

**Verifiering av vindenergiberäkningar  
med Alarm-systemet  
för Västra Götalands län**

**Älvsborgs Luftvårdsförbund**

Februari 2001

## Älvsborgs Luftvårdsförbund

Älvsborgs luftvårdsförbund är en sammanslutning av kommuner och industrier med utgångspunkt i före detta Älvsborgs län. Verksamhetsområdet omfattar nu Västra Götaland. Förbundet leds av en styrelse sammansatt av kommunala förtroendemän och företrädare för industrin. Styrelsen har till sitt förfogande en arbetsgrupp.

Luftvårdsförbundet bistår medlemmarna med bl.a. spridningsberäkningar av luftutsläpp från fasta källor och trafik, stöd till räddningstjänsten i form av spridningsprognoser vid brand eller gasutsläpp och med utredningar om vindenergin.

Basen för luftvårdsförbundets arbete är en terränganpassad spridningsmodell (Alarm-systemet, se nedan) som utvecklats av docent Leif Enger vid Meteorologiska institutionen, Uppsala universitet, med stöd av Naturvårdsverket. För det meteorologiska underlaget vid beräkningarna äger luftvårdsförbundet för närvarande 3 sodar och 7 mastanläggningar, se nedan.

### **ALARM-systemet i Västra Götalands län.**

Dynamiken i atmosfärens gränsskikt beror på komplex växelverkan av olika inflytanden: lokal topografi, vegetation, moln, storskaliga synoptiska krafter (t.ex låg och högtryck), olika uppvärmning av jordytan, och andra processer. Turbulenta flödet i atmosfären är extremt komplext och övergriper så många storlekar av virvlar att det i praktiken är helt omöjligt att i detalj simulera all virvlar. Studiet av turbulenta flödet fokuseras därför på att beskriva dess statistiska egenskaper. Modellen som används i Älvsborgs län i Sverige är av en s.k. andra ordningens typ. Modellen löser ekvationerna för medelflödena. dvs för vinden, temperaturen och fuktigheten, men också ekvationerna för turbulensen i atmosfären. Modellen har utvecklats vid Meteorologiska Institutionen, Uppsala Universitet, Uppsala (MIUU-modellen) under de senaste 25 åren. Den datamaskinstid som fordras för den här typen av modell är ofta av samma storleksordning som simulerade tiden, och är alltså alltför datamaskinskrävande för att utnyttjas vid säsong- eller årsberäkningar. Istället för att förenkla modellstrukturen, som skulle kunna introducera felaktiga resultat i komplex terräng, initierade Enger ett annorlunda tillvägagångssätt. Ett stort bibliotek med simulerade vind-, temperatur-, fuktighets-, och turbulent energi-fält skapades genom att göra simuleringar med den dynamiska modellen för ett stort antal (flera tusen) vädersituationer – en så kallad meteorologisk databas.

Ett atmosfäriskt modellsystem (**ALARM**-systemet = **A**dvanced **L**ocal **A**nd **R**egional **M**odelling sytem) har implementerats i hela Västra Götalands län. Det har redan använts operationellt i ca 10 år för delar av området – före detta Älvsborgs län – såväl för beräkning av föroreningsituationen vid enskilda tillfällen som för beräkning av medelvärden av koncentrationerna. Alla beräkningar utförs med hjälp av den meteorologiska databasen samt genom att använda lokala meteorologiska mätningar. Applikationer inkluderar bl.a.

- Operationell luftföroreningsberäkning
- Medelvärdesberäkning av föroreningar för regleringsändamål, bestämning av källparametrar och som hjälp vid stadsplanering.
- Vindenergiplanering (vindkartor)



Figur 1. Sodarinstrument för beräkning av vind och vindriktning

När man använder denna meteorologiska databas för spridnings- eller vindenergi-beräkningar måste man veta vilket av dessa flera tusen vind och turbulensfält som skall användas för en viss tidpunkt. Genom att använda mätningar av vind från ett så kallat sodarinstrument (Figur 1) på någon plats i området samt mätningar av en temperaturprofil och vind från en mast (Figur 2) i området, kan modellen jämföra mätta vind- och temperaturvärden med de simulerade värdena och leta fram den situation i databasen som ger bäst överensstämmelse mellan mätning och simulering på de aktuella mätplatserna. Den situation som ger den bästa överensstämmelsen mellan mätning och simulering används sedan för spridnings- och/eller vindenergi-beräkningarna. I sydvästra Sverige är terrängskillnaderna av storleksordningen 100 m, men samma dynamiska modell och densamma proceduren har använts i sydvästra USA (Colorado River Valley) och Grekland (Aten-området) där höjdskillnaderna är mycket större (1000 m). Både den dynamiska meteorologiska modellen och spridningsmodellen har verifierats mot mätningar och modellresultaten har presenterats i ett flertal vetenskapliga tidskrifter.<sup>1) se sidan 5</sup>

En sodar (ljudradar), figur 1, beräknar vind upp till några hundra meters höjd genom att beräkna dopplereffekten på utsända ljudimpulser. Data från mätningarna samlas automatiskt in av datamaskinen en gång per timme. Dessa data sparas i en databas för att användas vid medelvärdesberäkningar. För att beräkna koncentrationerna eller vindenergin under en viss tidsperiod, t.ex en vecka, en månad eller ett år, utför man statistik



Figure 2. Mast med vind, vindriktning och temperaturmätningar

på hur många gånger var och en av de tusentals vind- och turbulensfälten har uppträtt. Denna statistik tillsammans med databasen av vind- och turbulensfält används sedan för beräkning av medelkoncentration och percentiler, samt vid vindenergiartering.

Modellsystemet har utformats så att en person utan någon meteorologisk bakgrund skall kunna arbeta med systemet. I Västra Götalands län har databasen och programmet installerats i en dator placerad i Vänersborg. Alla kommuner och industrier i området, som är medlemmar i Älvsborgs Läns Luftvårdsförbund, kan ringa upp datorn över ett telefonmodem eller över internet.

## MIUU-modellen Uppsala Universitet

Ett annat tillvägagångssätt för att beräkna vindklimatet har utförts vid Meteorologiska Institutionen, Uppsala Universitet. I denna metod används precis som i ALARM-systemet den meteorologiska vindmodellen (MIUU-modellen) som nämnts ovan. Som i ALARM-systemet bildas en databas med ett stort antal simuleringar, men i detta fallet för endast 8 vindriktningar i stället för 36 vindriktningar som simulerats i ALARM-systemet, eftersom man i ALARM-systemet även är intresserad av luftförorenings-spridningar i området och därför behöver en noggrannare vindriktningsbestämning. Vid vindenergiberäkningarna vid meteorologiska institutionen har simuleringar gjorts för 4 olika årstider för att ta hänsyn till olika stabiliteter.

Alla dessa simuleringar måste sedan viktas samman genom att använda klimatologiska data om den geostrofiska vindens hastighet och riktning (dvs den vind man har på någon eller några tusen meters höjd) och dess variationer under året. Årsmedelvindhastigheten eller potentiella vindenergin kan på detta sätt beräknas för olika höjder inom det studerade området. I meteorologiska institutionens version av vindberäkningar används alltså inga lokala vindmätningar som indata. På nästa sida visas en tabell av mätt och simulerad vind på ett flertal platser i Sverige och på ett flertal olika höjder. I tabellen finns också inkluderat en jämförelse av beräkningar av vindhastigheten med ALARM-systemet i Tolvmänstegen i Strömstads kommun, Västra Götalands län.

Masterna i Emmaboda, Byxelkrok och Östhammar ligger i skogsområden. Uppsalamasten låg vid stadsgränsen. I tabellen har värdena för simuleringarna på dessa platser ej korrigerats för den så kallade nollplansförskjutningen (ca 10 m för en 17 m hög skog). Detta skulle reducera modellens vindhastigheter med 0.2 – 0.4 m/s för de angivna höjderna och platserna.

---

1)

Här följer några referenser till artiklar som publicerats i vetenskapliga tidskrifter med verifiering av MIUU-modellen och spridningsmodellen:

Enger L. (1986) A higher order closure model applied to dispersion in a convective PBL. *Atmospheric Environment* **20**, 879-894.

Tjernström M., Enger L. and Andrén A. (1988) A three-dimensional numerical model for studies of atmospheric flows on the meso- $\gamma$ -scale. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 1988 special issue supp no 2 to vol. 7.

Enger L. (1990a) Simulation of dispersion in moderately complex terrain - Part A. The fluid dynamic model. *Atmospheric Environment* **24A**, 2431--2446.

Enger L. (1990b) Simulation of dispersion in moderately complex terrain - Part B. The higher-order closure dispersion model. *Atmospheric Environment* **24A**, 2447--2455.

Enger L. (1990c) Simulation of dispersion in moderately complex terrain - Part C. A dispersion model for operational use. *Atmospheric Environment* **24A**, 2457--2471.

Melas D. and Enger L. (1993) A numerical study of flow in Athens area using the MIUU model. *Environment Software* **8**, 55-63.

Enger L., Koracin D., Yang X. (1993) A numerical study of the boundary layer dynamics in a mountain valley --- Part 1. Model validation and sensitivity experiments. *Boundary-Layer Met.* **66**, 357-394.

Koracin D. and Enger L. (1994): A numerical study of the boundary layer dynamics in a mountain valley - Part 2. Observed and simulated characteristics of the atmospheric stability and the local flows. *Boundary-Layer Met.* **69**, 249-283.

Enger L. and Koracin D. (1995) Simulations of dispersion in complex terrain using a higher-order closure model. *Atmospheric Environment* **29**, 2449-2465.

**Tabell 1. Jämförelser mellan observerade vindar och beräkningar med MIUU-modellen:**

<i>Plats</i>	<i>Höjd (m)</i>	<i>Observation (m/s)</i>	<i>Modell (m/s)</i>	<i>Diff. (%)</i>
<i>Ölands södra grund</i>	32	8.2	8.1	-1
<i>Almagrundet</i>	32	8.2	8.0	-2
<i>Näsudden</i>	32	6.4	6.4	0
	49	7.2	7.1	-1
	71	7.8	7.9	1
	103	8.5	8.6	1
<i>Maglarp</i>	32	6.8	6.8	0
	49	7.4	7.3	-1
	71	8.0	7.9	-1
	103	8.6	8.5	-1
<i>Emmaboda</i>	100	6.6	7.0	6
<i>Byxelkrok</i>	50	6.0	6.3	5
<i>Östhammar</i>	50	5.0	5.2	4
<i>Uppsala</i>	50	5.1	5.2	2
<b><i>Medel:</i></b>		<b>7.13</b>	<b>7.16</b>	
<i>Tolvmanstegen*, Strömstad</i>	40	5.97	5.92	-1

\* MIUU-modellen/ALARM-systemet, körningar över Västra Götalands län. Medelvärde för år 1999 under samtliga perioder då såväl mätmasten i Tolvmanstegen och sodar-mastmätningar i Alarm-systemet levererat värden. Maj månad bortföll.

## Verifiering av beräkning av vindenergi för Västra Götalands län.

Beräkningar av vindenergin har utförts för ett stort antal vinkraftverk i Västra Götalands län. Nedan redovisas resultaten av beräkningar både i tabell och grafisk form. Beräkningar av årsproduktion har utförts för åren 1996 t.o.m. 2000 eller från verksstart för yngre kraftverk.

Nya beräkningar har utförts även för de verk som tidigare verifierats. I den nya beräkningen har ny statistik från sodar och mastmätningarna utförts för alla beräkningsår. Dessutom har hänsyn tagits till om kraftverken är placerade i öppen terräng eller i skog. I de fallen ett kraftverk är placerat i skog har nollplanet antagits till 12 m över marken – vilket betyder ca 18 m hög skog. Där skogen bedömts vara lägre eller vid fall då man har öppen mark åt ett håll och skog åt ett annat har nollplanet antagits vara 6 m över marken.

Kraftverkens koordinater har tillhandahållits av Länsstyrelsen. Länsstyrelsen framhåller att det f n saknas kvalitetssäkring av de koordinater som verksamhetsutövaren uppger. Därför har Länsstyrelsen i detta fall gjort en egen bedömning och gallrat bort de osäkra verken. Ev kvarvarande avvikelser bör inte påverka verifieringens resultat.

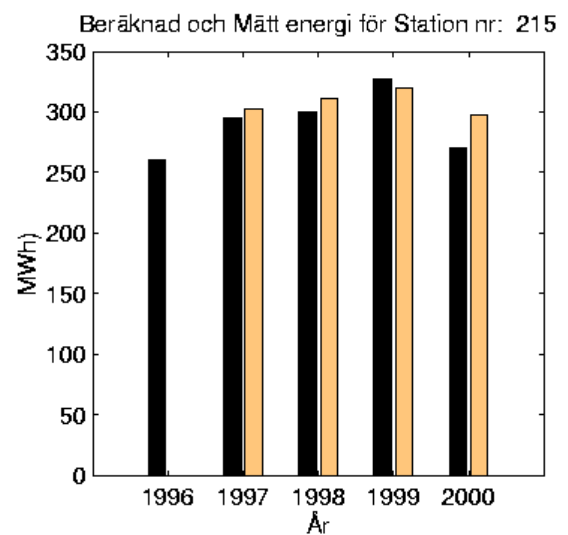
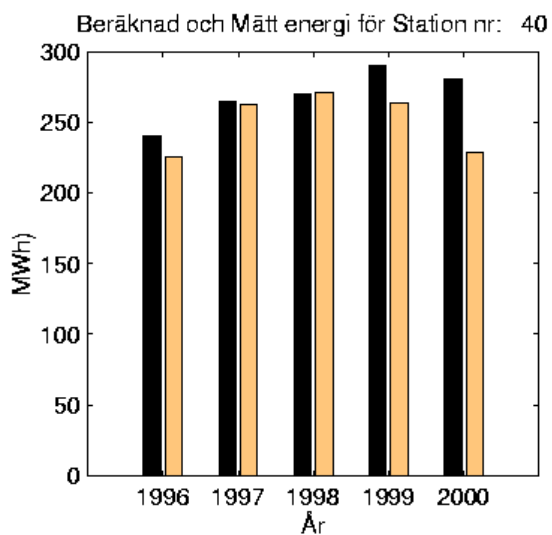
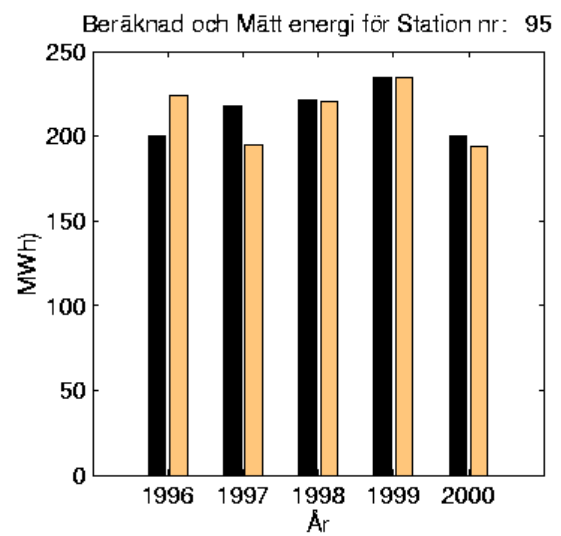
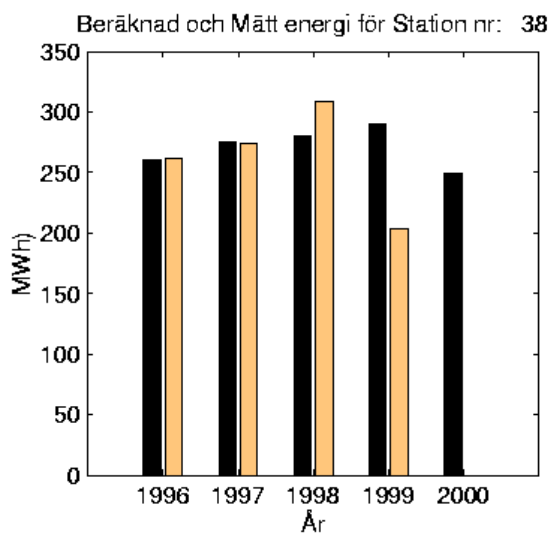
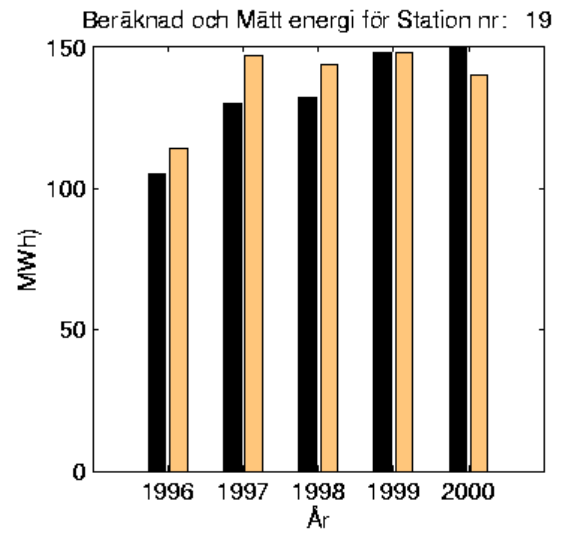
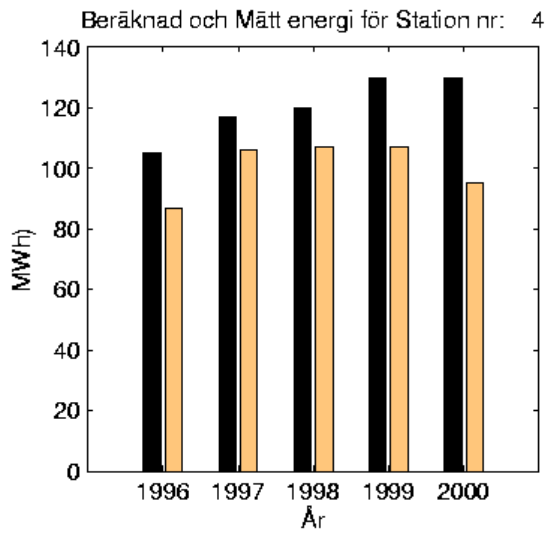
I tabell 2 på följande sidor anges i första spalten verkets namn och kommun. Andra spalten anger verkets nummer enligt Energimyndighetens benämning. Den tredje spalten anger beräknad produktion enligt statsbidragsansökan. Övriga spalter anger beräknad och uppmätt årsproduktion för varje enskilt verk för respektive år. För tre kraftverk gäller beräkningarna för år 2000 perioden 1 dec 1999 – 30 nov 2000, eftersom decemberproduktionen för dessa kraftverk ej har rapporterats. Dessa värden är märkta med en \* (kraftverk nr 398, 200 och 146). Om kraftverket har uppgivit ett produktionsbortfall som är mer än 2% har värdena korrigerats upp procentuellt. Detta är angivet med ett **k** eller **korr** framför värdet.

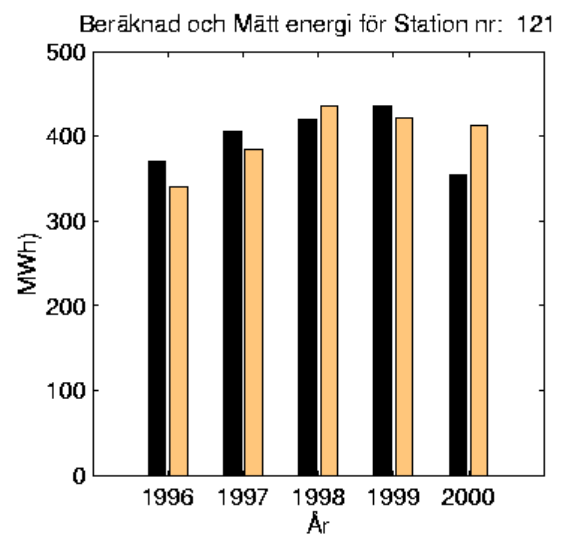
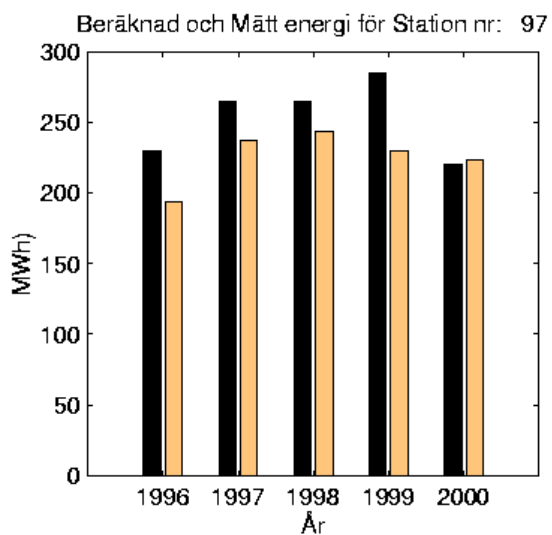
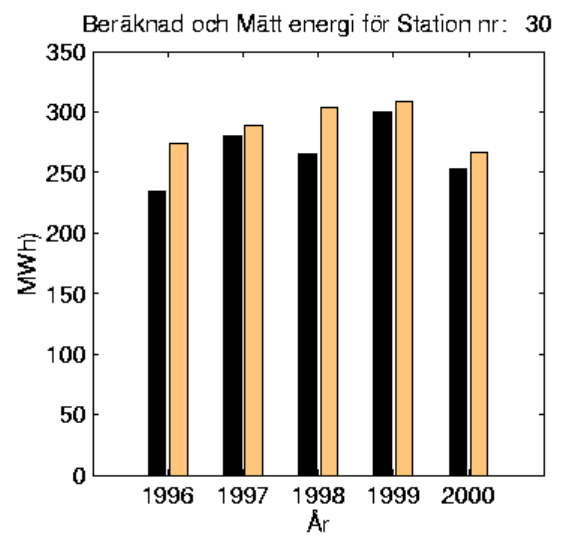
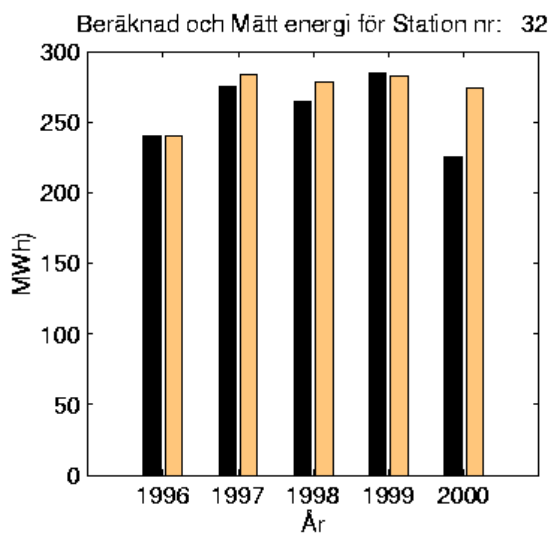
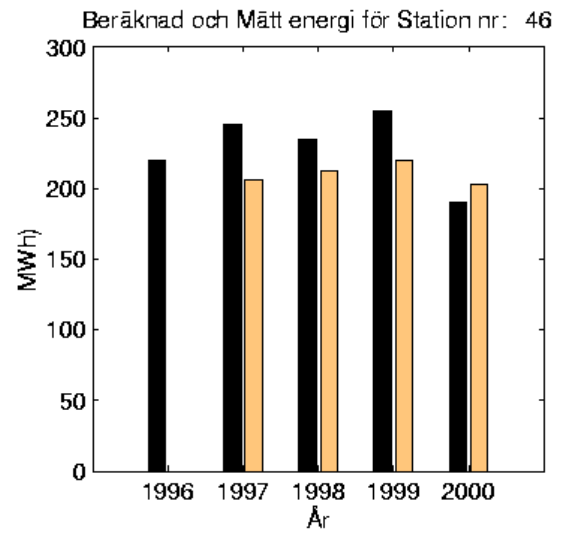
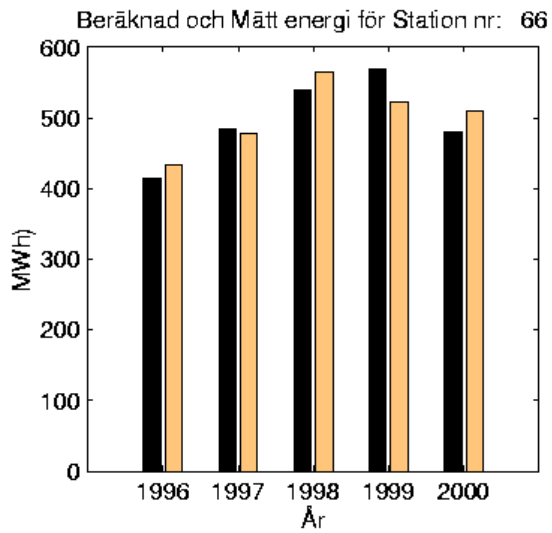
Tabell 2 följs av Figur 3 som visar beräknad (svart stapel) och angiven produktion (ljus stapel) för varje enskilt år samt för varje enskilt verk, dvs Figur 3 motsvarar Tabell 2 men uttryckt med hjälp av stapeldiagram.

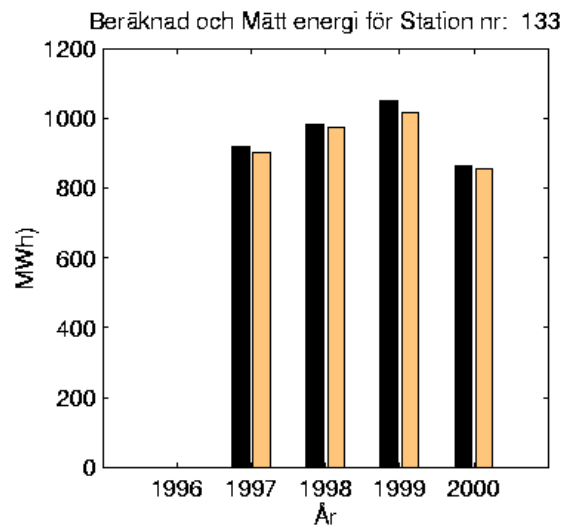
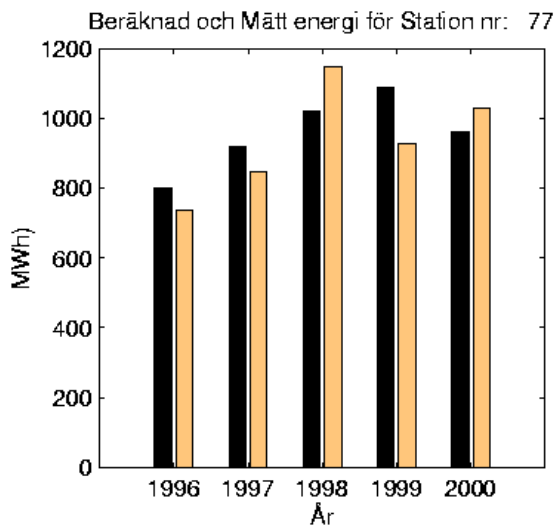
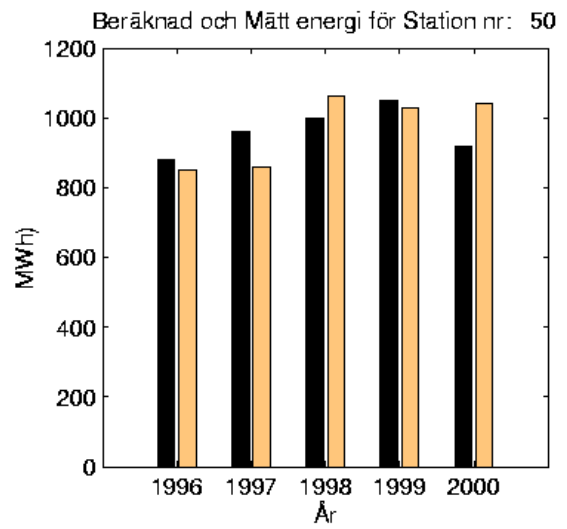
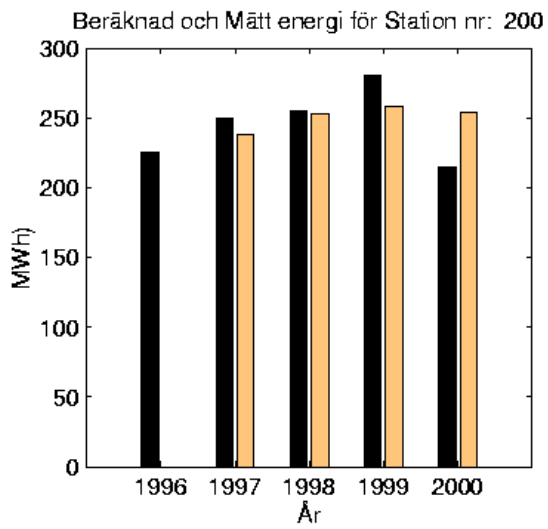
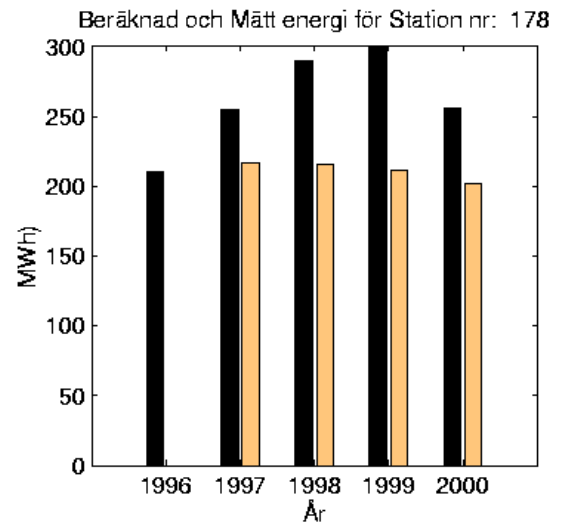
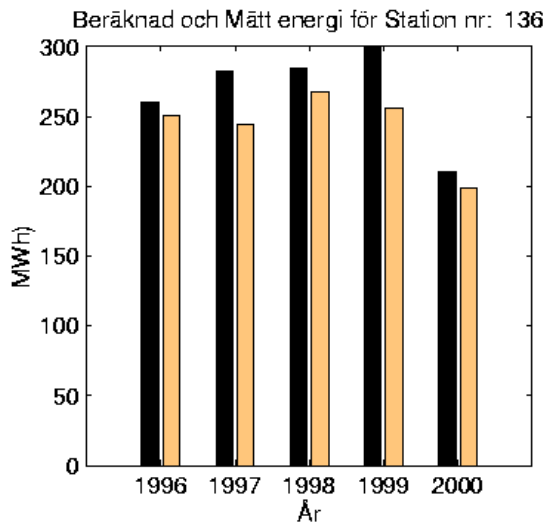
VINDKRAFT- VERK	NR	BER. PROD MWH	1996 MWH		1997 MWH		1998 MWH		1999 MWH		2000 MWH	
			ALARM	Drift	ALARM	Drift	ALARM	Drift	ALARM	Drift	ALARM	Drift
<b>Vestas 99</b>												
Erikstorp, Götene	4	165	105	<b>87</b>	117	<b>106</b>	120	<b>107</b>	130	<b>107</b>	130	<b>92 k 95</b>
<b>Wincon 99</b>												
Snösbäck, Falköping	19	180	105	<b>114</b>	130	<b>147</b>	132	<b>144</b>	148	<b>148</b>	150	<b>140</b>
<b>Wind World 150</b>												
Hede Gård, Mellerud	38	385	260	<b>262</b>	275	<b>274</b>	280	<b>308</b>	290	<b>203</b>	249	–
Vindlekan 1, Mellerud	95	300	200	<b>224</b>	218	<b>195</b>	221	<b>220</b>	235	<b>235</b>	200	<b>194</b>
Kyrkebo, Lundsbrunn, Götene	40	357	240	<b>225</b>	265	<b>262</b>	270	<b>271</b>	290	<b>264</b>	280	<b>228</b>
<b>Vestas 225</b>												
Kälvene, Falköping	215	330	260	n/a	295	<b>302</b>	300	<b>311</b>	327	<b>320</b>	330	<b>298</b>
Hjärtholmen Set, Göteborg	66a	550	415	<b>434</b>	485	<b>478</b>	540	<b>566</b>	570	<b>522</b>	505	<b>509</b>
Nordkärr, Mellerud	46	263	220		245	<b>206</b>	235	<b>213</b>	255	<b>220</b>	220	<b>203</b>
Kedumsvik, Lidköping	32	362	240	<b>240</b>	275	<b>284</b>	265	<b>278</b>	285	<b>283</b>	270	<b>274</b>
Sjöbergs säteri, Lugnås, Mariestad	30	400	235	<b>274</b>	280	<b>289</b>	265	<b>304</b>	300	<b>309</b>	325	<b>266</b>

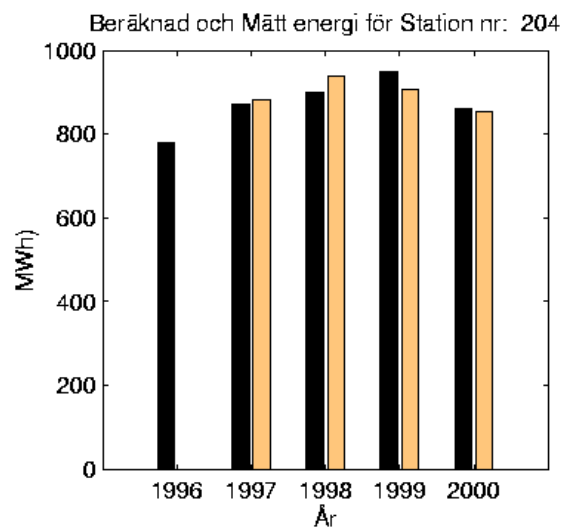
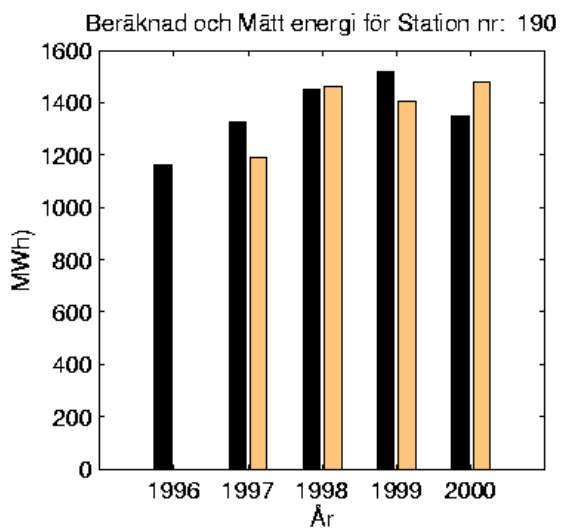
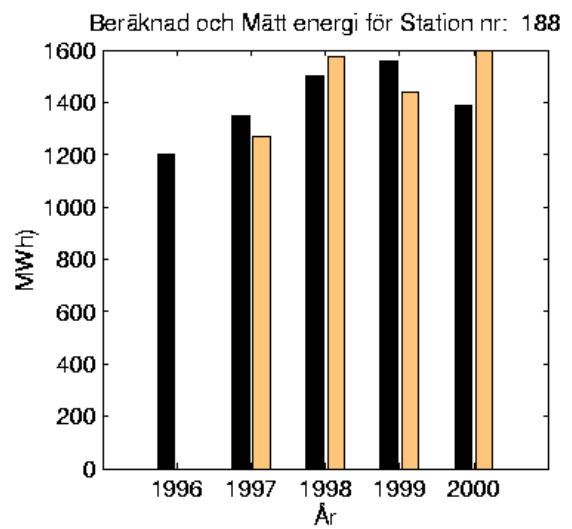
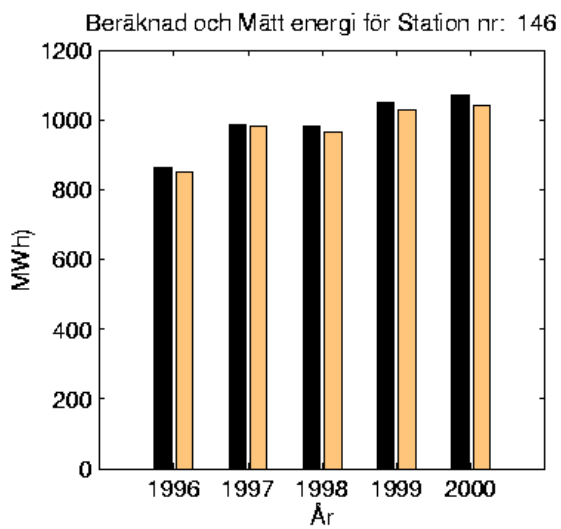
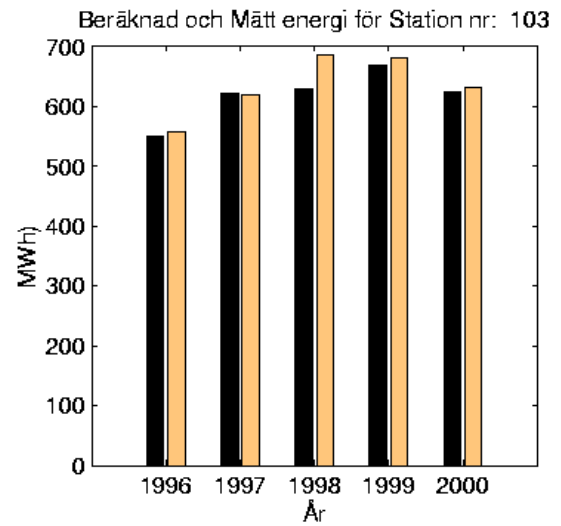
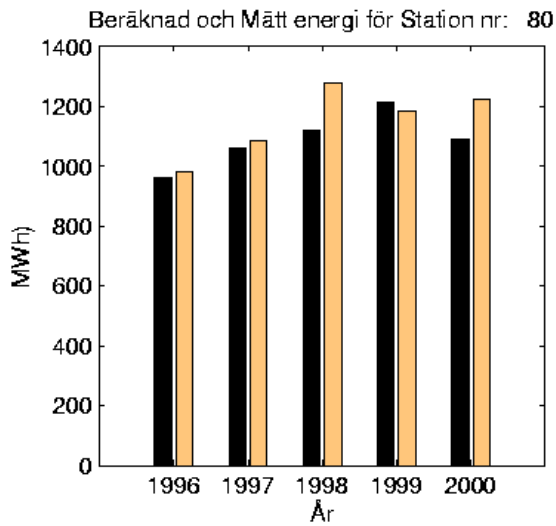
VINDKRAFT- VERK	NR	BER. PROD MWH	1996 MWH		1997 MWH		1998 MWH		1999 MWH		2000 MWH	
			ALARM	Drift	ALARM	Drift	ALARM	Drift	ALARM	Drift	ALARM	Drift
<b>Bonus 450</b>												
Basteviksholmen 1, Lysekil	50a	1000	880	<b>849</b>	960	<b>857</b>	1000	<b>1061</b>	1050	<b>1027</b>	920	<b>1039</b>
Risholmen Marta, Göteborg	77	1100	800	<b>737</b>	920	<b>848</b>	1020	<b>1148</b>	1090	<b>928</b>	960	<b>1028</b>
<b>Vestas 500</b>												
Molly Tången, Orust	80	1350	960	<b>980</b>	1060	<b>1087</b>	1120	<b>1278</b>	1215	<b>1183</b>	1090	<b>1222</b>
Ås, Grästorp	103		550	<b>557</b>	623	<b>619</b>	630	<b>686</b>	670	<b>681</b>	625	<b>631</b>
<b>Vestas 660</b>												
Uvered, Lidköping	436	1100									1155	<b>1040</b>
<b>Vestas 660 – 200</b>												
Ranåker, Skara	398	1000									1240	<b>1108*</b>
<b>Wind World 750</b>												
Otterbäckens Vind 1, Gullspång	404	1700									1355	<b>1342 korr: 1412</b>

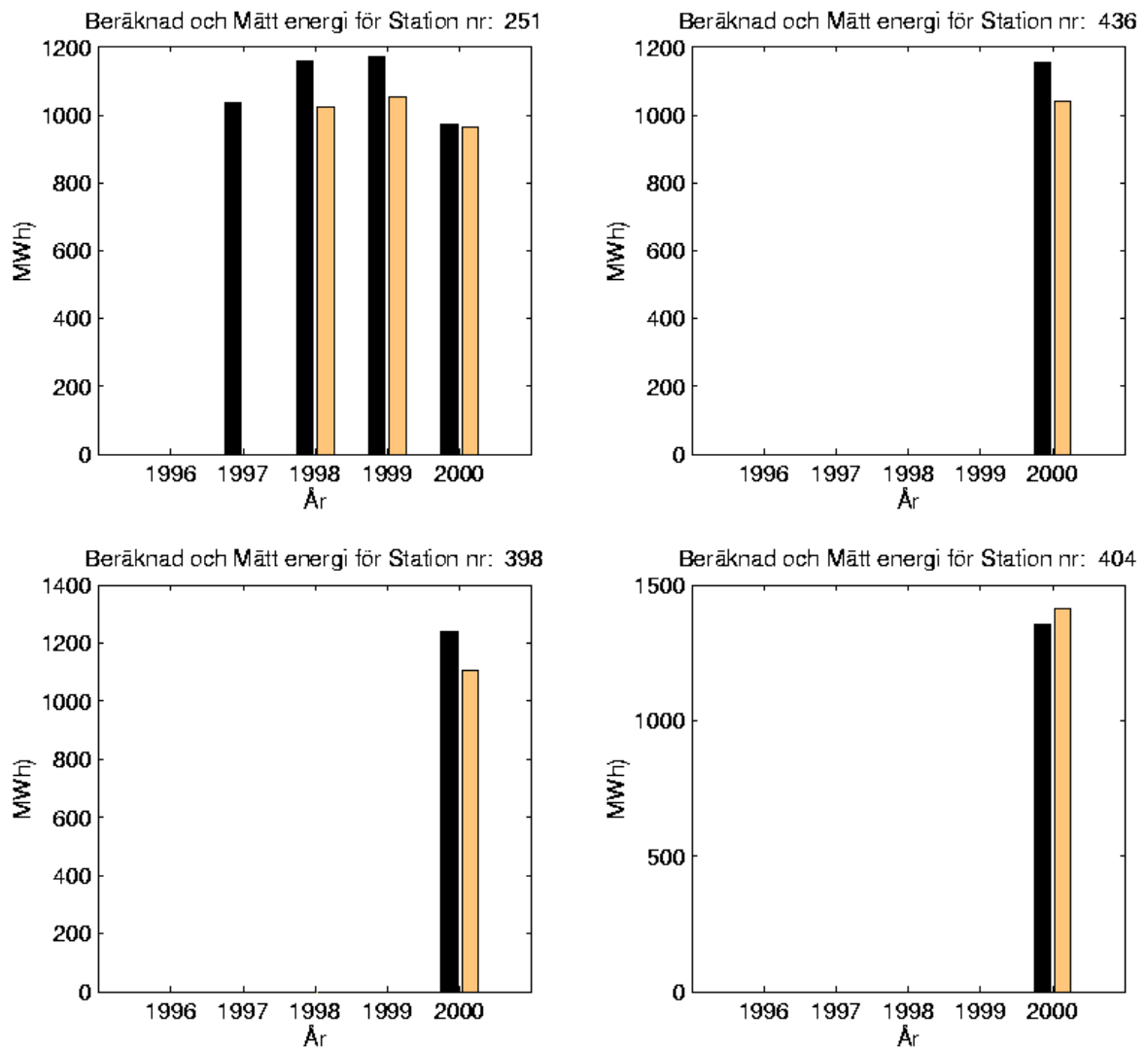
VINDKRAFT- VERK	NR	BER. PROD MWH	1996 MWH		1997 MWH		1998 MWH		1999 MWH		2000 MWH	
			ALARM	Drift	ALARM	Drift	ALARM	Drift	ALARM	Drift	ALARM	Drift
<b>Vestas 225</b>												
Almetorp, Lavad, Lidköping	97	320	230	<b>194</b>	265	<b>237</b>	265	<b>243</b>	285	<b>230</b>	270	<b>223</b>
Hornbore, Hamburgssund	121	500	370	<b>341</b>	405	<b>384</b>	420	<b>436</b>	435	<b>421</b>	395	<b>413</b>
Nuntorp, Brålanda	136	325	260	<b>251</b>	283	<b>244</b>	285	<b>268</b>	300	<b>256</b>	250	<b>199</b>
Älmestad, Ulricehamn	178	332	210	n/a	255	<b>217</b>	290	<b>216</b>	300	<b>211</b>	310	<b>202</b>
Lunden, Gårdhem	200	330	225	n/a	250	<b>238</b>	255	<b>253</b>	280	<b>258</b>	255	<b>254*</b>
<b>Vestas 600</b>												
Bromöllan, Brommö (Vänern)	146	1100	865	<b>851</b>	985	<b>983</b>	980	<b>966</b>	1050	<b>1029</b>	1070	<b>1043*</b>
Hjärtholmen, Göteborg	188 189	1450	1200	n/a	1350	<b>1271</b>	1500	<b>1576</b>	1560	<b>1437</b>	1390	<b>1600</b>
Risholmen, Göteborg, 4 verk	190 - 193	1450	1160	n/a	1325	<b>1193</b>	1450	<b>1459</b>	1520	<b>1408</b>	1350	<b>1480</b>
Håberg, Flo (vid Hunneberg)	204	938	780	n/a	870	<b>875 k 883</b>	900	<b>929 k 938</b>	950	<b>826 k 907</b>	860	<b>838 k 855</b>
<b>WindWorld 490</b>												
Lys-Vind, Lysekil	133	950	-	-	920	<b>865 k 901</b>	980	<b>973</b>	1050	<b>927 k1018</b>	920	<b>804 k 855</b>
<b>Bonus 600</b>												
Skärbo, Tanum Grupp med 6 verk	251 - 256	1170	-	-	1035	n/a	1160	<b>950</b>  <b>korr: 1023</b>	1170	<b>904</b>  <b>korr: 1053</b>	1040	<b>902</b>  <b>korr: 965</b>







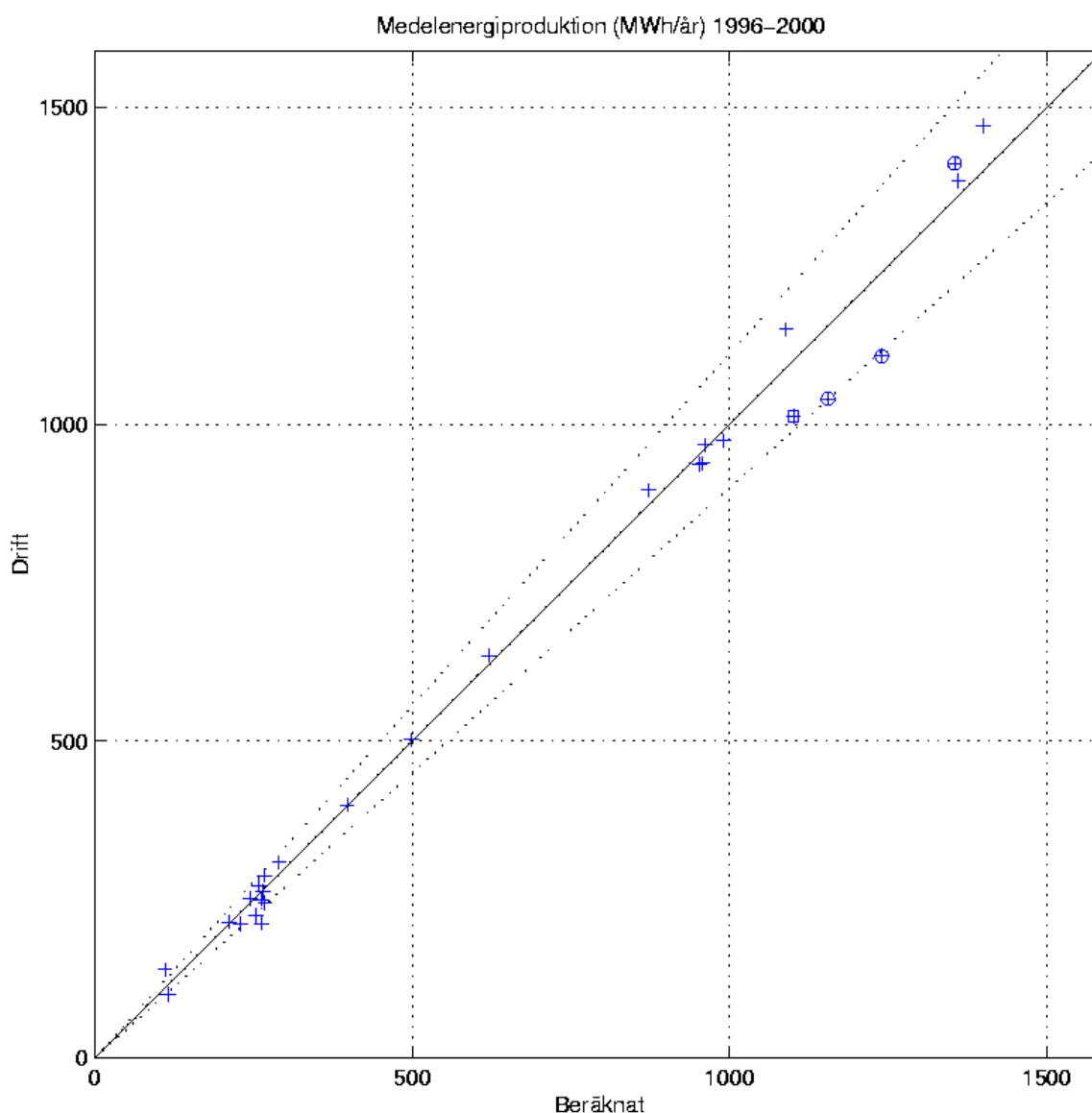




**Fig. 3.** Beräknad (svart stapel) och angiven produktion (ljus stapel) för varje enskilt år samt för varje enskilt verk (märkt med kraftverkets nummer enligt Energimyndigheten).

## Medelvärden av beräknad och angiven produktion

Figur 4 visar Medelenergiproduktionen för perioden 1996-2000. På horisontella axeln är angivet den simulerade (beräknade) produktionen och på den vertikala axeln visas den angivna driftproduktionen. De kraftverk som endast har ett års produktion har märkts med en cirkel kring värdet. Ett verk har produktion endast tre år och har markerats med en kvadrat kring värdet. Den heldragna linjen visar fullständig överensstämmelse och de streckade linjerna 10% avvikelse från drift produktionen. Som vi ser från figuren ligger de flesta vind kraftverksberäkningarna inom dessa 10%.



**Fig. 4.** Medelenergiproduktionen för perioden 1996-2000. På horisontella axeln är angivet den simulerade (beräknade) produktionen och på den vertikala axeln visas den angivna driftproduktionen. De kraftverk som endast har ett års produktion har märkts med en cirkel kring värdet. Ett verk har produktion endast tre år och har markerats med en kvadrat kring värdet. Den heldragna linjen visar fullständig överensstämmelse och de streckade linjerna 10% avvikelse från drift produktionen.

## **Sammanfattande bedömning av verifieringen**

Det primära målet för verifieringen var att se vilken överensstämmelse som finns mellan beräknad och rapporterad vindenergiproduktion. Skillnaden visar sig i de allra flesta fallen ligga under 10 %.

Ett annat mål var att se om modellen innehåller någon systematisk avvikelse mellan olika geografiska områden. Vindkraftutbyggnaden har hunnit längst i Bohuslän. Där är bedömningsunderlaget säkrast. I Skaraborg har även ganska nya verk tagits med för att få bästa möjliga bedömningsunderlag. I och med att jämförelsetiden är kort är bedömningen mindre säker. Någon systematisk skillnad i modellens prognosförmåga kan för närvarande inte urskiljas.

Avvikelserna tenderar att vara större, procentuellt sett, för de minsta vindkraftverken. Detta är naturligt, bland annat därför att de minsta verken är känsligast för lokala störningar som byggnader och vegetation.

Vid nu föreliggande verifiering har tidigare års verifiering räknats om. Beräknade produktionsvärden har blivit marginellt annorlunda. I några fall beror det på att beräkningen nu skett med större hänsyn till skogsterräng vilken tidigare verifiering helt bortsåg från. Andra skillnader beror på att ny statistikberäkning från sodar och mastmätningarna utförts för alla beräkningsår. Sammantaget belyser dessa skillnader något av den osäkerhet som alltid finns i vindenergiberäkningar.

## **Kommentar avseende vindenergikartorna**

Verifieringen avser det atmosfäriska modellsystemet som sådant. De kartor som publicerades av Länsstyrelsen i oktober 1999 har inte använts.

Om modellsystemet idag skulle ta fram nya kartor så skulle de ha marginella skillnader jämfört med tidigare kartor. Orsaken är att mätserien har förlängts med två år. Eftersom det finns stora skillnader mellan olika år kan medelvärdet för summan av åren förändras något. Om klimatet förändras kommer skillnader att uppträda för överskådlig framtid.

ALARM-systemet kommer att byggas ut för att även ta hänsyn till sjöbrisens inverkan. Därmed bör prognosvärdet i kustzonerna öka. Det finns också teknisk möjlighet att ta större hänsyn till skogens inflytande genom att kartor som visar skogens utbredning läggs in i underlaget för modellen. Det är ett ganska omfattande arbete men är fullt möjligt att genomföra om erforderliga resurser kan tillskapas.

Slutligen bör framhållas att vindenergikartorna är framtagna för kommunernas översiktliga planering. Innan de används som underlag för investeringsbeslut avseende vindkraftverk behöver man göra noggranna bedömningar och beräkningar på platsen.