

VINDFÖRHÅLLANDENA I SVERIGES
KUST- OCH HAVSBAND,
RAPPORT Nr 2

VINDFÖRHÅLLANDENA I SVERIGES
KUST- OCH HAVSBAND,
RAPPORT Nr 2

Lennart Robertson, Tord Kvick
och Roland Krieg

På uppdrag av Statens Energiverk, projekt nr 506 250-2
Norrköping januari 1987

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sammanfattning

Summary

1. BAKGRUND

2. METOD- OCH MODELLBESKRIVNING

3. VERIFIERING AV BERÄKNINGSRESULTAT

4. MODELLBERÄKNINGSRESULTAT

5. MÄTDATA

6. VINDAVTAGANDE FRÅN KUST

7. ENERGIKARTOR

REFERENSLISTA

SAMMANFATTNING

Med syfte att ta fram vindenergikartor för de svenska kust- och havsområdena har vi gått vidare med de havsvindstudier som genomfördes av SMHI 1983-84.

Vi har dels kunnat analysera längre tidsserier av mätdata från kasunfyrar och dels gjort ytterligare simuleringar med den dynamiska vindfältsmodellen som i detta projekt utnyttjas med några smärre modifieringar.

De mätdata som nu utnyttjats är 5-7.5 års timvisa vinddata från sju kasunfyrar där SMHI har automatiska väderstationer placerade. Dessa mätningar görs på 25-35 meters höjd över havsytan och i områden som är fria från öar. Uppmätta data har korrigerats med hänsyn till de störningar i vindströmningen som uppstår runt fyrkropparna.

Den dynamiska vindfältsmodell vi arbetat med beskrevs första gången av Danard (1977) och är en enkel en-nivås 2 dimensionell primitiv ekvationsmodell. Den mindre skalans vind erhålles genom en dynamisk tolkning av den stora skalans.

De mesoskaliga effekter som parametriseras i modellen och ligger till grund för den dynamiska tolkningen är:

- friktionseffekter
- topografin
- värmeflödet från underlaget

Mer i detalj innebär detta att vi för den stora skalans karaktäristik utnyttjat den geostrofiska vinden samt temperatur och geopotentialanalyser från marken, 850 mb och 700 mb. Den lilla skalans egenskaper beskrivs genom en digitalisering av topografin och skrovligheten i ett gridnät.

I denna studie har vi minskat avståndet mellan grid- eller beräkningspunkterna från 22 km till 11 km och utökat den simulerade tidsperioden från tre till tolv månader. Beräkningsområdet omfattar södra Sverige upp till Gävlebukten samt angränsande områden i väster och öster.

Slutresultaten redovisas i form av medianvindens fördelning för 100 m nivån i kartskalen 1:2500000 och i form av rörelseenergi-kartor för 100 meters höjd i skalen 1:1250000. De senare kan sammanfattas i följande punkter.

- Vindenergipotentialen är ca 40% högre vid den bästa kasunfyrspålsplatserna, Trubaduren, än vid den sämsta, Gustav Dahlén.
- 10-15 km ut från land är vindenergipotentialen i regel 35-45% högre än vid de landlägen som ligger närmast stranden.
- De mest vindrika områdena längs de svenska kusterna finns, enligt vad som framkommit i denna studie, längs hela västkusten och sydväst om Falsterbo, syd och öst om Öland, nordväst om Gotland och i Ålands hav.

SUMMARY

In purpose to produce wind energy maps for the Swedish off-shore regions we have expanded the studies which was carried out by SMHI during 1983-84.

One part of this study have been devoted to an analysis of a longer time series of wind data than was available during the first project. The second part of this study was to make more extensive simulations with the dynamic wind field model, earlier used in the preceding project but now used with some slight alterations.

The measured wind data which has been analyzed this time are from a 5-7.5 years long period and from seven offshore light houses around the swedish coasts? The measurements are made on routine basis by SMHI as a part of the automatical weather stations-network in Sweden. The heights of the wind speed sensors are 25-35 metres above the sea level and the light houses are situated in regions outside the archipelagous and in lack of islands. The measured wind data are adjusted to compensate for the disturbances of the wind field which are included by the light house bodies.

The dynamic wind field model used was originally developed by Maurice Danard (1977) and is a two-dimensional, one-level primitiv equation-model. The wind field of the smaller scale is calculated by a dynamic interpretation from the greater scale.

The mesoscale-effect included in the model are the base for the dynamic interpretation. They are:

- surface roughness
- topography
- heat flux from the ground

To characterize the greater scale we have used the geostrophic wind, obtained from the pressure field, and the temperature- and geopotentialfields from surface, 850 mb and 700 mb-levels. The propertied of the smaller scale are described the topography and the surface roughness in a grid.

In this study we have decreased the distance between the grid-points from 22 km to 11 km and increased the simulated time period from three to twelve months. The area for which we have run the computer model includes the part of Sweden which is south of the latitude 61°30'.

The results of the study are presented as maps with isolines for the median wind and for the potential wind energy in terms of kinetic energy (kWh/m² year) att 100 meters above ground. The conclusions of the latter can be summarized by the following points:

- The wind energy potential is about 40% higher at the best of light house sites, Trubaduren, compared to the least windy of the sites, Gustav Dahlén.
- 10-15 kilometres from land, the wind energy potential usually is 35-45% higher than at the shore.
- The most windy offshore sites can, according to the results from this study, be found along the whole west coast, southwest of Falsterbo, south and east of Öland, northwest of Gotland and at the sea of Åland.

1. BAKGRUND

Det grundläggande motivet för att man intresserat sig för havsbaserade vindkraftaggregat är att vindtillgången är bättre till havs än över land. Avgörande för ekonomin jämfört med landbaserade är till stor del hur mycket bättre vindtillgången är till havs. Motsvaras de större anläggnings- och driftskostnaderna av ökad produktion?

På uppdrag av Statens Energiverk genomförde SMHI under 1983/84 tre olika utredningsprojekt i syfte att klarlägga vindförhållandena till havs. Projekten innebar att

- Sodarmätningar på Nidingen genomfördes och utvärderades
- Mätfel på kasunfyrar studerades genom bl a vindtunnelprov.
- Vindstatistik från kasunfyrarna togs fram.
- Modellsimuleringar rörande vindhastighetens "återhämtning från land och ut över havet genomfördes.
- Modellsimuleringar rörande medelvindfältet över landets södra kustområden. Tre månaders data bearbetades.

Resultaten redovisades i rapporterna (1), (2), och (3). Även om vi kunde dra en hel samstämmiga slutsatser från de olika delprojekten så konstaterades dock en relativt sett stor osäkerhet i vissa bedömningar. Detta gällde främst hur vindtillgången varierar mellan olika kustavsnitt och havsområden. Dessa bedömningar grundade sig främst på de tre månadernas simuleringar samt på vindstatistik från kasunfyrarna.

Mot bakgrund av detta och att bostadsdepartementet fått i uppdrag att föreslå lokaliseringlägen för "offshore-vindkraftverk" motsvarande en årsproduktion av 20 TWh har SMHI fått i uppdrag av STEV att ta fram en ny bedömning av havsvindförhållandena baserat på ett mer omfattande underlag.

I föreliggande redovisning har vi dels analyserat ytterligare 2.5 års data från kasunfyrar (totalt 5-7.5 år) och dels genomfört modellsimuleringar över ett helt kalenderår.

2. METOD- OCH MODELLBESKRIVNING

Den modell vi arbetat med, såväl i detta projekt som det föregående, beskrevs första gången av Maurice Danard (1977) och är en enkel en-nivås 2-dimensionell primitiv ekvationsmodell. Danards tanke var att använda modellen för att modifiera en storskalig vind till en vind som är representativ för en mindre skala. I modellen finns ingen växelverkan mellan de olika skalorna, utan hans antagande var att en god approximation av den mindre skalans vind kan erhållas genom en dynamisk tolkning av den stora skalan. I sitt ursprungsskick tillämpades modellen på fält med 10 km avstånd mellan beräkningspunkterna.

De mesoskaliga effekter som parametriserats i modellen och ligger till grund för den dynamiska tolkningen är:

- friktionseffekter (markens skrovlighet)
- topografin
- värmeflödet från underlaget

Mer i detalj innebär detta att vi för den stora skalans karaktäristik utnyttjat den geostrofiska vinden som beräknats ur lufttrycksfältet, samt temperatur- och geopotentialanalyser från marken, 850 mb och 700 mb. Den lilla skalans egenskaper beskrivs genom en digitalisering av den uppskattade topografin och skrovligheten i ett gridnät med samma upplösning som avståndet mellan beräkningspunkterna. Värmeflödet parametriserar genom introduktion av landtemperaturen två meter över marken och havsvattnets temperatur.

Från denna ursprungliga modell har vissa förändringar gjorts. Detta i syfte att hålla beräkningsvolymen i datorn vid en rimlig nivå samtidigt som upplösningen har ökats och ett större klimatologiskt material behandlats, se nedan.

De förändringar som skett är att den, ut modellteknisk synvinkel, relativt tunga termiska drivningen i modellen har tagits bort. Detta medför att ex.vis sjöbriseffekter inte har kunnat beskrivas. Dessa effekter är dock ur för utomskärs belägna vindkraftlägen av underordnad betydelse. Vidare har tryckfältsanalyserna utnyttjats på ett sätt som är mer konsistent med den finskaliga analysmetod som används för att ta fram tryckfältet. Informationen i indata har på detta sätt bättre utnyttjats.

Den viktigaste ekvationen i modellen är rörelseekvationen som i vektorform ges av:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} - (g \nabla Z_s + RT_s \nabla \ln p_s) - f \mathbf{k} \times \mathbf{V} + \mathbf{IF} + K_m \nabla^2 \mathbf{V}$$

Där vi från vänster har: advektion, tryckgradientkraft (i terrängföljande koordinater), coriolis kraft, friktion och diffusion.

Friktionstermen beskrivs av empiriska formler enligt Deardorff (1972).
Nedan ges den viktigaste:

$$|F| = \frac{c U_*^2}{H}$$

där c är en stabilitetsberoende konstant och H är gränsskiktets djup. Stabiliteten erhålls ur temperaturdata för nivåerna 850 - och 700 mb samt geopotentialen för dessa nivåer, och temperaturdata för marknivån. För att bestämma U_* utnyttjas den logaritmiska vindlagen.

$$|W| = \frac{U_*}{k} \cdot \ln \frac{Z - d}{Z_0}$$

Beräkningarna görs i ett antal tidssteg tills dess att stationär lösning erhålls. Vanligen 5 tidssteg om 30 sekunders längd. Ju kortare avståndet mellan beräkningspunkterna som väljs ju kortare tidssteg måste tillämpas.

När vi 1984 gjorde beräkningar för hela södra Sverige tillämpade vi ett avstånd mellan beräkningspunkterna på 22 km. Beräkningarna gjordes för var sjätte timma under tre månader (831029-840131). För att få ett bättre bedömningsunderlag har vi nu gjort nya beräkningar med

- halverat avstånd (11 km) mellan beräkningspunkterna. Det innebär totalt 7560 punkter.
- meteorologiska indatafält för var sjätte timma under ett helt kalenderår (1985-08-1985-07). Det innebär totalt 1231 beräkningstillfällen.

Motivet för att minska gridavståndet är att vi då får ett mer väldefinierat läge för kustlinjer. Genom att gå igenom ett helt års data undviker vi att få en skevhet i resultaten beroende på årstidsberoende faktorer.

Vi vill poängtera att styrkan hos denna modell är att tolka ett storskaligt vind/tryckfält till den lilla, i detta fall intressanta, skalan. Vi bedömer att modellen är sämre på att beräkna den exakta vindtillgången. Dessutom kan vindtillgången under ett visst år avvika relativt mycket från de klimatologiska förhållandena.

I första hand görs alltså dessa beräkningar för att försöka kartlägga eventuella skillnader i vindförhållandena mellan olika kust- och havsområden runt södra Sverige. Sådana skillnader kan uppstå pga exempelvis lågtryckbanornas rörelsemönster och storskaliga strömningsfenomen orsakade av skillnaden i skrovlighet mellan land och hav.

3. VERIFIERING AV BERÄKNINGSRESULTAT

Antalet vindmätningsstationer inom det aktuella beräkningsområdet är relativt få men det ger ändå en viss möjlighet till jämförelse mellan beräknade och uppmätta värden.

Eftersom mät höjden vid kasunfyrarna varierar mellan 26- och 33 meter så har vi utfört beräkningar för 30 meters höjd.

I nedanstående tabell redovisas uppmätta och modellberäknade medianvindar samt weibullfördelningens formfaktor på 30 meters höjd vid de olika mätplatserna. För de tre stationer som finns i norra Östersjön är överensstämmelsen mycket god. Det gäller både nivån och skillnaderna mellan de tre platserna. För Maglarp är det beräknade värdet ca 1 m/s för lågt. Men just för området utanför Maglarp visar beräkningarna på en kraftig gradient i vindfältet. Det betyder att en mycket liten förskjutning i det beräknade fältet förklarar avvikelsen mot det uppmätta värdet.

TABELL. Uppmätta och beräknade vindvärden 1984.08-1985-07.

Mätstation	Uppmätt		Beräknat	
	Medianvind	Weibullformfaktor	Medianvind	Weibullformfaktor
Västra Banken	6.1	2.2	5.7	2.2
Almagrundet	7.0	2.3	6.6	2.2
Gustav Dahlén	6.1	2.2	6.0	2.3
Näsudden	6.1	2.2	6.2	2.1
Maglarp	6.4	2.1	5.5	2.1
Ringhals	5.9	1.9	4.5	1.9
Trubaduren	6.4	1.9	5.0	1.6

För de två västkustlägena Ringhals och Trubaduren har beräkningarna gett ca 1.5 m/s för låga medianvindar. Differensen mellan de två platserna är emellertid lika stor, 0.5 m/s, i det beräknade och uppmätta fallet. Även här kan "nivåfelet" i beräkningarna förklaras av en liten förskjutning av fältet. Avståndet mellan beräkningspunkterna är 11 km och därmed blir kustlinjens läge inte fastlagt med större noggrannhet än ± 5.5 km i modellberäkningarna.

Sammanfattningsvis tycker vi att dom få möjligheter till jämförelser med uppmätta data som ges, på ett tillfredsställande sätt, visat att modellberäkningarna ger ett rimligt resultat.

4. MODELLBERÄKNINGSRESULTAT

Som tidigare nämnts har beräkningarna utförts för tidsperioden 1984-08-1985-07 och för var sjätte timma. Orsaken till att vi valt just denna 12 månadersperiod är att vi har tillgång till mesoskaliga analyser av meteorologiska ingångsdata för just den perioden. Vindförhållandena har varit sämre under detta år än under perioden 1979-85. En analys av våra kasunfyrsdata visar att medianvindsunderskottet varierar mellan 0.2- och 0.8 m/s.

Beräkningar har utförts för 30- och 100 meters höjd och för varje gridpunkt har följande uppgifter beräknats i form av årsvärden.

- Medelvind
- Medianvind
- Weibullparametrarna
- Rörelseenergi (beräknat från weibullparametrarna)

Dessutom har vi beräknat den geostrofiska vinden i varje gridpunkt, figur 1. Det är den fiktiva vind som gradienter i marktryckfältet skulle ge upphov till om det inte funnits någon topografi och om markskrovligheten kunde försummas.

I figur 2 har medianvinden och weibullparametrarna plottats för varannan gridpunkt och på en översiktskarta. Som arbetsmaterial för framtagandet av de i kapitel 7 presenterade energikartorna har vi plottat alla beräknade årssiffror på kartor i skalan 1:1250000.

Av figur 1 framgår att det geostrofiska vindfältet över Sverige är relativt flackt även om det finns en hel del relativt svaga maxima- respektive minimaområden. Krafigare maximaområden (större än 11 m/s) finns dels över västra Skagerack och dels över östra Östersjön.

En viktig fråga är naturligtvis om det geostrofiska vindmönstret under det analyserade året är normalt eller ej. Tyvärr kan vi inte svara på detta eftersom vi inte har tillgång till meteorologiska grunddata för att beräkna en geostrofisk vindkarta, med denna detaljeringsgrad, för en längre period. Vi kan bara anta att det erhållna mönstret någorlunda väl beskriver normalförhållandena. Några försök till förklaringar av vindfältets utseende ger vi oss inte in på eftersom det bara kan ske i form av spekulationer.

Vid betraktande av figur 2 med 100-metersvinden är det bl a nödvändigt att beakta att pga den relativa låga upplösningen i beräkningarna, 11 km, är värdena i övergångszonen mellan land och hav osäkra. Strandens läge är ju inte fastlagd med större noggrannhet än ± 5.5 km. I skärgårdsområdena måste beräkningarna betraktas som speciellt osäkra eftersom skrovligheten där är inhomogen. Men det är ju i första hand lokaliseringsområden utomskärs som är aktuella för stora vindkraftverk.

Från de analyserade isolinjerna för medianvinden framgår att den, längs de flesta kustavsnitt, ökar från ca 5 m/s över land till 7-7.5 m/s en bit ut till havs. Det mest uppseendeväckande undantaget gäller Skånekusten och södra Östersjön där medianvinden generellt är mindre än 7 m/s. Tyvärr har vi inga mätningar ute till havs som kan verifiera dessa resultat. I det fortsatta arbetet har vi betraktat detta resultat med viss skepsis.

I figur 2 kan vi också studera vilka värden på weibullfördelningens formfaktor "C" som modellberäkningarna givit. Värdena ($\times 100$) anges underst vid varje gridpunkt. Grovt sett kan man säga att värdena i Ålands hav, norra- och mellersta östersjön är högre än ca 2.2. I södra Östersjön och längs Sveriges västra kust är värdena under 2.0. Dessa beräkningsresultat stämmer bra med vad som uppmätts vid kasunfyrarna (se kapitel 3). Vi har inga mätresultat som visar att så extrema C-värden som 2.6 och 1.65 förekommer. Beräkningarna har dock gett sådana resultat för en del områden ute till havs. Vi litar inte riktigt på dessa resultat. Låga C-värden innebär att den tillgängliga rörelseenergin är relativt stor i förhållande till medianvinden.

Genom att jämföra den geostrofiska vindkartan och medianvindkartan för 100 m höjd kan vi dra vissa slutsatser om vilka egenskaper i den senare som beror på den geostrofiska- eller "fria" vinden och vad som orsakas av andra faktorer. Nedan följer en analys av några mönster i medianvindkartan.

Det kraftiga vindmaximat på 100 meters höjd över Skagerack orsakas helt av den geotrofiska vindens mönster. Samma sak gäller det lilla maximaområdet utanför Skälderviken och sydväst om Falsterbo. På den geotrofiska vindkartan finns ett avlångt maximaområde som sträcker sig från Östtysklands kust mot Vätterns södra spets. Det har gett upphov till de två separata vindmaximana på 100 meters höjd.

Det maxima som finns söder om Torhamns udde kan ha orsakats av en "hörneffekt" i strömningen. Den geotrofiska medelvinden ger här ingen förklaring.

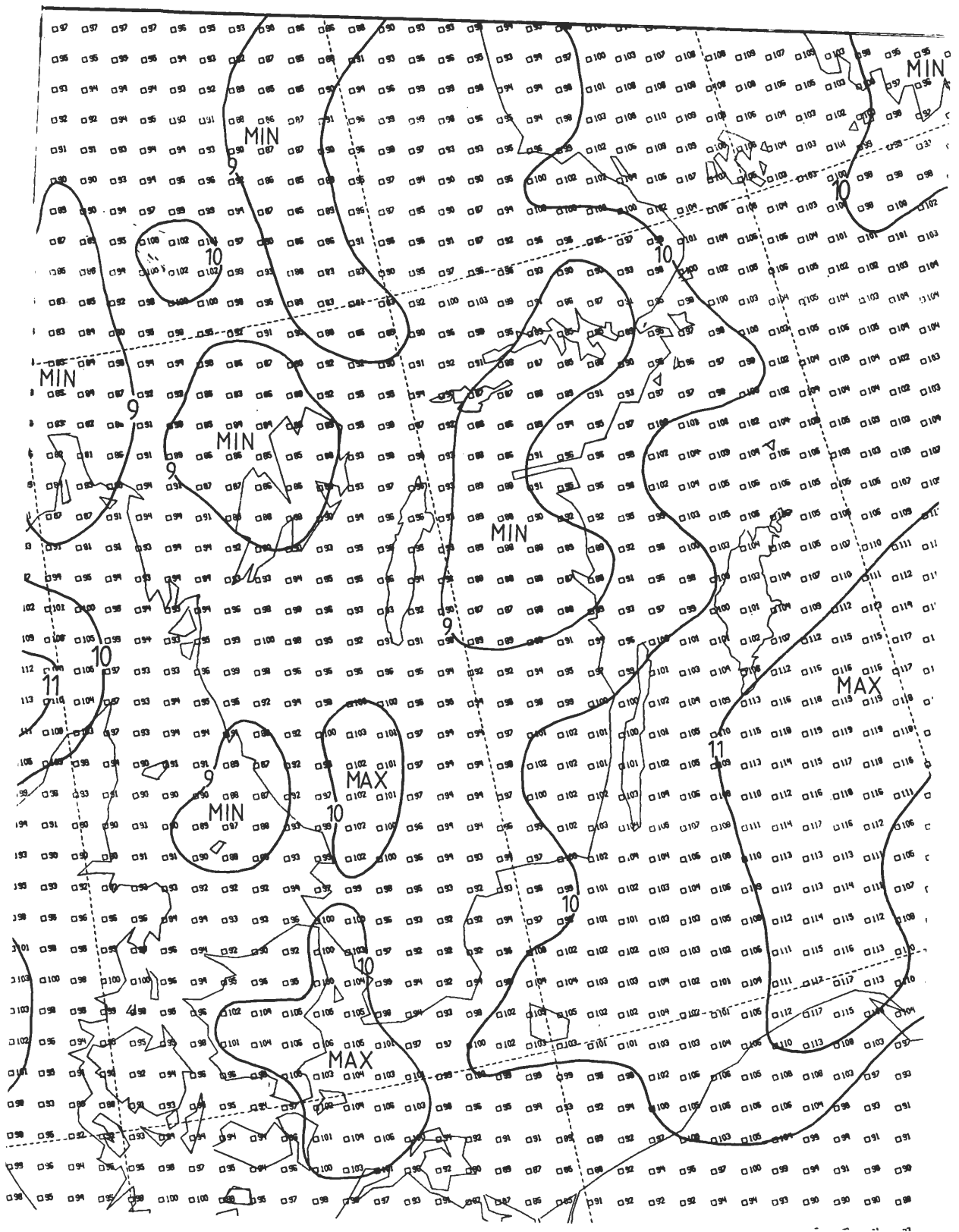
På grund av den relativt låga upplösningen har det i beräkningarna inte tagits tillräcklig hänsyn till Ölands och Gotlands landområden. Vinden har inte reducerats tillräckligt med hänsyn till den högre markskrovligheten. Därmed har medianvindfältet ett felaktigt utseende runt öarna.

De högre 100 m-vindarna öster om Öland och minimat mellan Gotland och fastlandet kan förklaras från det "fria vindfältet".

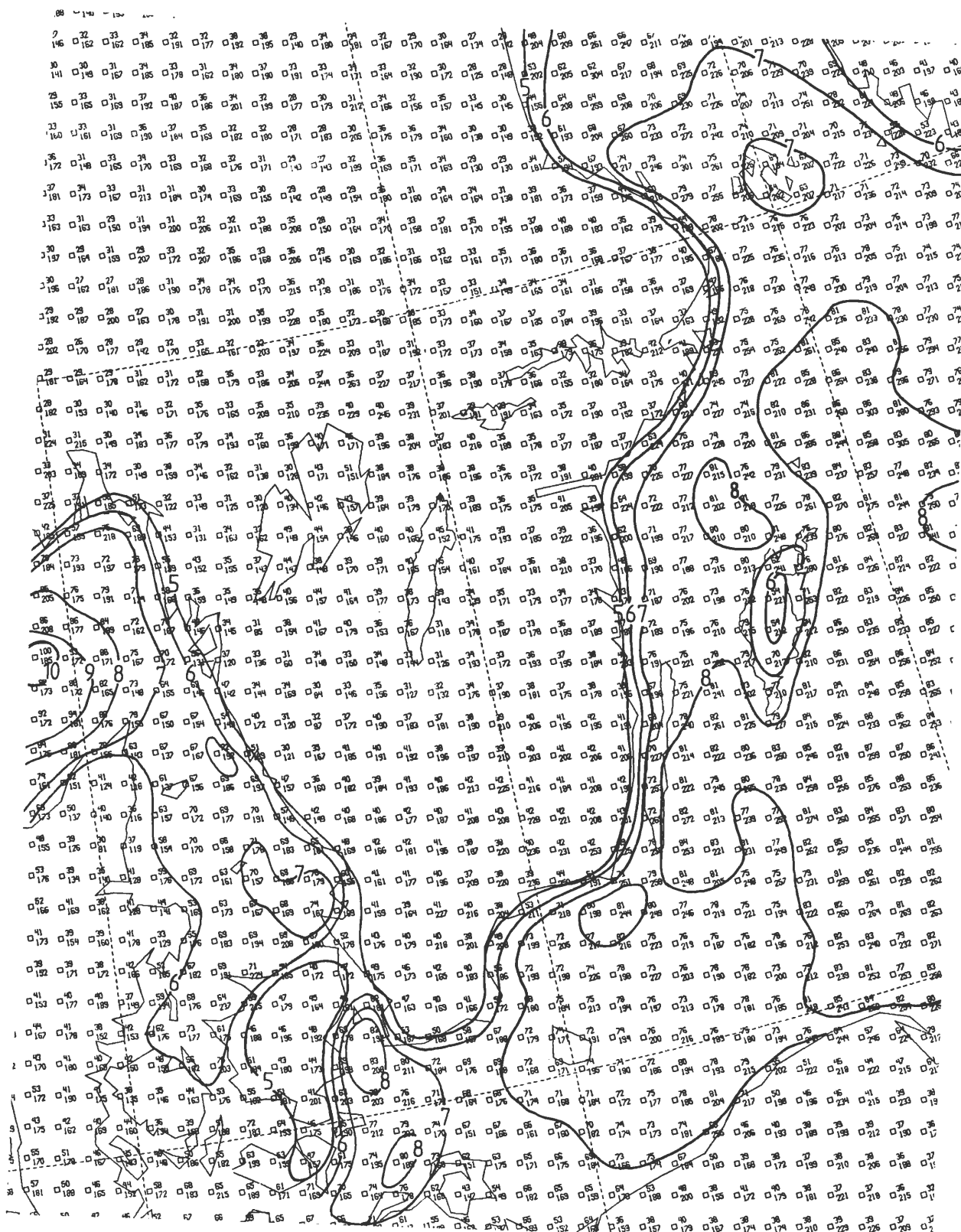
I kustregionerna märks den geostrofiska vindens variation främst som en förstärkning alternativt en förflackning av medianvindens gradient ut från kusten. Detta är särskilt tydligt vid Hallandskusten, östra (och södra) Skånes kustområden, samt utmed Östergötlands och Södermanlands kustregioner där den geostrofiska vinden uppvisar minima och där medianvindens gradienter samtidigt är svagare. I områden med större gradienter i medianvinden har också den geostrofiska vinden maximum, som vid Skånes västkust, vid Upplandskusten samt Norges sydkust.

Längs den konkava kustlinjen söder och norr om Bråviken gör isolinjerna förhållandevis längre ut till havs än längs den konvexa "Stockholmskusten". En förklaring till detta finns delvis i den geostrofiska vindens fördelning, enligt vad som sagts ovan, men också av att havsområdet utanför den konkava kusten har land med hög skrovlighet i betydligt fler vindriktningar.

Till sist kan vi konstatera att de flesta mönster i 100 meters vindfältet, utanför de landpåverkade områdena, orsakas av det geostrofiska vindfältets dvs lufttryckfältets utseende.



FIGUR 1. Beräknad geostrofisk medelvind (m/s x 10) för perioden
1984-08-01 - 1985-07-31



FIGUR 2. Beräknad medianvind (m/s \times 10), de övre siffrorna, och Weibull - formfaktor (\times 100), de undre siffrorna på 100 meters höjd. 1984-08-01 - 1985-07-31.

5. MÄTDATA

En viktig källa till kunskap om vindförhållandena till havs är de vindmätningar som rutinmässigt görs av SMHI på ett antal kasunfyrar runt Sveriges kuster. Fyrarna finns på platser utanför skärgårdarna, 20-40 km från kusterna, och representerar ofta lämpliga lokaliseringsslägen för vindkraft.

Det stora problemet med att utnyttja dessa data är att mätningarna störs av strömningen runt fyrkroppen. Men inom ramarna för ett tidigare uppdrag från STEV anlätade vi Flygtekniska Försöksanstalten för vindtunnelmätningar och genomförde själva fullskalemätningar på en fyr. På detta sätt fick vi fram korrektionsfaktorer att applicera på uppmätta vindhastighetsvärden och därmed var det möjligt att utnyttja dessa viktiga mätdata. I en rapport av Kvick och Andersson (1984) redovisas dels mätfelsanalyserna och dels vindstatistik från 8 kasunfyrar för perioden 1979 - 1983 (för vissa stationer 1981-07--1983).

Nu har vi tagit fram ny statistik från samma kasunfyrar innefattande ytterligare 2.5 år mätdata. Det innebär att bedömningarna av vindenergipotentiaerna kan grunda sig på 5-7.5 års mätdata.

Förutom mätdata från kasunfyrarna så finns också vissa mätdata från Nidingen (sodardata) och från Nässkär (mastdata). Dessa mätningar är gjorda under ca 1 år vardera och måste därför anses relativt osäkra. De båda mätprojekten finns redovisade i Bergström (1983) samt Kvick och Salomonsson (1984).

I tabell 1 redovisas vindhastighetsfördelningarna från 7 kasunfyrar gällande den nya tidsperioden. Vid samtliga platser är medianvinden för den nya 2.5-årsperioden 0.5 - 1.0 m/s lägre än för den tidigare perioden. För totalperioden (5 - 7.5 år) innebär det 0.1 - 0.5 m/s lägre medianvind. Minskningen är störst vid de nordligaste mätlägena. Vid exempelvis Almagrundet har medianvinden på mätthöjd "sänkts" från 7.6 m/s till 7.5 m/s och vid Trubaduren från 7.2 m/s till 7.0 m/s.

I tabell 2 redovisas vinddata dels från så lång period som möjligt och dels från en för alla mätstationer gemensam mätperiod. Vi har också extrapolerat medianvinden från mätthöjd till 50-, 75- och 100 meters höjd.

Denna extrapolation har gjorts med hjälp av exponentlagen

$$V_{h_1} / V_{h_2} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^\alpha \quad V_h = \text{vindhastigheten på höjden } h.$$

Profilmätningar i öppna havsområden (Nidingen och Nässkär) visar att värdet på exponenten α , sett över en normalperiod är 0.13 - 0.15. Vi har räknat med $\alpha = 0.13$.

I tabell 2 redovisas också vindens rörelseenergiinnehåll per m² tvärsnittsarea och per år.

I figur 3 ges en översiktlig bild av vindriktningsförhållandena vid de sju kasunfyrarna. Huvudsakligen dominerar västliga och sydvästliga vindriktningar. I Bottenhavet är emellertid nordliga och sydliga vindar mycket vanliga.

Ur tabellen kan utläsas att, för de stationer där mätningar gjorts under den längre perioden, medianvindarna är nästan exakt likadana för den 5 år långa perioden som för 7.5 årsperioden. Mot bakgrund av detta gör vi bedömningar att data från 5 årsperioden 810701--860630 kan betraktas som "normala".

I tabell 3 har vi sammanställt uppskattade "normala" vindförhållandena från de 7 kasunfyrarna, ytterligare en äldre kasunfyr (Grundkallen). Nässkär, Nidingen samt från några mätmaster belägna på "bästa landlägen". Lägena för de olika mätplatserna framgår av figur 4.

Som framgår av tabell 3 varierar vindförhållandena avsevärt mellan de olika mätplatserna. På 100 m höjd varierar medianvinden mellan 7.6 och 8.8 m/s och formfaktorn i weibullfördelningen mellan 1.91 och 2.29. Det innebär att den potentiella vindtillgången varierar upp till 40% mellan olika platser trots att de ligger på ungefär samma avstånd, 20-25 km, från kusten.

Med det glesa nätet av mätstationer som grund är det omöjligt att dra några definitiva slutsatser om de geografiska variationerna i havsvindförhållandena. Men vissa förhållanden går dock att konstatera genom att studera i första hand tabell 3 och figur 4.

De tre nordligaste stationerna visar god samstämmighet sinsemellan. Medianvinden är ca 1 m/s lägre än vid ex.vis Almagrundet och rörelseenergipotentialet ca 30% lägre. Grundkallens mätserie visar på mycket god vindtillgång men det finns anledning att vara skeptisk till dessa resultat eftersom mätningarna registrerats genom manuell avläsning vilket kan ha medfört felaktigheter.

Ett intressant resultat är skillnaden i vindtillgång mellan Almagrundet och Gustaf Dahlén. Trots att fyrarna ligger relativt nära varandra och på ungefär samma avstånd från kusten är medianvinden vid Almagrundet ca 0.8 m/s högre och energipotentialet ca 35% större. Som framgår av kapitel 4 ger modellberäkningarna ett likartat resultat.

Vid Ölands södra grund tycks vindförhållandena vara mycket likartade de vid Almagrundet.

Om vi går över till västkusten kan vi först konstatera att de två närliggande stationerna Trubaduren och Nidingen uppvisar mycket likartade mätresultat. Trots att medianvinden är ca 0.5 m/s lägre än vid Almagrundet så är rörelseenergiinnehåll ca 5% högre. Orsaken till detta är vindfördelningens utseende. På västkusten är andelen höga vindhastigheter, relativt sett, större. Det framgår av de lägre värdena på Weibullfaktorn "C". Samma förhållande gäller mellan landbaserade stationer i västra och östra delarna av sydsverige.

En jämförelse mellan de bästa landplacerade mätstationerna och offshorestationerna visar ex.vis att på västkusten når man en 35% högre vindenergipotentialet om man flyttar sig 10-12 km ut från Ringhals.

I Östersjön är vindtillgången ca 25% bättre vid Almagrundet och Ölands södra grund än vid Näsudden. Däremot är, enligt dessa mätningar, vindtillgången bättre på Näsudden än vid Gustav Dahlén.

TABELL 1. Vindhastighetens (m/s) fördelning (%). De uppmätta värden är korrigerade med hänsyn till strömningsstörningar som uppstår rund fyrkasunen.

Station	Höjd över havsytan (m)	Mätperiod	0-2.4	2.5-4.4	4.5-6.4	6.5-8.4	8.5-10.4	10.5-12.4	12.5-14.4	14.5-16.4	16.5-18.4	18.5-20.4	20.5-22.4	22.5-	Max-vind (m/s)	Median-vind (m/s)	Data-tillgänglighet (%)
Farstugrunden	30	810701-860630	99.7 9.7	90.0 18.1	72.0 21.9	50.1 20.5	29.6 14.5	15.2 8.3	6.9 4.2	2.7 1.8	0.9 0.7	0.3 0.2	0.1 0.1		26.8	6.5	96.5
Sydostbrotten	30	"	100.1 8.9	91.2 17.4	73.8 21.5	52.3 20.4	31.9 15.8	16.1 9.1	7.0 4.5	2.5 1.7	0.8 0.5	0.3 0.2	0.1 0.1		24.7	6.7	97.2
Västra banken	27	"	100.0 8.7	91.3 16.1	75.2 21.2	54.0 22.0	32.0 17.0	15.0 8.5	6.5 4.3	2.2 1.7	0.5 0.4	0.1 0.1			23.3	6.9	88.9
Almagrundet	31	790101-860630	99.9 6.2	93.7 12.8	80.9 20.4	60.5 22.1	38.4 17.6	20.8 10.9	9.9 5.5	4.4 2.7	1.7 1.0	0.7 0.4	0.3 0.2	0.1 0.1	30.2	7.5	92.7
Gustav Dahlén	26	"	99.8 8.0	91.8 16.1	75.7 24.2	51.5 22.5	29.0 16.2	12.8 8.0	4.8 3.3	1.5 1.1	0.4 0.3	0.1 0.1			22.9	6.6	86.2
Öland s.grund	26	790101-841230	100.0 6.8	93.2 12.9	80.3 20.7	59.6 21.1	38.5 17.6	20.9 10.9	10.0 6.0	4.0 2.6	1.4 1.0	0.4 0.3	0.1 0.1		26.6	7.4	87.7
Trubaduren	26	790101-860630	100.0 10.5	89.5 14.6	74.9 19.6	55.3 18.7	36.6 15.4	21.2 10.5	10.7 5.8	4.9 2.9	2.0 1.2	0.8 0.5	0.3 0.2	0.1 0.1	29.3	7.1	89.0

TABELL 2. Vindförhållanden, uppmätta och extrapolerade, för två olika tidsperioder.

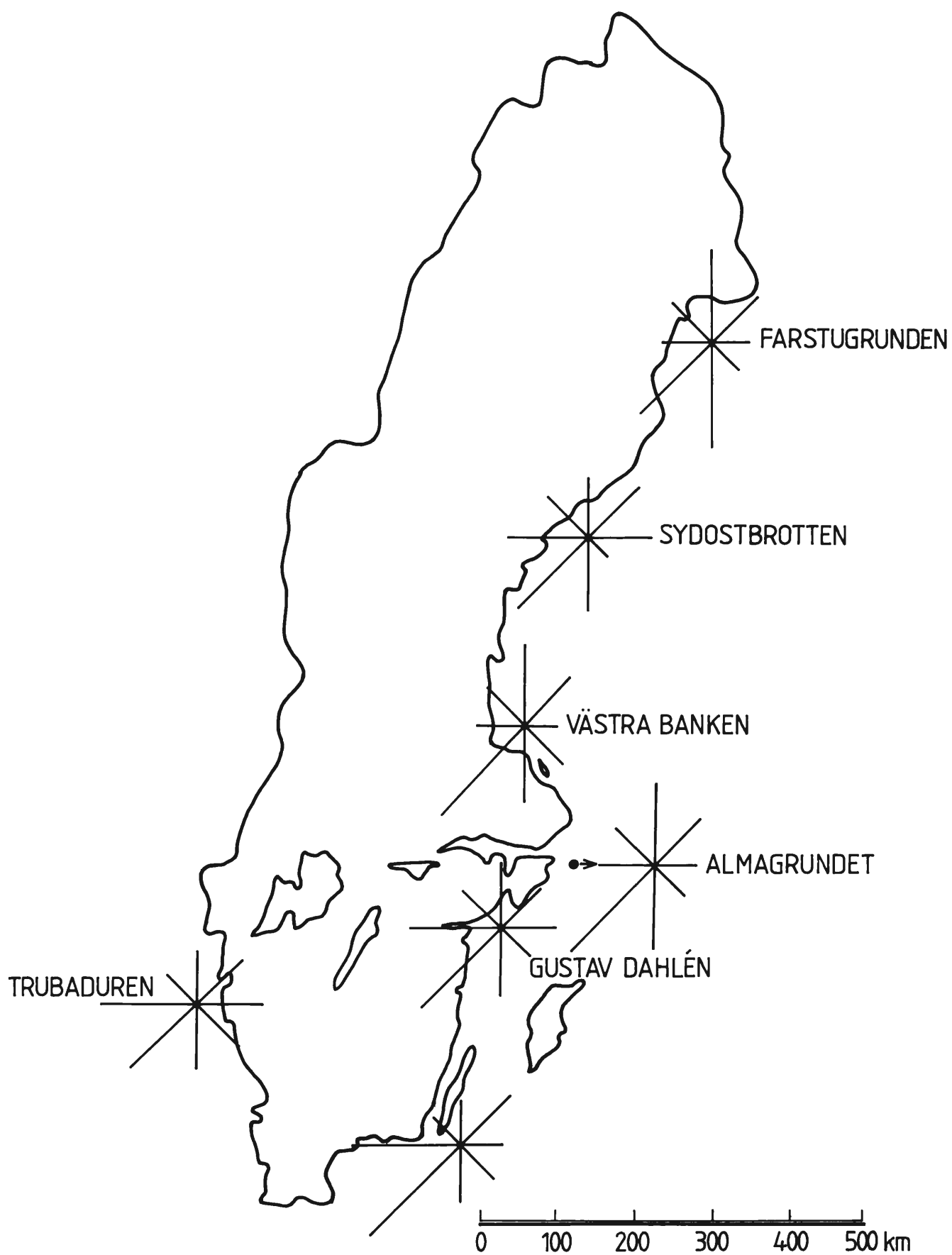
Station	Mät- höjd	1979-01-01--1986-06-30 (7.5 år)							1981-07-01--1986-06-30 (5 år)								
		Weibullparam.		medianvindar (m/s)			rörelseenergi (kwh/m ² -år)		Weibullparam.		medianvindar (m/s)			rörelseenergi (kwh/m ² -år)			
		på mät- höjd C	A	mät- höjd	50 m	100 m	mät- höjd	50 m	100 m	på mät- höjd C	A	mät- höjd	50 m	100 m	mät- höjd	50 m	100 m
Farstugrunden	30	-	-	-	-	-	-	-	2.03	7.75	6.5	6.9	7.6	3389	4210	5510	
Sydostbrotten	33	-	-	-	-	-	-	-	2.11	7.88	6.7	7.7	7.7	3471	4300	5480	
Västra Banken	27	-	-	-	-	-	-	-	2.14	7.89	6.9	7.5	8.2	3356	4310	5650	
Almagrundet	31	2.29	8.77	7.5	8.1	8.8	4423	5710	7320	2.32	8.81	7.5	8.1	8.8	4426	5610	7200
Trubaduren	26	1.91	8.29	7.1	7.7	8.4	4385	5820	7630	1.86	8.10	7.0	7.6	8.3	4211	5590	7330
Gustav Dahlén	26	2.24	7.69	6.6	7.2	7.9	3027	4130	5450	2.27	7.76	6.6	7.2	7.9	2968	4050	5340
Ölands s. grund*	36	2.29	8.68	7.4	8.1	8.8	4283	5710	7320	-	-	-	-	-	-	-	

* tidsperiod 1979-01-01-1984-12-31

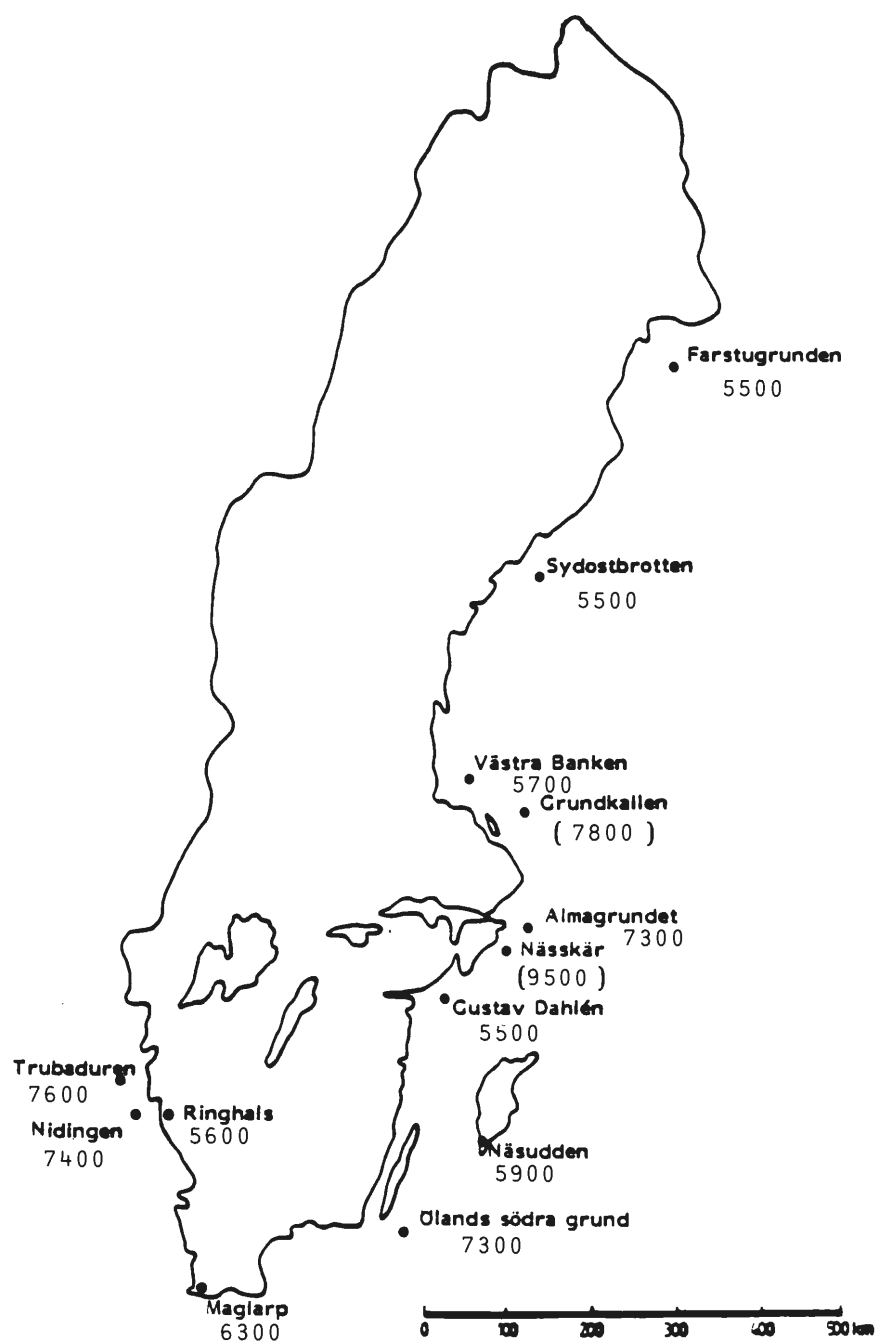
TABELL 3. Uppskattade normala vindförhållanden vid åtta kasunfyrrar samt några master på land.

Station	50 m höjd			rörelse- energi kwh/m ² -år	100 m höjd			rörelse- energi kwh/m ² -år
	median vind (m/s)	weibullpar.			median vind (m/s)	weibullpar.		
		A	C			A	C	
Farstugrunden	6.9	8.3	2.05	4200	7.6	9.1	2.05	5500
Sydostbrotten	7.1	8.3	2.10	4300	7.7	9.1	2.10	5500
Västra Banken	7.5	8.6	2.15	4300	8.2	9.4	2.15	5700
Grundkallen*	8.3	9.6	2.15	6000	9.1	10.5	2.15	7800
Almagrundet	8.0	9.3	2.30	5700	8.8	10.2	2.30	7300
Gustav Dahlén	7.2	8.4	2.25	4100	7.9	9.1	2.25	5500
Ölands s. grund	8.1	9.3	2.30	5700	8.8	10.2	2.30	7300
Trubaduren	7.6	9.0	1.90	5800	8.3	9.9	1.90	7600
Näsudden	7.0	8.3	2.17	4100	8.0	9.6	2.18	5900
Maglarp	7.3	8.5	2.32	4300	8.4	9.9	2.27	6300
Ringhals	6.7	8.3	2.08	4200	7.7	9.2	2.05	5600
Nässkär*	8.3	9.7	2.00	6500	9.2	11.0	2.00	9500
Nidingen*	7.5	9.1	1.95	5600	8.3	10.0	1.95	7400

* Vid dessa stationer har en annan typ av vindmätare utnyttjats jämfört med vid de övriga. Därför är kanske inte mätresultaten direkt jämförbara.



FIGUR 3. Uppmätta vindriktningsfördelningar.



FIGUR 4. Vindmättningsplatser som utnyttjats vid havsvindanalyser. Siffrorna anger beräknad rörelseenergipotential (kWh/m² år) på 100 meters höjd.

6. Vindavtagande från kust.

I vår förra havsvindstudie (3) genomfördes en speciell modellsimulering med syfte att beskriva hur vindhastigheten beror av avståndet till kustlinjen. Den modell som tillämpades var densamma som i detta projekt. Danard (1977), men med skillnaden att den termiska cirkulationen var inkluderad i modellen. Beräkningarna gjordes för ett 30 x 60 km stort område vid Ringhals norr om Varberg och upplösningen i gridnätet var 1 km. En tidsperiod om 11 månader simulerades.

För varje gridpunkt beräknades dels medelvärdet av samtliga simulerade vindhastigheter och dels medelvärden för pålands- respektive frånlandsvind.

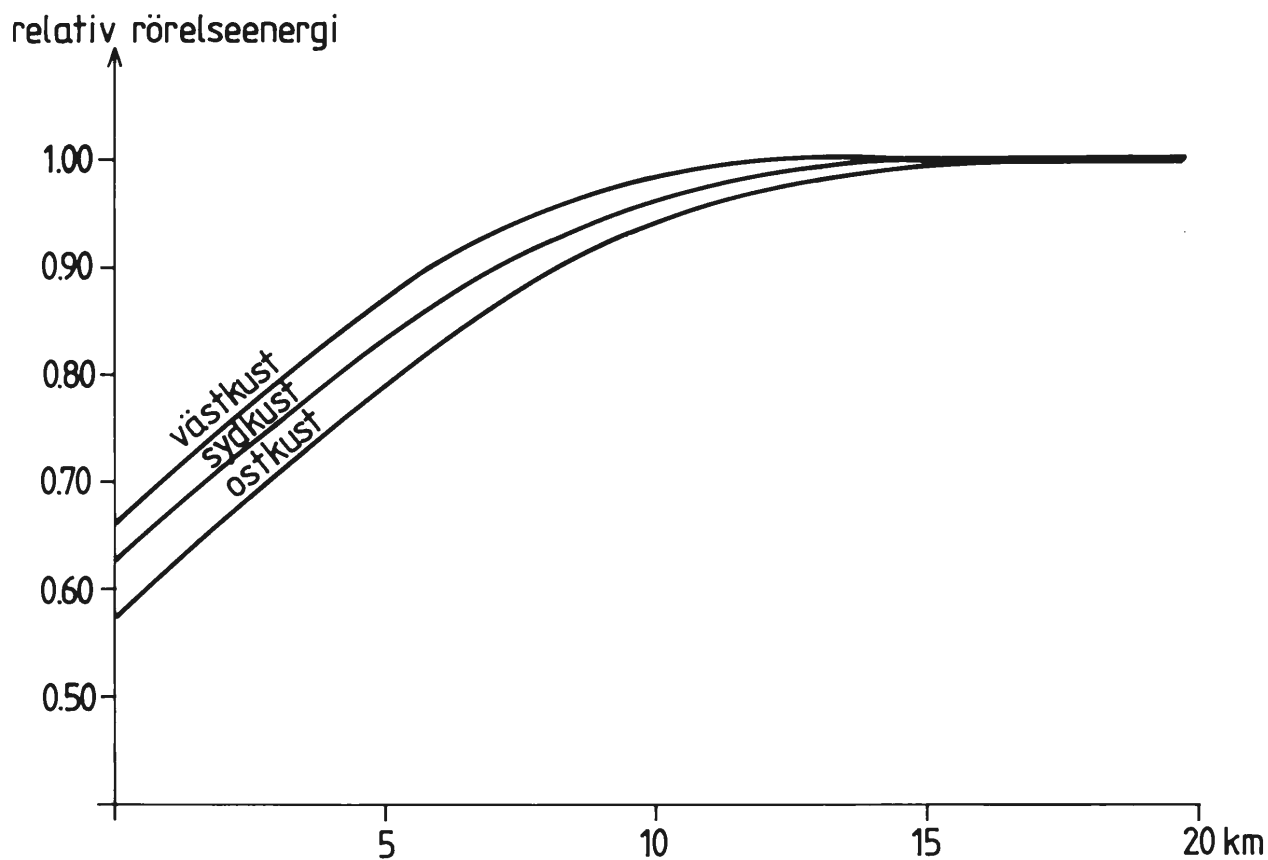
Utifrån de resultat som presenterades i rapporten (3) har vi beräknat hur den tillgängliga rörelseenergin beror av avståndet från kusten, figur 5. Genom att utnyttja vindriktningsstatistik från olika kuststationer och väga ihop frånlands- och pålandskurvorna utifrån denna statistik har vi fått fram olika rörelseenergikurvor för väst-, syd- och ostkust.

Vid utnyttjande av dessa kurvor är det viktigt att notera att de beskriver vindförhållandena som om de enbart beror på markskrovligheten. I verkligheten kan det finnas mönster i den geostrofiska eller "fria" vinden som överlagras de här redovisade kurvorna.

Ytterligare en svårighet när det gäller att enkelt utnyttja kurvorna är att det ofta är svårt att definiera kustlinjens läge. Framförallt gäller det kustavsnitt med omfattande skärgårdar. Modellsimuleringarna gjordes för ett kustavsnitt med mycket väldefinierad kustlinje helt utan öar av betydelse. Det skall också påpekas att kurvornas utseende är beroende av landområdets skrovlighet och topografi. Ringhalsområdet karakteriseras av 8 km bred kustslätt som övergår i en kuperad skogsterräng.

Kurvorna i figur 5 visar alltså vindens variation, enligt beräkningar med en enkel vindfältsmodell, med avståndet från en kust där landskapet kan karaktäriseras som ett slättområde med relativt gott om bebyggelse och spridda skogsdungar.

Längs Skånes sydkust är kustlandskapet betydligt öppnare och har en lägre skrovlighet. Det innebär att differensen i vindtillgång mellan land och öppet hav är mindre än vad diagrammet visar. Stora delar av ostkusten är skogklädd ända ut till havet. Det innebär att differensen mellan land och hav, i fråga om vindtillgång, är större än i diagrammet.



FIGUR 5. Rörelseenergi på 50 - 100 m höjd som funktion av avståndet från kust enligt beräkningen med en enkel vindfältsmodell och utanför ett kustlandskap med en skrovlighetsparameter på ungefär 0.1 m.

7. ENERGIKARTOR

Målsättningen med detta projekt var att ta fram "vindenergi kartor" för de svenska kust- och havsområdena. Detta har vi gjort genom att sammanväga mätdata från kasunfyror och master med de beräknade vindfälten.

Vi har genomgående satt stor tilltro till mätresultaten och konsekvent sett till att energikartorna stämmer överens med uppmätta data. Det har inneburit att modellberäkningarna har justerats på så sätt att relationerna i energinivå mellan olika kustavsnitt (väst-, syd- respektive ostkust) har anpassats till mätresultaten. Den viktigaste informationen från modellberäkningarna har varit vind- och energifältens mönster mellan de relativt få mätpunkterna.

I analogi med vindenergi karteringen över landområdena presenterar vi vindenergin i form av tillgänglig rörelseenergi på 100 meters höjs sett över ett "normalår".

Rörelseenergi kartorna har tagits fram efter ungefär följande schema.

- vi har utfått från det analyserade medianvindfältet på skala 1:1250000
- weibullfaktorn (C) har fastställts för olika kustavsnitt utifrån mätresultaten
- medianvinden har därmed kunnat översättas till rörelseenergi
- anpassning till uppmätta rörelseenergisiffror.

Modellsimuleringarna har alltså utförts för ett år och vi har antagit att vindmönstrets utseende under detta år är representativt för en längre period. Däremot har vi kompenserat för medianvindens avvikelse från normalperioden vid den slutliga karteringen.

Redovisning av karteringen på skalan 1:1250000 medför att det går år fyra kartor i A-4-format för att täcka in den undersökta delen av landet. Orsaken till att inte hela Sveriges kust har studerats är att vi saknar nödvändiga meteorologiska indatafält till beräkningsmodellen för norra hälften av landet.

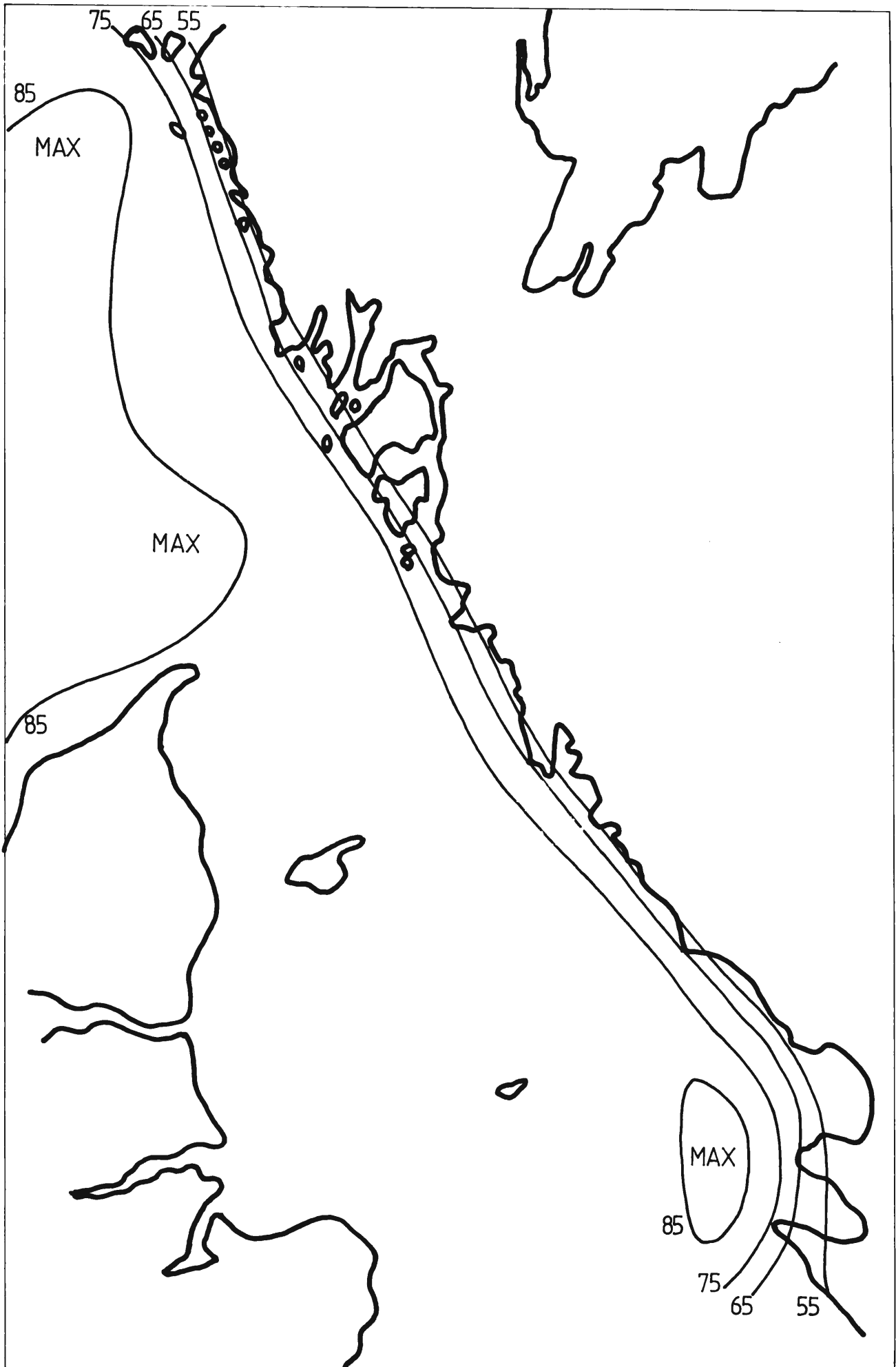
Kartorna 1-4 talar egentligen bäst för sig själv men vi vill ändå göra några kommentarer.

Beräkningarna har som tidigare nämnts visat på ett extra vindrikt område utanför Skälderviken. Vi har ingen möjlighet att verifiera detta resultat med mätdata och har heller ingen teori om varför det uppkommer. En viss försiktighet när det gäller att styra lokalisering primärt efter detta resultat kan vara befogad.

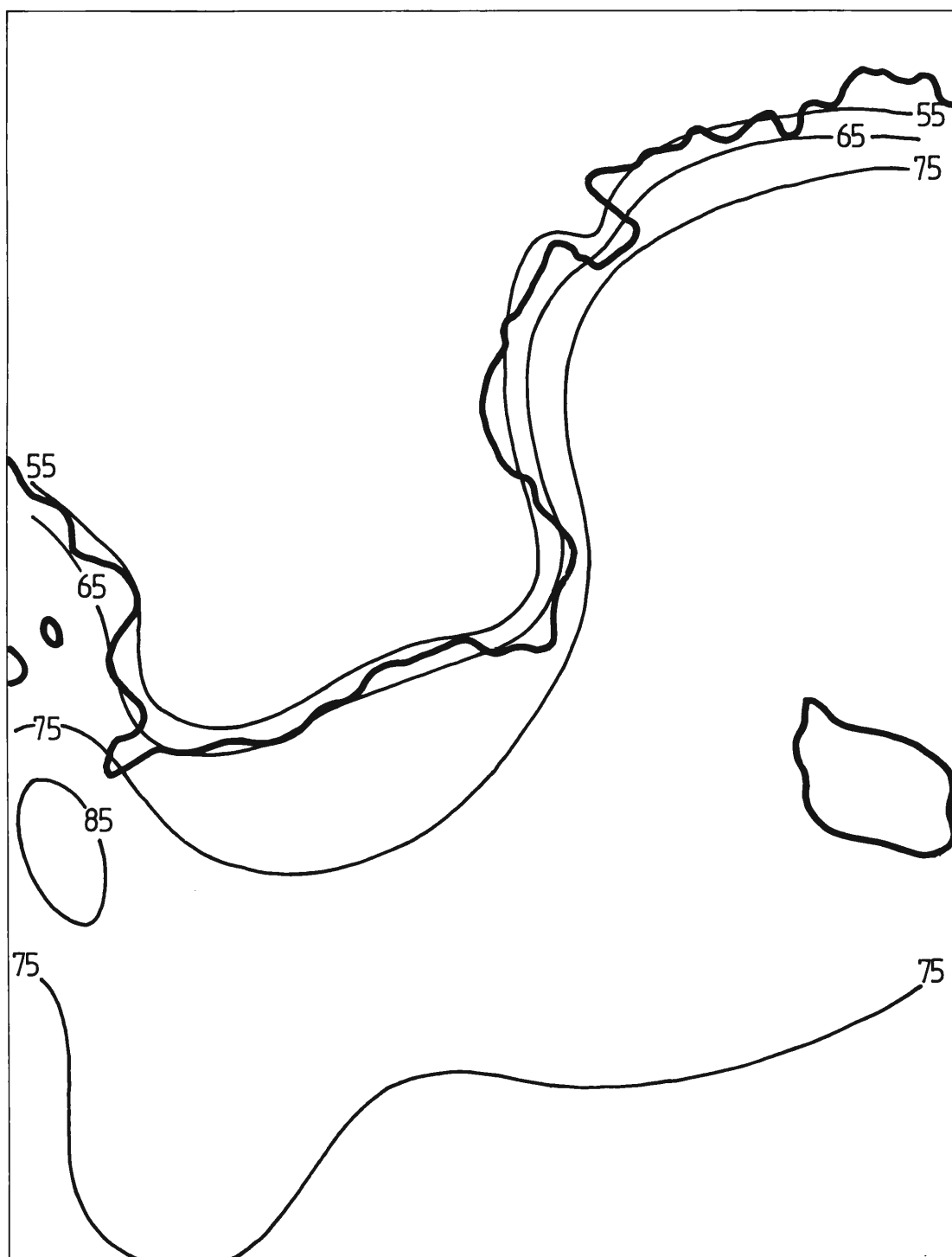
Karteringen längs Skåne- och Blekingekusterna är relativt osäkra pga avsaknad av kasunfyrmätningar att verifiera mot. På grund av att modellen beräknat fram betydligt lägre medianvind än vad som uppmätts vid Maglarp har vi justerat upp nivån på energipotentialen längs Skånes och Blekinges kuster. Längre ut till havs har vi tillämpat de beräknade resultaten.

Isolinjerna för del olika rörelseenerginivåerna svarar mot följande medianvindar och formfaktorer.

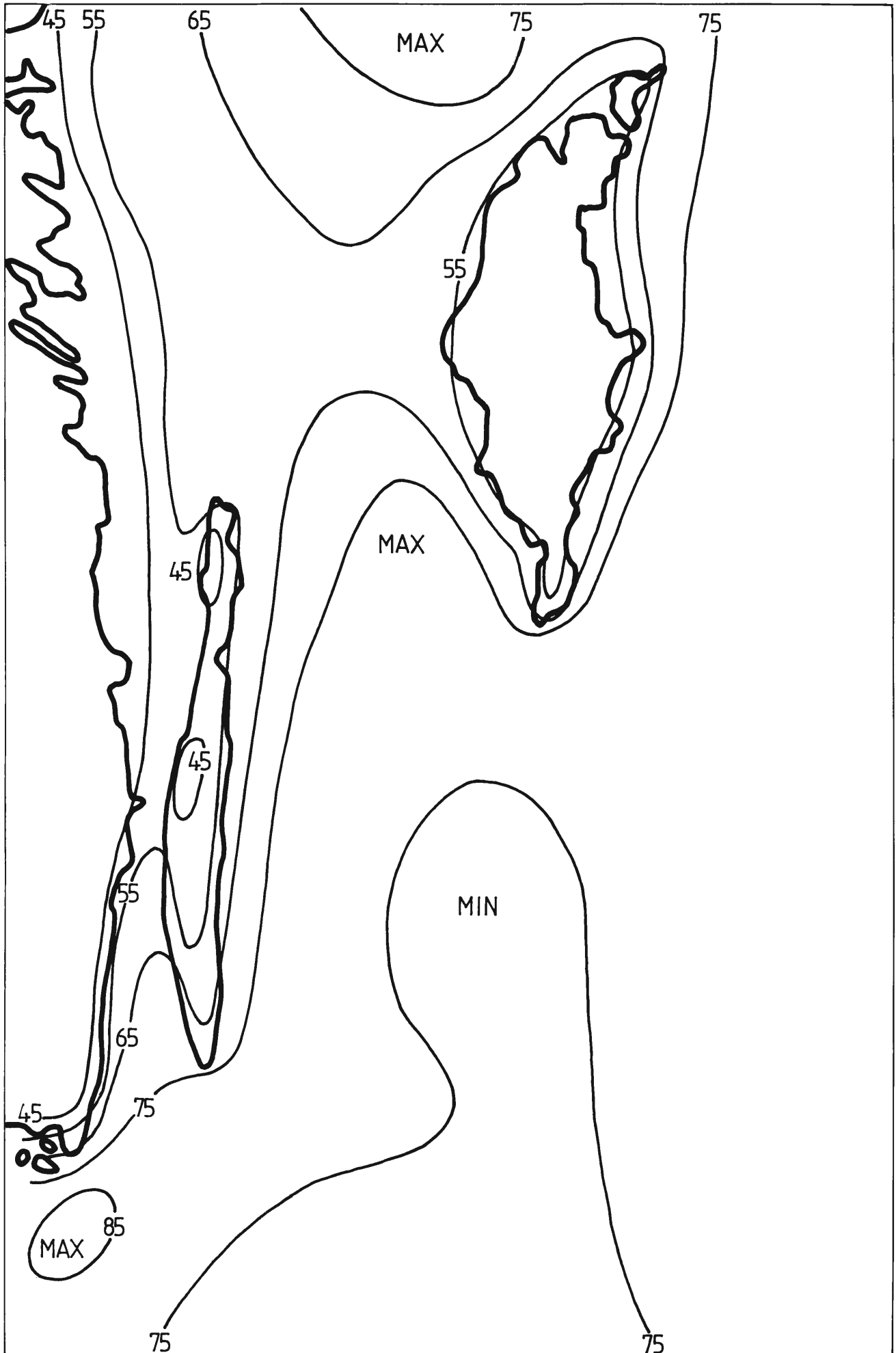
Rörelseenergi (kWh/m ² år)	Kartblad 1 median- vind (m/s)	form- faktor	Kartblad 2 median- vind (m/s)	Form- faktor	Kartblad 3+4 median- vind (m/s)	form faktor
4500	-	-	-	-	7.5	2.25
5500	7.4	1.90	7.6	2.00	8.1	2.25
6500	7.9	"	8.1	2.00	8.5	2.25
7500	8.2	"	8.5	2.00	8.9	2.25
8500	8.6	"	-	-	-	-

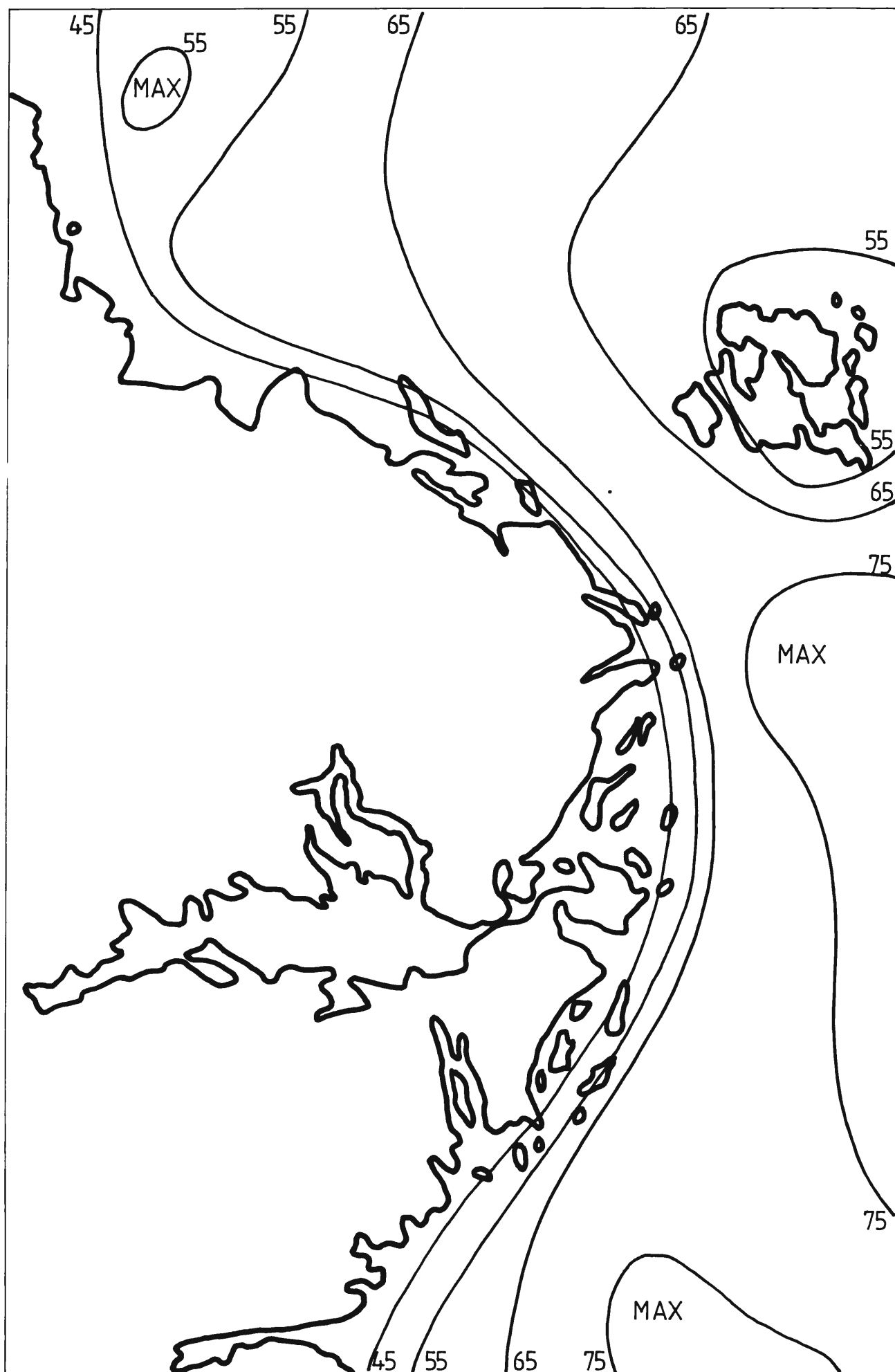


Karta 2. Tillgänglig rörelseenergi (10^2 kWh/m² år) på 100 m höjd.



Skala 1:1 250 000





REFERENSLISTA

1. Kvick, Salomonsson: Vindmätningar med Sodar på Nidingen, SMHI 1984.
2. Kvick, Andersson: Vindstatistik från svenska kasunfyrrar, SMHI 1984.
3. Fredriksson, Kvick, Törnevik, Olsson: Vindförhållandena i Sveriges kust- och havsområden, SMHI 1984.
4. Lundtang-Petersen, Troen, Frandsen: Vindatlas for Danmark, Risö 1980.
5. Bergström, Hans: Vindklimatologisk bearbetning av profilmätningar från Nässkär, MIUU 1983.
6. Danard, Maurice: A simple model for mesoscale effects of topography on surface winds, Monthly Weather Review, pp 572-581 1977.
7. Deardoff, James W. : Parameterization of the Planetary Boundary Layer for Use: General Circulation Models, Monthly Weather Review, Vol. 100, No 2, 1972.



Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
601 76 Norrköping. Tel 011-15 8000. Telex 64400 smhi s.