



Kleine en middelgrote windturbines Technische aspecten

Karel Van Wyngene
Power-Link, Universiteit Gent

Inhoud

- Vermogen in de wind
- Types windturbines
- Aanbod kleine en middelgrote windturbines
- Jaarlijkse energieproductie
- Invloedsfactoren

Vermogen in de wind

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3$$

ρ = luchtdensiteit, R = rotorstraal, v = windsnelheid

Vermogen in de wind

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3$$

ρ = luchtdensiteit, R = rotorstraal, v = windsnelheid

- densiteit daalt op hogere hoogte en bij hogere temperatuur

Zeeniveau: 1,293 kg/m³

Mount Everest: 0,425 kg/m³

Vermogen in de wind

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3$$

ρ = luchtdensiteit, R = rotorstraal, v = windsnelheid

- evenredig met kwadraat van rotorstraal

Vermogen in de wind

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3$$

ρ = luchtdensiteit, R = rotorstraal, v = windsnelheid

- evenredig met 3^{de} macht van de windsnelheid

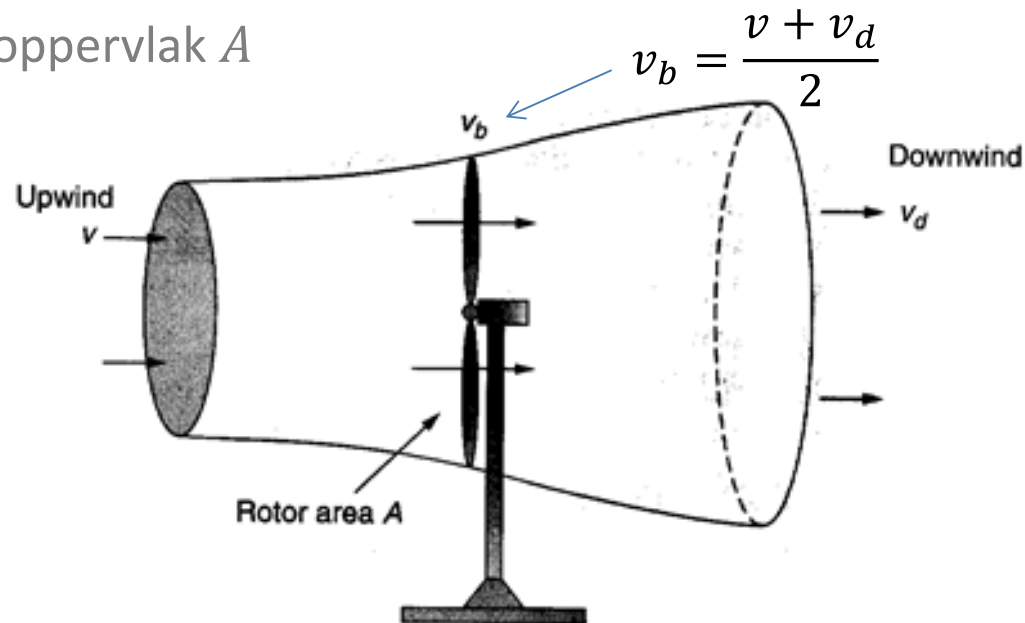
windsnelheid x 2  vermogen \nearrow 8

windsnelheid / 2  vermogen \searrow 8

Betz limiet

het 'rendement' van de windenergieconverteor

- windsnelheid voor de rotor v
- windsnelheid ter hoogte van de rotor v_b
- windsnelheid na de rotor v_d
- rotoroppervlak A



Betz limiet

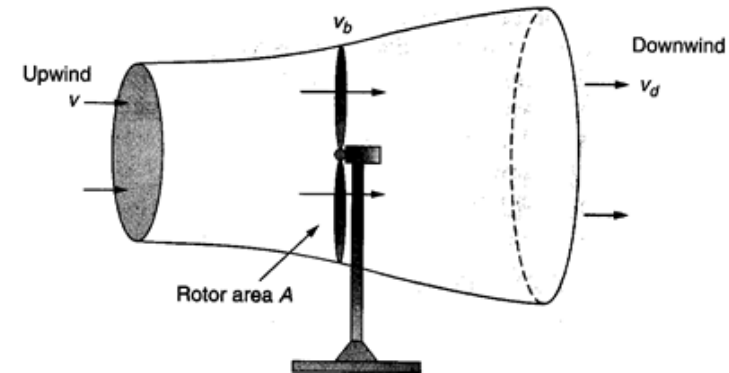
vermogen in de wind

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \text{ [W]}$$

energie door rotoroppervlak A

$$\begin{aligned}
 P_a &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_b \cdot (v^2 - v_d^2) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{1}{2} (v + v_d) \cdot (v^2 - v_d^2) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{v_d}{v}\right)^2 + \left(\frac{v_d}{v}\right) - \left(\frac{v_d}{v}\right)^3 \right) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_d}{v} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{v_d}{v}\right)^2 \right) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p
 \end{aligned}$$

$v_b = \frac{v + v_d}{2}$



Betz limiet

rotorefficiëntie C_p

$$C_P = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_d}{v}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{v_d}{v}\right)^2\right)$$

maximum C_p

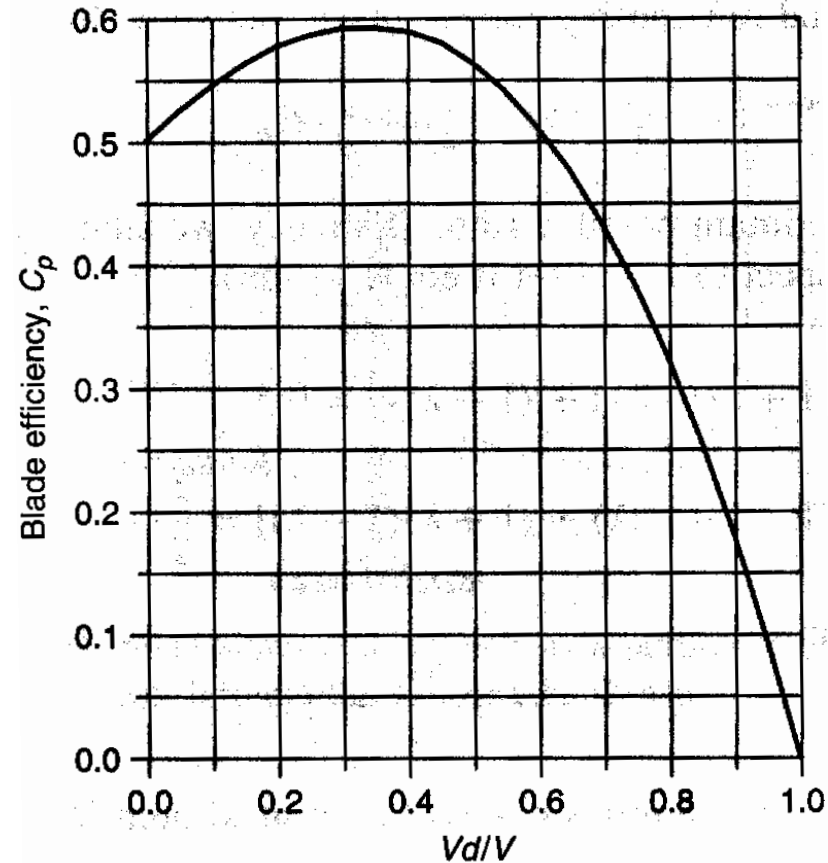
$$\frac{v_d}{v} \rightarrow x$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} \cdot (1 + x) \cdot (1 - x^2) \right) = 0$$

$$-\frac{3}{2} \cdot x^2 - x + \frac{1}{2} = 0$$

$$\Leftrightarrow x = \frac{1}{3}$$

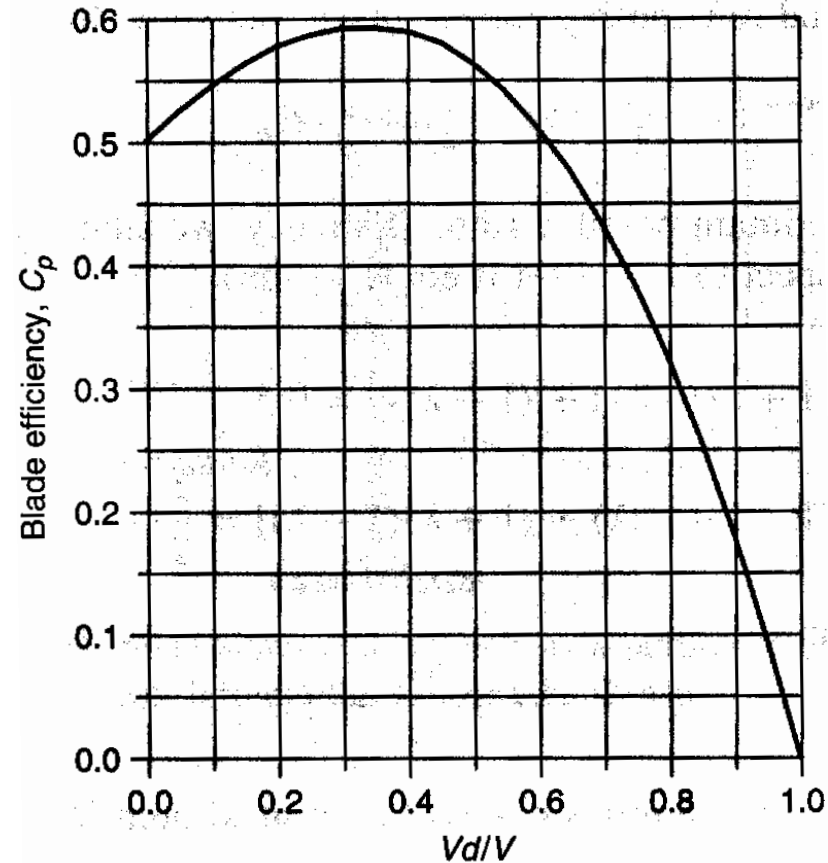
$$C_{Pmax} = \frac{16}{27} = 59,3\%$$



Betz limiet

maximum C_p

- 59,3%
- maximale limiet voor alle types windturbines
- geen mechanische, elektrische verliezen in rekening
- grote turbines: 40%-50%
- kleine turbines: 10%-40%
- sommige type turbines hebben lagere limieten (bv Savonius)



Rotorefficiëntie of vermogenscoëfficiënt C_p

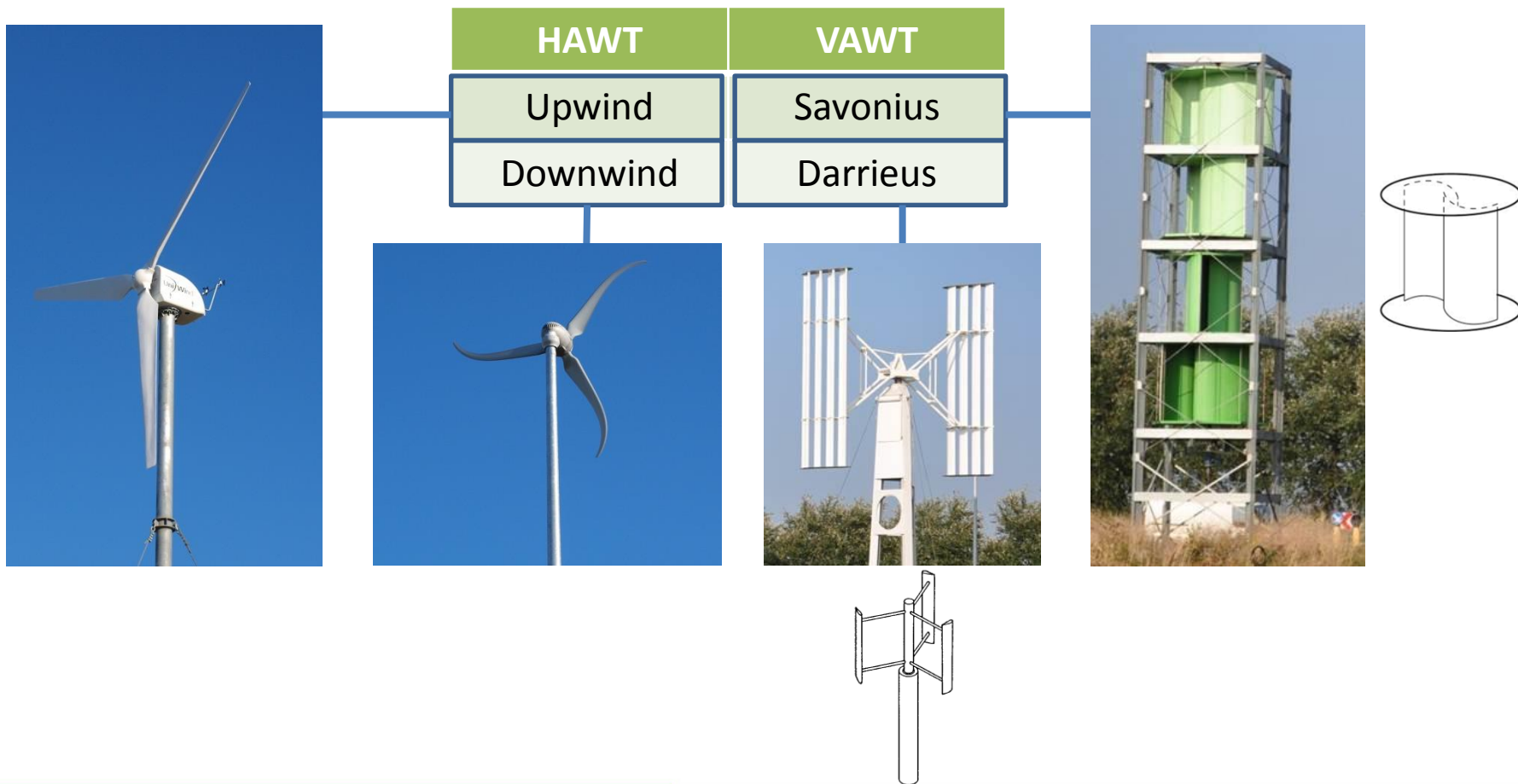
wordt beïnvloedt door:

- type rotor
- windsnelheid
- tip speed ratio λ (verhouding tipsnelheid t.o.v. windsnelheid)

Inhoud

- Vermogen in de wind
- **Types windturbines**
- Aanbod kleine en middelgrote windturbines
- Jaarlijkse energieproductie
- Invloedsfactoren

Types windturbines



VAWT – Savonius

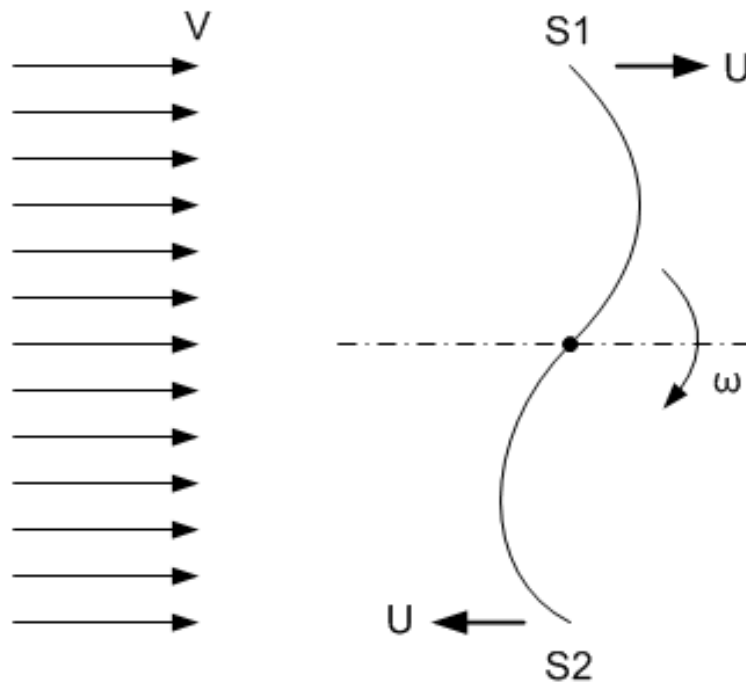
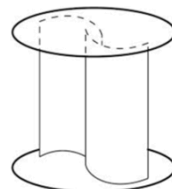
kenmerken:

- meest eenvoudige turbine
- gebaseerd op dragkracht
- krachtenkoppel ontstaat door verschil in luchtweerstand
- zeer beperkte rendementen (η : 15%)



VAWT – Savonius

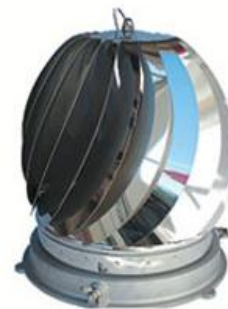
werking:



VAWT – Savonius

toepassingen:

- reclameborden
- trekkap
- demonstratie
- cup anemometer (windsnelheidsmeter)



VAWT – Darrieus

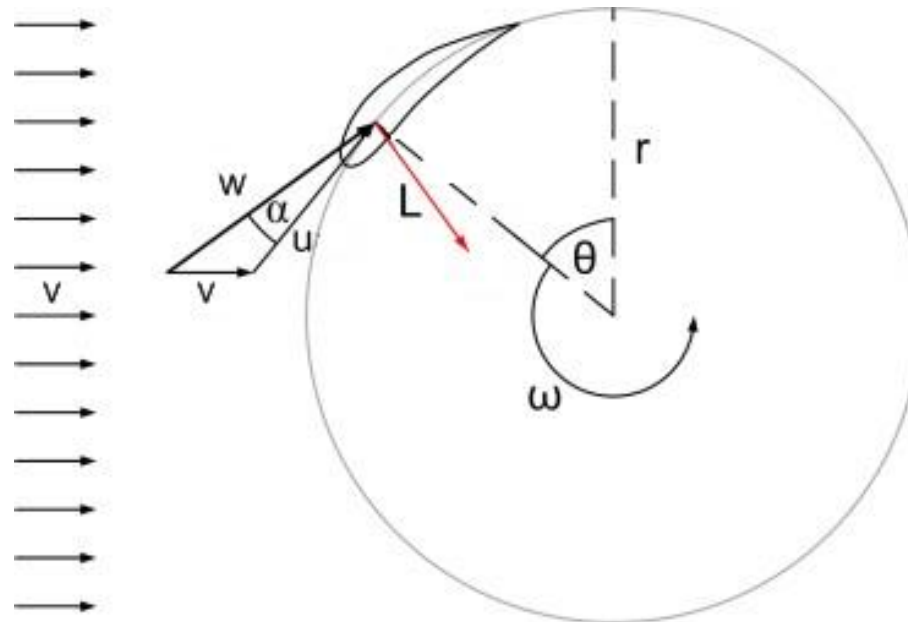
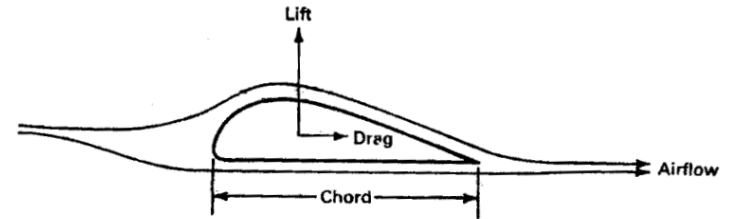
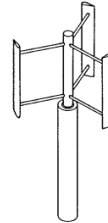
kenmerken:

- ‘airfoils’ of aerodynamische profielen (‘vliegtuigvleugel’)
- gebaseerd op liftkracht
- hoger rendement dan Savonius
- moeilijk zelfstartend (soms combinatie Savonius)



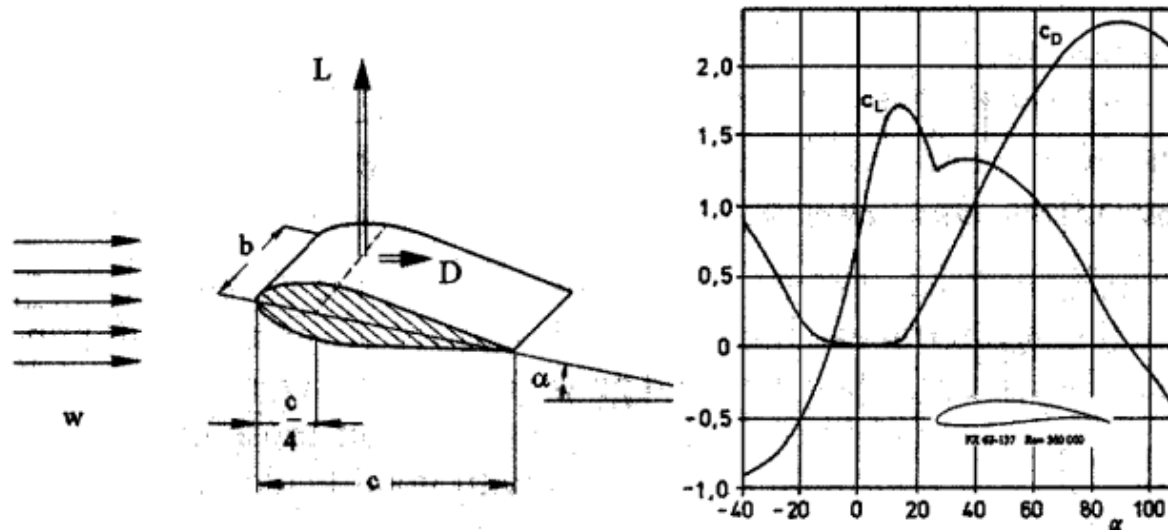
VAWT – Darrieus

werking:



VAWT – Darrieus

aanvalshoek:



- lift- en drag coëfficiënten variëren met aanvalshoek α
- Darrieus turbine heeft vaste pitch
- productie van koppel is zeer pulserend

VAWT – Darrieus

voor- en nadelen:

- theoretisch hoge rendementen, in principe gelijk aan HAWT
- geen slagschaduw, geen kruisysteem
- mechanische problemen: trillingen, buiging, slechts op één punt ingeklemd

Horizontale as windturbines

kenmerken:

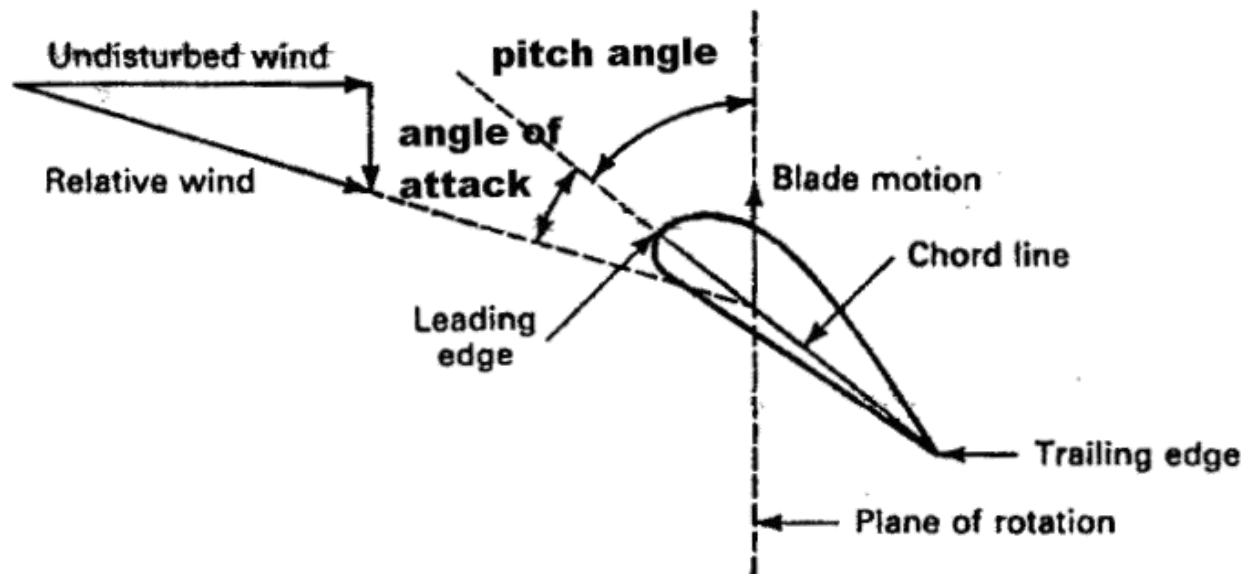
- gebaseerd op liftkracht
- moet in de wind gedraaid worden: kruien
- rotor levert continu koppel
- meestal drie wieken (elektrische turbines) of meer (kleine turbine, pompturbine)



Horizontale as windturbines

werking:

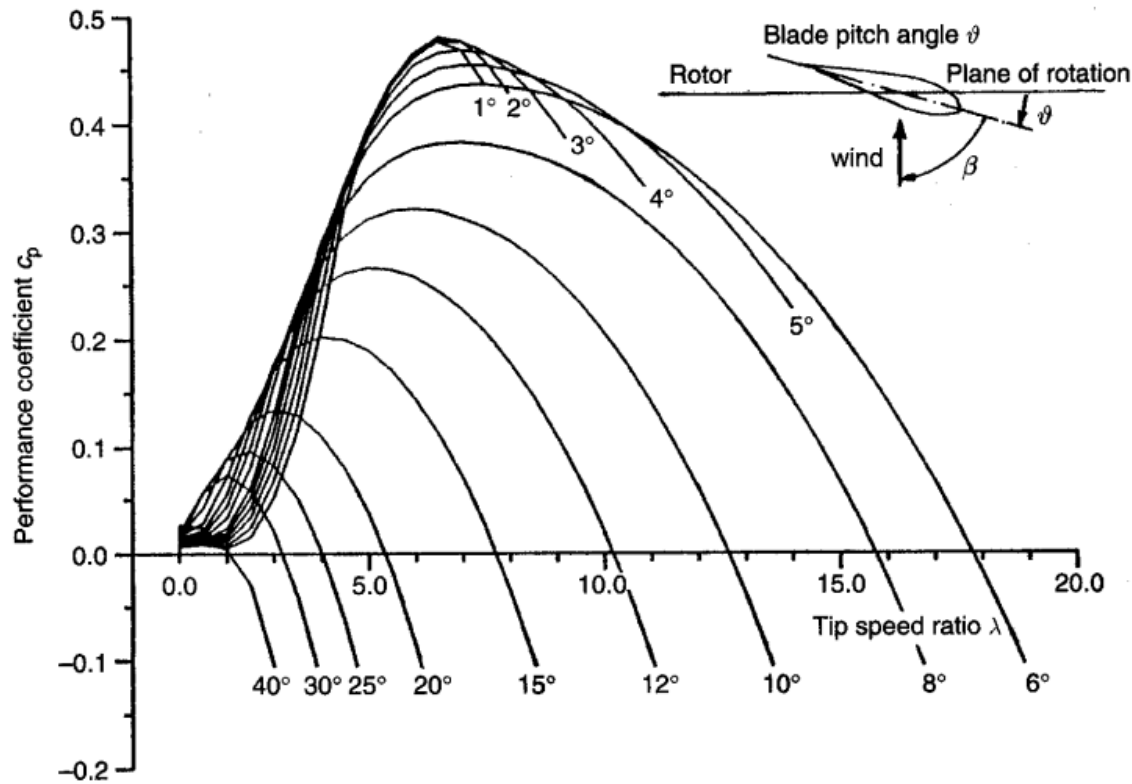
- idem Darrieus, maar met wieken rond horizontale as geplaatst



- controle van aanvalshoek mogelijk → **pitchcontrole**

Horizontale as windturbines

pitchcontrole:



Horizontale as windturbines

pitchcontrole:

- optimaal rendement bij iedere windsnelheid
- rendement verlagen bij maximaal generatorvermogen
- complexe sturing
- niet aanwezig in kleine windturbines

Horizontale as windturbines

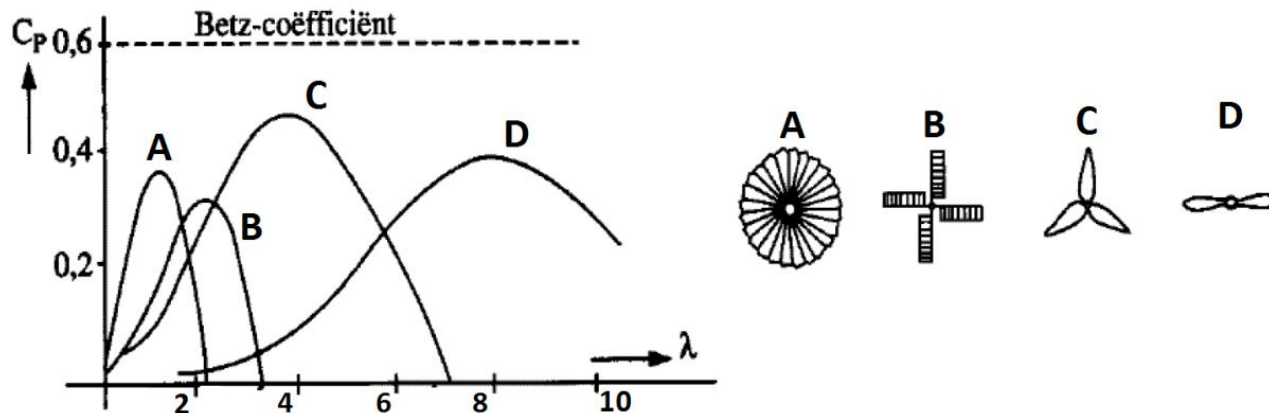
solidity:

- verhouding tussen de totale koorde lengte en de omtrek van de rotor

$$\sigma = \frac{c \cdot B}{2 \cdot \pi \cdot R}$$

c = koorde van rotorblad, B = aantal rotorbladen, R = rotorstraal

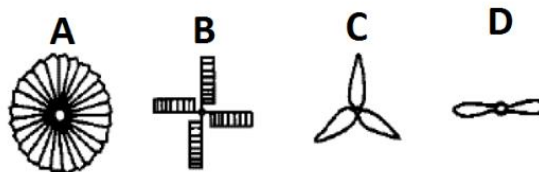
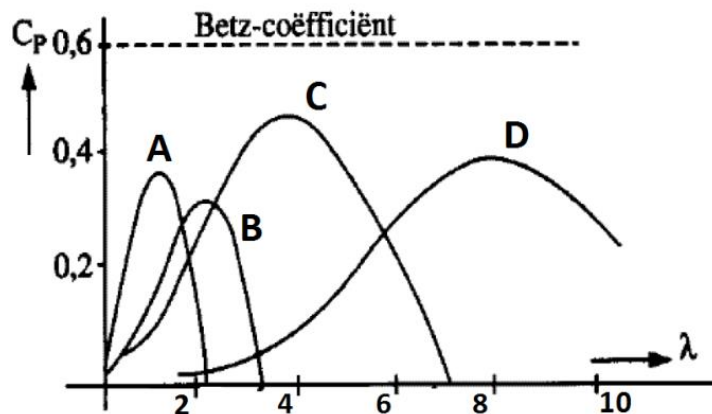
- solidity beïnvloedt vorm en ligging C_p curve



Horizontale as windturbines

solidity:

- grote σ (type A)
 - traag draaiend
 - hoog koppel
- kleine σ (type D)
 - traag draaiend
 - hoog koppel



Horizontale as windturbines

kruisystemen

- passief



upwind rotor: windvaan



downwind rotor

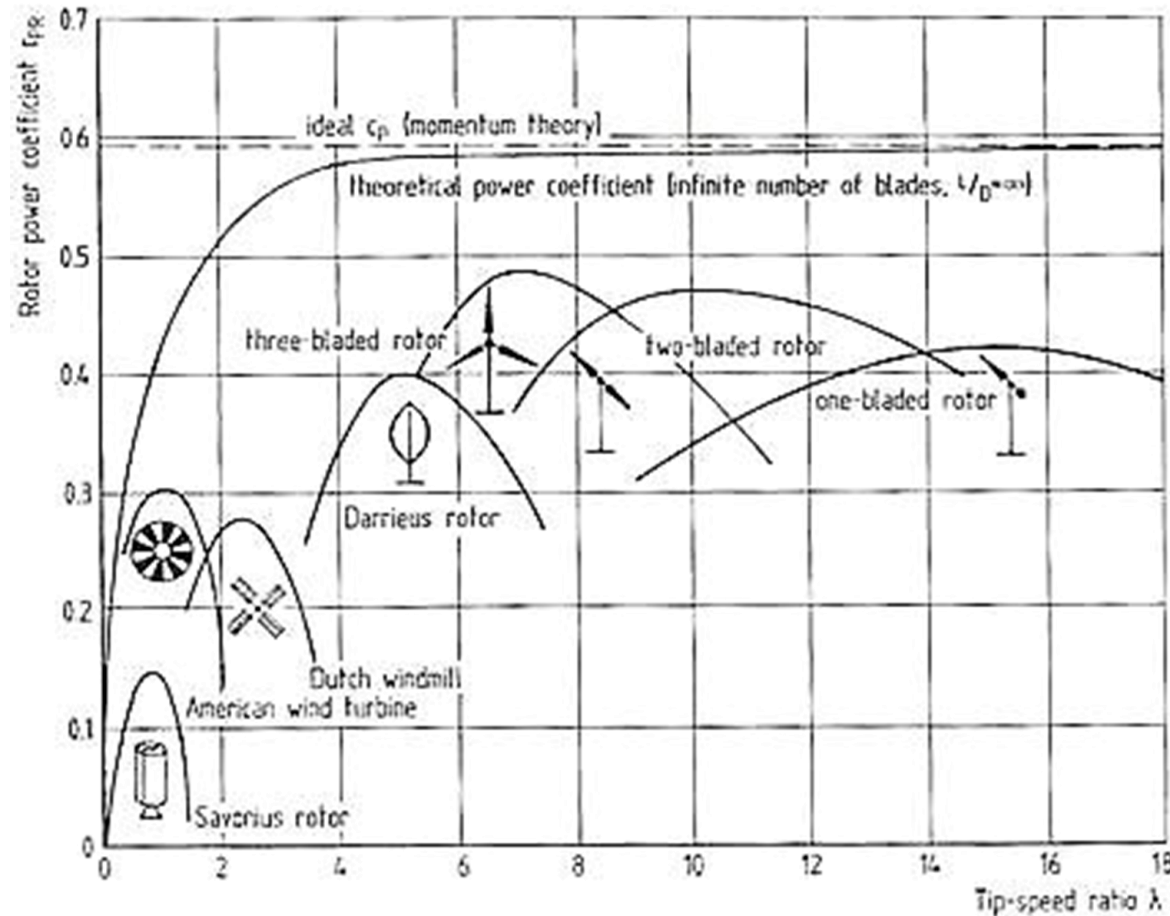
Horizontale as windturbines

kruisystemen

- kruimotor op tandrad in gondel
- sturing met windvaan en anemometer op gondel



Overzicht types windturbines



Inhoud

- Vermogen in de wind
- Types windturbines
- **Aanbod kleine en middelgrote windturbines**
- Jaarlijkse energieproductie
- Invloedsfactoren

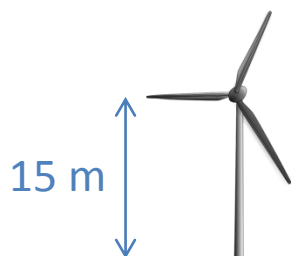
KMWT

kleine versus (middel)groot

kleine windturbines

15 m

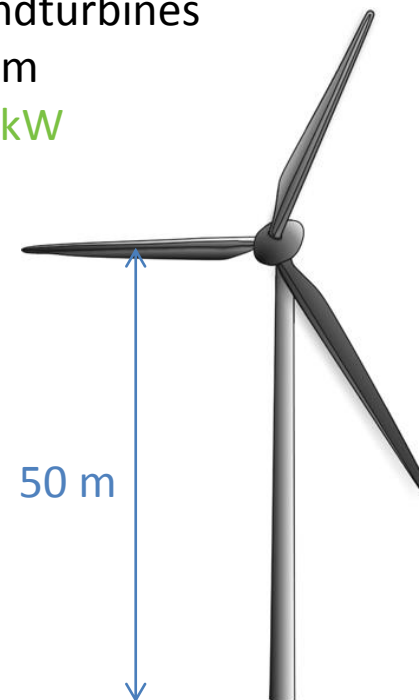
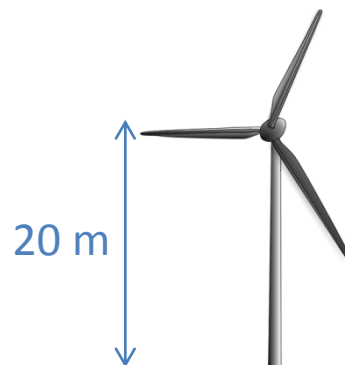
1 - 10 kW



middelgrote windturbines

20 - 50 m

10 - 300 kW



KMWT

hoogte en diameter

	Kleine turbine	Middelgrote turbine		
Vermogen (kW)	0,2 – 10	50	100	200 – 300
Masthoogte (m)	10 – 15	20 – 35	30 – 40	30 – 50
Rotordiameter (m)	1 – 8	15	20	30

KMWT

productie

	Kleine turbine			Middelgrote turbine		
Vermogen (kW)	2,5	5	10	50	100	200
Geschatte Jaaropbrengst (kWh)*	3.000	6.000	10.000	60.000	140.000	280.000

* Bij een gemiddelde windsnelheid van ca. 5 m/s

KMWT

prijzen

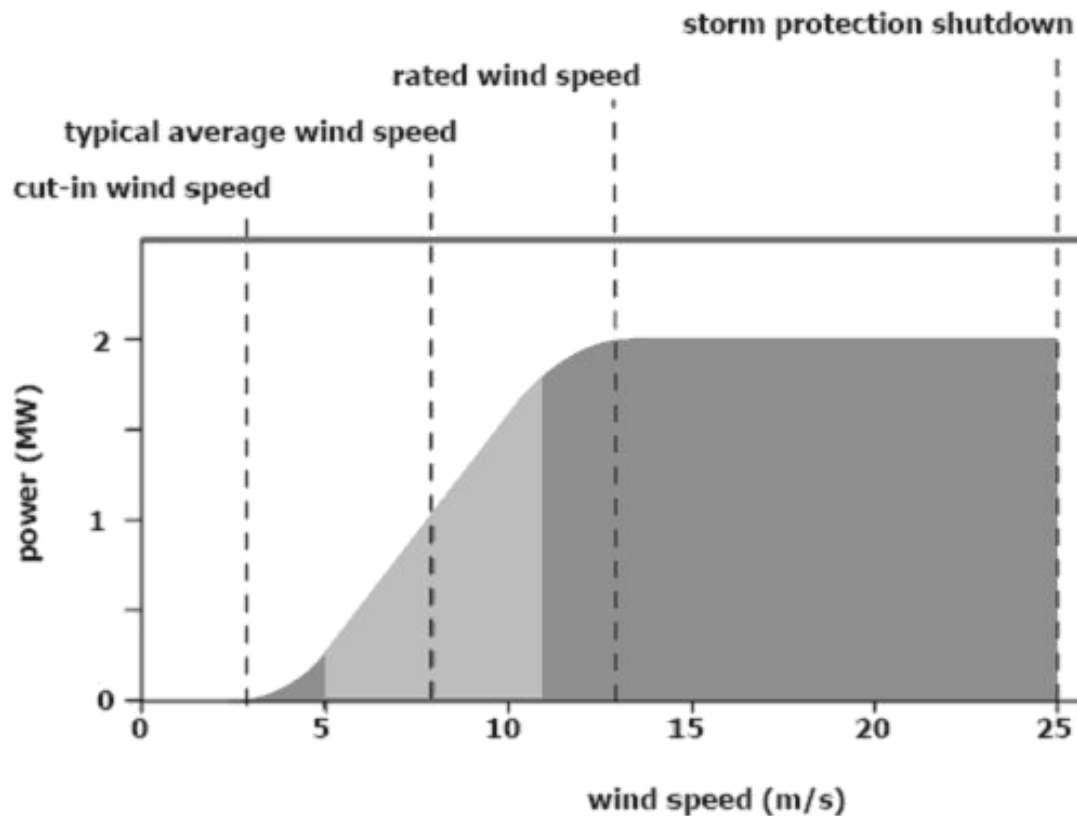
- Leading Edge LE-300 (P = 300 W)
→ 1000 EUR incl. installatie, excl. Onderhoud
- Windera IN S (P = 3,5 kW)
→ 21.000 EUR incl. installatie, excl. Onderhoud
- Sonkyo Windspot (P = 7,5 kW)
→ 37.000 EUR incl. installatie, excl. Onderhoud
- XANT-21 (P = 100 kW)
→ 326.000 EUR incl. installatie, excl. Onderhoud

Inhoud

- Vermogen in de wind
- Types windturbines
- Aanbod kleine en middelgrote windturbines
- **Jaarlijkse energieproductie**
- Invloedsfactoren

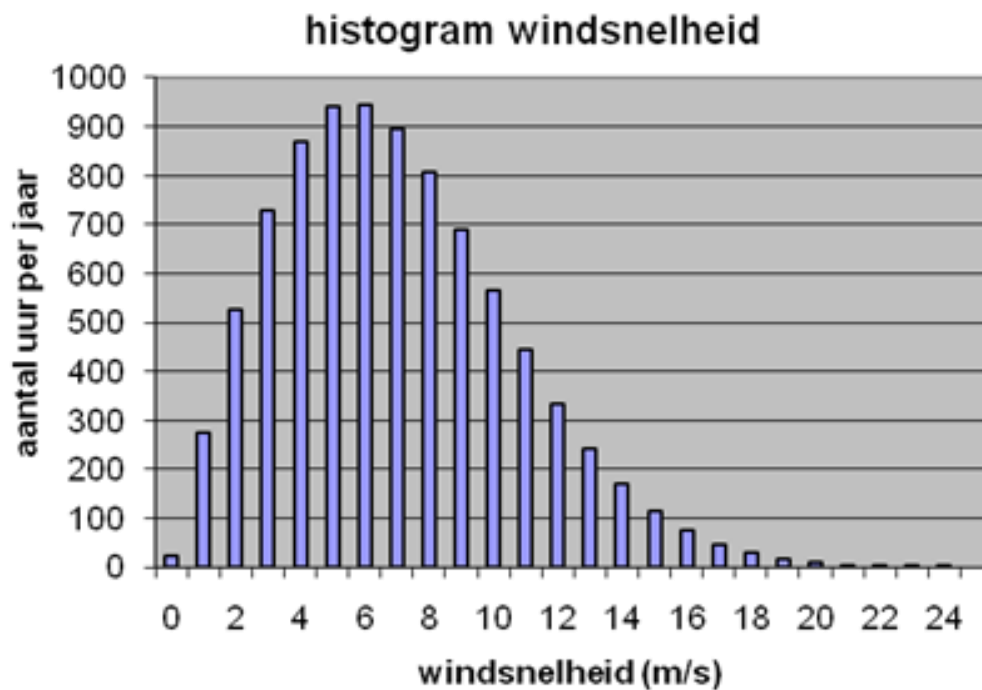
Jaarlijkse energieproductie

powercurve



Jaarlijkse energieproductie

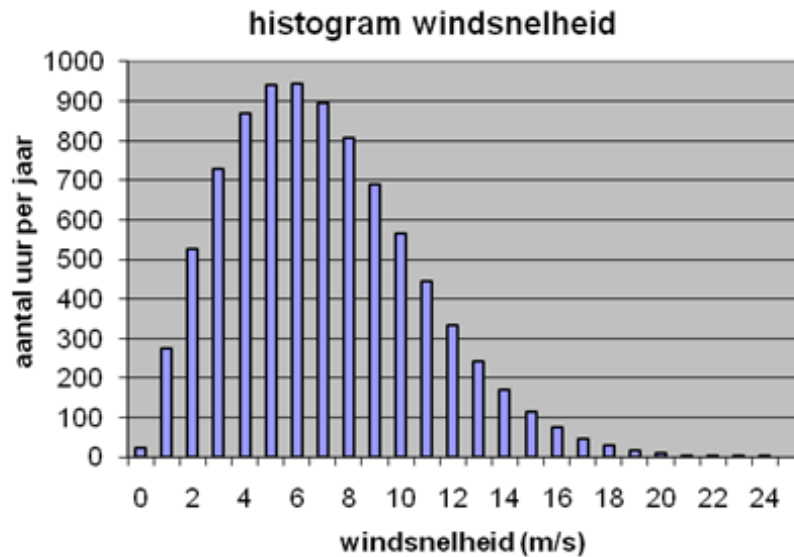
windverdeling



Windsnelheid (m/s)	Uur per jaar
0	24
1	276
2	527
3	730
4	869
5	941
6	946
7	896
8	806
9	690
10	565
11	444
12	335
13	243
14	170
15	114
16	74
17	46
18	28
19	17
20	9
21	5
22	3
23	1
24	1
25	0

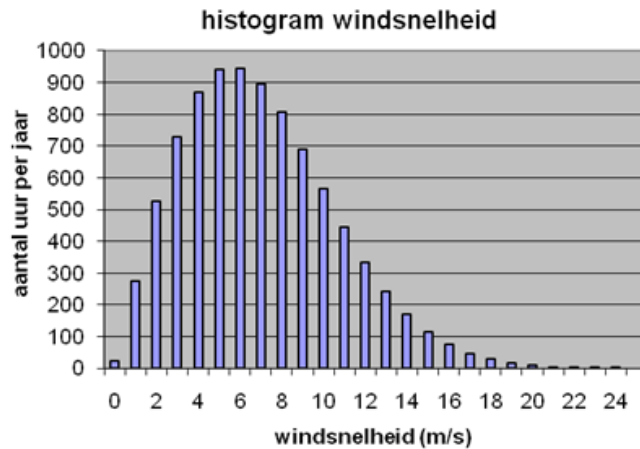
Jaarlijkse energieproductie windverdeling

- lage windsnelheden komen vaker voor, aandeel niet onderschatten
- schatting via gemiddelde windsnelheid en powercurve is foutief!

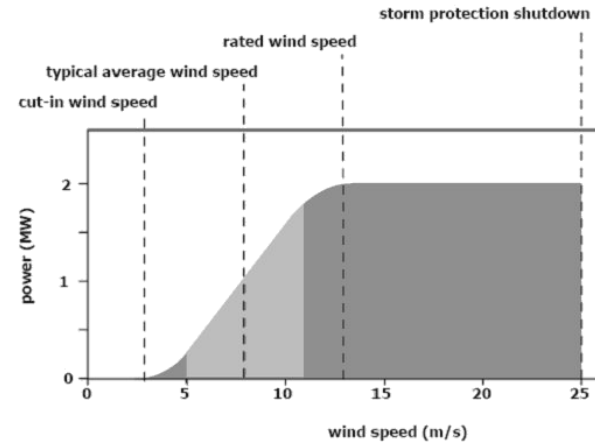


Windsnelheid (m/s)	Uur per jaar
0	24
1	276
2	527
3	730
4	869
5	941
6	946
7	896
8	806
9	690
10	565
11	444
12	335
13	243
14	170
15	114
16	74
17	46
18	28
19	17
20	9
21	5
22	3
23	1
24	1
25	0

Jaarlijkse energieproductie berekening



X



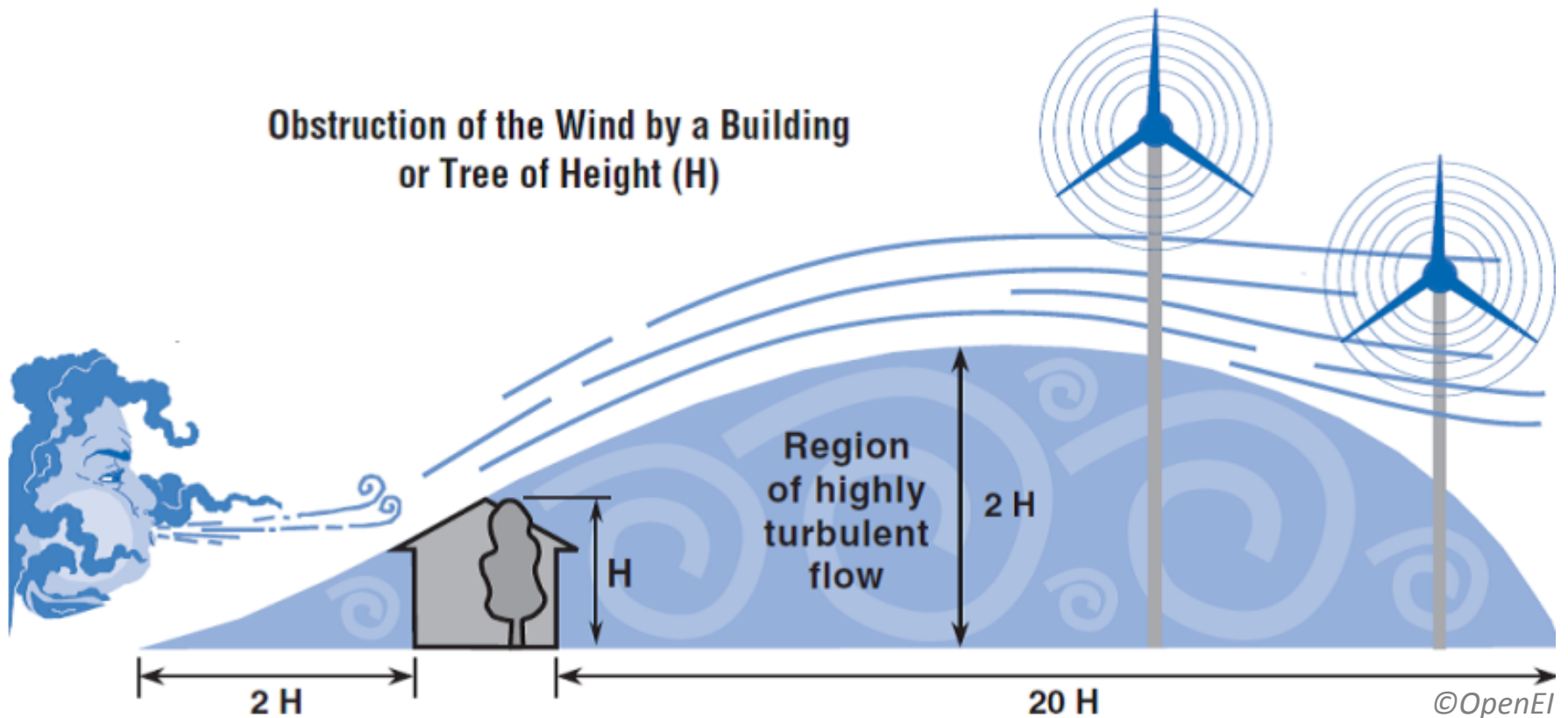
- histogram vermenigvuldigen met powercurve geeft correcte inschatting!

Inhoud

- Vermogen in de wind
- Types windturbines
- Aanbod kleine en middelgrote windturbines
- Jaarlijkse energieproductie
- **Invloedsfactoren**

Invloedsfactoren

obstakels



Invloedsfactoren

obstakels

Vuistregel

rotor min. 10 m hoger dan obstakels binnen een straal van 100 m

- ✓ Voornamelijk obstakels in zuidwestelijke richting (upstream)

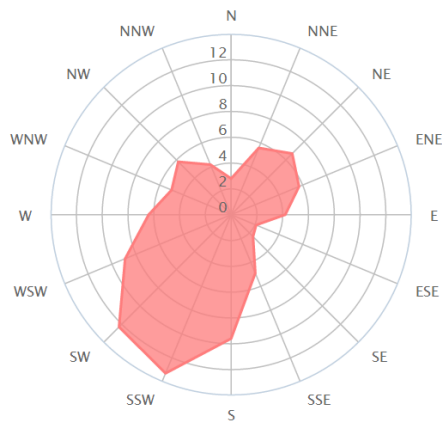
→ kleine windturbines

- ✓ binnen een straal van 100 m geen obstakels hoger dan 5 m – rotorstaal

Invloedsfactoren

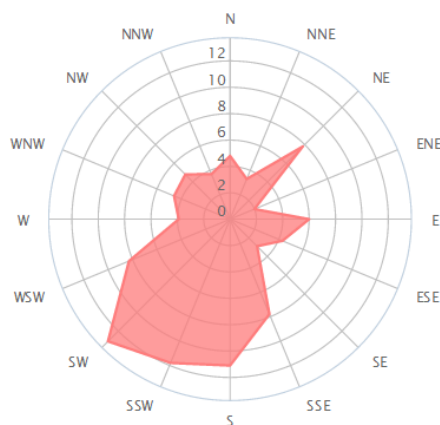
obstakels

Wind direction distribution in (%)
Jaar



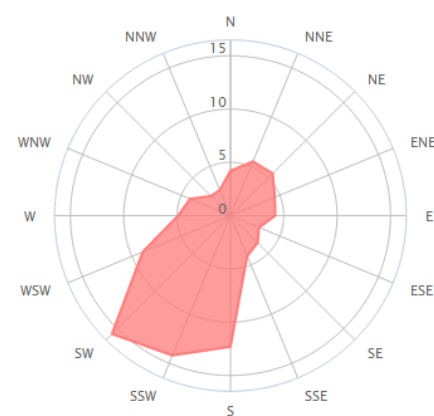
Roeselare

Wind direction distribution in (%)
Jaar



Veldegem

Wind direction distribution in (%)
Jaar

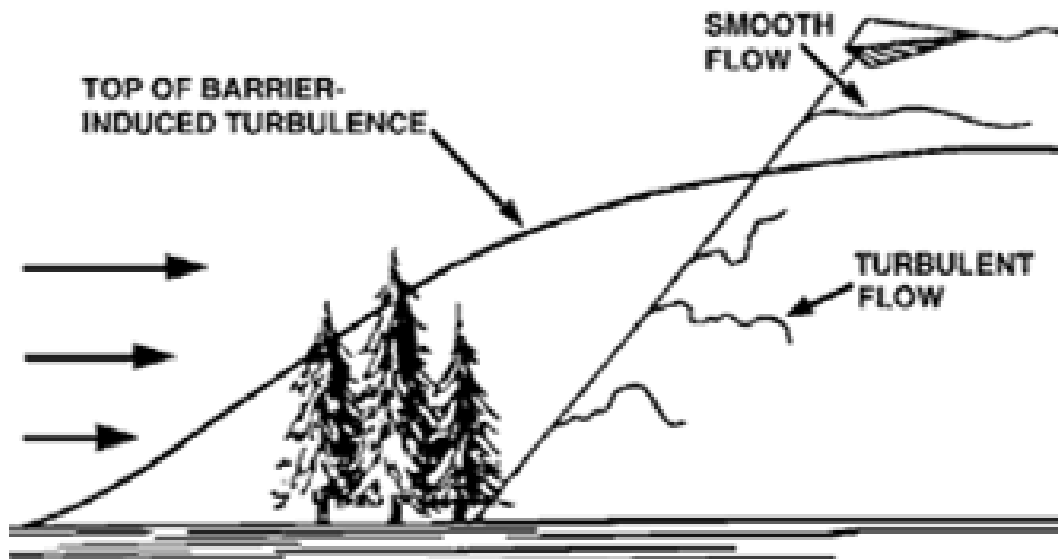


Diepenbeek

@windfinder.com

Invloedsfactoren

kite test



Invloedsfactoren

turbines onderling

- ✓ onderlinge afstand zijwaarts 3-5 x rotordiameter
- ✓ onderlinge afstand downstream 6-10 x rotordiameter

Invloedsfactoren

windsnelheid

EW50 Wind Turbine
Expected Annual Net Energy Production

Average Wind Speed		Annual Energy Output (kWh), Weibull distribution k=2.0, Select Elevations						
m/s	mph	Sea Level	1000'	2000'	3000'	4000'	5000'	6000'
4	8.9	33000	32000	31000	30000	29000	28000	27000
4.1	9.2	36000	34000	33000	32000	31000	30000	29000
4.2	9.4	39000	37000	36000	35000	34000	33000	32000
4.3	9.6	43000	41000	40000	39000	37000	36000	35000
4.4	9.8	47000	45000	44000	42000	41000	40000	38000
4.5	10.1	51000	49000	47000	46000	44000	43000	41000
4.6	10.3	55000	53000	51000	50000	48000	46000	45000
4.7	10.5	59000	57000	55000	53000	51000	50000	48000
4.8	10.7	63000	61000	59000	57000	55000	53000	51000
4.9	11	67000	65000	63000	61000	59000	57000	55000
5	11.2	71000	68000	66000	64000	62000	60000	58000
5.1	11.4	76000	73000	71000	69000	66000	64000	62000
5.2	11.6	80000	77000	75000	72000	70000	68000	65000
5.3	11.8	85000	82000	79000	77000	74000	72000	69000
5.4	12.1	90000	87000	84000	81000	79000	76000	73000
5.5	12.3	94000	91000	88000	85000	82000	80000	77000

toename 0,5 m/s → toename 39% jaarlijkse productie

Huidige installaties in Vlaanderen?



www.windkracht13.be/inventaris-kmwt/

Registreer uw kleine of middelgrote windturbine via wk13@ugent.be

Small Wind Turbine Field Lab - UGent



www.swtfieldlab.ugent.be



Karel Van Wyngene
Universiteit Gent, Power-Link

karel.vanwyngene@ugent.be