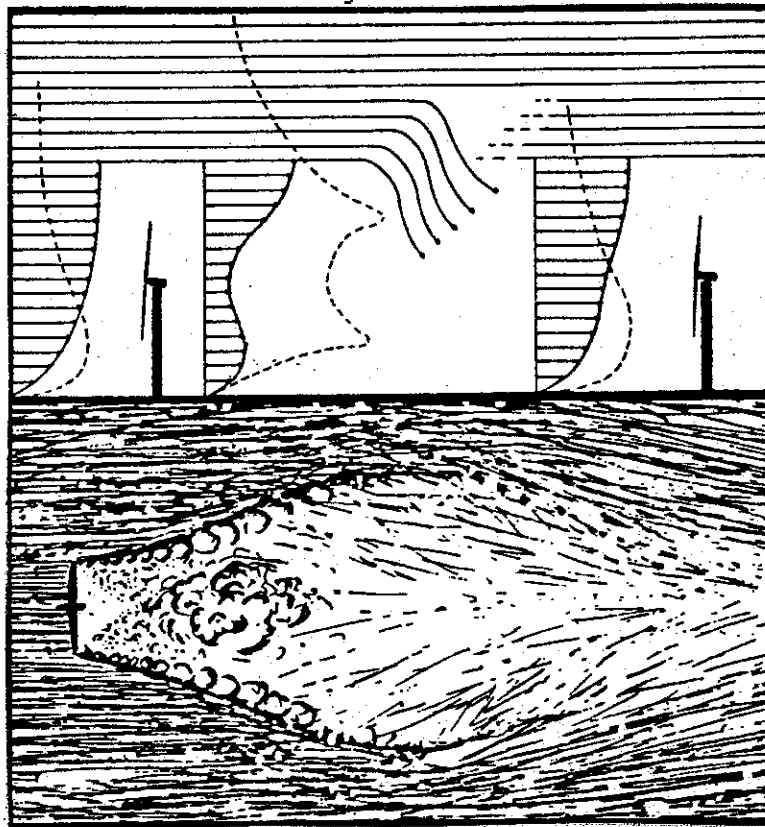


FOLKECENTER
for Vedvarende Energi

PLANOWANIE GOSPODARSTW (WINDFARMS)
wytwarzających energię elektryczną z pomocą wiatru

Fizyka wiatru



Claus Nybroe
1988

Folkecenter for Renewable Energy
Centrum Badawcze Odnawialnych Energii

Tel. 045 97 95 65 55

Fax. 045 97 95 65 55

W s t ę p

Jest to stosunkowo niewielka rozprawa dotycząca tak skomplikowanego problemu jakim jest projektowanie gospodarstw produkujących energię elektryczną z pomocą wiatru. Przedstawia ona jednak czytelnikowi podstawy, głównie fizyki wiatrów, szczególnie przydatne w tej pracy. Ich znajomość umożliwia czynne uczestnictwo w dyskusjach i pracach projektowych łącznie z obliczeniem efektów "dziur powietrznych" i wydajności całego gospodarstwa.

Spis treści:

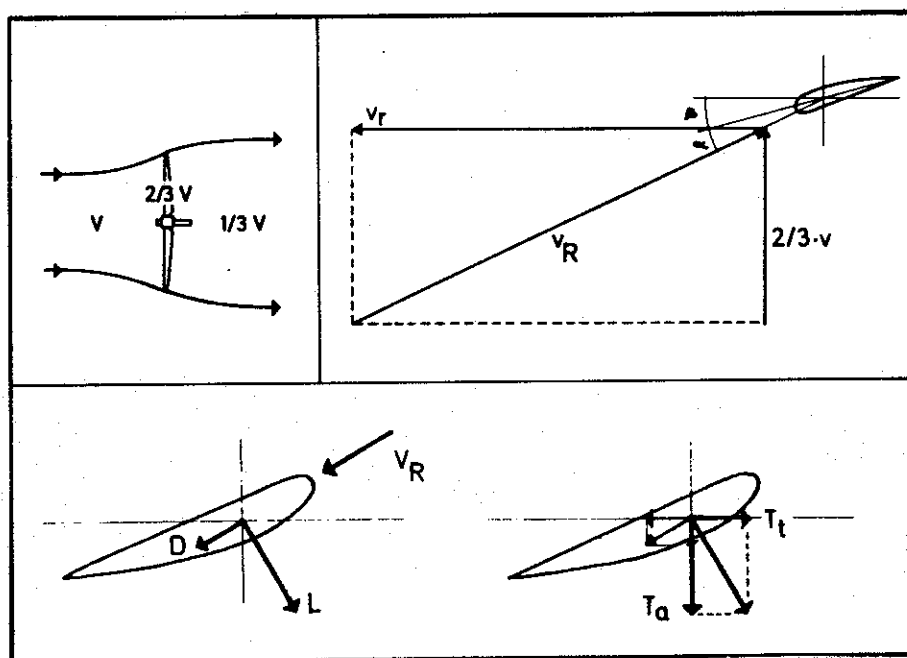
1. Turbina wiatrowa	3
2. Ukształtowanie terenu	7
3. Praca badawcza	11
4. Dziura powietrzna	14
5. Metody obliczeniowe	16
6. Przykłady	22
7. Podsumowanie	27

1. TURBINA WIATROWA

Rys.1 pokazuje fizyczne skutki uderzenia wiatru w płat wirnika. W najlepszym przypadku prędkość wiatru zostaje zmniejszona do $2/3$ w płaszczyźnie wirnika i do $1/3$ poza nią.

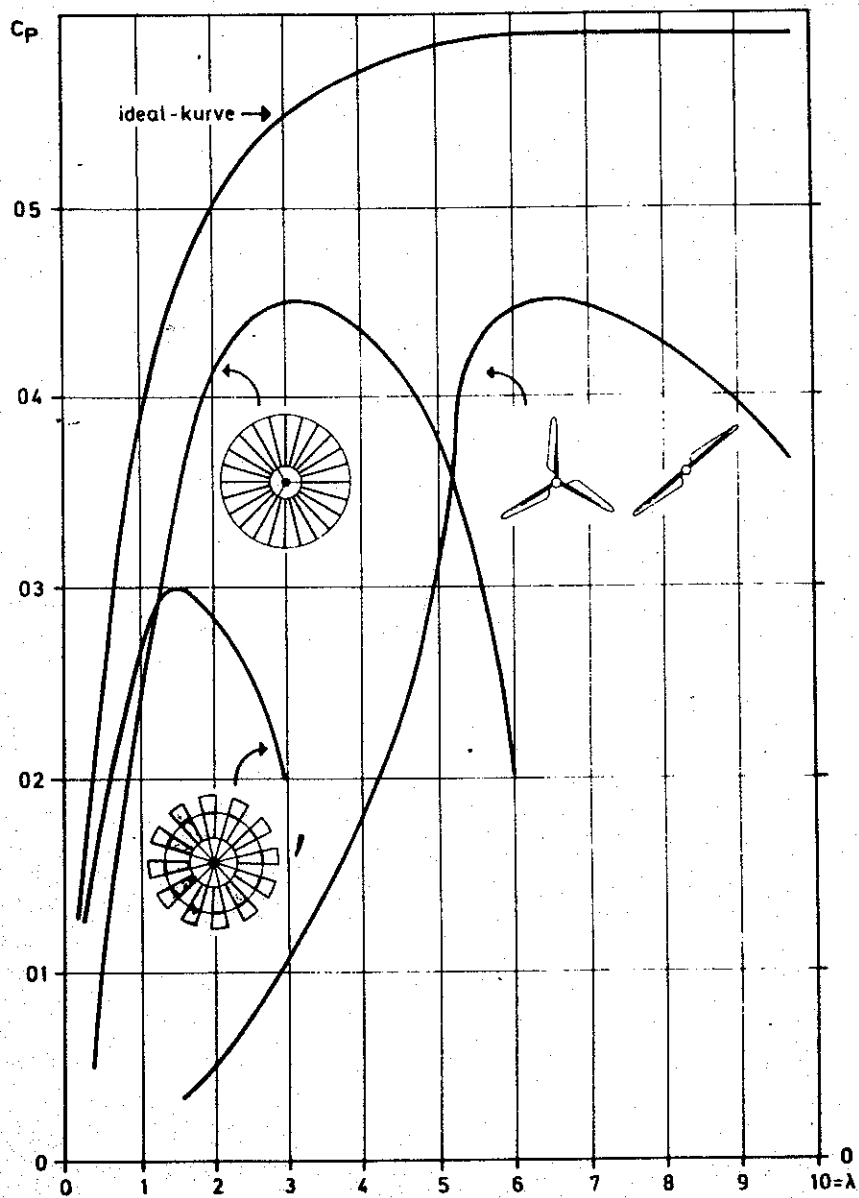
Wirnik zaczyna obracać się. Jego prędkość obrotowa (v_r) i prędkość wiatru w płaszczyźnie wirnika ($2/3 * v$) tworzą wypadkową prędkość wiatru (v_R), który opływa profil płata wirnika.

Przepływ wytwarza dwie siły : wznoszącą (L) i ciągnącą (D). W najczęściej spotykanych warunkach pracy siła wznosząca posiada najwyższą wartość. Dzieli się ona na dwie nowe siły (T_a i T_t). T_a jest nazywana siłą pchającą a T_t jest siłą obracającą, która powoduje, że wirnik zaczyna kręcić się.



rys.1

Prędkość obrotowa i ilość płatów określa typ wirnika. Jest to pokazane na rys.2. Oś odciętych przedstawia stosunek prędkości maksymalnych (prędkość w centrum turbiny / prędkość wiatru) a oś rzędnych wydajność wirnika. Do tej pory dwu- i trzypłatowe wirniki były wyłącznie stosowane w dużych turbinach wiatrowych instalowanych na terenie dużych gospodarstw. Wydaje się, że nowa generacja mniejszych i wielopłatowych turbin wiatrowych ma przyszłościowe zastosowanie jako samodzielne jednostki a także jako dopełnienie dużych gospodarstw.



rys. 2

Wynik pracy turbiny wiatrowej (P) możemy przedstawić wzorem :

$$P = 0,61 * v^3 * A * C_p * n_M \text{ (W)}$$

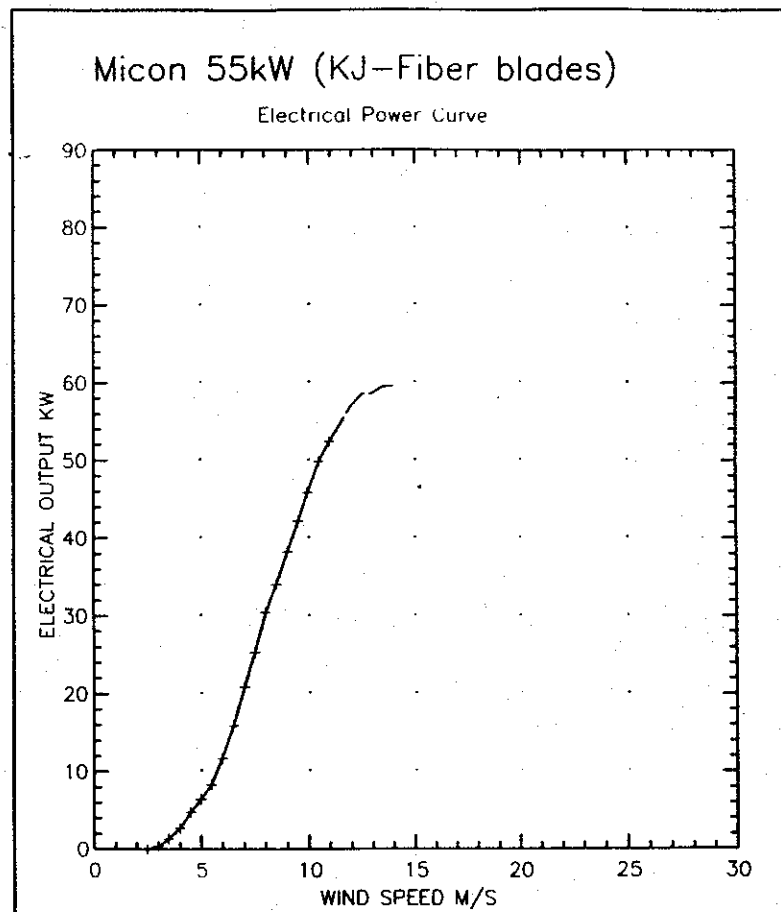
gdzie v - prędkość wiatru (m/s),

A - rozwinięta powierzchnia wirnika (m^2),

C_p - wydajność wirnika,

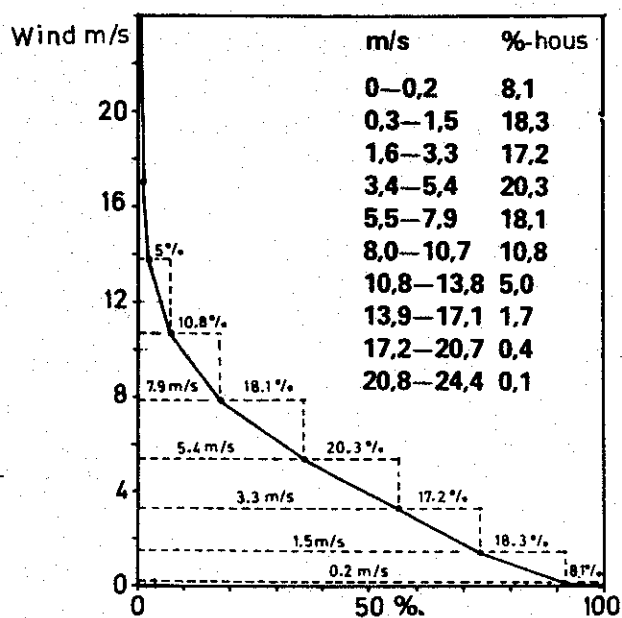
n_M - całkowita wydajność obracającego się urządzenia.

Wykonując obliczenia w szerokim zakresie prędkości wiatru otrzymujemy krzywą mocy turbiny wiatrowej. Rys.3 pokazuje przykład takiego wykresu.



rys. 3

Jeżeli pomiary prędkości wiatru w terenie wykonamy w dłuższym przedziale czasowym otrzymamy krzywą rozkładu taką jaką pokazuje przykład na rys. 4.



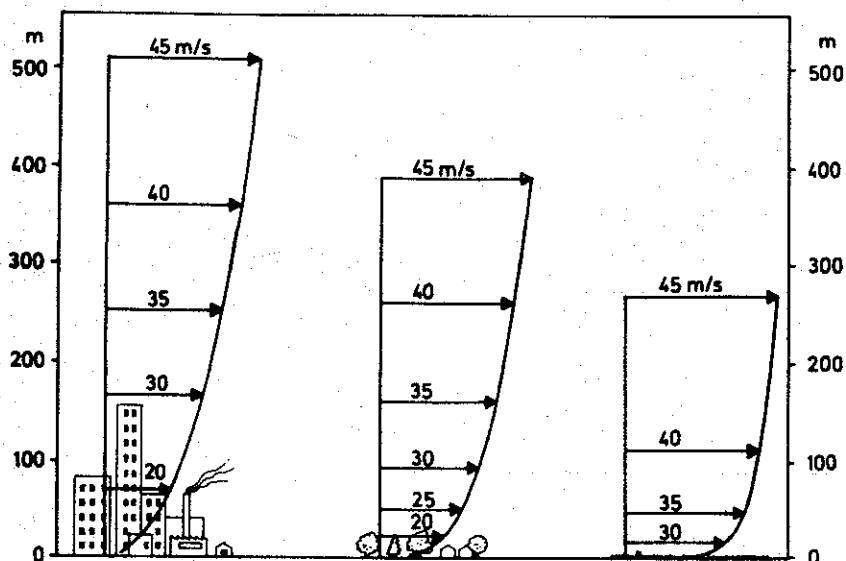
rys. 4

Jeżeli prędkość wiatru podzielimy na przedziały czasowe to wówczas roczny efekt pracy turbiny wiatrowej (E) przedstawia wzór :

$$E = \frac{0,61 * A * \sum v^3 * C_p * n_M * h_i}{1000} \quad \text{kWh/rok}$$

gdzie h_i - ilość godzin w przedziale i.

2. UKSZTAŁTOWANIE TERENU



rys. 5

Rys. 5 przedstawia tak zwane profile wiatru nad określonym typem terenu. Ogólnie mówiąc prędkość wiatru wzrasta wraz z wysokością, lecz tylko do pewnej granicznej wartości.

Zawodowe projektowanie gospodarstw wymaga często pewnych informacji o prędkości wiatru w centrum turbiny wiatrowej. Prędkość wiatru jest najczęściej mierzona za pomocą anemometrów (tzw. anemometrów kielichowych). I dlatego też najlepiej byłoby gdyby w okresie prowadzenia prac badawczych anemometry były umieszczone na planowanej wysokości centrum turbiny. Rozwiązanie takie wymaga jednak zastosowania wielu anemometrów rozmieszczonych na różnych wysokościach i jest bardzo kosztowne. Zamiast tego można zastosować niższą wieżę a prędkość wiatru obliczyć wzorem :

$$\frac{u_n}{u_o} = \frac{h}{o}^{0.18}$$

gdzie u_n - prędkość wiatru na wysokości centrum turbiny,
 u_o - prędkość wiatru na mierzonej wysokości "o".

Prędkość wiatru zależy także od powierzchni terenu określanej jako ukształtowanie. Rys.6 opisuje cztery klasy ukształtowania terenu i jego względną energię obliczoną 50 metrów nad powierzchnią ziemi.

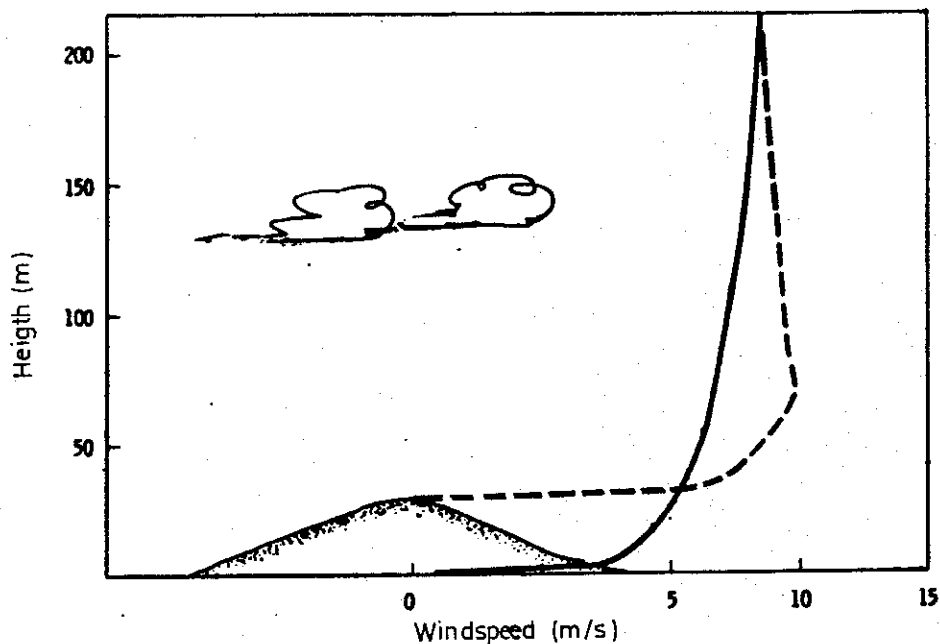
Klasy ukształtowania	Rodzaj terenu	Względna energia
0	Otwarte wody	10
1	Otwarty teren z niewielką ilością drzew i zabudowań	7
2	Tereny rolnicze z pewną ilością drzew i zabudowań	5
3	Tereny zabudowane i zadrzewione	3

rys.6

Zatem planując gospodarstwo musisz brać pod uwagę następującą zależność : im wyżej położone jest centrum turbiny i wyższa jest klasa ukształtowania terenu tym wymagana jest większa powierzchnia aby uzyskać "czystą" klasę ukształtowania terenu. Przystawia to rys.7.

Wysokość centrum turbiny	Klasa ukształtowania terenu			
	0	1	2	3
80	4,5	3,5	3,0	2,5
50	3,8	3,0	2,6	2,1
40	3,5	2,9	2,4	2,0
30	3,2	2,7	2,2	1,9
20	2,9	2,2	1,9	1,6
10	2,2	1,7	1,5	1,6

rys.7. Minimalna wolna przestrzeń (w km) przed czołem turbin wiatrowych dla uzyskania "czystej" klasy ukształtowania terenu.



rys. 8

Rys. 8 pokazuje przykładowe profile wiatru nad wierzchołkiem wzgórza i ponad płaską powierzchnią. Jak jest to widoczne na rysunku prędkość wiatru nad wierzchołkiem wzgórza wzrasta do pewnej wartości co oczywiście wpływa na wzrost produkcji energii.

Rysunek ten pokazuje także, że prędkość wiatru po osiągnięciu pewnego maksimum zmniejsza się. Oczywiście nie zawsze tak się dzieje ale istnieje taka możliwość. Zatem jeżeli zamierzasz wybudować wiele turbin wiatrowych na grzbiecie wzgórza to musisz zbadać możliwość wystąpienia tego zjawiska (budowa wysokich i kosztownych wież mieści w sobie ryzyko, że wirniki mogą znaleźć się w obszarze, w którym prędkość wiatru już spada). Aby tego uniknąć można zaproponować wykonanie pomiarów prędkości wiatru za pomocą trzech anemometrów umieszczonych na różnych wysokościach tego samego słupa. Środkowy anemometr powinien być umieszczony jako pierwszy i na wysokości (h) gdzie spodziewamy się maksymalnej prędkości wiatru określonej wzorem :

$$h = \frac{0.3 * L^*}{\ln \frac{1}{z_0}}$$

gdzie L^* - odległość od wierzchołka wzgórza (HD) do punktu, gdzie wysokość wynosi $H/2$,

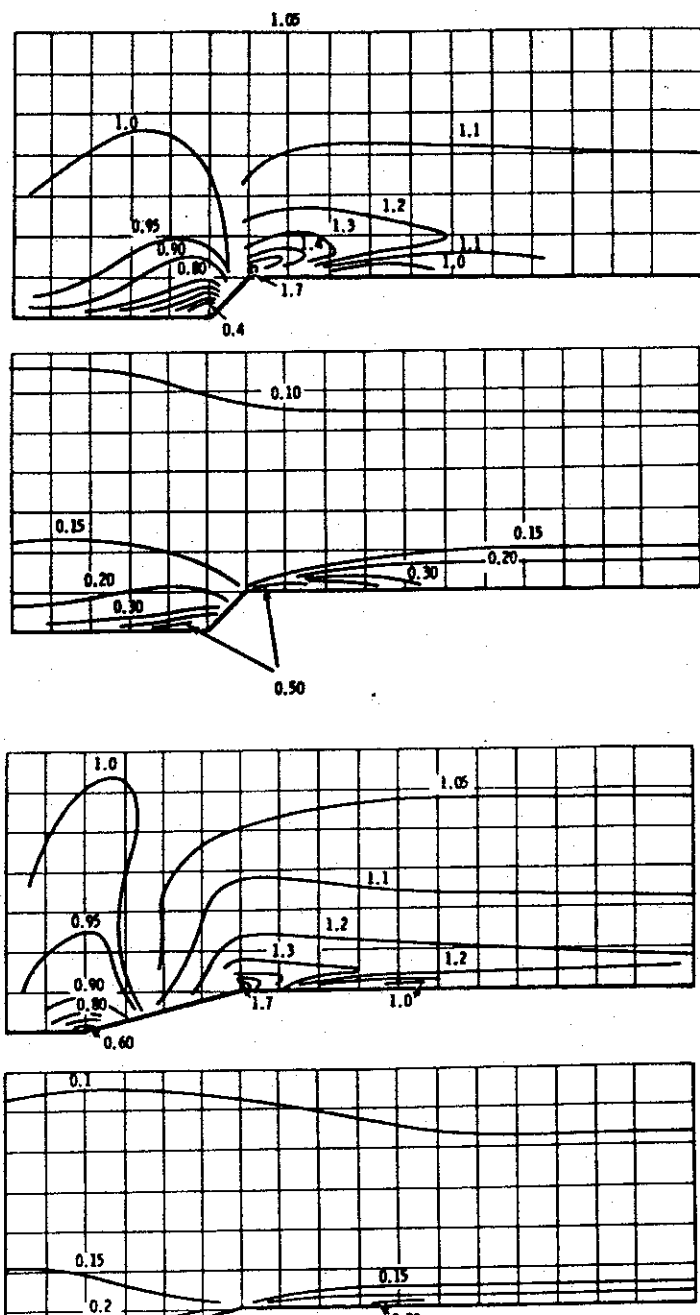
z_0 - współczynnik zależny od długości i ukształtowania

$z_0 = 0,01$ m dla trawy i pierwszej klasy ukształtowania,

$z_0 = 0,05$ m dla niewielkich krzaków i drugiej klasy ukształtowania,

$z_0 = 0,3$ m dla lasów i trzeciej klasy ukształtowania.

Rys. 9 przedstawia dwa zestawy krzywych uzyskanych z pomiarów wiatru w tunelu. W każdym zestawie górny wykres przedstawia rozkład współczynników przy zwiększającej się prędkości natomiast dolny rozkład intensywności zawirowań. Te i inne pomiary wykazują by nie planować instalacji zbyt blisko krawędzi skał nadmorskich czy na zbyt stromych zboczach, gdzie intensywność zawirowań może być zbyt duża dla wirnika. Należy unikać pochyłości o spadku większym niż 45%.



rys. 9

3. P R A C A B A D A W C Z A

Rozważania dotyczące charakterystycznych ruchów mas powietrznych (wiatrów) w danym terenie poprzedzają jakąkolwiek instalację pojedynczej turbiny wiatrowej czy kompleksu turbin w gospodarstwie. Praca ta w znacznym stopniu zależy od rejonu, w którym ma być wykonana instalacja.

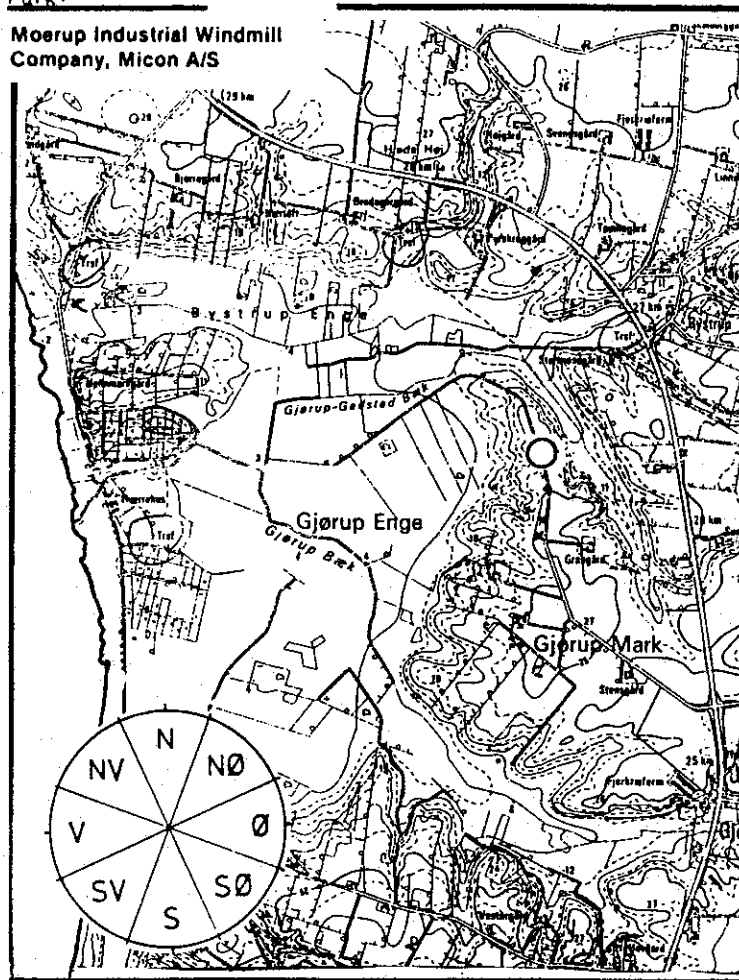
a) Infrastruktura rozwinięta

Na obszarach zaludnionych i z dobrze rozwiniętą infrastrukturą jesteś w tej dobrej sytuacji, że możesz uzyskać wyniki systematycznych pomiarów atmosferycznych z odpowiednich instytucji. (Jeżeli nie, to spójrz do następnego podrozdziału.) W tak szczęśliwej sytuacji praktycznie nie musisz wykonywać żadnych pomiarów. Zamiast tego możesz wykorzystać atlas wiatrów zgodnie z metodą opracowaną w Danii przez Risoe.

Korzystając z tej metody należy osobiście rozpoznać planowane miejsce instalacji z dobrą mapą o skali co najmniej 1:25 000 i kompasem. Powierzchnię dzieli się na 8 sektorów zgodnie z kierunkami wiania wiatrów. Każdy z nich jest potem klasyfikowany zgodnie z klasami ukształtowania. Metoda ta pozwala także na uwzględnienie w projektowaniu klas ukształtowania terenu oraz nierówności naturalnych (wzgórza) i sztucznych (zabudowania). Obliczenia wykonuje się poprzez zestawienie krzywej mocy danej turbiny wiatrowej z danymi zawartymi w atlasie wiatrów. Takie postępowanie pozwala na obliczenie ilości energii możliwej do wyprodukowania przez turbinę w ciągu roku. Przykład takiego postępowania przedstawia rys.10.

Park: **GJØRUP**

Moerup Industrial Windmill
Company, Micon A/S



Klasyfikacja gruntu

Klasa ukształtowania terenu Wzgórze Zabudowania
 Sektor odległy odległość bliski H L %zmniejszenia

AREA-CLASSIFICATION						
Sector	Roughnessclass			Hill		Shelt REDUC. %
	Remote	Dist.	Near	H	L	
N	2	1000	1	20	400	
NE	3	1000	2	10	200	
E			2	10	200	
SE	3	1800	1	10	200	
S	3	1500	2	20	1000	
SW	0	2000	1	20	500	2
W	0	1800	1	20	300	
NW	2	1300	1	20	400	

All computations 24 m above terrain

A-PARAMETER : 7.38 m/s

C-PARAMETER : 1.79

ENERGY
total in wind : 3.3 MWh/m²/år

ENERGY
19.23 m mill : 258 MWh/år
(100%)

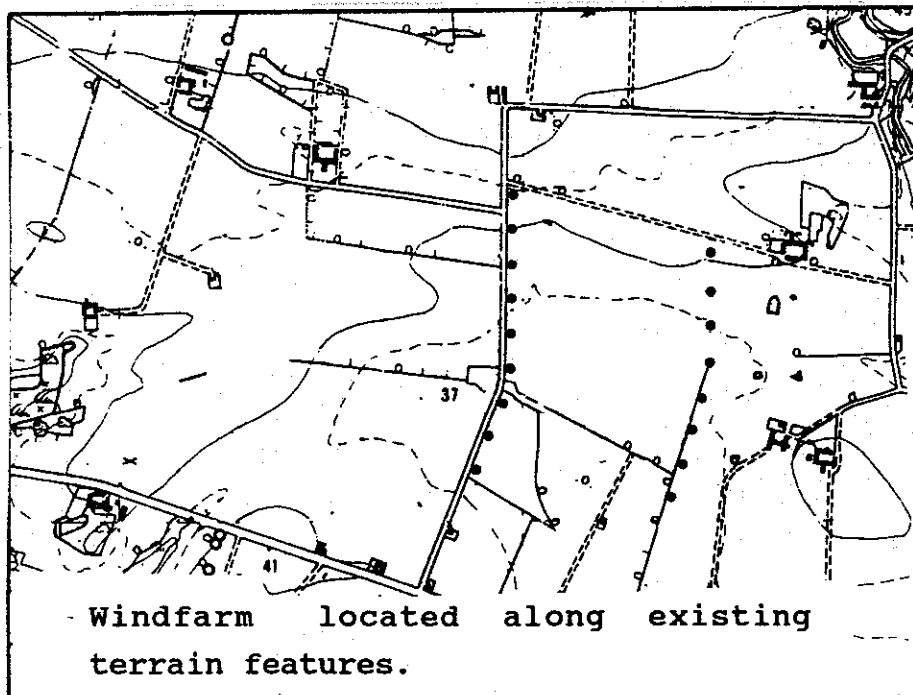
Wszystkie obliczenia
 wykonano
 24 m nad terenem
 rys. 10
 12

Na terenach zaludnionych często najwięcej pracy wymaga znalezienie najlepszego i realnego miejsca do umiejscowienia instalacji. Jeżeli poszukiwania dotyczą dużych obszarów to dobrze jest rozpocząć od pracy z mapą. Pozwala to na znalezienie i wykluczenie terenów zajętych takich jak rezerwaty przyrody, lotniska, tereny wojskowe i 200 metrowe strefy wokół zabudowań. Należy także znaleźć i wykluczyć okolice niekorzystne pod względem układów wietrznych (tereny pagórkowate, lasy i większe grupy lub linie drzew).

W efekcie znajduje się kilka wolnych miejsc. Należy skonfrontować je z mapą fizyczną, której poziomnice pokazują miejsca szczególnie korzystne dla naszych instalacji takie jakie wzniesienia i pochyłości terenu, oraz z atlasem wiatrów.

Jeżeli zamierzenia dotyczą większych obszarów najbardziej korzystne jest dokonanie pierwszej selekcji na podstawie zdjęć lotniczych danego terenu.

Na terenach zaludnionych niemniej ważny jest problem uzyskania gruntów pod instalację. Aby ułatwić sobie pertraktację z właścicielami ziemskimi czy też przedstawicielami administracji danego terenu należy planować umiejscowienie instalacji wzdłuż istniejących już urządzeń terenowych takich jak : drogi, tamy czy miedze dzielące pola. Praktyka udowodniła zasadność takiego postępowania. Uwzględnienie powyższych uwarunkowań nie ogranicza możliwości zaprojektowania dobrej i sprawnej instalacji.



Gospodarstwo
umieszczone
wzdłuż
istniejących
urządzeń
terenowych

rys. 11

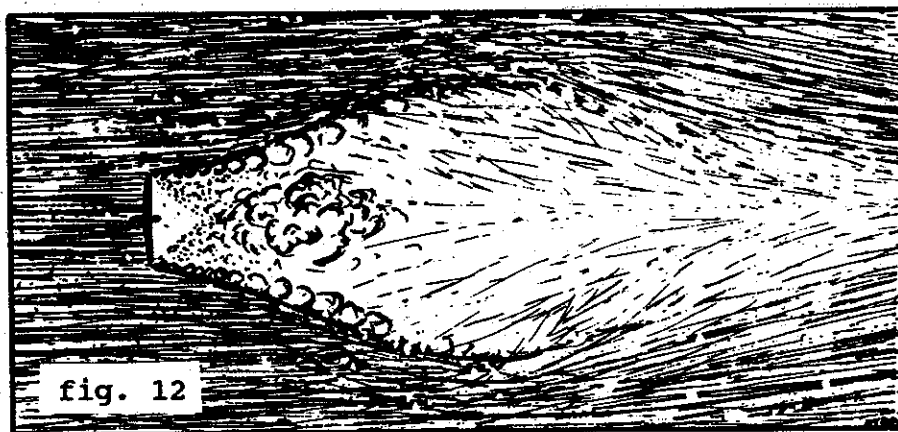
13

b) Infrastruktura uboga

Obszary z ubogą infrastrukturą charakteryzują się rozległymi przestrzeniami o niewielkim zaludnieniu z niewieloma zabudowaniami przy niewielkiej produkcji rolnej czy przemysłowej. Dlatego też stosunkowo łatwo jest tutaj dobrze umiejscowić gospodarstwo.

Jeżeli chodzi o pomiary wiatrów to musisz polegać na samym sobie gdyż odpowiednie dane przeważnie nie istnieją. Musisz zainstalować aparaturę pomiarową, która zarejestruje kierunek i prędkość wiatru. Warunki wietrzne mogą się zmieniać z roku na rok. W sytuacji gdy w pobliżu jest stacja meteorologiczna możesz wykorzystać jej aktualne dane i średnie z całego roku by uaktualnić swoje pomiary. W tym przypadku potrzebujesz stosunkowo krótkiego okresu czasu. Gorzej gdy nie ma w pobliżu stacji meteorologicznej. Musisz wtedy poświęcić więcej czasu by uzyskać wiarygodne dane.

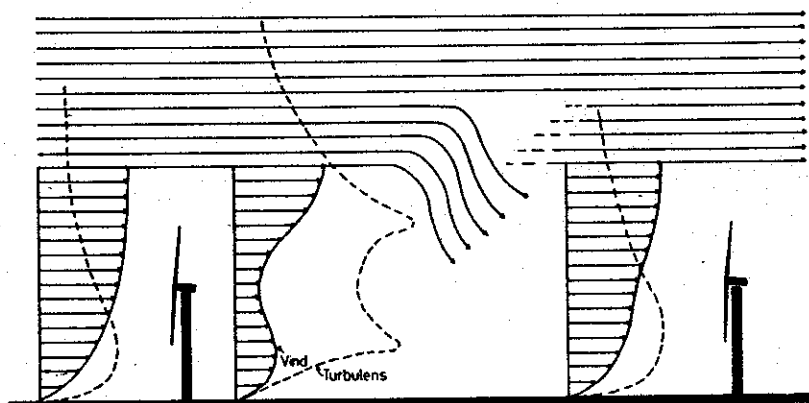
4. DZIURA POWIETRZNA



rys.12

Rys.12 pokazuje co dzieje się poza wirnikiem turbiny wiatrowej. W tym miejscu pojawia się przestrzeń ze zmniejszającą się prędkością wiatru i zwiększającą się intensywnością zawirowań. Przestrzeń ta zwana jest dziurą powietrzną i jest zjawiskiem podobnym do pojawiania się kilwata za śrubą statku. Za wirnikiem i trochę dalej dziura powietrzna jest ograniczona przez wiry wytwarzane przez końcówki płatów wirnika.

Zapobiega to przenikaniu strumieni wolnego wiatru do dziury powietrznej. Wraz ze wzrostem odległości od wirnika (w kierunku wiania wiatru) wiry słabną i strumienie wiatru zaczynają przenikać do dziury. Ciągłe jeszcze nie wiemy kiedy ten proces kończy się i dziura powietrzna zanika. Przypuszcza się, że następuje to w kierunku wiania wiatru w odległości równej 5 - 10 średnic wirnika (5 - 10 D) za płaszczyzną wirnika.



rys.13

Rys.13 pokazuje to samo zjawisko przedstawione za pomocą profili wiatru. Linie całkowite przedstawiają prędkość wiatru natomiast przerywane zawirowania. Przed czołem turbiny mamy do czynienia ze zwyczajnym profilem wiatru a zawirowania osiągają swoją największą wartość niewiele ponad ziemią. Za turbiną natomiast widzimy słabnące profile wiatru i zwiększający się stopień zawirowania szczególnie za końcówkami wirnika. Po chwili znajdujące się wokół wolne wiatry wdzierają się do dziury powietrznej i profile wiatru odtwarzają się stając się podobne tym przed czołem turbiny.

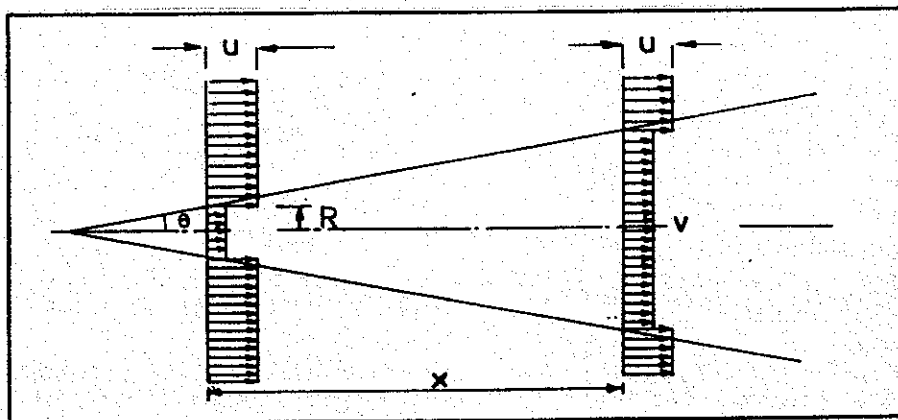
5. METODY OBLICZENIOWE

Przyjmijmy, że wydajność jednej turbiny wiatrowej ma wartość 1. Jeżeli będziemy mieli w gospodarstwie 10 turbin to całkowita wydajność nazywana wydajnością gospodarstwa będzie mniejsza od jedności (np 0.9) dzięki efektowi dziury powietrznej turbin. Także nie wszystkie turbiny mogą być przez cały czas ustawione czołowo do napływających wiatrów. Czasem niektóre turbiny stoją w dziurze innych.

Niewiele jest metod matematycznych pozwalających na obliczenie efektów dziur powietrznych i wydajności gospodarstwa. Są one zresztą bardzo skomplikowane. Przedsiębiorstwa doradcze proponują ich kupno w postaci oprogramowania komputerowego. Jest to bardzo kosztowne rozwiązanie.

Istnieje jednak bardzo prosta metoda, zgodnie z którą można samodzielnie napisać program komputerowy. Można także wykonać obliczenia z pomocą tylko kalkulatora. Te przybliżone obliczenia pozwalają na uzyskanie wyników zdumiewająco zgodnych z wynikami uzyskanymi złożonymi metodami.

Metoda została opracowana przez inżyniera Niels Otto Jensena z Risoe. Rys.14 pokazuje zastosowanie tej metody dla pojedynczej turbiny wiatrowej.



rys.14

Prędkość wiatru w dziurze powietrznej (v) jest zależna od :

(u) - prędkości wolnego wiatru opływającego wirnik,

(x metrów) - odległości w kierunku wiania wiatru za wirnikiem,

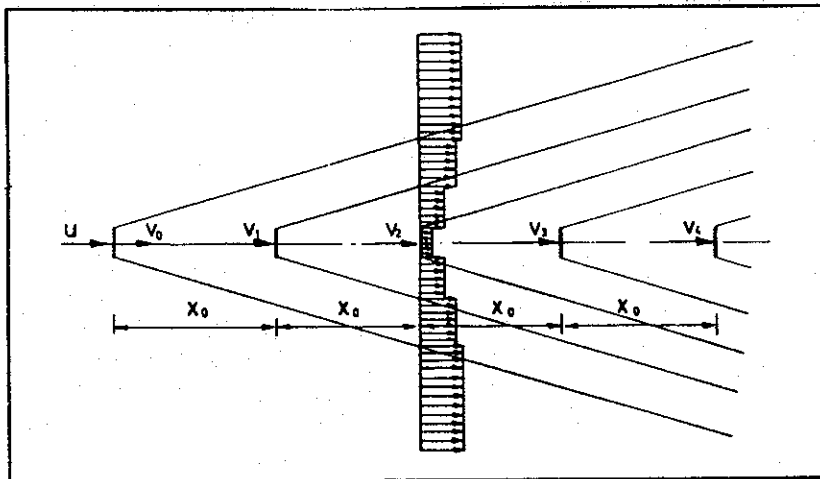
(R metrów) - promienia wirnika,

(θ) - kąta rozchodzenia się wiatru

V jest obliczona ze wzoru :

$$v = u \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{R}{R + \alpha_{\theta} * x} \right)^2 \right]$$

α_{θ} jest nazywana stałą rozchodzenia się. Wcześniej jej wartość przyjmowano jako 0.1, lecz obecnie przyjmuje się wartość 0.07 przy kącie rozchodzenia się wynoszącym odpowiednio 4.5° .



rys.15

Rys.15 pokazuje zastosowanie metody w przypadku rzędu turbin wiatrowych. Wyrażenie przyjmuje postać :

$$\frac{v_N}{u} = 1 - \left(1 - \frac{1}{3} * \frac{v_{N-1}}{u} \right) \left(\frac{R}{R + \alpha_{\theta} * x_0} \right)^2$$

gdzie v_N - prędkość wiatru przed czołem turbiny numer (N + 1).

Możemy przyjąć następujące wartości dla obliczenia prędkości wiatru w przypadku rzędu turbin przedstawionych na rys.15 :

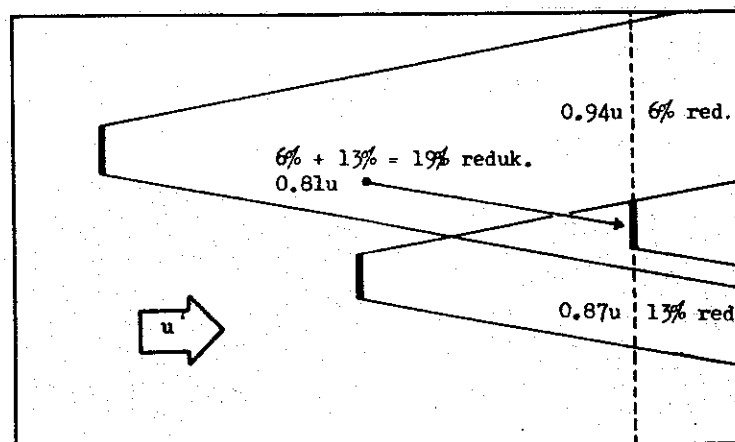
$$\begin{aligned} u &= 10 \text{ m/s} \\ R &= 10 \text{ m} \\ \alpha_{\theta} &= 0.1 \\ x_0 &= 100 \text{ m } (5 D) \end{aligned}$$

Wykonane obliczenia pokazują, że prędkość wiatru przed turbiną nr 2 wynosi $0.83 u$ podczas gdy przed turbinami nr 3,4 i 5 posiada już stałą wartość równą $0.82 u$.

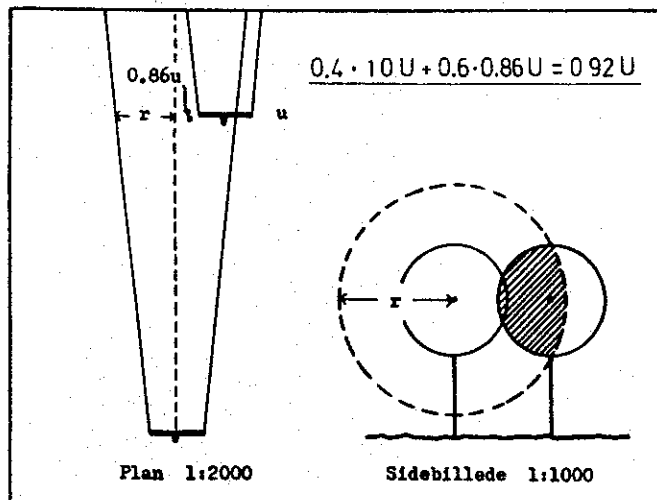
Wynik pracy turbiny wiatrowej jest w zasadzie głównie zależny od sześciangu prędkości wiatru (u^3) przy uwzględnieniu oczywiście kilku stałych. Korzystając z wyżej przyjętych wartości możemy obliczyć wydajność rzędu turbin wiatrowych zgodnie z wzorem :

$$\frac{P}{P_0} = \frac{u^3 + (0.83u)^3 + 3(0.82)^3}{5u^3} = 0.64$$

Rys.16 pokazuje sytuację, w której następuje nałożenie się dziur powietrznych.



rys.16



Rys.17 pokazuje sytuację, w której wirnik znajduje się tylko częściowo w dziurze powietrznej innej turbiny.

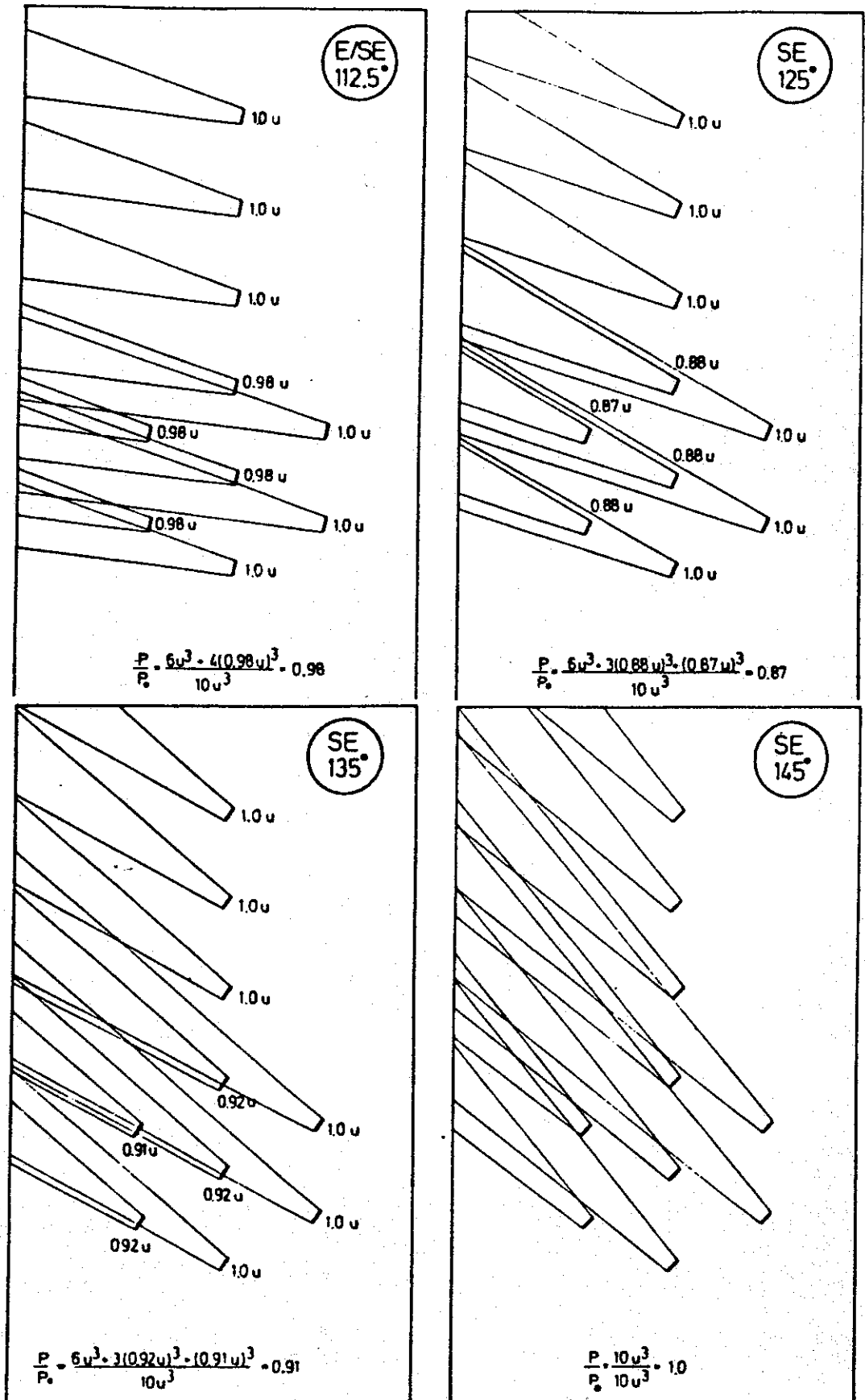
rys.17

Jesteśmy teraz zdolni do obliczenia całkowitej wydajności gospodarstwa. Rys.18A pokazuje sytuację zaistniałą na gospodarstwie w Sydvestmors. Kompasem należy podzielić cały obszar na 8 sektorów (N, NE, E ...). Następnie korzystając ze znanej nam już metody obliczamy wydajność gospodarstwa w każdym sektorze. (Najbardziej istotną częścią tej pracy jest obliczenie poszczególnych rzędów. Można trochę uprościć obliczenia dotyczące pełnego czy tylko częściowego nakładania się dziur powietrznych.)

Wyniki tych obliczeń przedstawiono w tabelce (rys.18). Z obliczeń tych uzyskuje się także całkowitą wydajność gospodarstwa.

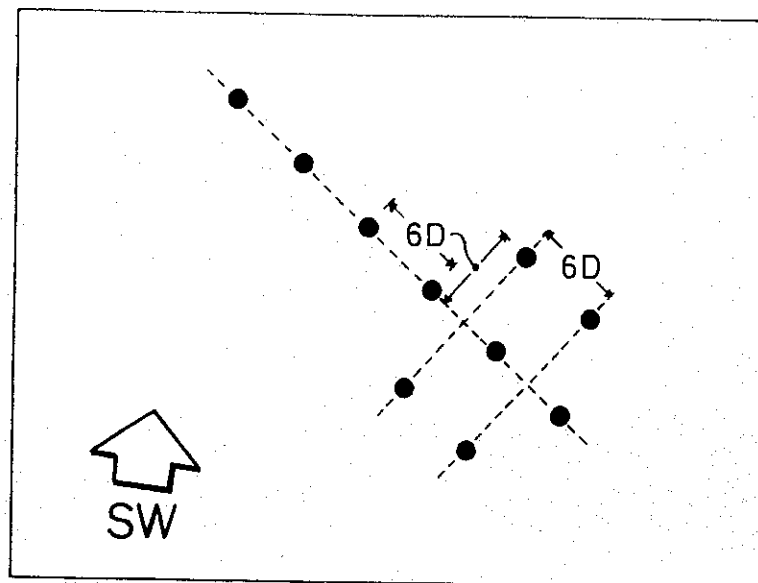
Sektor	klasa ukształt.	A rozkład w %	B wydajność gosp.	A * B
N	1	6.5	0.86	5.59
NE	2	9.2	0.96	8.83
E	2	12.7	0.95	12.07
SE *	1	12.2	0.93	11.35
S	1	15.3	0.86	13.16
SW	1	17.7	0.96	16.99
W	1	18.8	0.95	17.86
NW	2	7.6	0.93	7.07
		100.00		92.92%

rys.18 (* zobacz rys.18A z przykładami obliczeń na następnej str.)

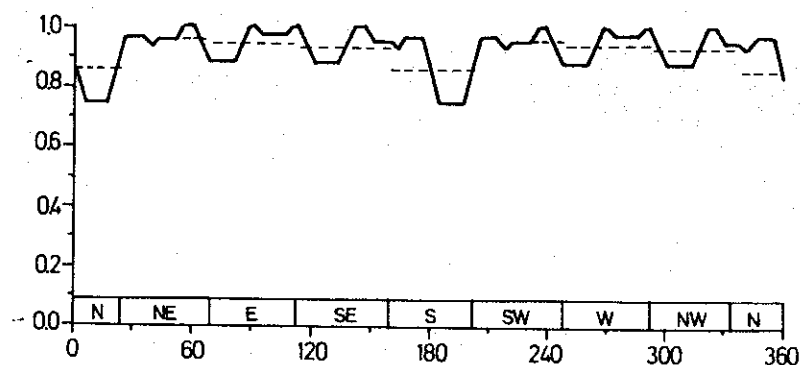


rys.18A Przykłady obliczeń wydajności dla sektora południowo-wschodniego gospodarstwa w Sydvestmors.

rys.19



Wydajność gospodarstwa



Kierunek wiatru

Średnia roczna wydajność gospodarstwa : 0.93

Rys.19 pokazuje przykładowe usytuowanie turbin gospodarstwa w Sydvestmors oraz rozkładową krzywą wydajności dla wszystkich sektorów. Całkowita wydajność wynosi 0.93. W gospodarstwie znajduje się 10 turbin. Przyjmijmy, że pojedyncza turbina zainstalowana indywidualnie w terenie może wyprodukować rocznie 200 000 kWh. Uwzględniając obliczoną wydajność gospodarstwa można obliczyć całkowitą ilość energii elektrycznej uzyskanej w ciągu roku:

$$P = 10 * 200\ 000 * 0.93 = 1\ 860\ 000 \text{ kWh/rok}$$

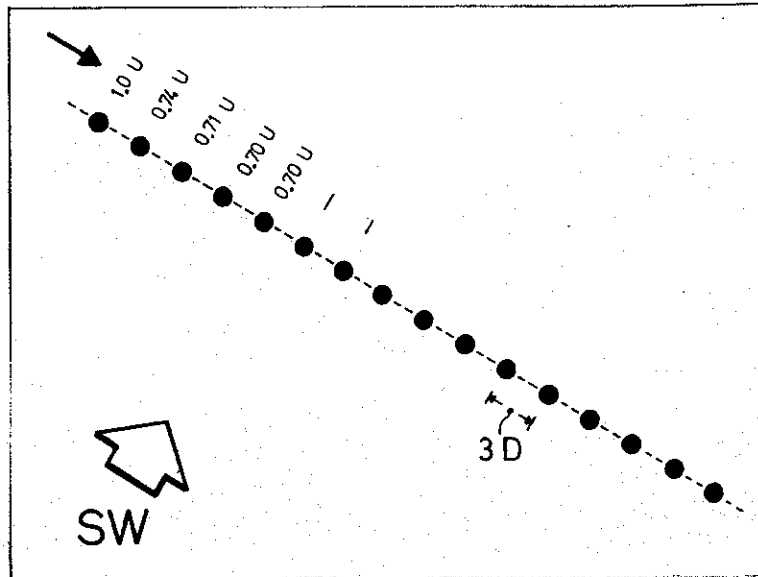
zakładając 100% dostępność dla wiatru tzn, że turbiny obracają się stale w określonym przedziale czasu.

6. PRZYKŁADY

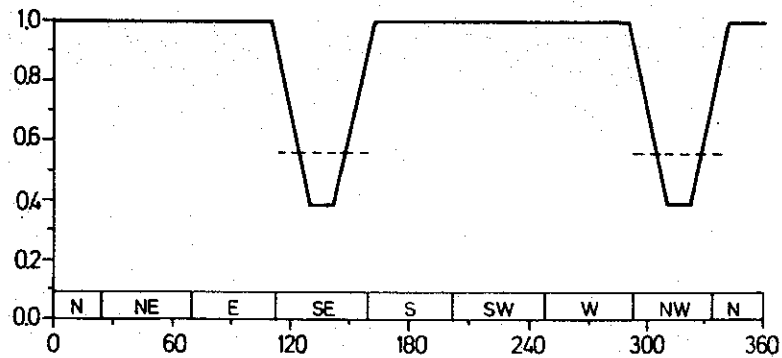
Aby poznać charakterystykę różnych rozwiązań przedstawiono ich 4 typy. Wszystkie przykładowe rozwiązania zawierają po 16 turbin a ich wydajność wynosi w przybliżeniu 0.9 tak jak to przedstawiono w tabeli na rys.18.

Jeżeli w terenie występują jakieś uprzywilejowane kierunki wiania wiatrów, to oczywiście należy próbować ustawić rzędy pod właściwym kątem w stosunku do wiejących wiatrów. W Danii większość wiatrów wieje z kierunków zachodniego lub wschodniego. Dlatego też rzędy turbin w poszczególnych przykładach ustawione są pod właściwym kątem w stosunku do tych kierunków.

rys. 20



Wydajność gospodarstwa

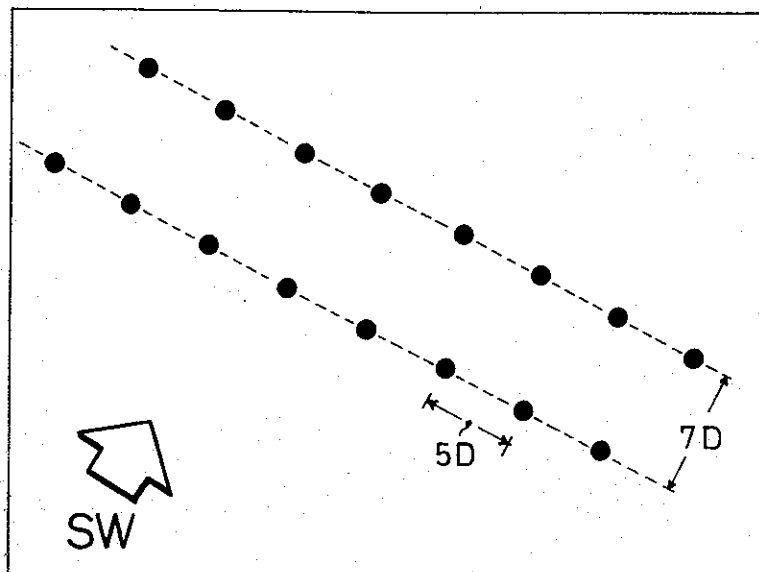


Kierunek wiatru

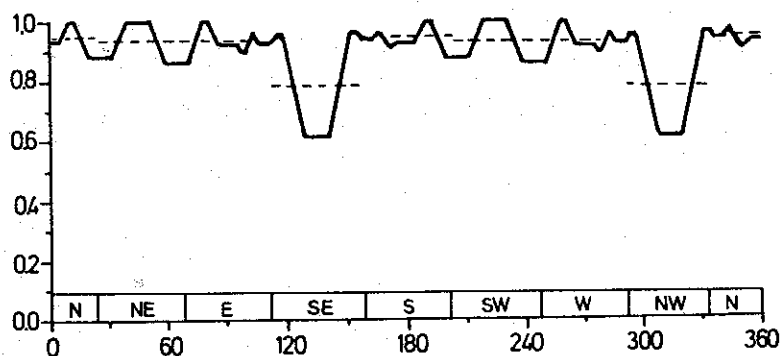
Średnia roczna wydajność gospodarstwa : 0.91

Rys. 20 pokazuje przykład jednorzędowego usytuowania turbin. Jeżeli rząd jest ustawiony pod właściwym kątem w stosunku do uprzywilejowanego kierunku wiania wiatru to uzyskuje się dobrą wydajność gospodarstwa przy stosunkowo niewielkich odległościach między turbinami. Krzywa wydajności pokazuje, że turbiny są atakowane przez wiatr przez większość czasu. Obniżenia krzywej wskazują, że występuje także efekt dziur powietrznych w przypadku gdy wiatr wieje wzdłuż rzędu. W takiej sytuacji prędkość wiatru przed czołem wirnika jest stała od turbiny nr 4.

rys. 21



Wydajność gospodarstwa

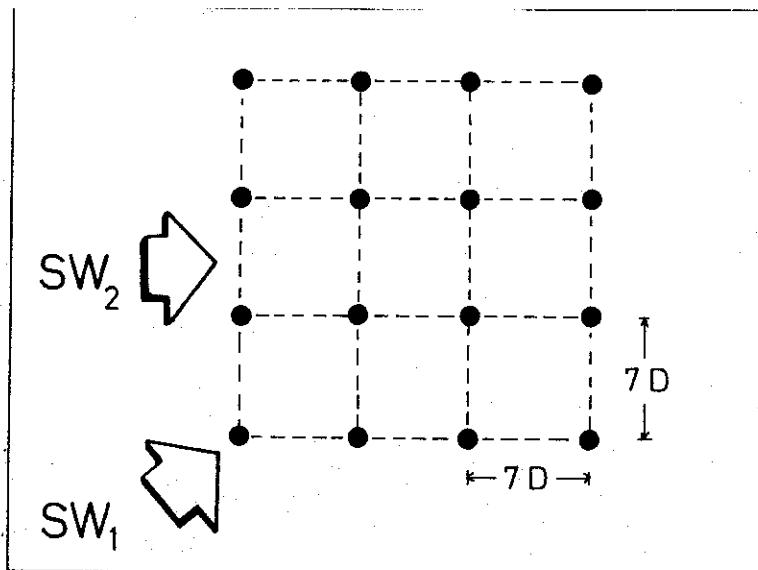


Kierunek wiatru

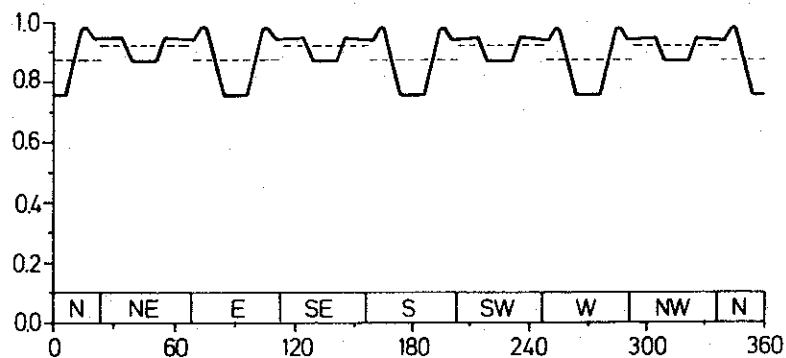
Średnia roczna wydajność gospodarstwa : 0.93

Rys. 21 pokazuje przykład dwurzędowego usytuowania turbin. W porównaniu do przykładu jednorzędowego częściej pojawia się tu efekt dziur powietrznych. Dlatego też wymagana jest większa odległość pomiędzy rzędami i turbinami by uzyskać podobną wydajność gospodarstwa. Krzywa rozkładu wydajności jest bardziej poszarpana. Występują także obniżenia krzywej w przypadku gdy wiatr wieje wzdłuż rzędów.

rys. 22



Wydajność gospodarstwa SW 1 (SW 2 = \div 45 deg.)

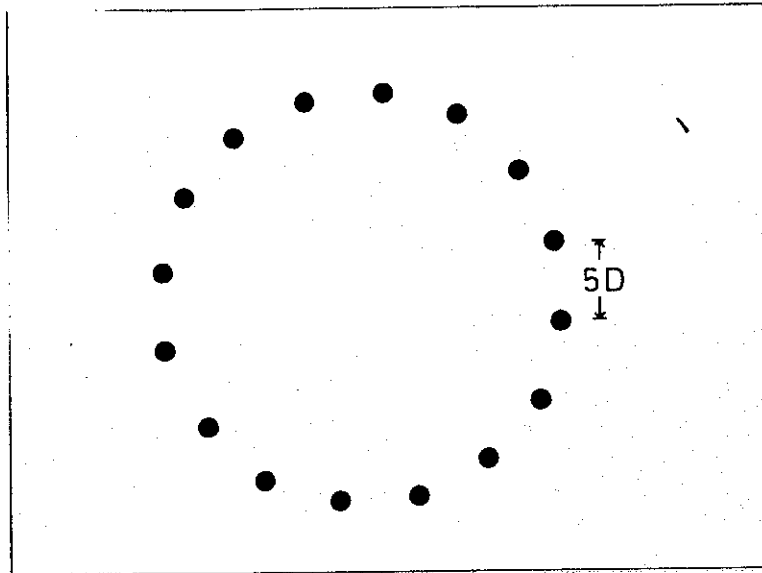


Kierunek wiatru

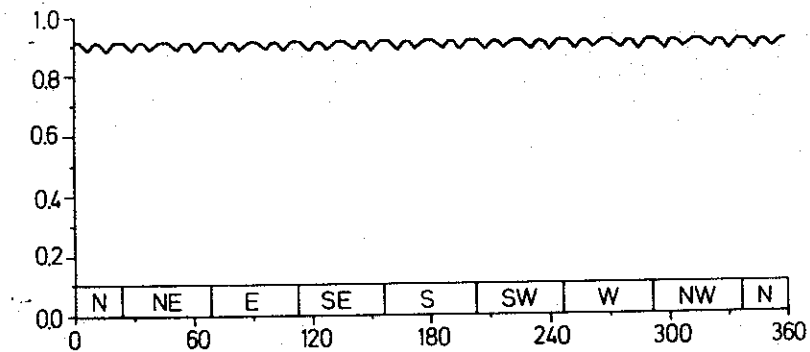
Średnia roczna wydajność gospodarstwa : 0.91

Rys. 22 pokazuje przykład usytuowania turbin w kwadracie po 4 rzędy w każdym kierunku. Oczywiście w sytuacji większej ilości rzędów i szerszego wystąpienia efektu dziur powietrznych wymagana jest większa powierzchnia gospodarstwa dla uzyskania podobnej wydajności. Rozwiązanie to jest przykładem gospodarstwa niezależnego od uprzywilejowanego kierunku wiania wiatru.

rys. 23



Wydajność gospodarstwa



Kierunek wiatru

Średnia roczna wydajność gospodarstwa : 0.90

Rys. 23 przedstawia ostatnie przykładowe rozwiązanie, w którym turbiny są umiejscowione na obwodzie koła. Gospodarstwo takie jest w pełni niezależne od uprzywilejowanego kierunku wiania wiatru a jego wydajność w całym okresie pracy jest stała.

Jeżeli trzeba zakupić cały teren, który zajmują turbiny (także i teren pomiędzy turbinami) to istotnym czynnikiem staje się konsumpcja gruntów. Porównując poszczególne przykłady rozwiązań (jednorzędowego, dwu- i czterorzędowego oraz kołowego) to współczynnik zużycia gruntu wynosi odpowiednio 5, 10 i 12.

7. P O D S U M O W A N I E

Wiatr jest wolny a więc niezależny od człowieka i przeważnie czysty. Może zaopatrzyć nas w odnawialną energię bez skażenia środowiska. Turbiny są pożyteczne. Miejmy ich zatem jak najwięcej !

Jakkolwiek mogą pojawić się pewne ograniczenia. Spójrzmy co stało się w Kalifornii na początku tej dekady. Cena ropy naftowej osiągnęła bardzo wysoki poziom. Wysoki był także kurs dolara. W tym okresie władze stanowe ustaliły bardzo korzystne warunki podatkowe dla ludzi gotowych do zainwestowania pieniędzy w gospodarstwa produkujące energię elektryczną z pomocą wiatru. W rezultacie zainstalowano 15 - 20 tysięcy turbin w latach 1982 - 1986. Turbiny zostały zainstalowane na 3 terenach pustynnych.



rys. 24

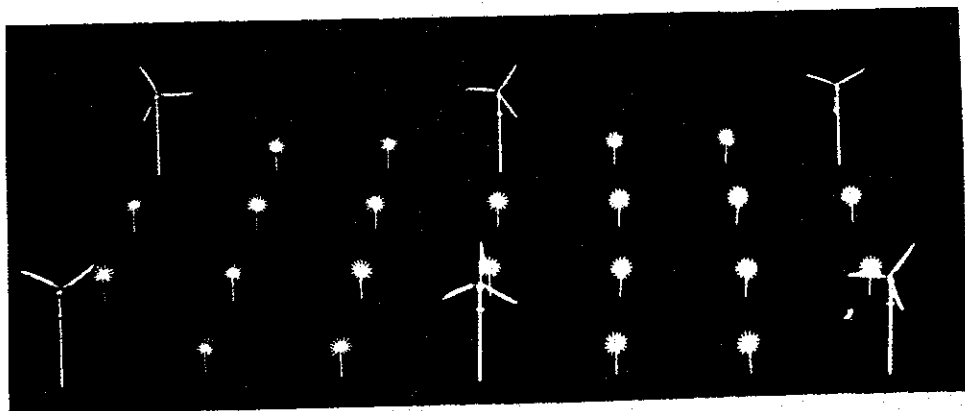
Problemy naturalnego środowiska w Kalifornii

Rozwój spowodował problemy środowiskowe. Wielkie stłoczenie turbin, urządzeń elektrycznych i napisów ostrzegawczych stworzyło wrażenie bałaganu i nieporządku a także wzrokowe skażenie terenów. Ludzie skarżyli się na hałas i różnego rodzaju elementy wyposażenia, zużyte lub połamane, walające się wokół.

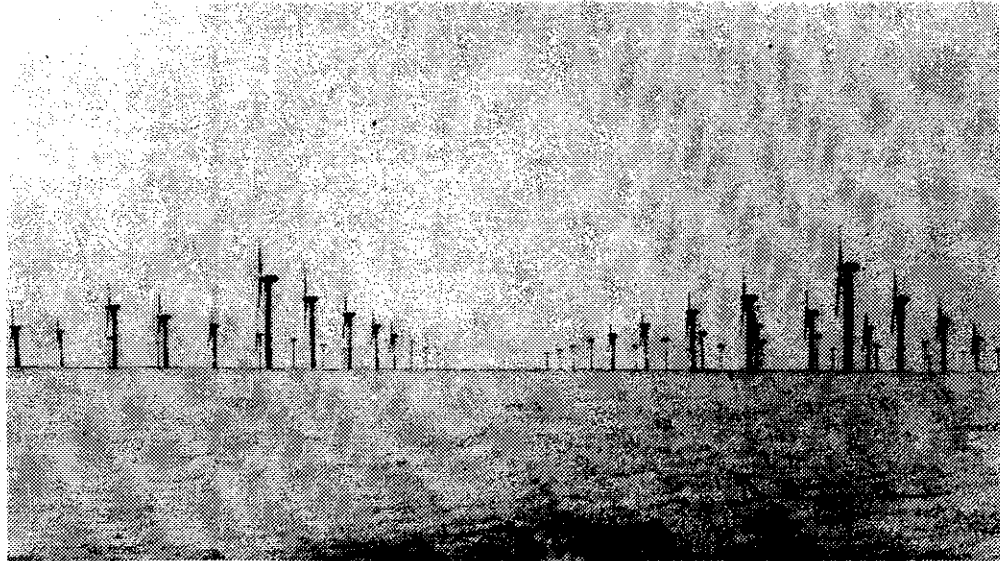
Inaczej mówiąc : Zainstalowanie dużej ilości turbin wiatrowych wymaga zręcznego projektowania uwzględniającego potrzeby terenu i ludzi tam zamieszkujących. Są trzy proste i podstawowe zasady :

- 1) Gospodarstwo produkujące energię elektryczną z pomocą wiatru winno być tak zaprojektowane by uwzględniało uwarunkowania terenu a nawet je uwypuklało.
- 2) Odległość pomiędzy poszczególnymi gospodarstwami winna być taka by krajobraz nie był zdominowany przez turbiny. Każde pojawienie się gospodarstwa z turbinami powinno być miłym zaskoczeniem.
- 3) Ilość turbin na terenie danego gospodarstwa nie może być zbyt duża. Dlatego też należy instalować mniej ale za to większych turbin.

W przyszłości mogą pojawić się nowe rodzaje gospodarstw produkujących energię elektryczną z pomocą wiatru. Rys.25 pokazuje przykład takiego rozwiązania, które może pojawić się na terenach gdzie ziemia jest bardzo droga lub gdy zamierzamy uzyskać atrakcyjny efekt plastyczny (architektura terenu). Takie rozwiązanie określamy jako dopełnienie. Instalujemy wówczas mniejsze wirniki pod większymi zwiększając w ten sposób stopień nasycenia urządzeniami na m^2 gruntu.



rys.25



rys. 26

Gospodarstwo morskie

Możemy także spodziewać się w przyszłości gospodarstw usytuowanych w morzu, gdzie problemy środowiska są przypuszczalnie mniejsze. Najnowsze duńskie badania wykazują, że ekonomika "gospodarstwa morskiego" jest podobna do ekonomiki "gospodarstwa lądowego" o klasie ukształtowanie terenu równej 1.

W końcu możemy także wyobrazić sobie wszystkie aktualnie działające urządzenia, w których tradycyjne pojedyncze wieże zostaną zastąpione przez swego rodzaju koronki.