

# Technische aspecten bij een windpark op zee

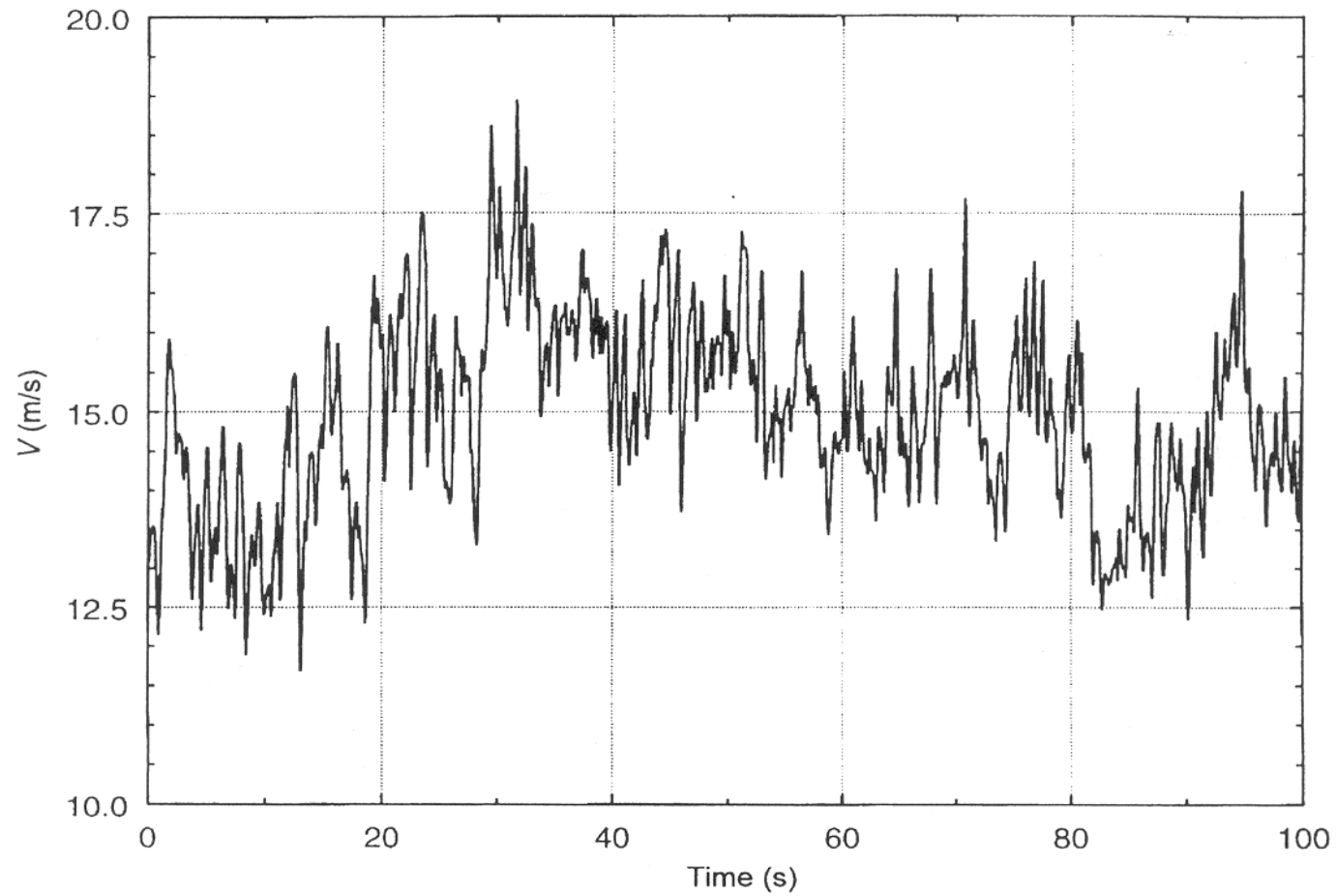


Bron: Siemens

# Onderwerpen

- **Energie uit de wind**
- **Opbrengst van een windturbine**
- **Opbrengst van het park**
- **Bekabeling met drie fasen**
  
- **Opdracht: Turbinekeuze en opbrengstberekening**

# Eigenschappen van de wind



# Verdeling van de windsterkte

De kans dat een bepaalde windsnelheid voor komt wordt wiskundig beschreven door een Weibull verdeling;

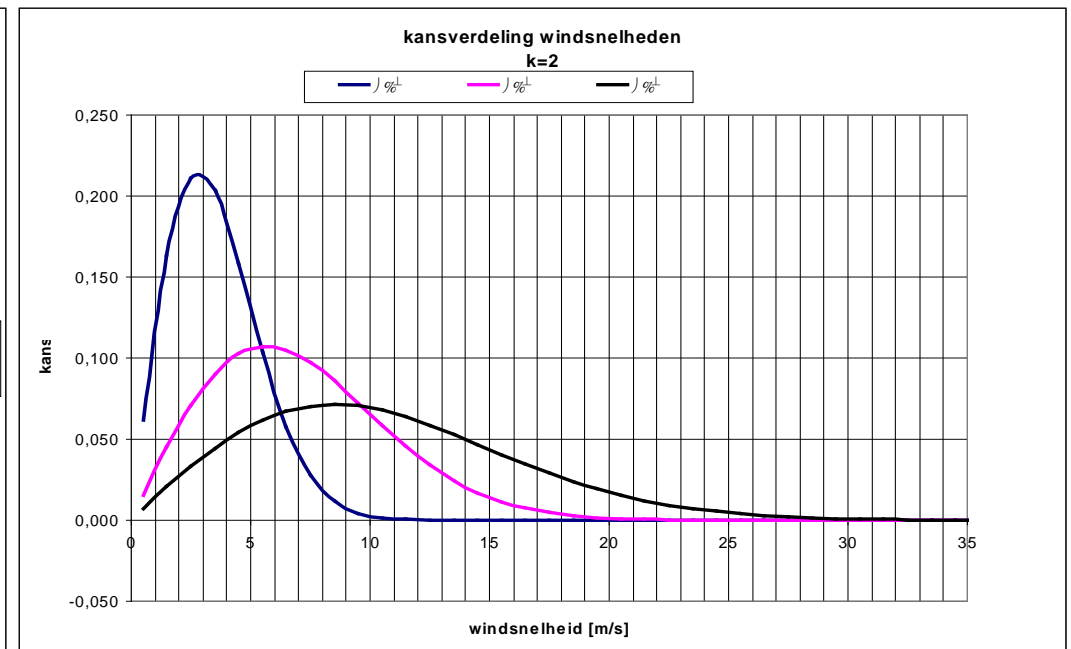
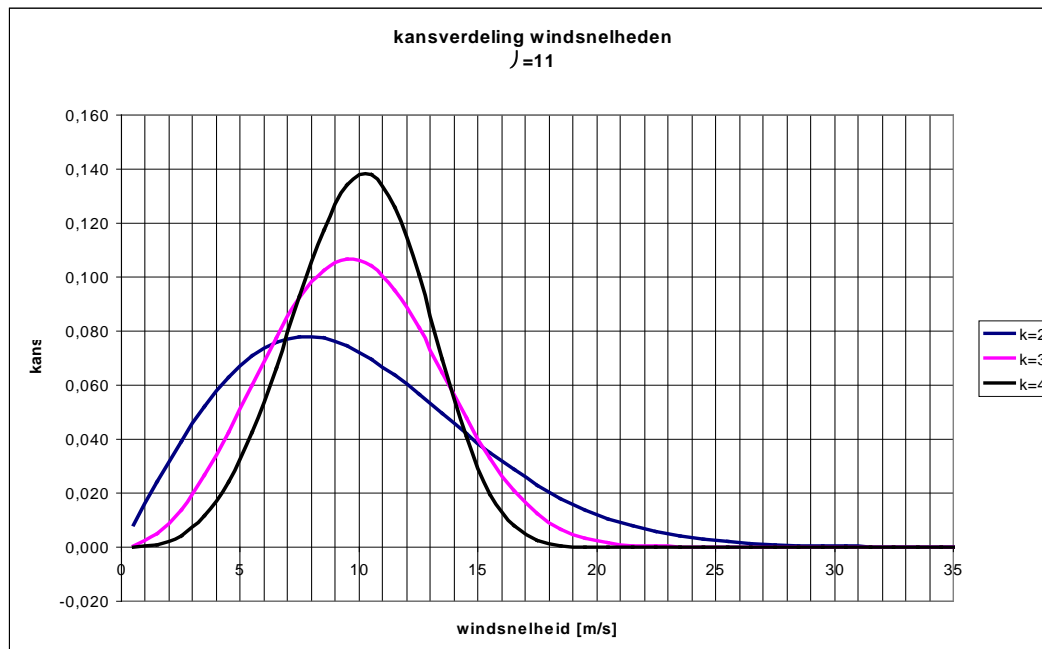
$$p = \frac{k}{\lambda} * \left( \frac{v}{\lambda} \right)^{k-1} * e^{-\left( \frac{v}{\lambda} \right)^k}$$

p=kans (probability)

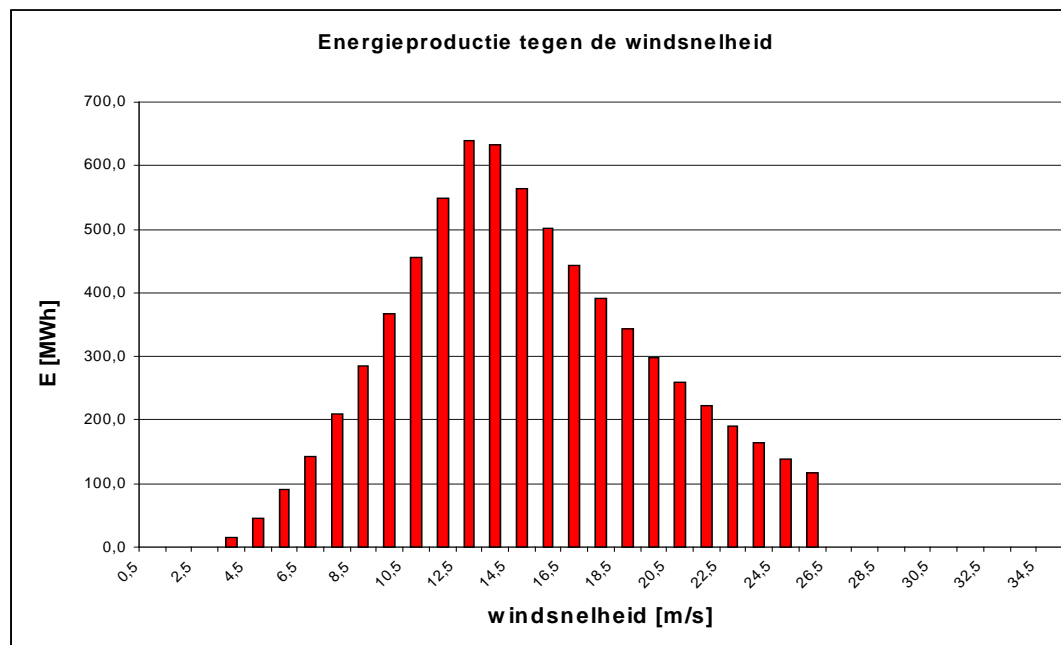
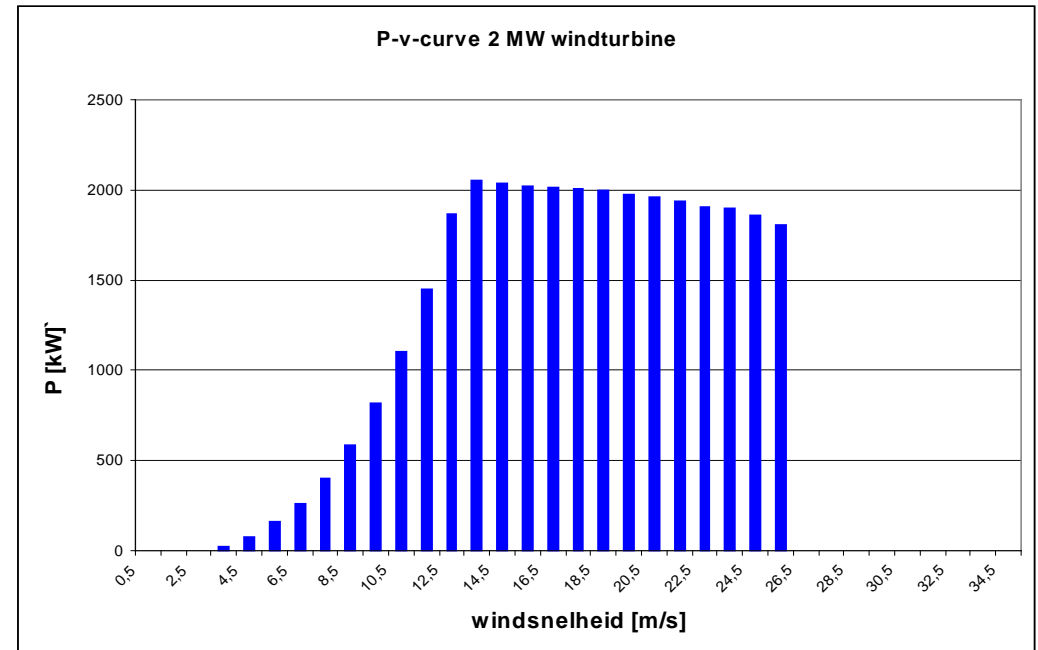
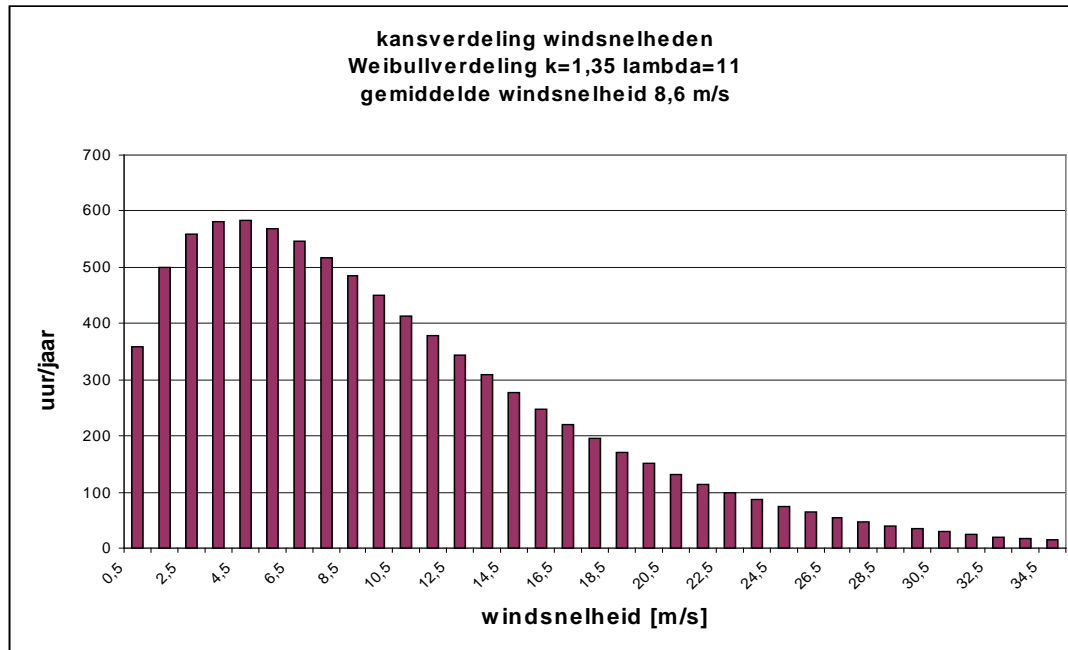
v= windsnelheid

k= vormfactor

$\lambda$ =schaalfactor



# Verdeling van de windsterkte



# Opbrengst uit de wind

De energie die in de wind zit kan worden berekend m.b.v. de formule voor de kinetische energie:

$$E_k = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

Hierin is:

- $E_k$  = de energie in de wind aanwezig in J
- $m$  = de massa in kg
- $v$  = de windsnelheid in m/s

# Opbrengst uit de wind

Stel:

1  $m^3$  lucht verplaatst zich met een snelheid van 10 m/s.

Hoe groot is  $E_k$  ?

$$E_k = \frac{1}{2} \times m \times v^2 = \frac{1}{2} \times \rho \times V \times v^2$$

$$\rho = \text{soortelijke massa van lucht} = 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V = \text{volume in } m^3$$

$$E_k = 0,5 \times 1,29 \times 1 \times 10^2 = 64,5 \text{ J of Ws}$$

# Opbrengst uit de wind

$$P_{wind} = \frac{E_k}{t} = \frac{\frac{1}{2} \times \rho \times V \times v^2}{t} = \frac{1}{2} \times m' \times v^2$$

Hierin is:

- $P_{wind}$  = het in de wind aanwezige vermogen uitgedrukt in W
- $m' = \frac{\rho \times V}{t} = \frac{m}{t}$  het massadebiet in kg/s
- $v$  = de windsnelheid in m/s



# Opbrengst uit de wind

Het **massadebiet**  $m'$  is de massa lucht die per seconde door de rotor gaat. Deze kan berekend worden door de dichtheid van de lucht te vermenigvuldigen met het **volumedebiet**  $Q$ .

$$m' = \rho_l \times Q \text{ kg/s}$$

$Q$  = het volumedebiet in  $m^3/s$

$$Q = \frac{V}{t} = A \times v \quad \frac{m^3}{s}$$

$A$  = het rotoroppervlak in  $m^2$

# Opbrengst uit de wind

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \times \rho_l \times A \times v \times v^2$$

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \times \rho_l \times A \times v^3$$

$$A = \pi \times R^2$$

**R = lengte rotorblad in m**



<http://www.dpbbbrugge.be/techniek/Windturbine.html>

# Vermogensfactor $C_p$

Deze bepaalt welk percentage van het in de wind aanwezige vermogen, ook effectief door de Rotor kan worden opgenomen

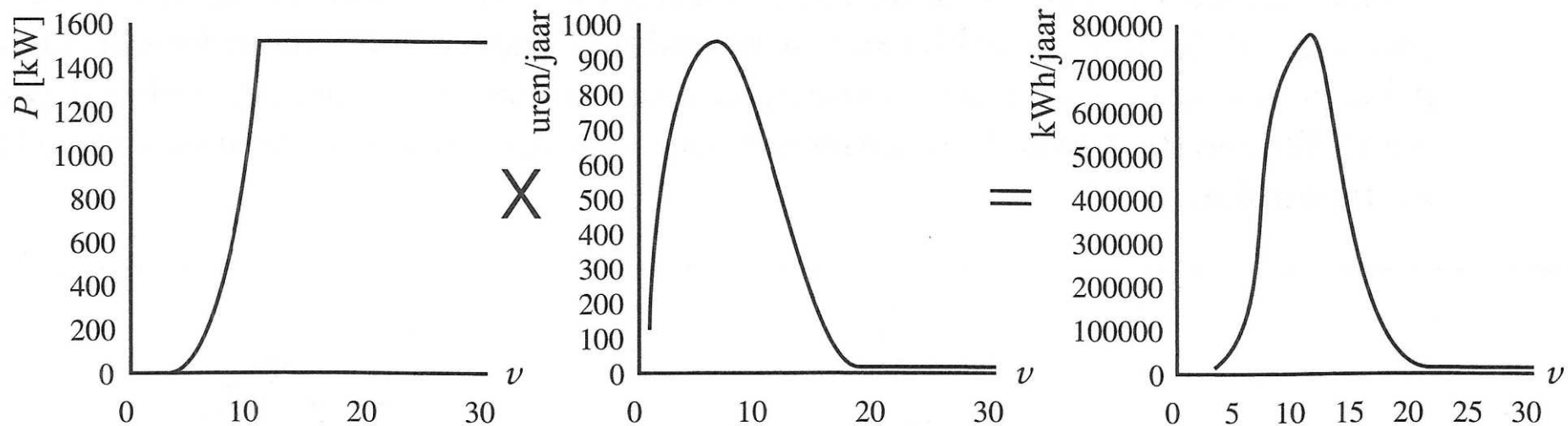
$$P_R = C_p \times P_{wind} = \frac{1}{2} \times C_p \times \rho_l \times v^3 \times A$$

$$P_R = 2,03 \times C_p \times R^2 \times v^3$$

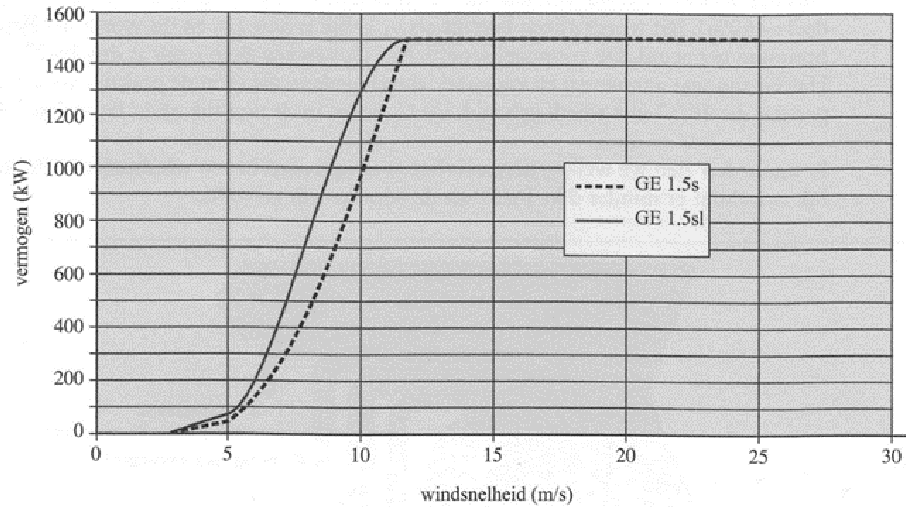
$$C_p \leq 16/27 (= 0,6) \quad (\text{Betzlimiet: maximale theoretische rendement})$$

# Opbrengst in kWh uit de wind

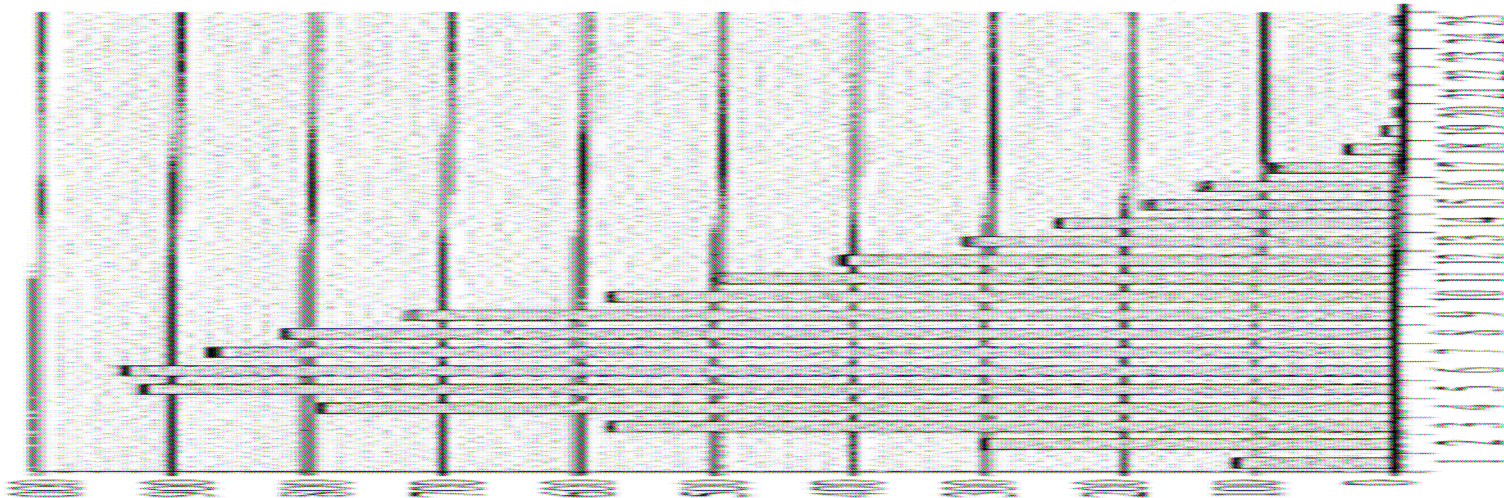
Vermogenscurve maal windverdeling levert energieopbrengst per jaar:



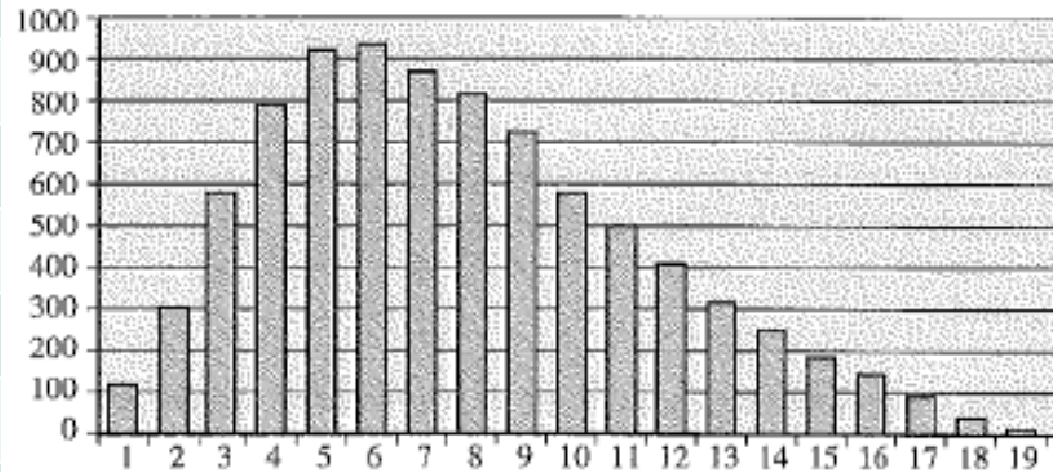
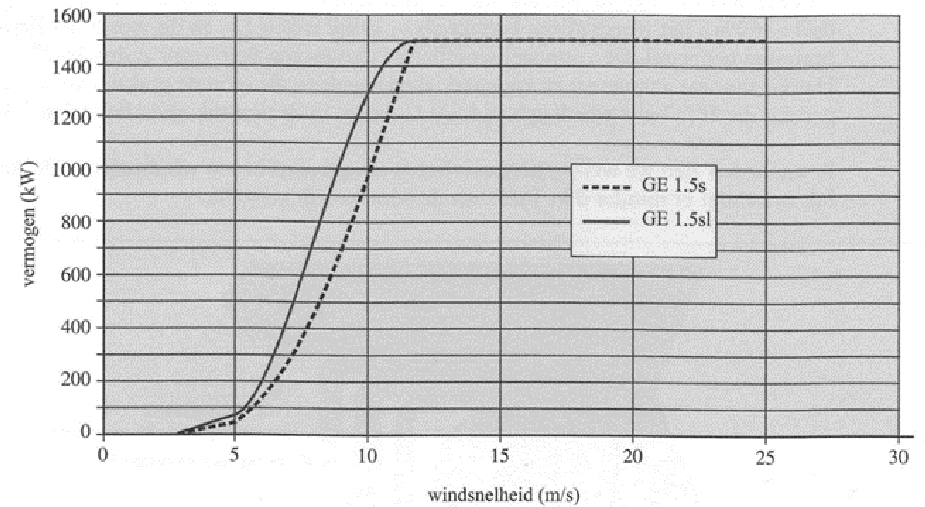
# Voorbeeld opbrengst



- Neem bijvoorbeeld deze windverdeling uit Ouwehand (blz. 153, figuur 6.2)

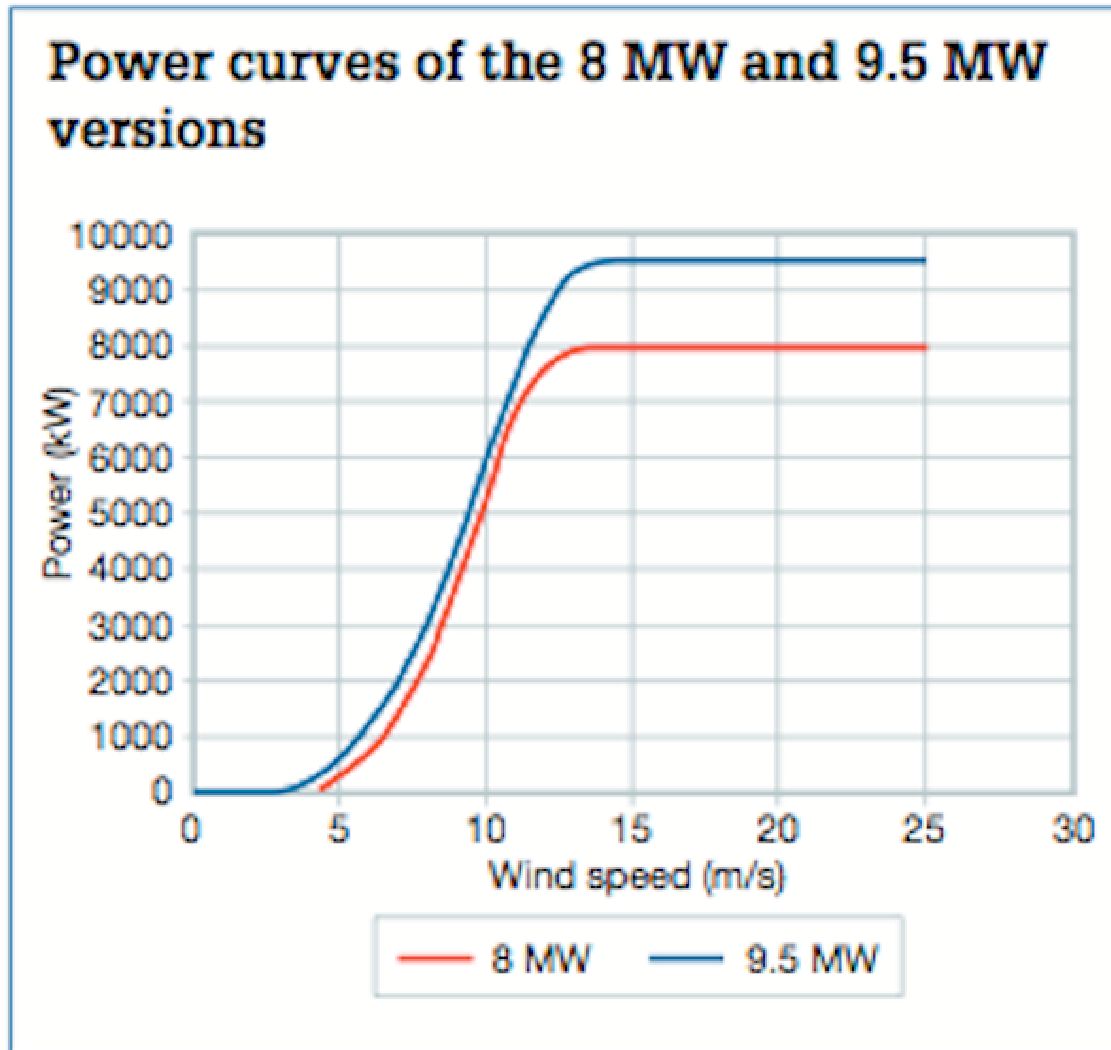


Windsnelheid (m/s)	Aantal uren	Vermogen (kW)	Opbrengst (kWh)
4	800	50	40000
5	910	75	68250
6	930	200	186000
7	870	300	261000
8	810	800	648000
9	720	1000	720000
10	580	1300	754000
11	500	1450	725000
12	410	1500	615000
13	310	1500	465000
14	250	1500	375000
15	180	1500	270000
16	150	1500	225000
17	100	1500	150000
18	40	1500	60000
19	10	1500	15000



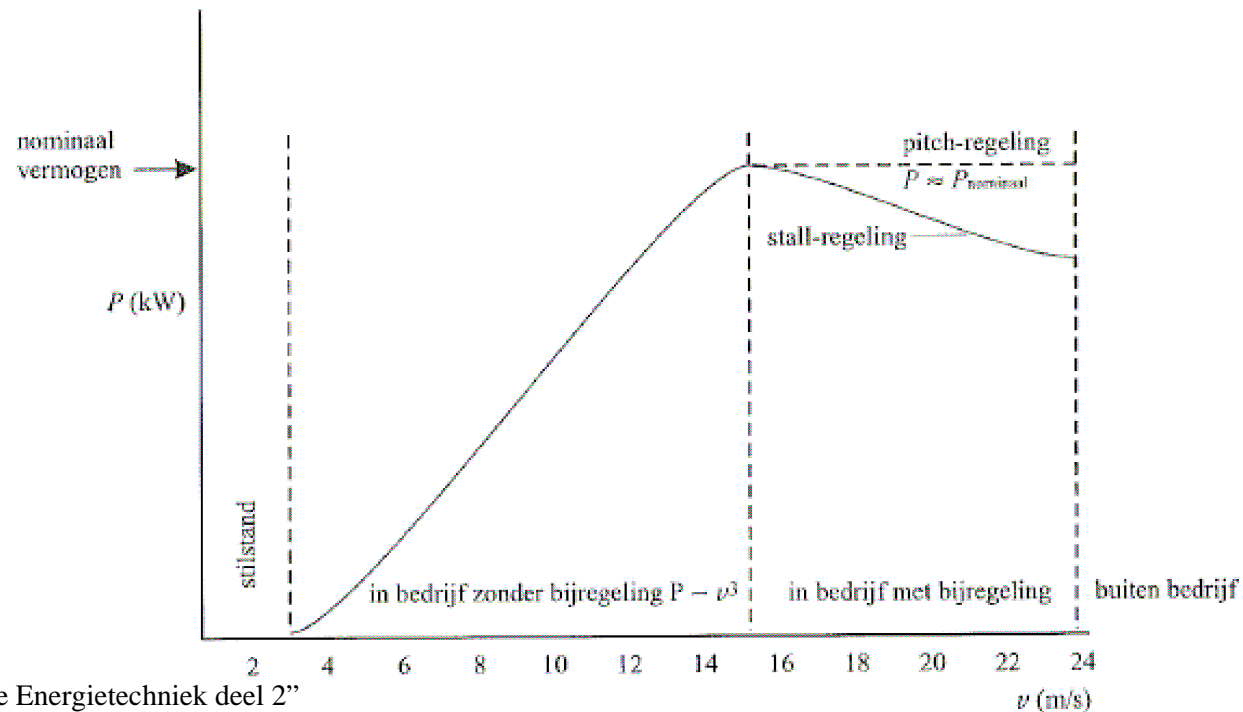
Totaal: **5577250** kWh

# Voorbeeld Power curve



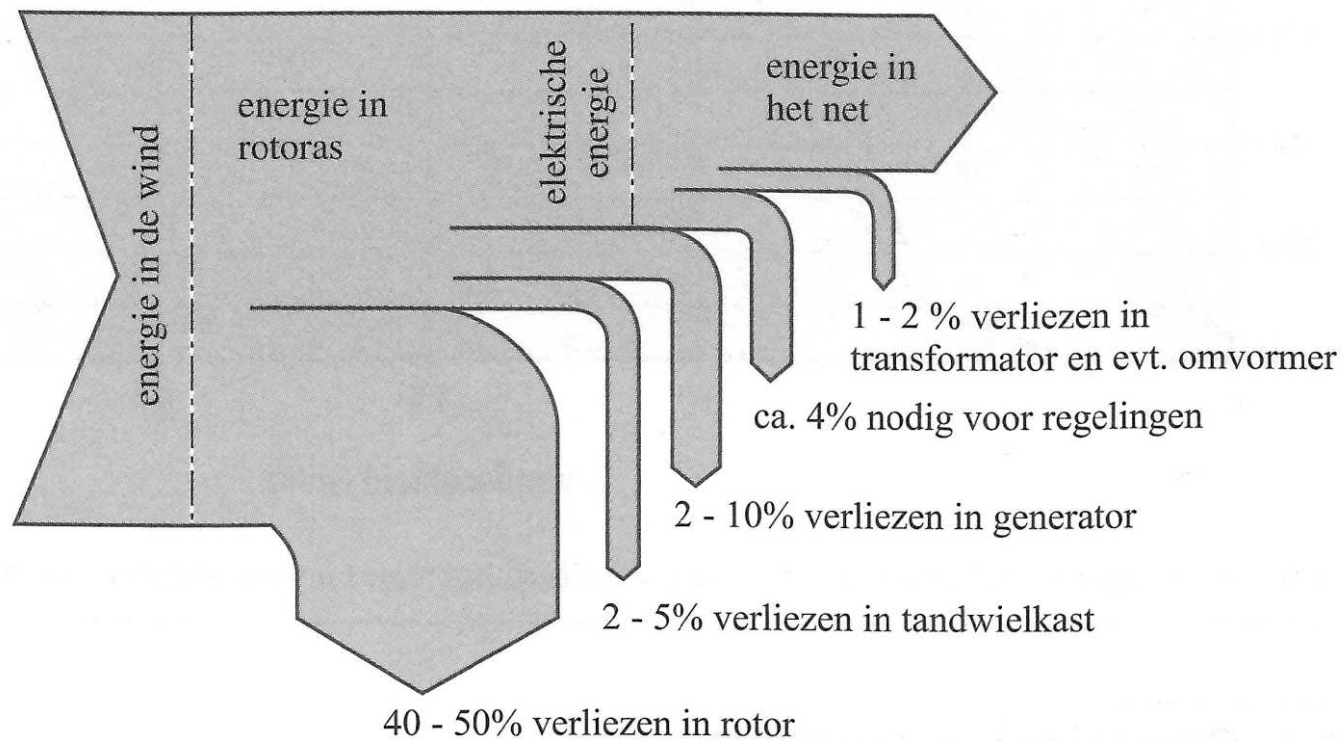
# Vermogensregeling

- Vanaf een bepaalde windsnelheid het vermogen ongeveer gelijk blijft bij toenemende windsnelheid.
- Zonder regeling zal het vermogen met de derde macht van de windsnelheid blijven toenemen.
- De winddruk neemt toe met het kwadraat van de windsnelheid en daardoor de rotor- en mastbelasting.





# Energiestromen in een turbine

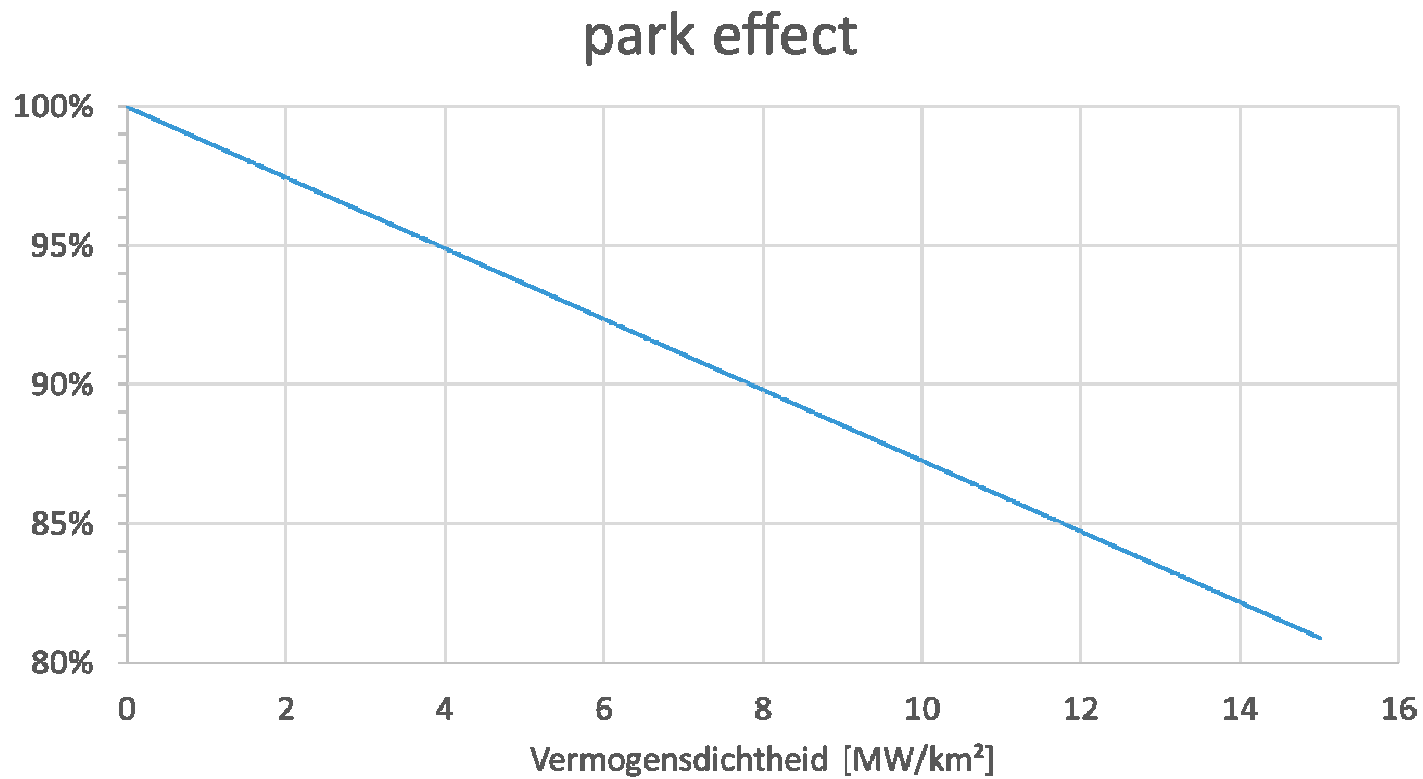


# Wake-effect

- Windturbine haalt energie uit de wind die de turbine nadert
- De wind achter de turbine heeft minder energie dan de wind voor de turbine
- Er ontstaat dus een luwte achter de turbine, de wind verliest een deel van zijn kracht
- Een turbine die in de windrichting staat van de andere, zal minder opbrengen



# Bepaling van het parkeffect

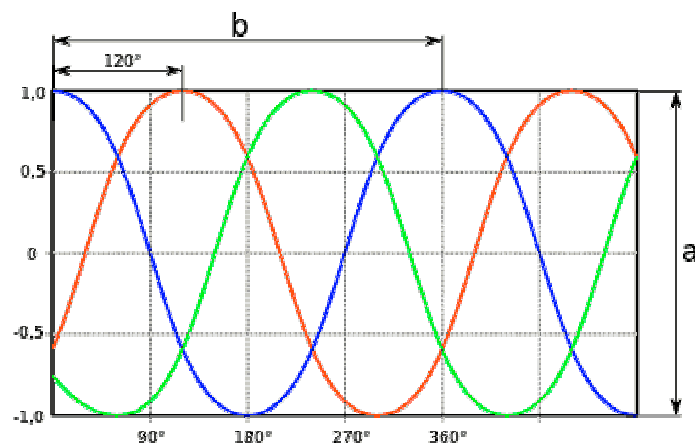


# Bepaling van het parkeffect

- Stel dat je een turbine hebt met vermogen  $P$  [MW].
- Bepaal de jaaropbrengst  $E$  m.b.v. de vermogenscurve en windverdeling [kWh].
- Bepaal hoeveel turbines je op de kavel wilt plaatsen: [ $n$  turbines]
- Bepaal het totale opgestelde vermogen op de kavel:  $n$  keer  $P$  [MW]
- Bepaal de oppervlakte van het windpark  $A$  [aantal km<sup>2</sup> wateroppervlak]
- Bepaal de vermogensdichtheid:  $n$  keer  $P/A$  [MW/ km<sup>2</sup>]
- Bepaal m.b.v. de grafiek het parkeffect:  $PE$  [%]
- Bepaal de totale opbrengst van het park:  $PE$  maal  $n$  maal  $E$

# Aansluiting op het net

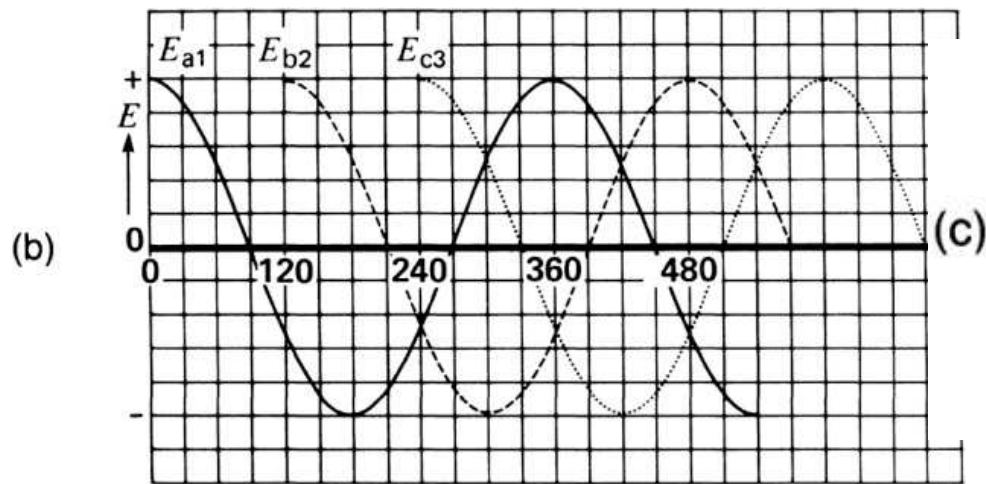
- Een turbine zelf levert elektriciteit op een laag spanningsniveau bv. 230/400 V
- De spanning van deze generator is (meestal) een **3-fasige** wisselspanning:



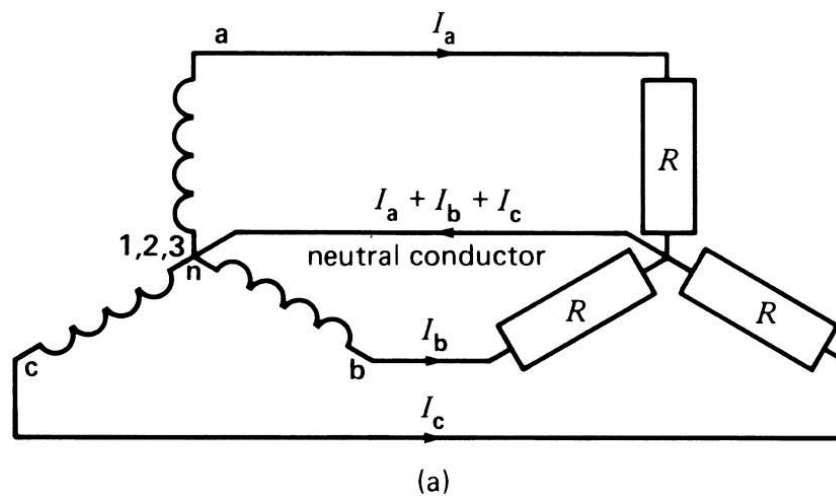
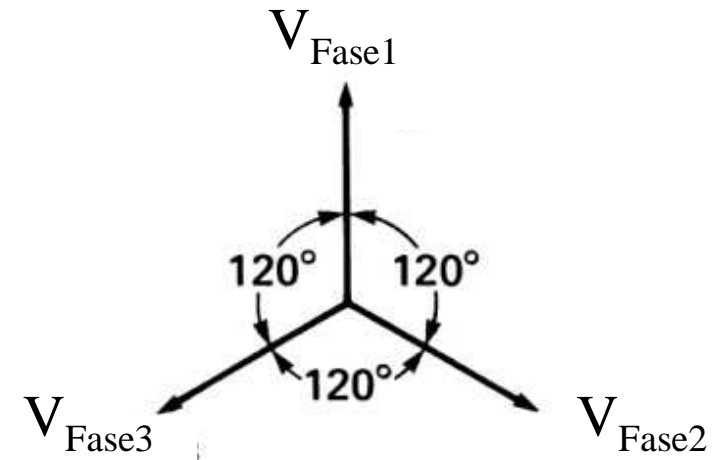
- Transformator in de turbine verhoogt de spanning tot middenspanningsniveau **66 kV**.
- Windturbines zijn aangesloten op het TenneT platform.

# Aansluiting op het net

3-fasespanning



Vectordiagram



# Aansluiting op het net

- Vermogen wordt dus verdeeld over 3 fasen (3 geleiders met soms de nul)
- Voor het vermogen in 1 fase geldt:

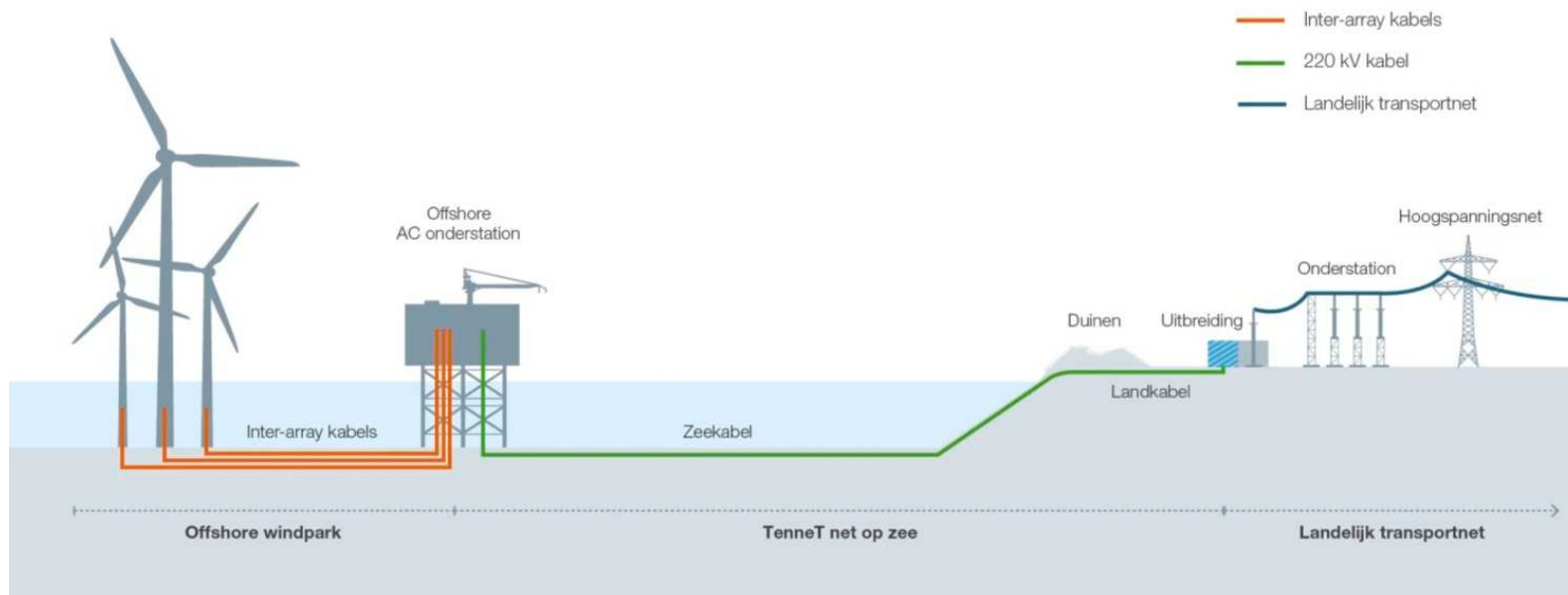
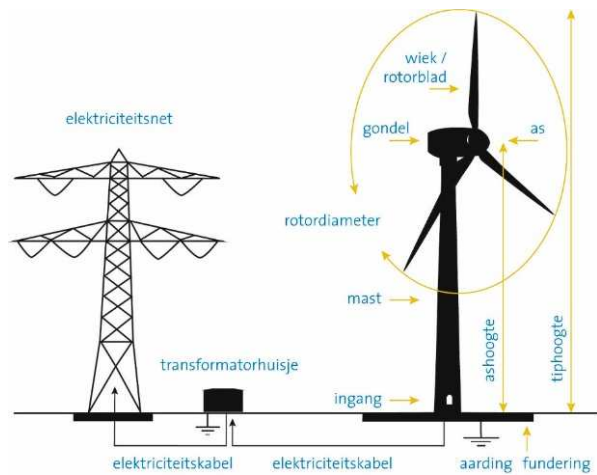
$$P_{\text{Fase}} = V_{\text{Fase}} I_{\text{Fase}} \cos\varphi \text{ [W]}$$

- Voor het totale vermogen geldt dus (mits *symmetrische* belasting):

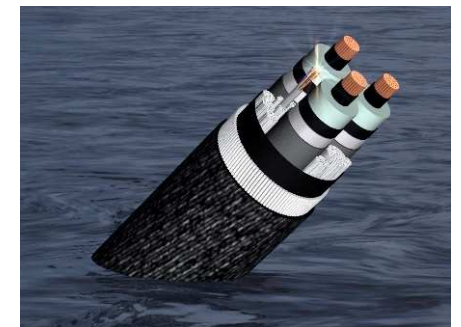
$$P_{\text{totaal}} = 3V_{\text{Fase}} I_{\text{Fase}} \cos\varphi \text{ [W]}$$

- $S_{\text{totaal}} = 3V_{\text{Fase}} I_{\text{Fase}} \text{ [VA]}$

# Aansluiting op het net



zeekabel (3 fasen)





# Aansluiting op het net

## Voorbeeld:

Er moet een vermogen vanuit het windpark worden getransporteerd van 100 kVA over 3 kabels, waarbij elke kabel dezelfde stroom voert en de spanning 66 kV is (dat is de spanning tussen twee fasen!).

Hoe groot is de stroom door de kabels?

- Voor het totale vermogen geldt:  $S_{\text{totaal}} = 3V_{\text{Fase}}I_{\text{Fase}}$  [VA]
- $S_{\text{totaal}} = 100 \text{ kVA}$
- $V_{\text{fase}} = 66/\sqrt{3} = 38,1 \text{ kV}$
- $I_{\text{fase}} = S_{\text{totaal}}/3 * V_{\text{fase}} = 100 \text{ kVA}/3 * 38,1 \text{ kV} = 0,87 \text{ A}$

# Opdracht: opbrengst en turbinekeuze

- Verzamel gegevens over de windsterkte.
- Maak een keuze voor een turbine of turbines.
- Kies een indeling van het park met turbines.
- Bepaal de jaaropbrengst van die turbine.
- Bepaal de opbrengst van het park (dus de twee kavels)
- Doe dit voor **twee** configuraties om de opbrengsten te kunnen vergelijken.