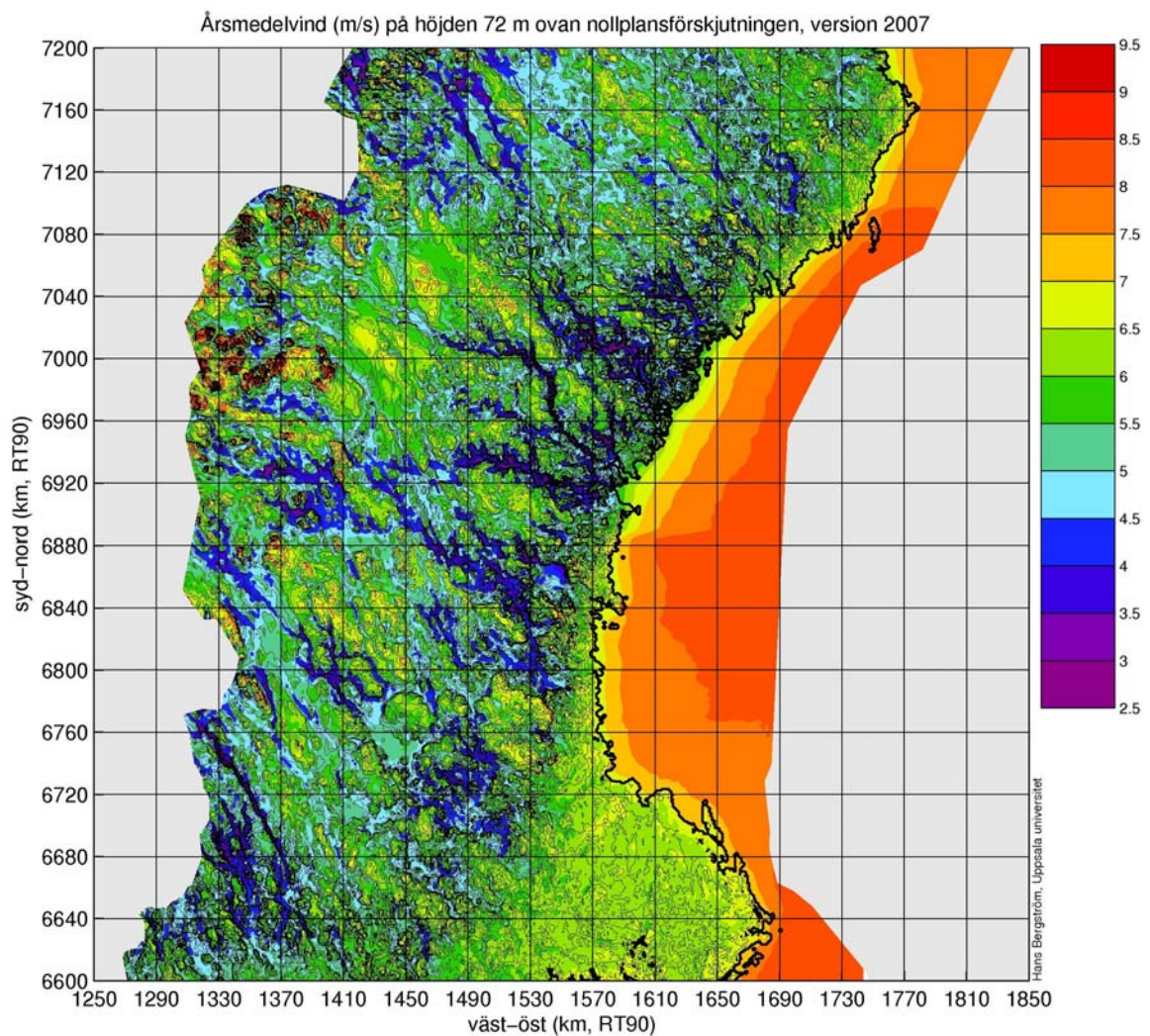
Figur 4: Årsmedelvinden på 103 m höjd ovan nollplansförskjutningen beräknad med MIUU-modellen med 1 km horisontell upplösning.



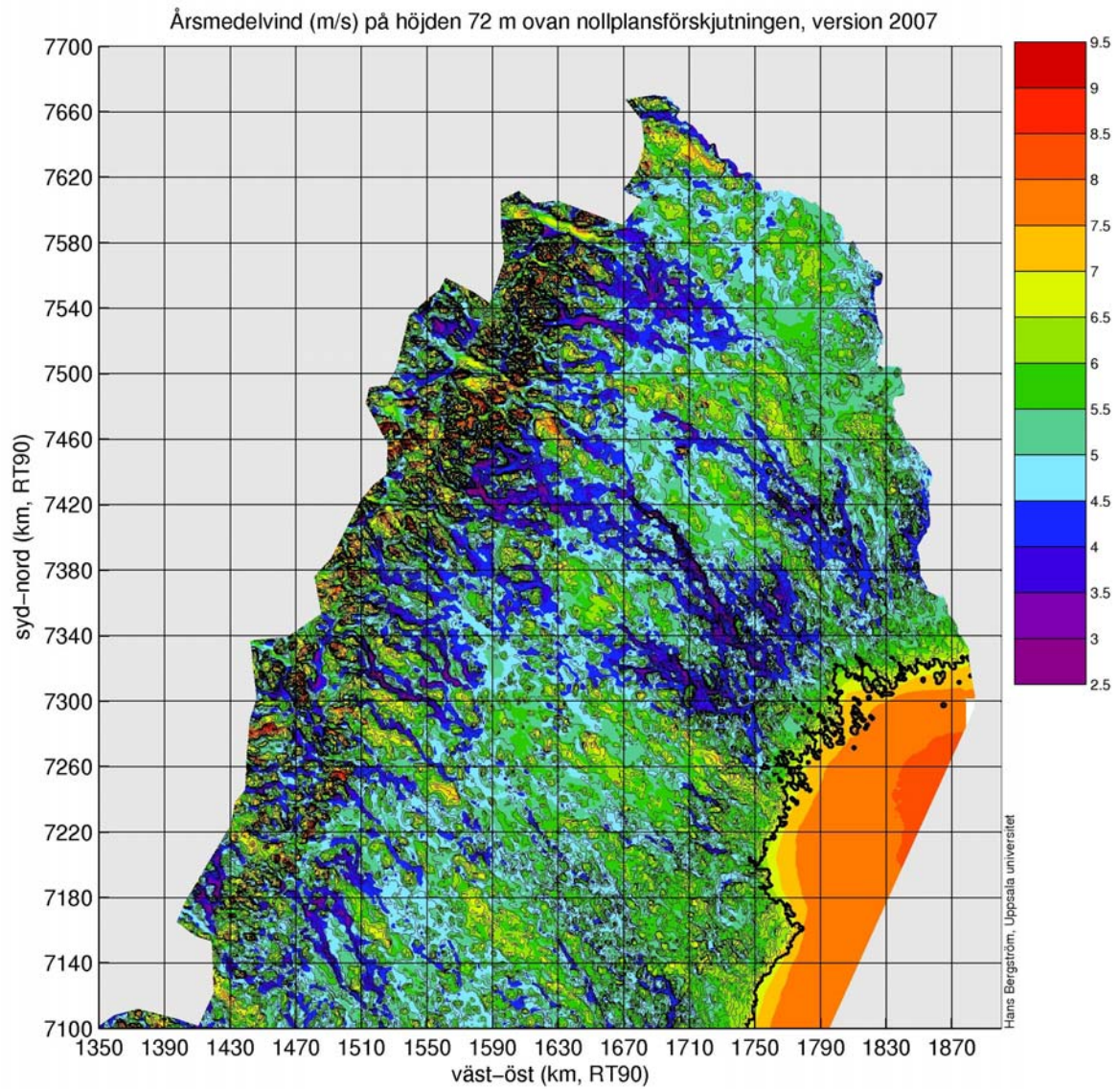
Figur 5: Differensen i årsmedelvind mellan version 2007 och version 2006.



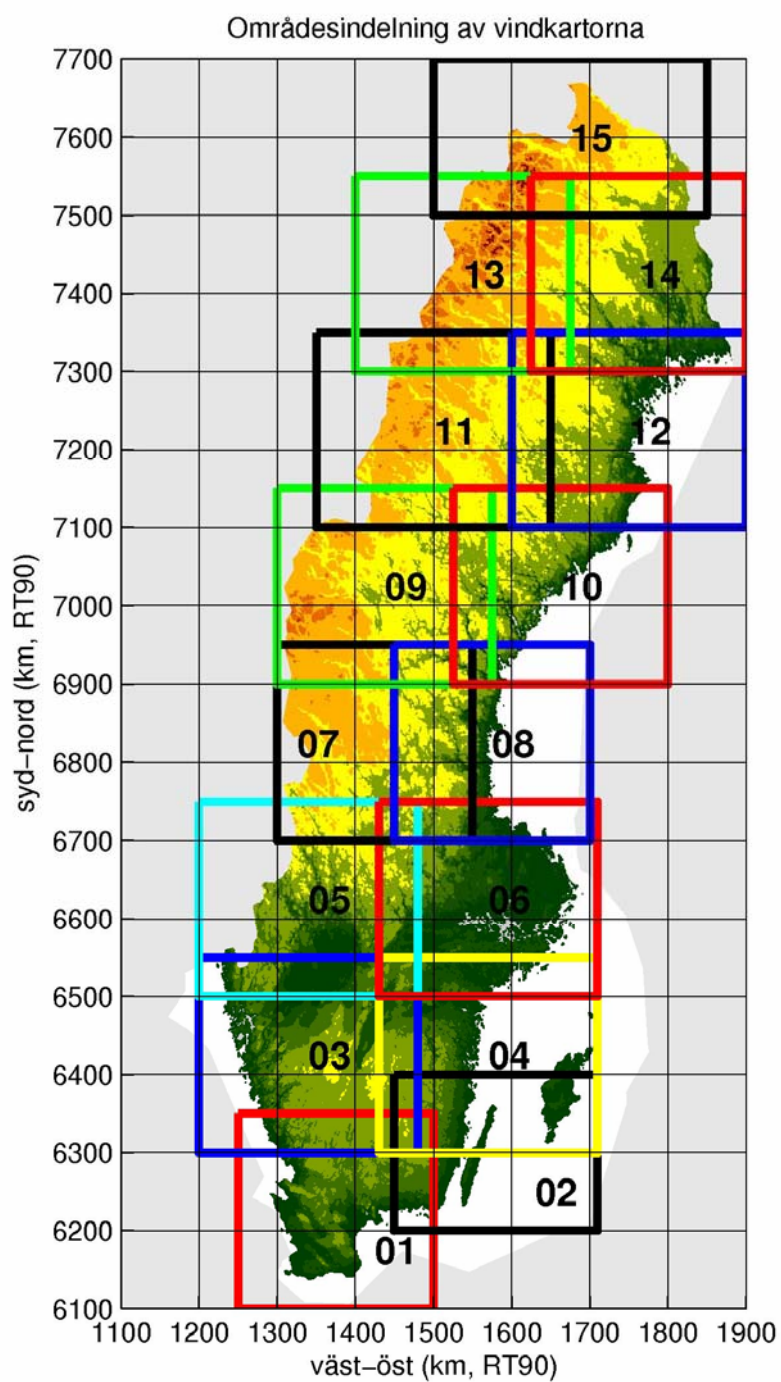
Figur 6: Årsmedelvinden på 72 m höjd ovan nollplansförskjutningen beräknad med MIUU-modellen med 1 km horisontell upplösning.



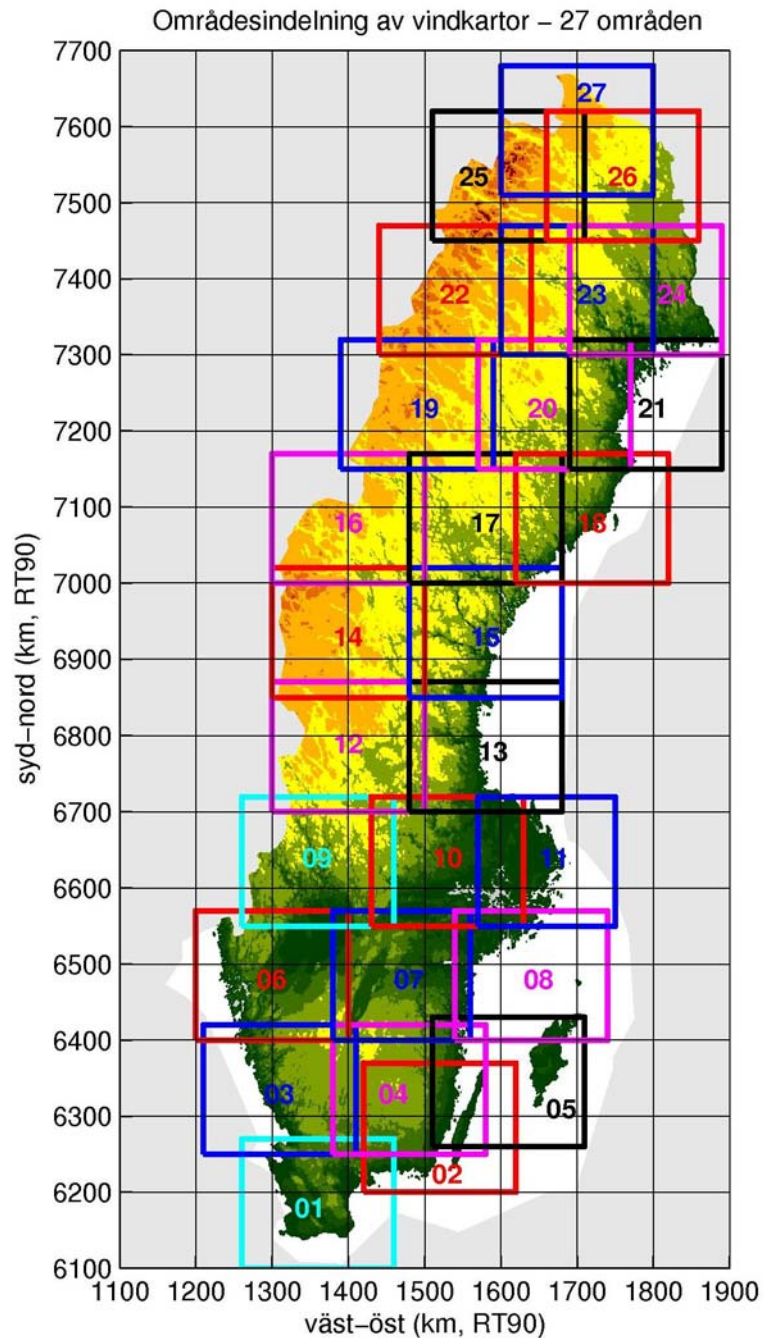
Figur 7: Årsmedelvinden på 72 m höjd ovan nollplansförskjutningen beräknad med MIUU-modellen med 1 km horisontell upplösning.



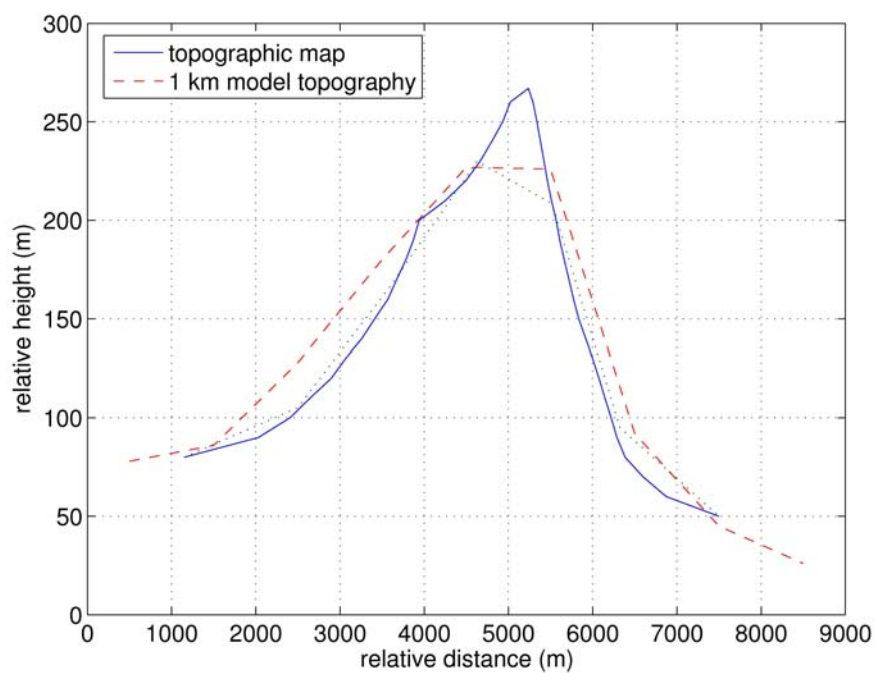
Figur 8: Årsmedelvinden på 72 m höjd ovan nollplansförskjutningen beräknad med MIUU-modellen med 1 km horisontell upplösning.



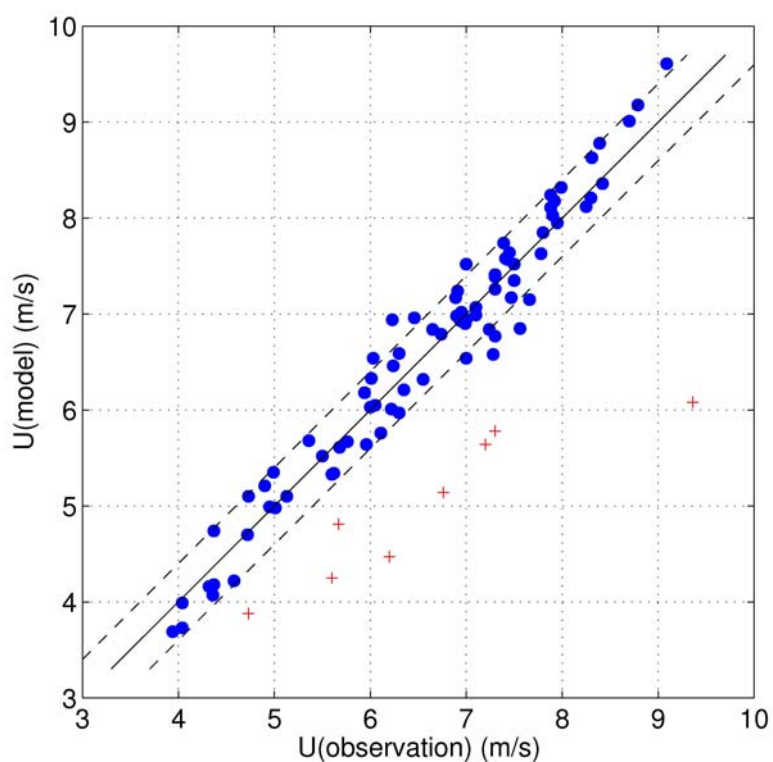
Figur 9: Topografisk karta över Sverige som visar de 15 delområden för vilka kartor över årsmedelvinden på 72 m höjd finns tillgängliga på Energimyndighetens hemsida (www.stem.se).



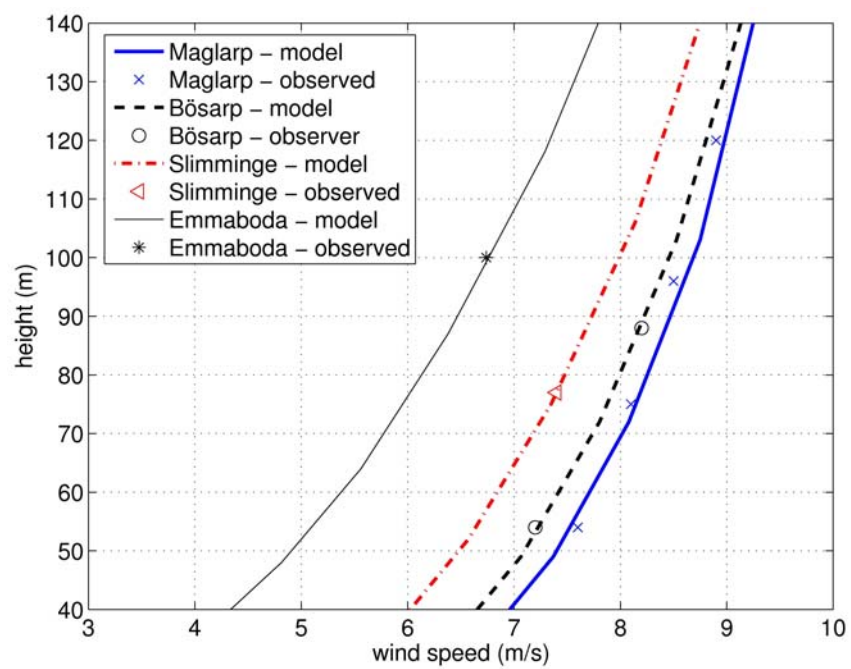
Figur 10: Topografisk karta över Sverige som visar de 27 delområden för vilka kartor över årsmedelvinden på 72 m höjd finns tillgängliga på Uppsala universitets hemsida (<http://www.geo.uu.se/luva/default.aspx?pageid=13152&lan=0>).



Figur 11: Jämförelse mellan verklig topografi och topografin med 1 km upplösning.



Figur 12: Modellerad mot observerad årsmedelvind. Platserna markerade med '+' har topografi som uppenbart inte löses up av modellen.



Figur 13: Modellerade och observerade årsmedelvindprofiler på 4 platser.