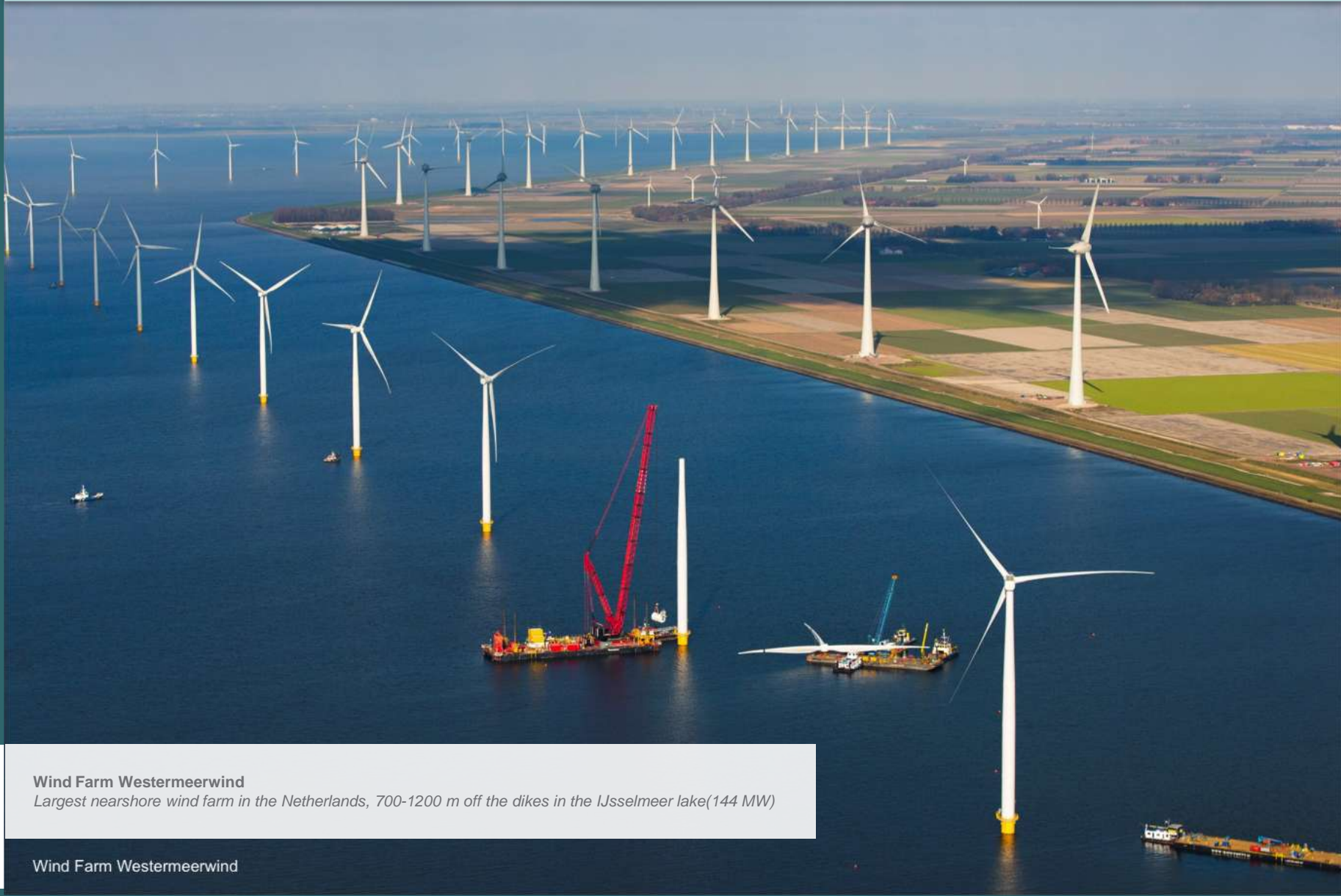


# Windenergie op land

Jos Beurskens  
SET Analysis  
(Voorheen ECN)

KIVI  
Mini Seminar Windenergie  
Arnhem, 19 October 2016



**Wind Farm Westermeerwind**  
*Largest nearshore wind farm in the Netherlands, 700-1200 m off the dikes in the IJsselmeer lake(144 MW)*

Wind Farm Westermeerwind

Technisch Weekblad. Sept. 2015

# Service

## TIPS

### Meer dan duizend olieplatforms ontmanteld in de Noordzee

De Noordzee heeft in veertig jaar ongeveer veertig miljard vaten olie (dat is inclusief olie-equivalenten aan gas) opgeleverd. De reserves zijn nog eens 24 miljard vaten. Omdat de oudste velden uitgeput zijn, zullen oliemaatschappijen in de komende tien jaar in de Noordzee meer dan duizend oliebronnen moeten afsluiten en ontmantelen. Dit is volgens het Britse tijdschrift **The Engineer** een geweldige technische en logistieke uitdaging.

De grootste klus valt toe aan Shell, dat in de komende jaren vier olieplatforms, 140 bronnen en 28 pijpleidingen van het Brentveld gaat opruimen. Volgens Shell heeft Brent een tiende deel van alle olie- en gas uit de Noordzee geproduceerd. Drie van de vier Brentplatforms produceren al niet meer en de vierde - Charlie - wordt naar

verwachting in de komende jaren stilgelegd.

De eerste zorg is de ontmanteling van platform Delta. De *Pioneering Spirit*, een speciaal voor dit werk gebouwd vaartuig, moet volgend jaar in één hijs de 23.000 ton zware topside van de betonnen poten lichten. Shell zal de topside daarna in Engeland laten slopen. Vervolgens gaat men ook de drie betonnen poten en de onderzeese leidingen van de Delta verwijderen. Het bedrijf claimt dat 95 % van het materiaal wordt hergebruikt.

De fase van 'plugging and abandonment', het permanent afsluiten van de eigenlijke olieputten, is volgens *The Engineer* technisch het moeilijkste deel van de ontmanteling. (TZ)

[bit.ly/1D42L9j](http://bit.ly/1D42L9j)



# Overzicht

- Geschiedenis
- Enkele cruciale fysische begrippen
- Windturbine
- Windparken
- Netintegratie
- Wind capaciteit in Nederland/Europa
- Uitbreiding marktpotentieel op land (CC)
- Acceptatie en impacts



# Geschiedenis



# Geschiedenis



© Jos Beurskens



© Jos Beurskens



© Jos Beurskens

# Geschiedenis

© Jos Beurskens



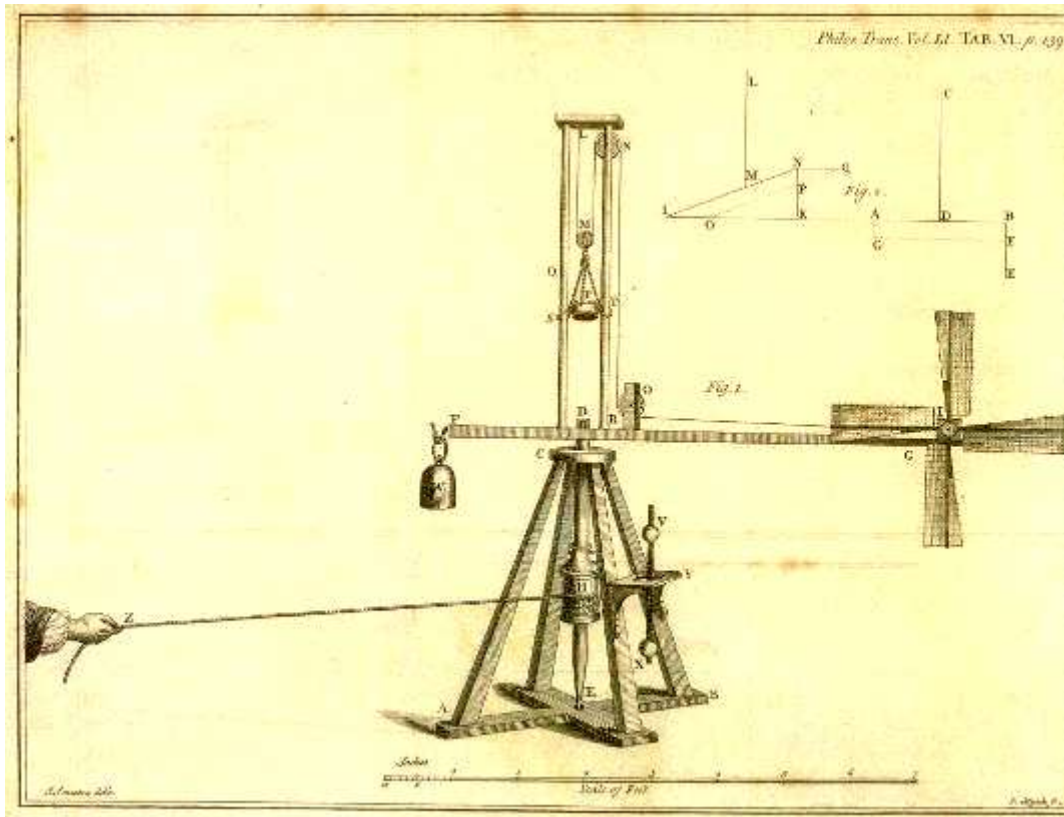
Windpark Neer (L)



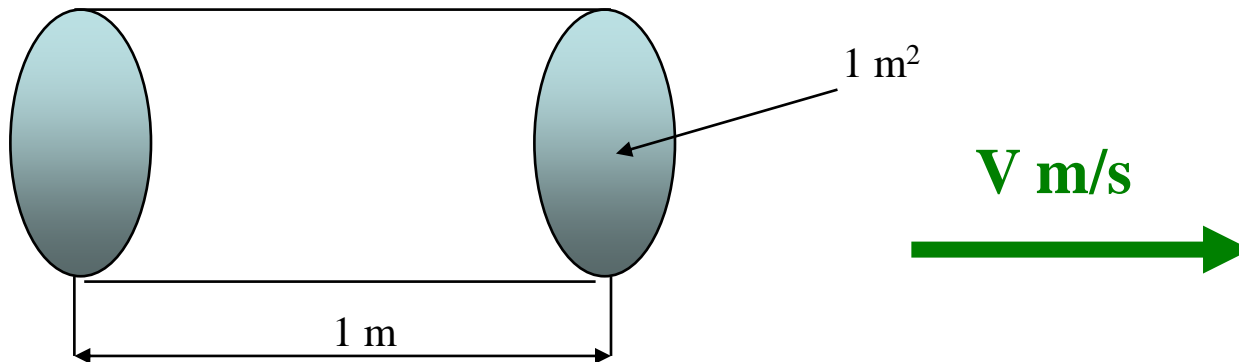
# Enkele cruciale fysische begrippen

## Eerste wetenschappelijke benaderingen

18-de eeuw: John Smeaton (GB)



# Enkele cruciale fysische begrippen: *de wind*



$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$$

**1 m<sup>3</sup> lucht weegt 1.2 kg,  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$**

Luchtdichtheid wordt mede bepaald door de hoogte (druk) en temperatuur

# Enkele cruciale fysische begrippen: *de wind*

**Vermogen (= energie per seconde)  
van de wind is:**

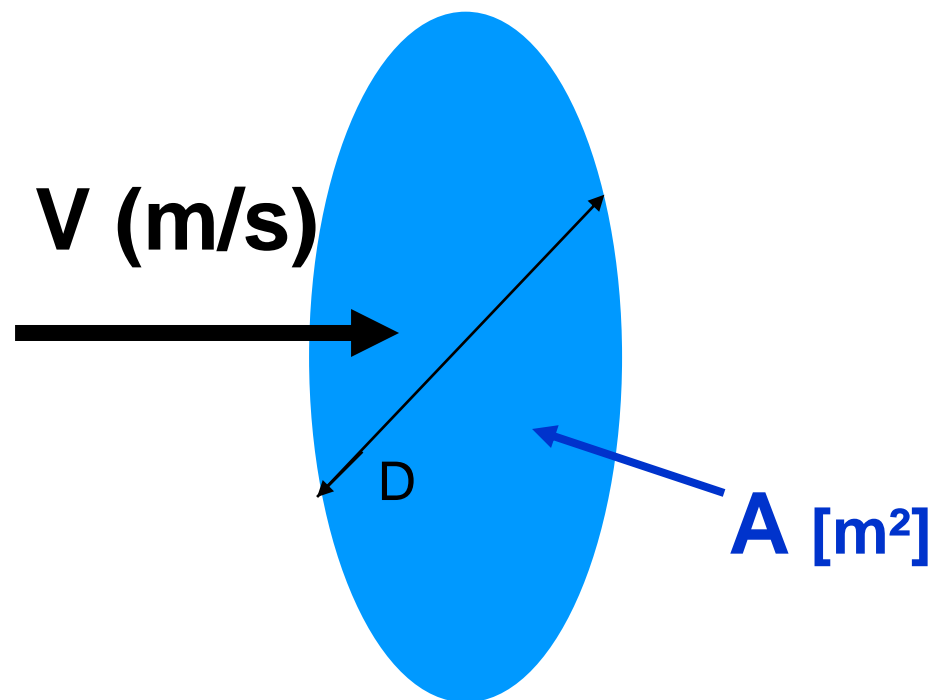
$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot V^2 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$\rho$  = luchtdichtheid; ongeveer 1,2 [kg/m<sup>3</sup>]

Enkele cruciale fysische begrippen: *de wind*

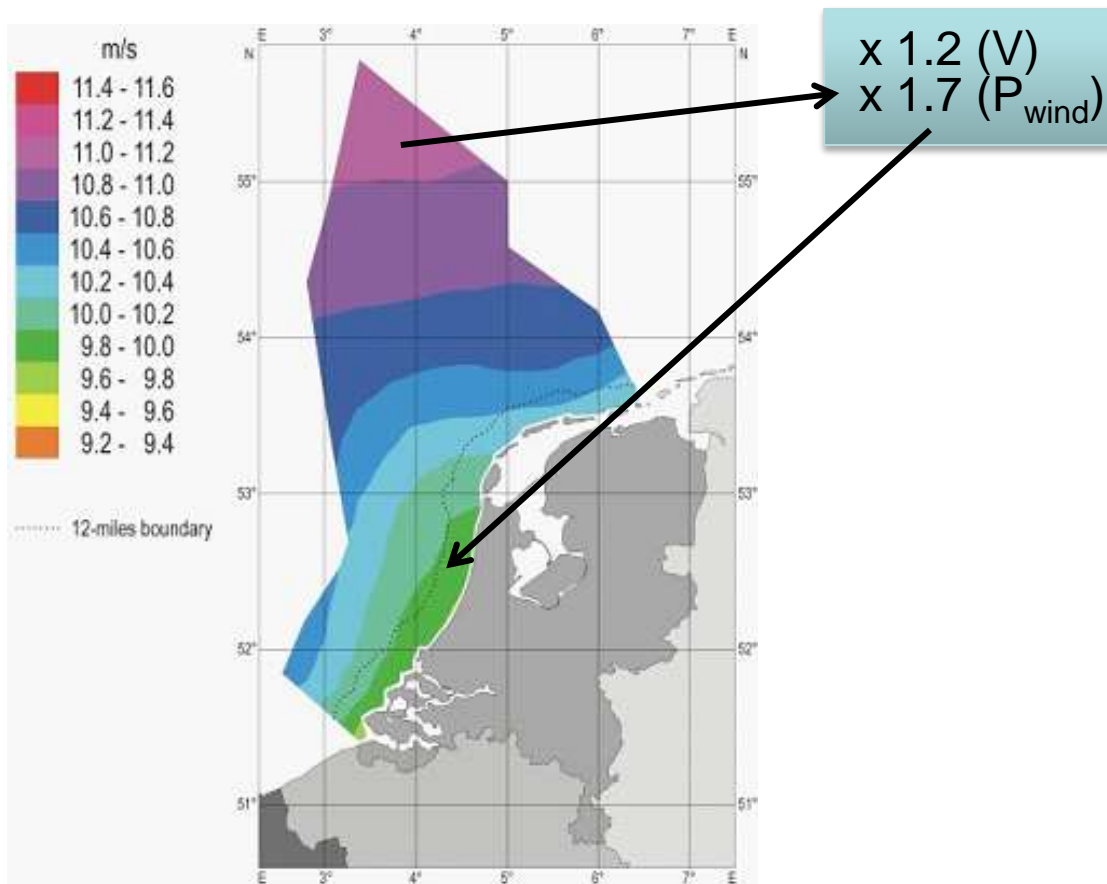
Windsnelheid (m/s)	Windsnelhed (Watt/m <sup>2</sup> )
<b>3</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>130</b>
<b>12</b>	<b>1035</b>





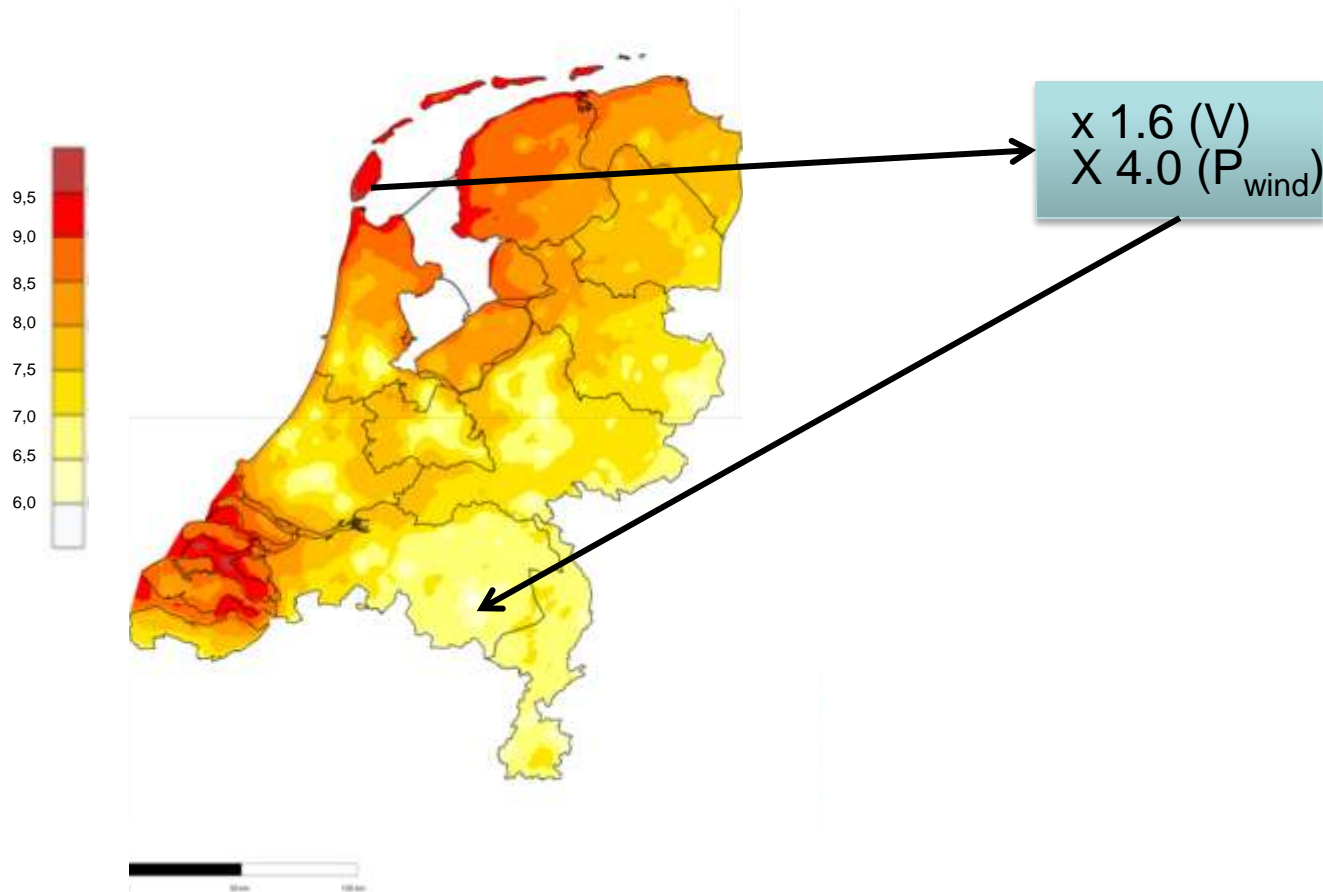
# Enkele cruciale fysische begrippen: *de wind*

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \text{ [W/m}^2\text{]}$$



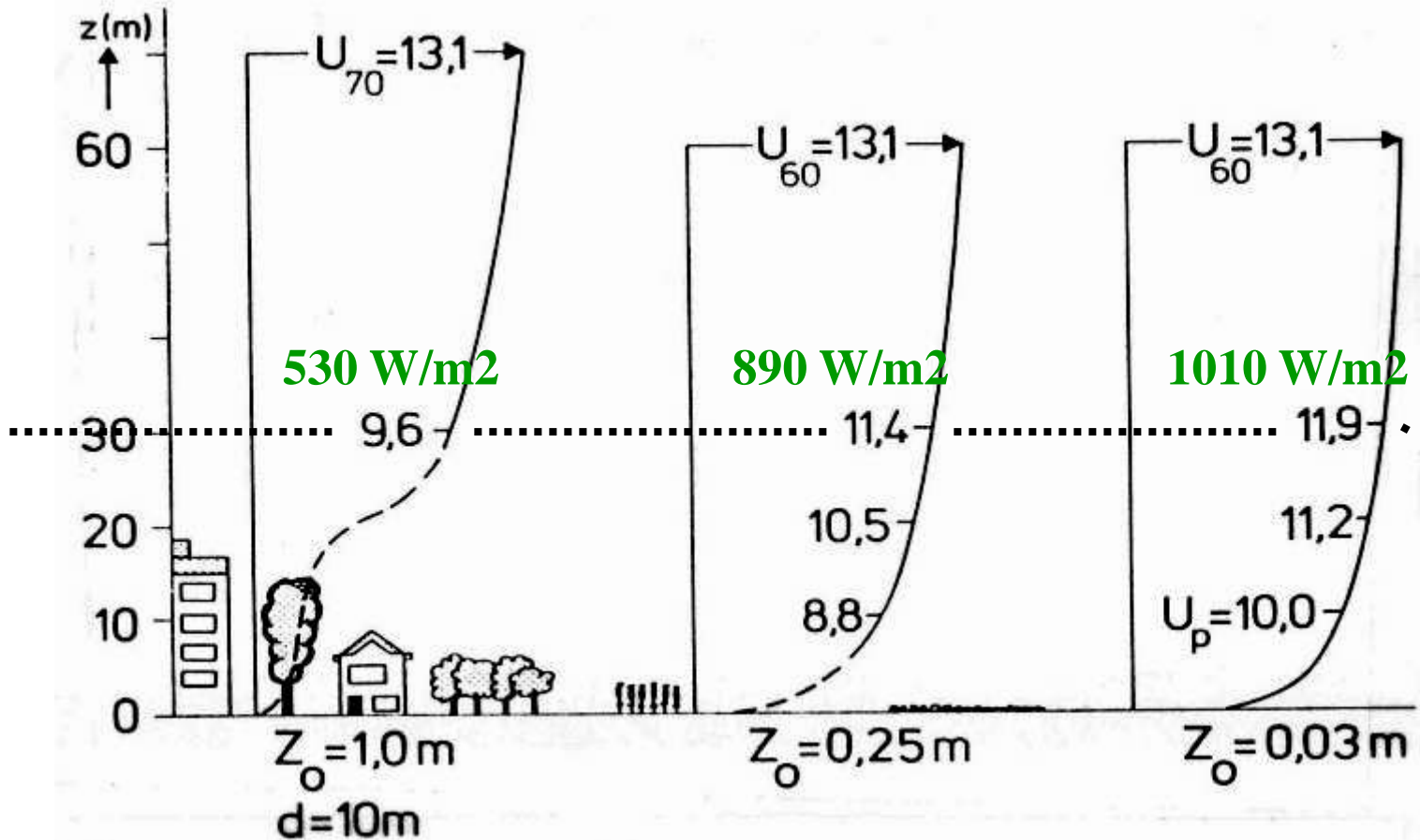
Enkele cruciale fysische begrippen: *de wind*

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

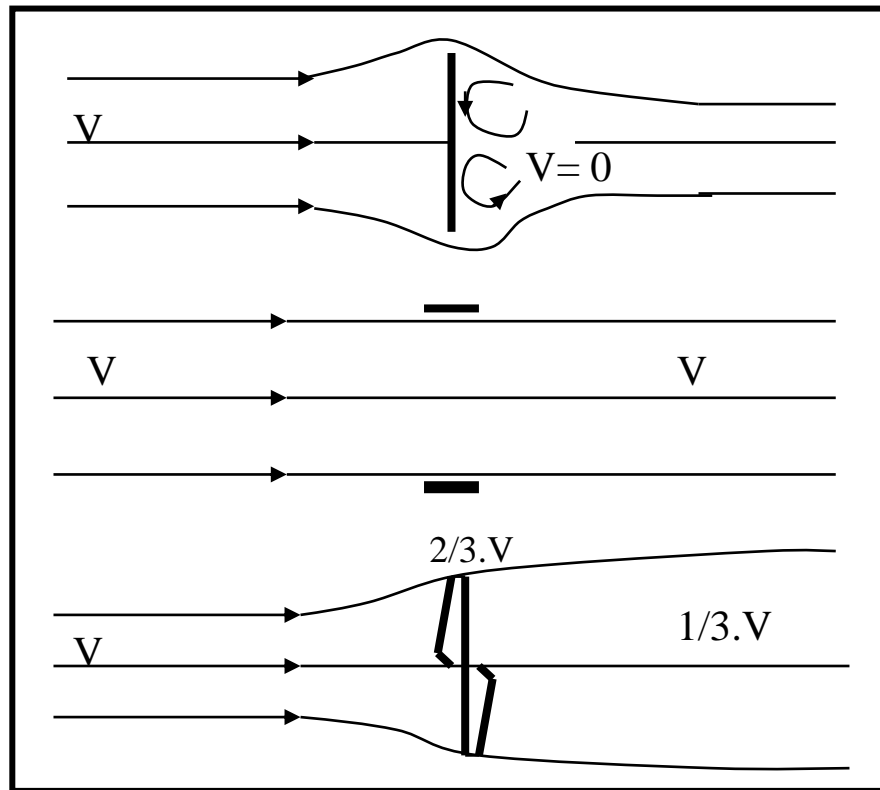


# Enkele cruciale fysische begrippen: *de wind*

Wind shear



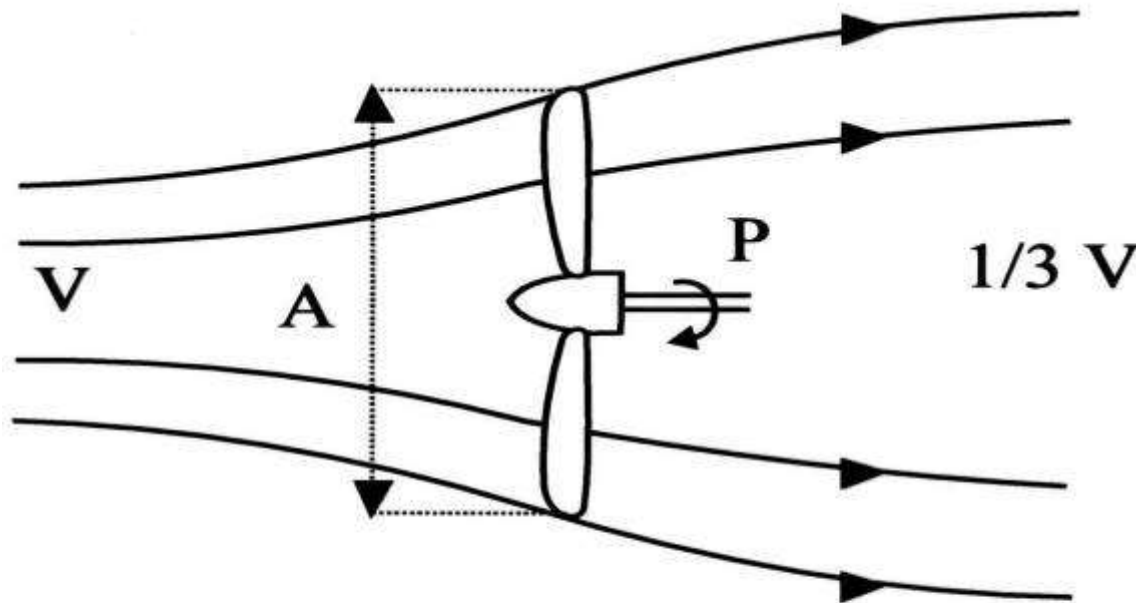
# Enkele cruciale fysische begrippen: *de windturbine*



**Vermogen =  
massastroom x  
snelheidsverandering**



# Enkele cruciale fysische begrippen: *de windturbine*



1926: Albert Betz (D)

$$P = 1/2 \rho \cdot C_p \cdot V^3 \cdot A_{\text{rotor}}$$

$$C_p \leq 16/27 \quad \text{bijna 60\%}$$

**Zhukovsky-Lanchester-Betz limiet**

# Enkele cruciale fysische begrippen: *de windturbine*

Karakterisering Rotoren: snelopendheid  $\lambda$



$\lambda = 1$

$\lambda = 6$

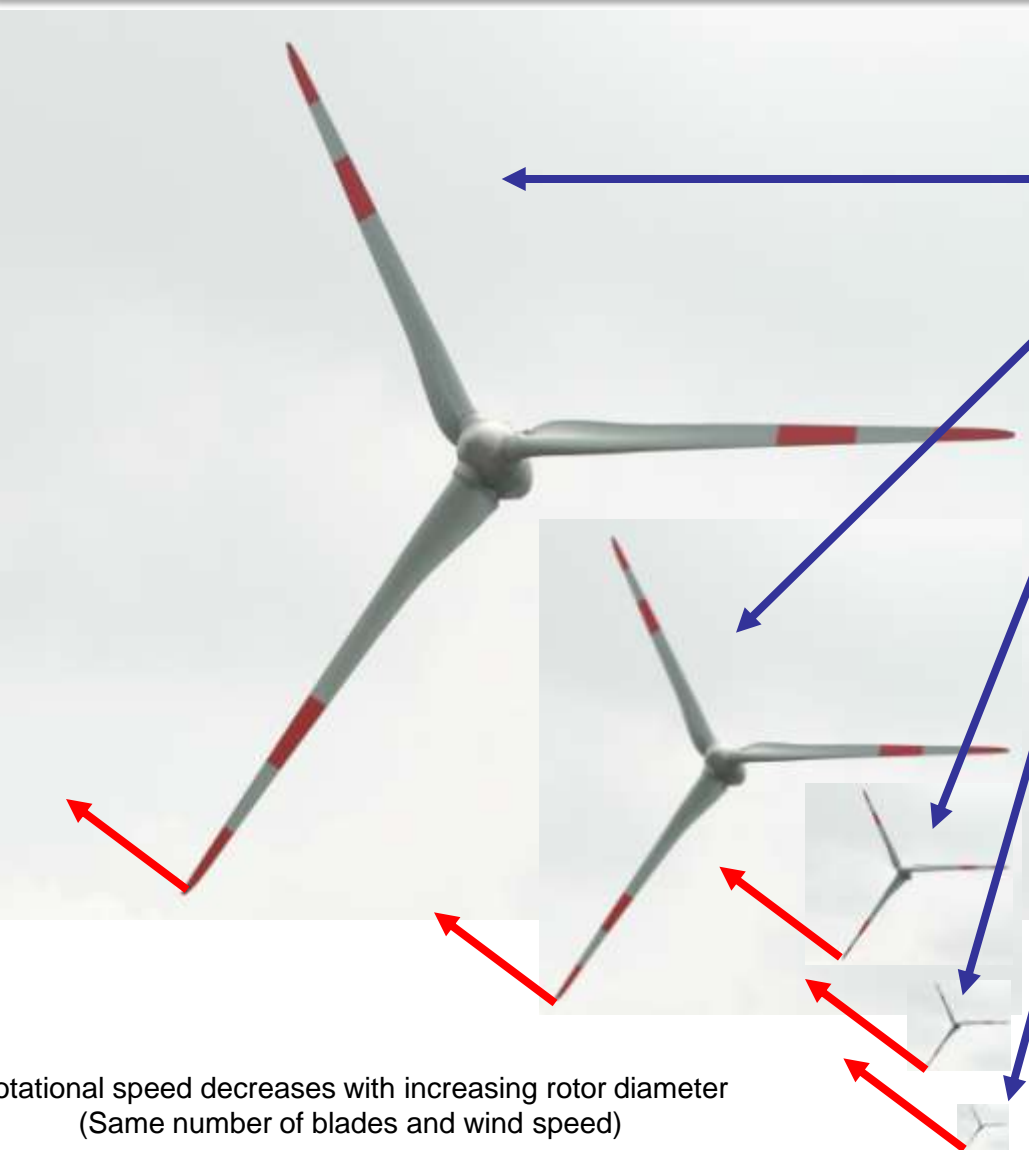
$\lambda = 8$

$\lambda > 10$

$$\lambda = \frac{\text{Snelheid rotortip}}{\text{Windsnelheid}}$$

$$P = M \cdot \Omega$$

# Enkele cruciale fysische begrippen: *de windturbine*



D [m]	P	Omw/s	Omw/m in
120	5 MW	0,13	7,5
60	1,2 MW	0,26	15,3
20	150 kW	0,75	46
10	35 kW	1,53	92
2	1,5 kW	7,6	460

Rotational speed decreases with increasing rotor diameter  
(Same number of blades and wind speed)



© Jos Beurskens

# de Windturbine



Senvion



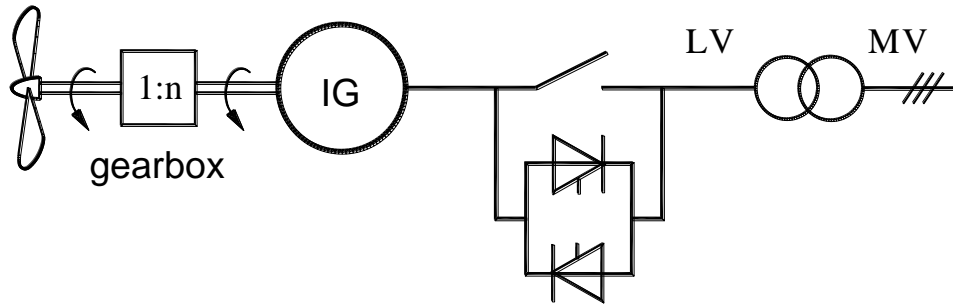
Lagerwey



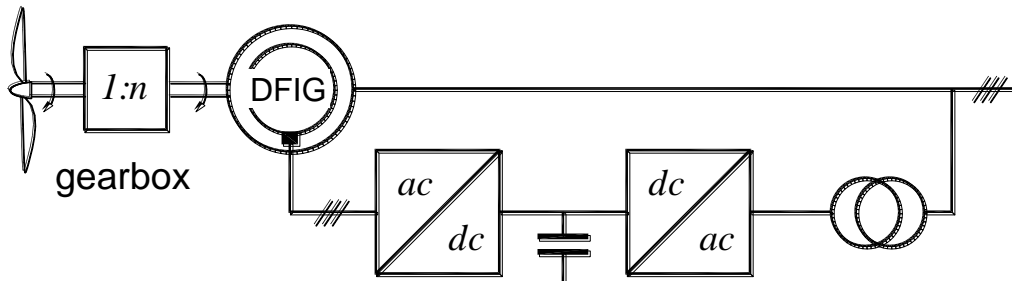


# de Windturbine

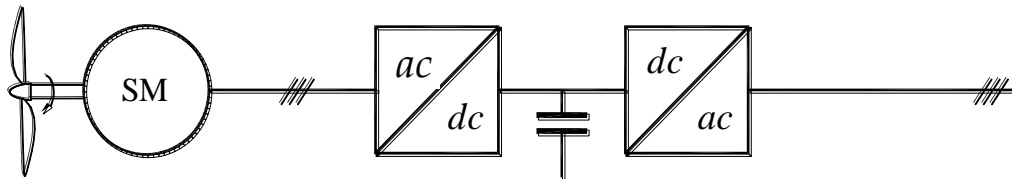
## Main configurations for electrical conversion in WT's



Directly Coupled Induction Gen.



Doubly Fed Induction Generator

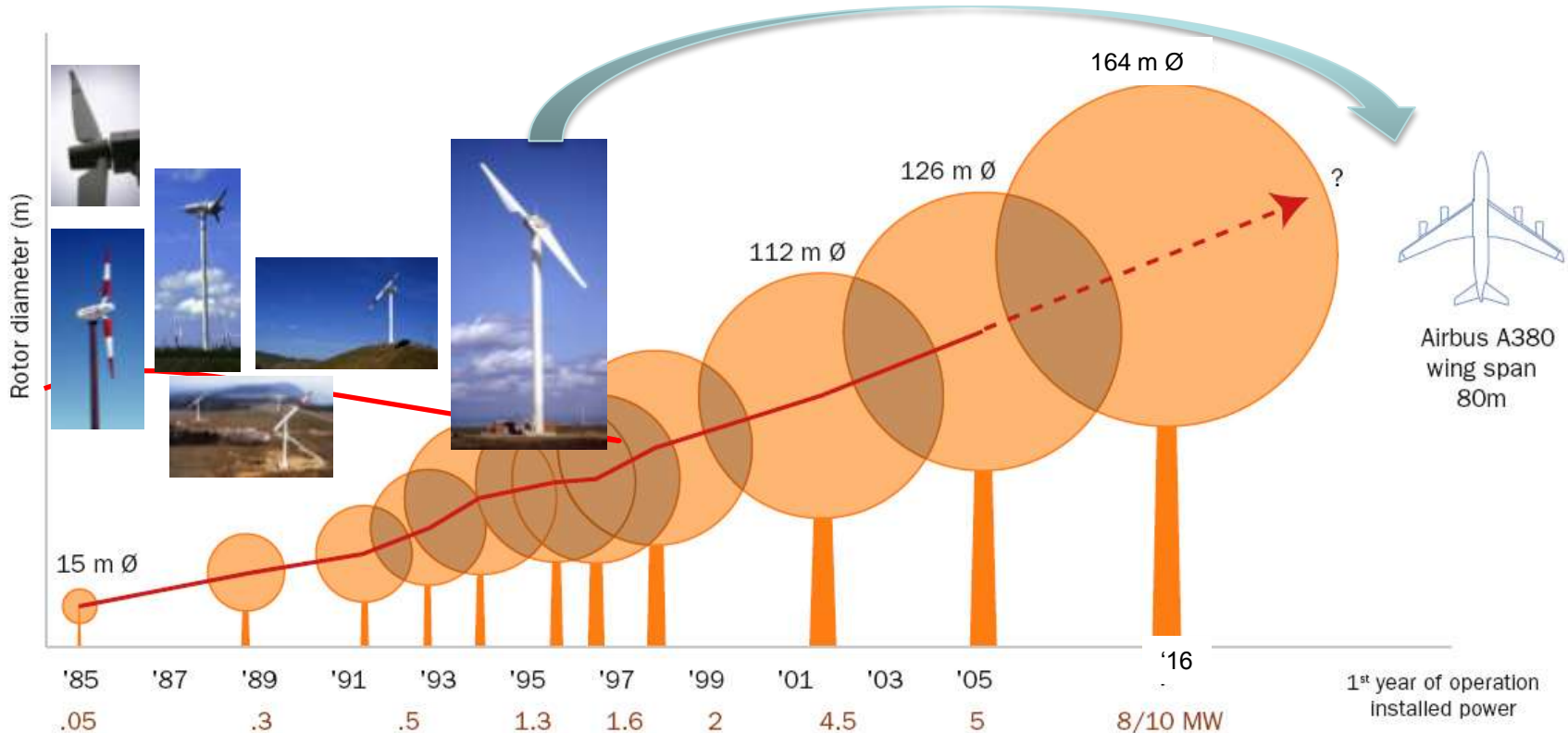


Direct Drive generator with full converter

# de Windturbine

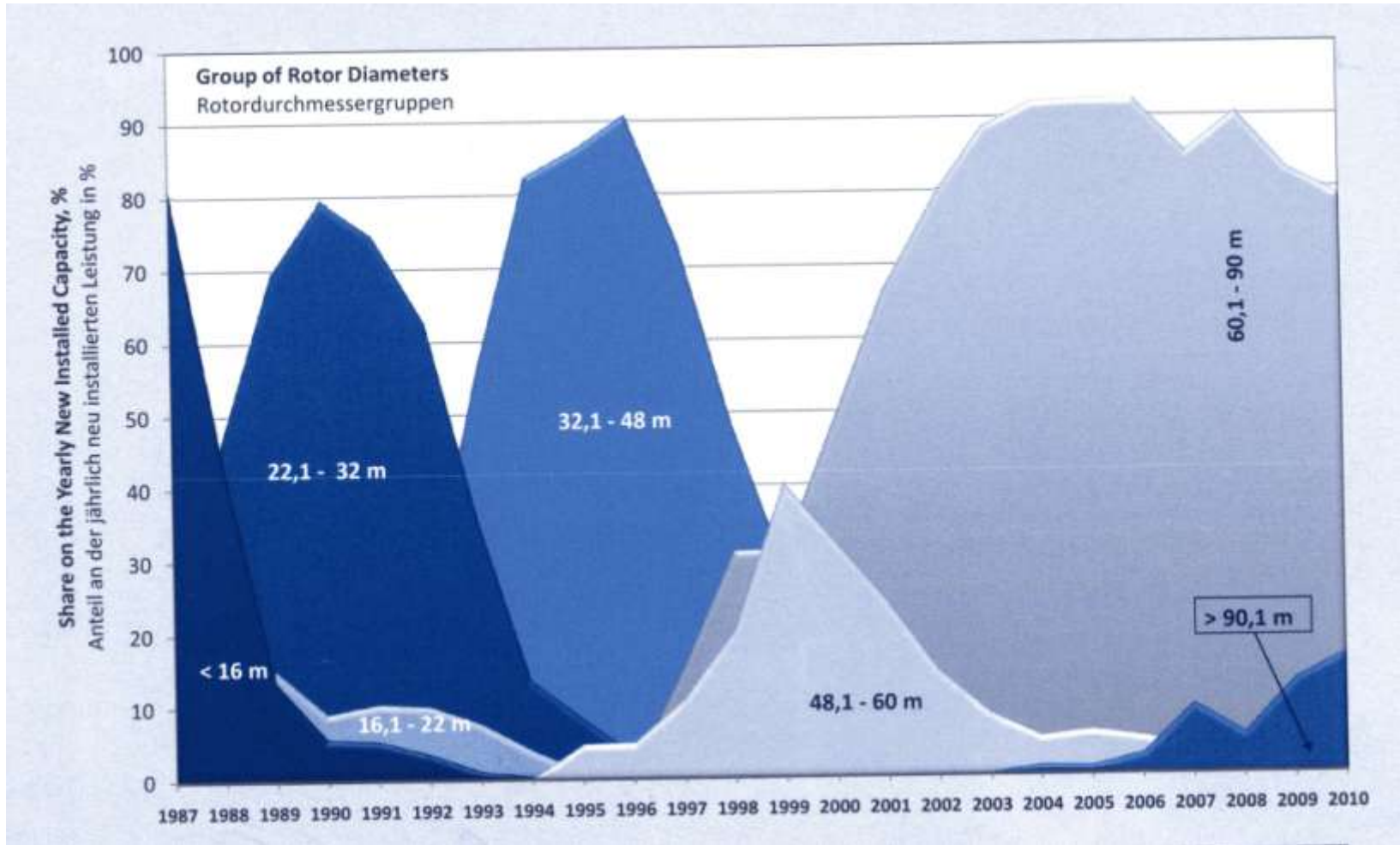
## Opschalen

Some large scale prototypes 1981-1997. 33 m Ø (0,3 MW) – 100 m Ø (4MW).



# de Windturbine

## Opschalen



Source: DEWI

# de Windturbine

Opschalen

*Voor de ingenieur*

mass  $\sim (D^3)$   
cross section  $\sim (D^2)$   
stress (= mass/cross section)  $\sim D$

*Voor de econoom*

investment cost  $\sim (D^3)$   
energy output  $\sim (D^2)$   
COE (= inv. cost/energy output)  $\sim D$

Development of advanced materials  
with a higher strength-to-mass ratio

# de Windturbine

De grootste turbines





# de Windturbine

## De grootste turbines



Photo: Ozlem Ceyhan-Yilmaz



©Jos Bourskens

EWEA 2012, Copenhagen



# de Windturbine

## De grootste turbines

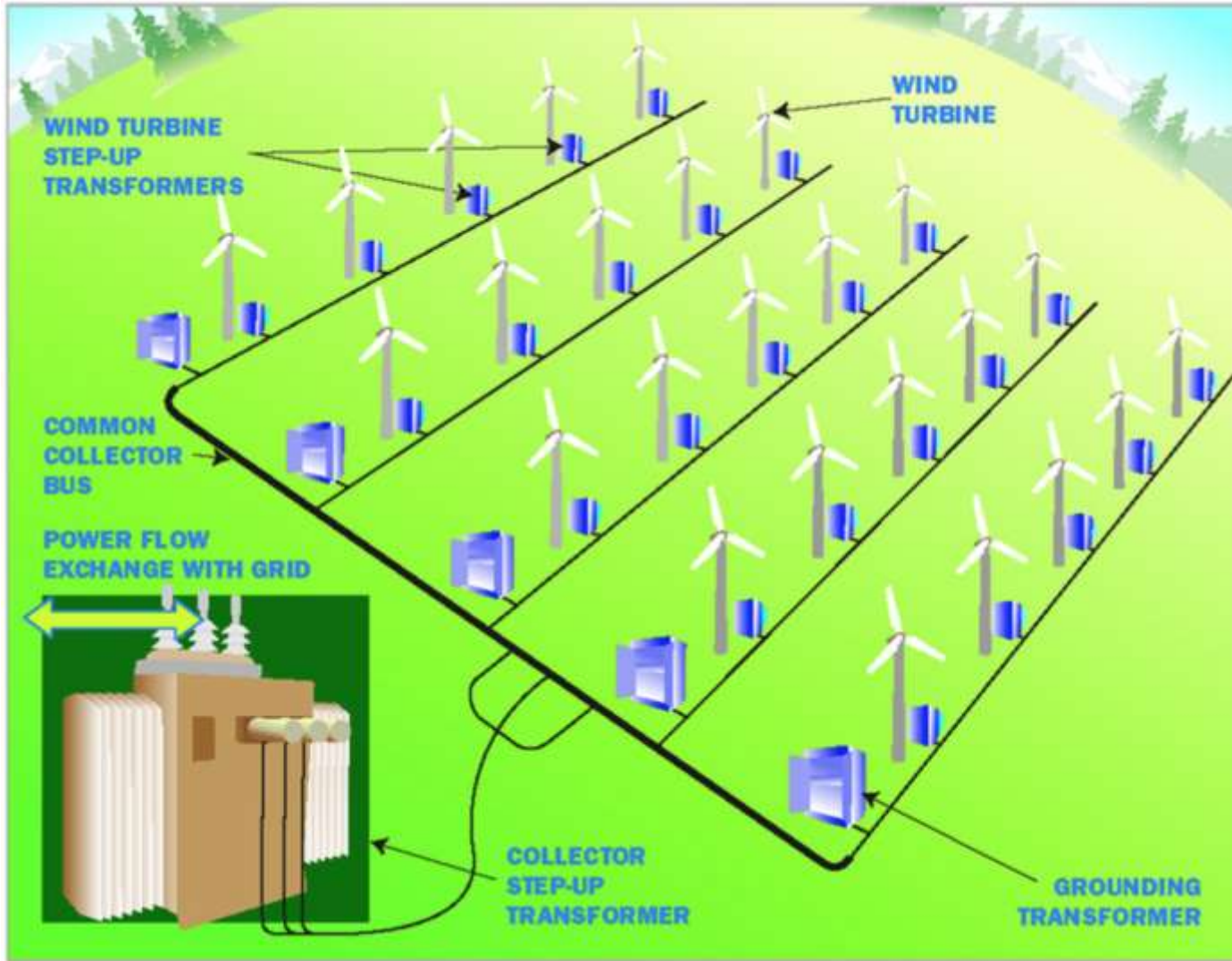
	Make & Type	Rotordiameter [m]	Rated power [MW]
1	MHI-Vestas V164 8MW	164	8 +
2	Adwen	164	8+
3	Sinovel SL6000	155	6.0
4	Siemens SWT-8.0-154	154	8.0
5	ENERCON E-154 Medemblik	154	7.5
6	Senvion 6.2M152	152	6.15
7	GE Haliade 6MW (former Alstom)	150.8	6.0
8	MingYang (2blades) SCD 6.0MW	140	6.0
9	Dongfang/Hyundai	140	5.5
10	Adwen AD5-135	135	5

2016-10

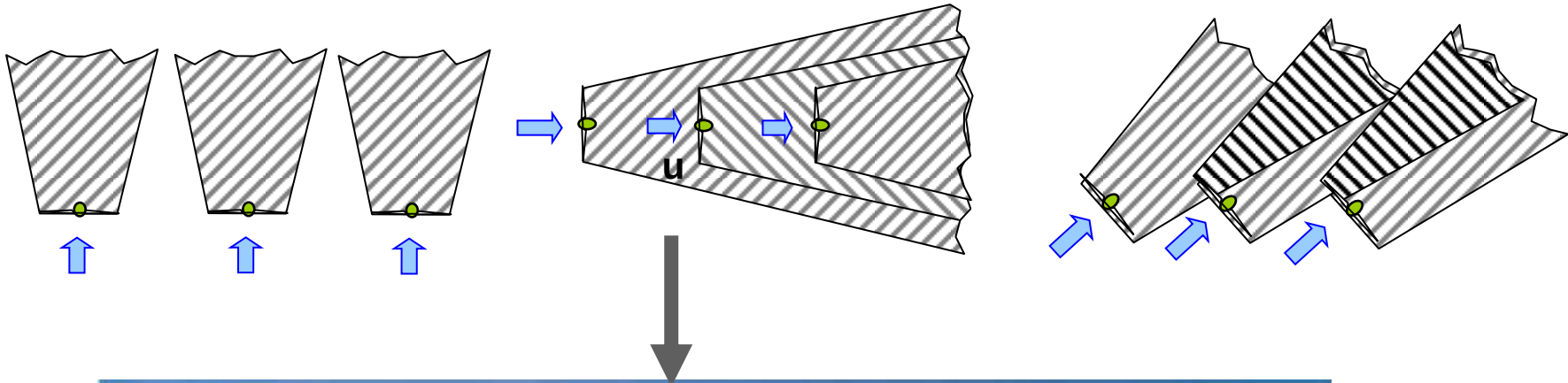


Lagerwey turbines

# Windparken

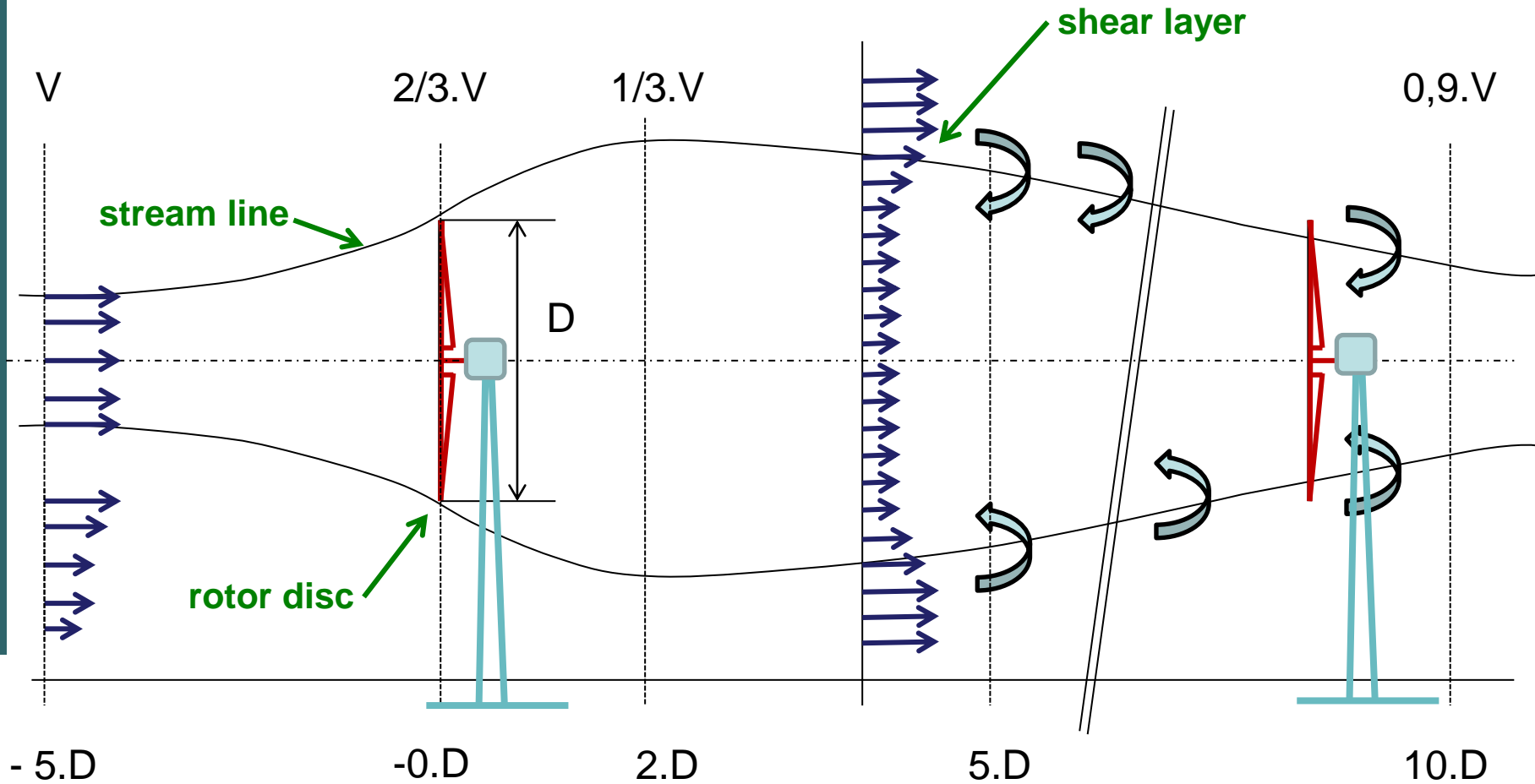


# Windparken



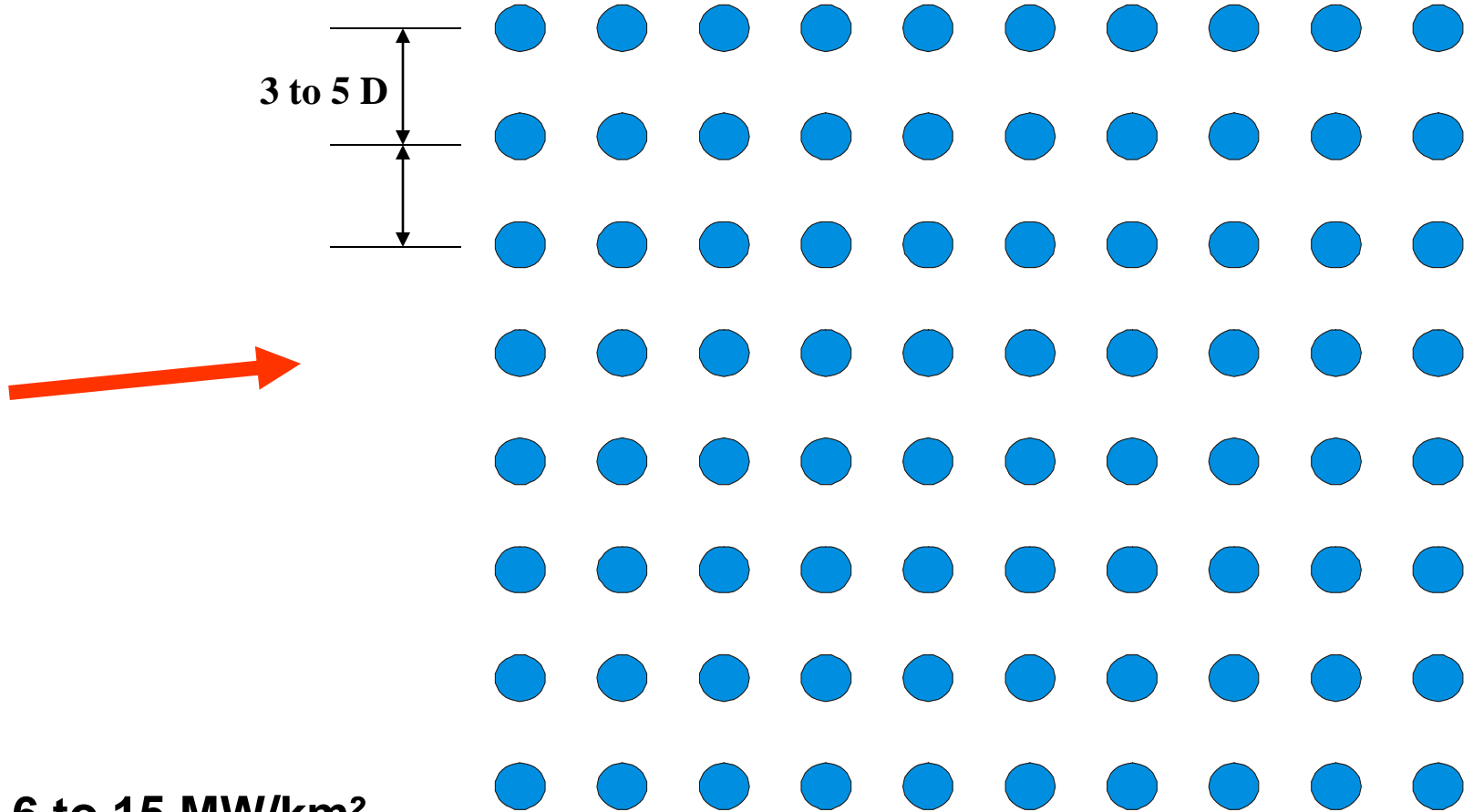
# Windparken

## Wind turbine zog



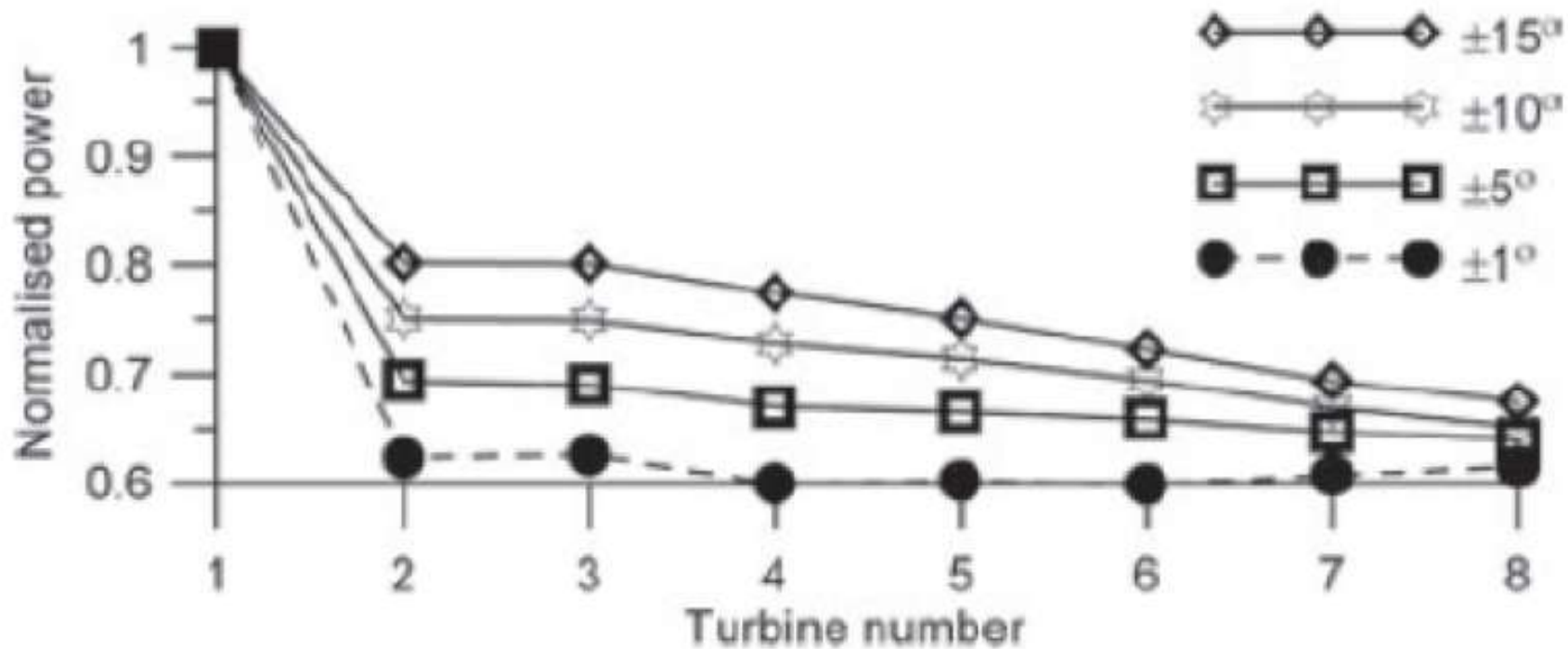
# Windparken

Lay out



## Windparken

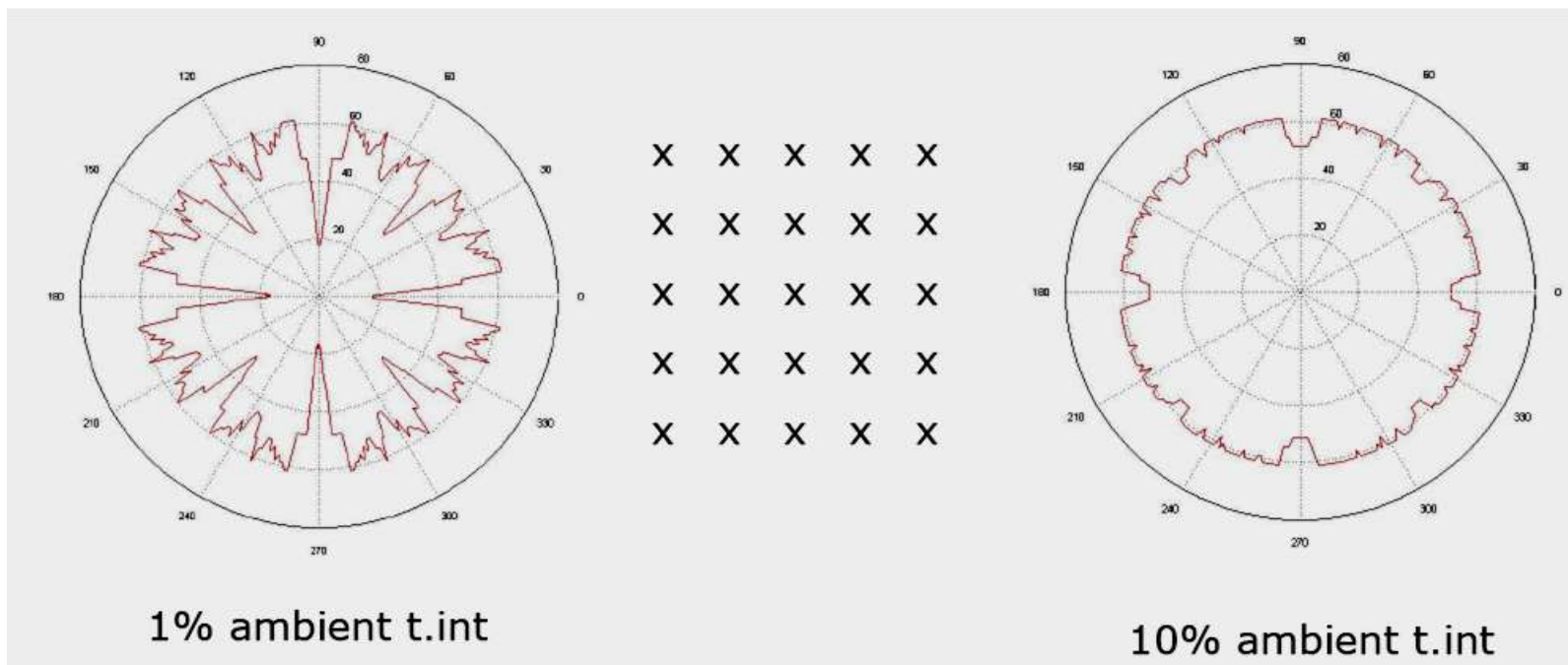
## Zogregeling





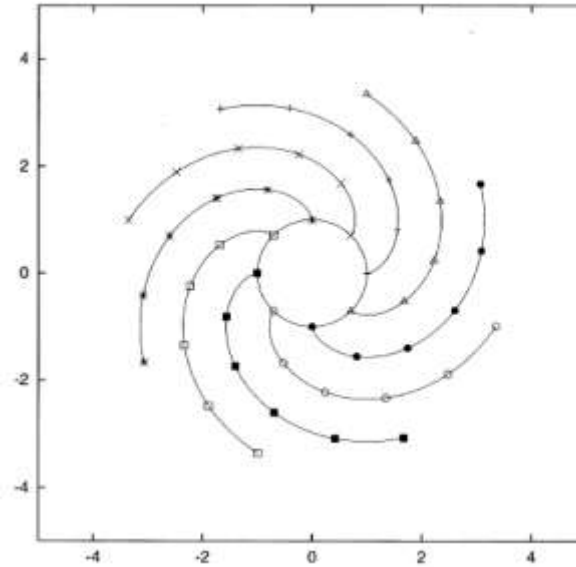
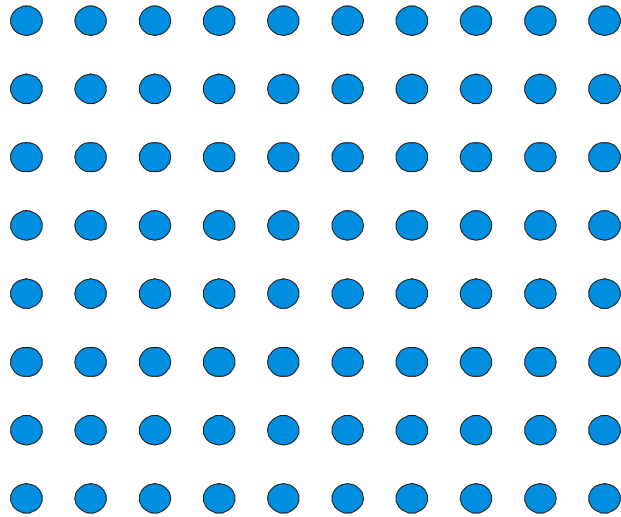
# Windparken

Wind farm output variabiliteit als functie van windrichting en turbulentie-intensiteit

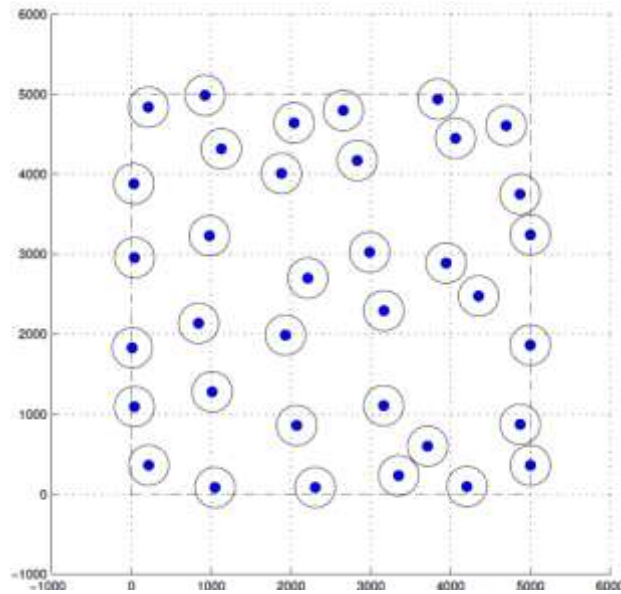


Torben J. Larsen, Risø-DTU

# Windparken

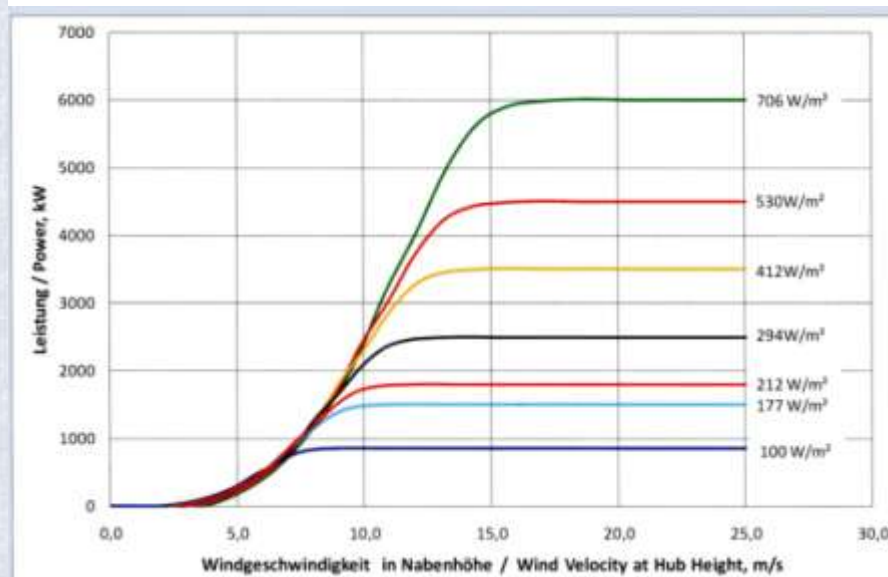
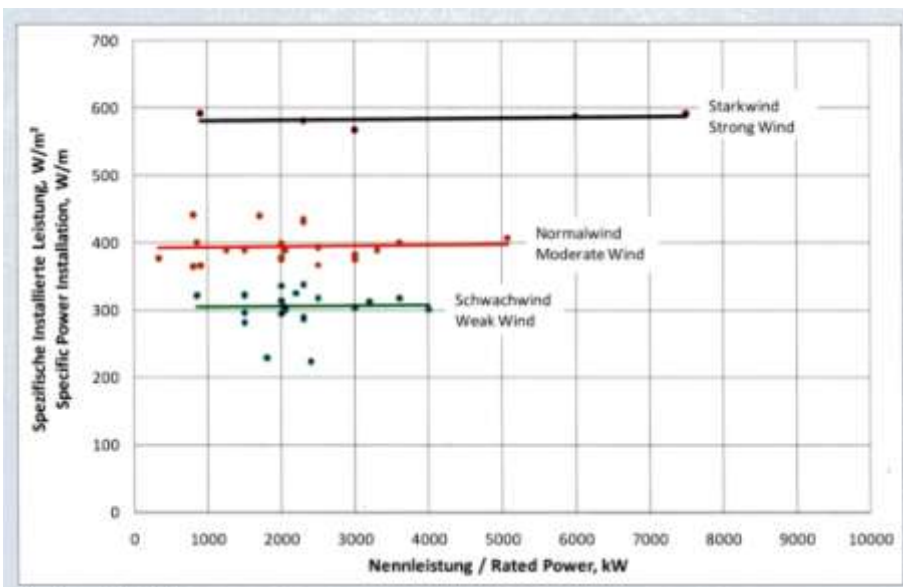


Torben J. Larsen, Risø-DTU



# Koppeling aan het net

## Wind turbine power rating

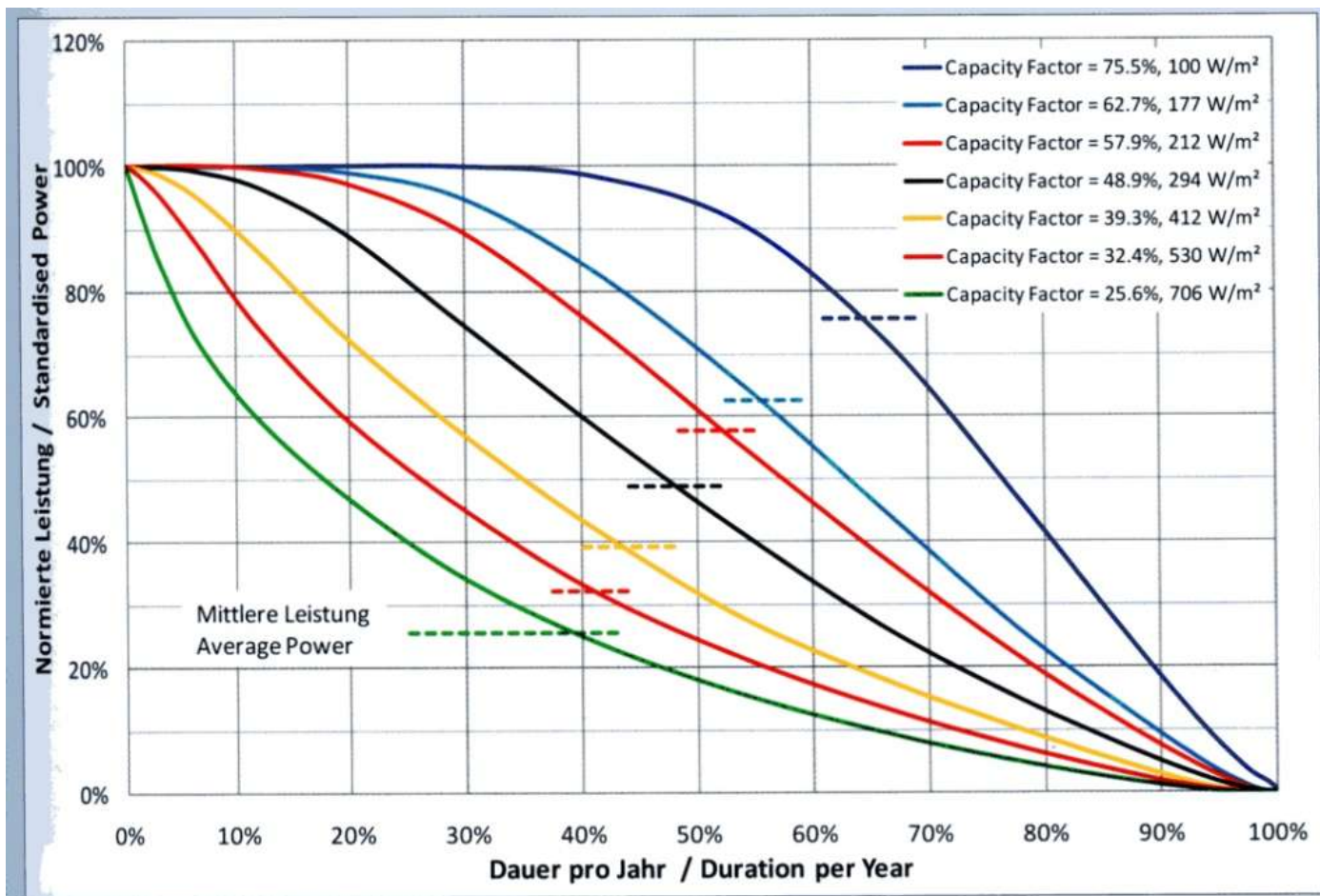


Source: J.P. Molly, DEWI

$$p = \frac{P_R}{A_{rotor}} \quad [W/m^2]$$

# Koppeling aan het net

## Wind turbine power rating and capacity factor

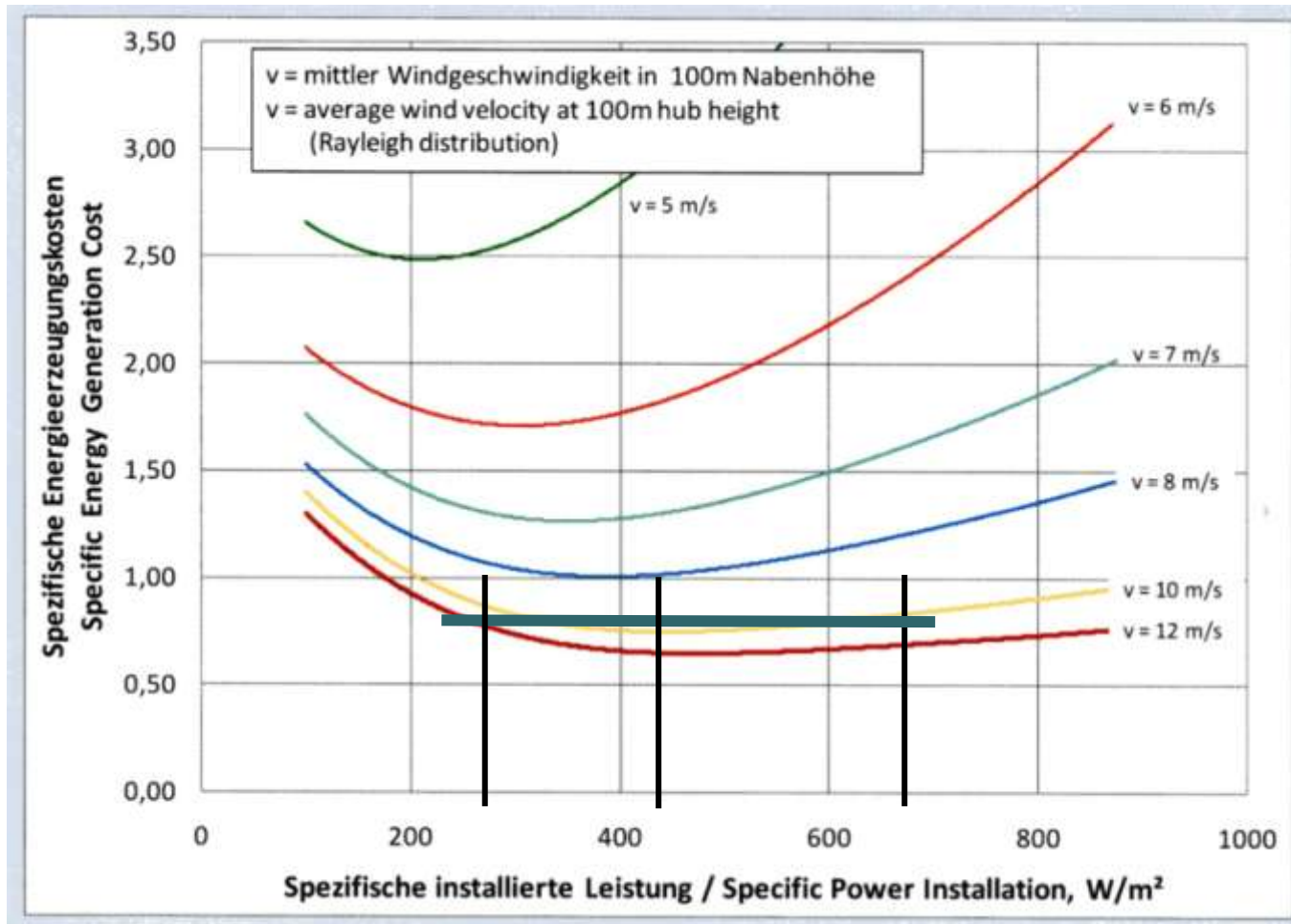


Source: J.P. Molly, DEWI

100 m hub height, Weibull  $k=2,92$ ,  $V_{ave} = 7,3$  m/s)

# Koppeling aan het net

## Cost of de-rating wind turbines

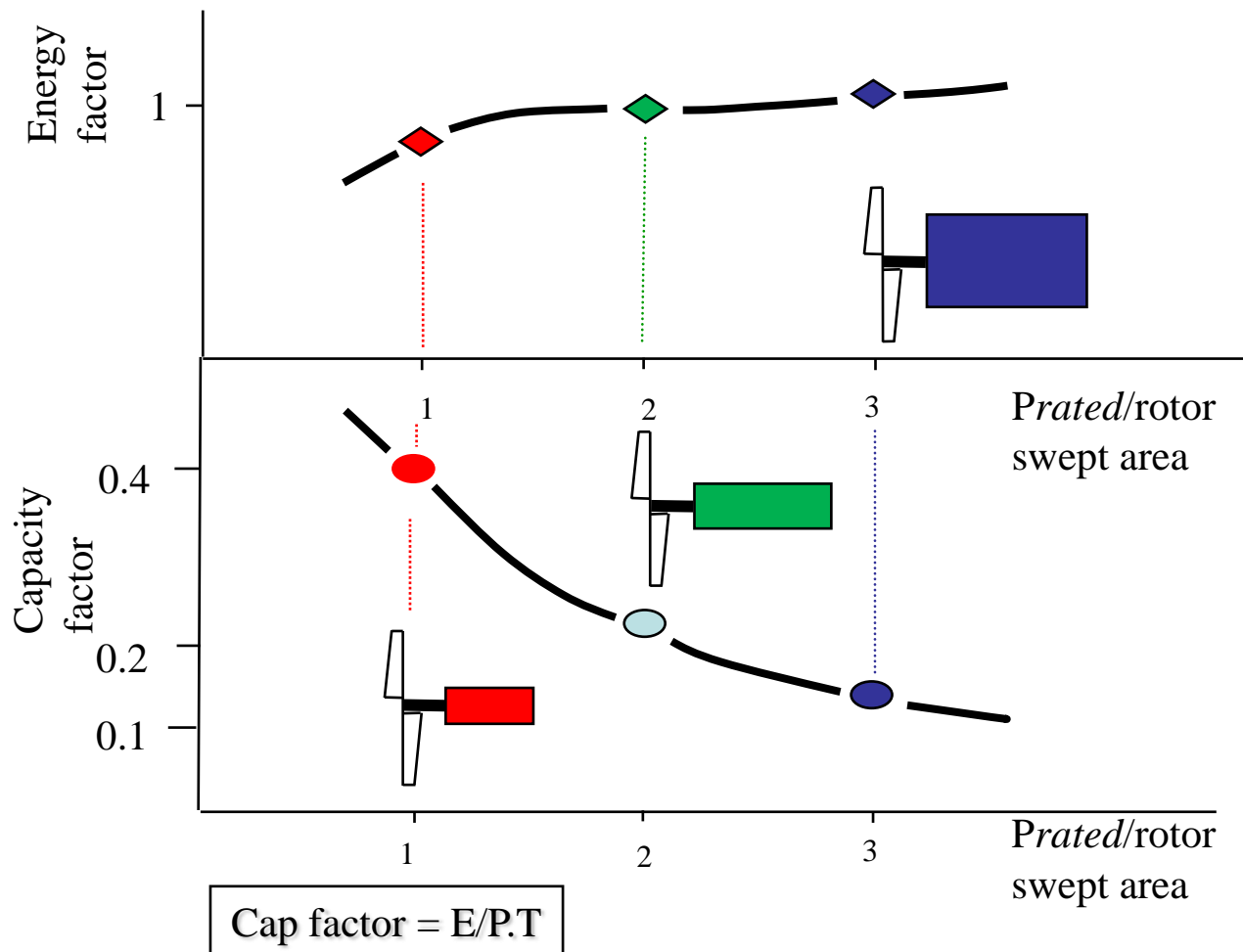


Source: J.P. Molly, DEWI

System rating: Low wind regime rating  
 Mechanical design: High wind speed regime

# Koppeling aan het net

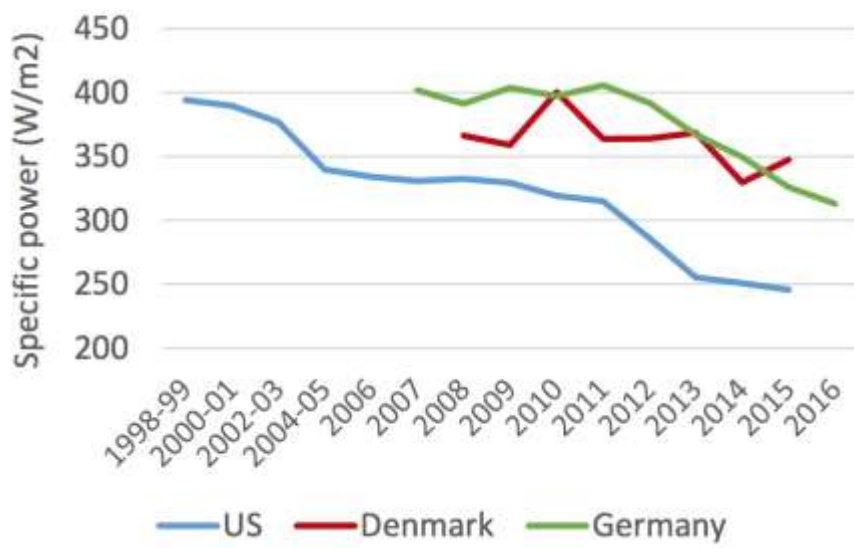
De windturbine karakteristieken: energie- en capaciteitsfactor (equivalente aantal vollasturen per jaar)





# Koppeling aan het net

### Lower specific power



### Higher hub heights



Bron: Hethey, Ea

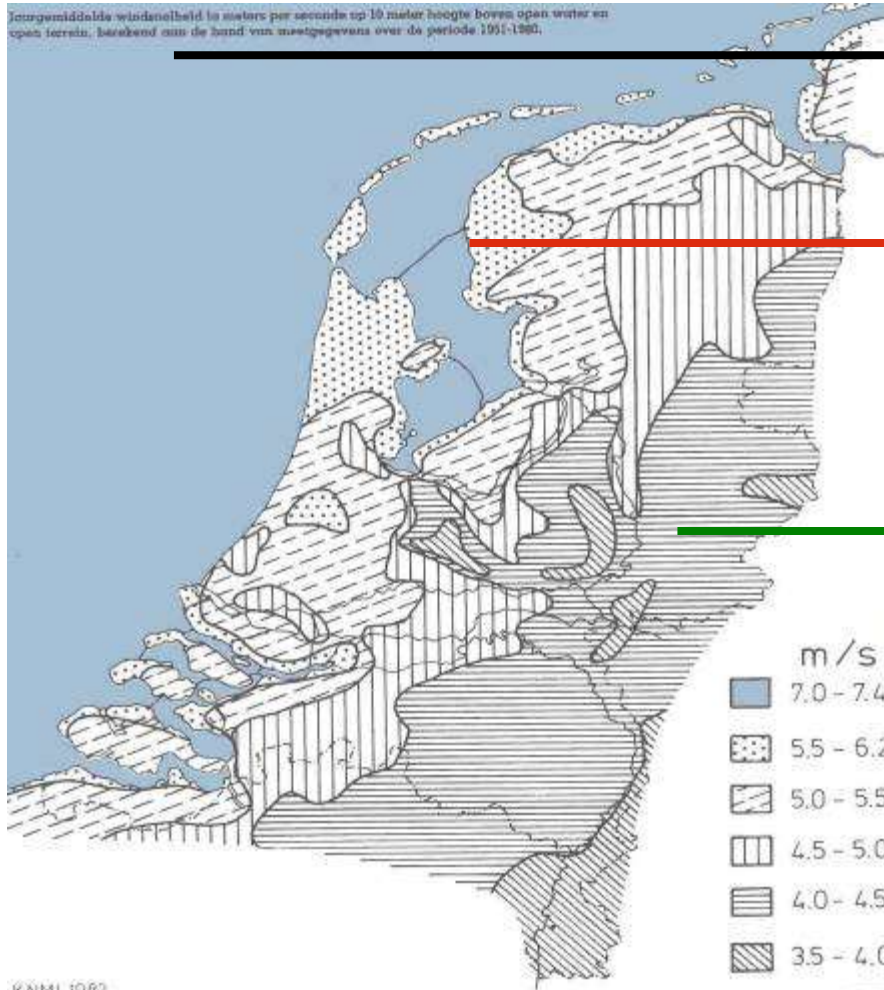
# Koppeling aan het net

	Make & Type	Rotordiameter [m]	Rated power [MW]	Specific power [W/m <sup>2</sup> ]
1	MHI-Vestas V164 8MW	164	8 +	380 +
2	Adwen	164	8+	380 +
3	Sinovel SL6000	155	6.0	318
4	Siemens SWT-8.0-154	154	8.0	430 offshore
5	ENERCON E-154 Medemblik	154	7.5	403 onshore
6	Senvion 6.2M152	152	6.15	339
7	GE Haliade 6MW (former Alstom)	150.8	6.0	336
8	MingYang (2blades) SCD 6.0MW	140	6.0	390
9	Dongfang/Hyundai	140	5.5	357
10	Adwen AD5-135	135	5	350

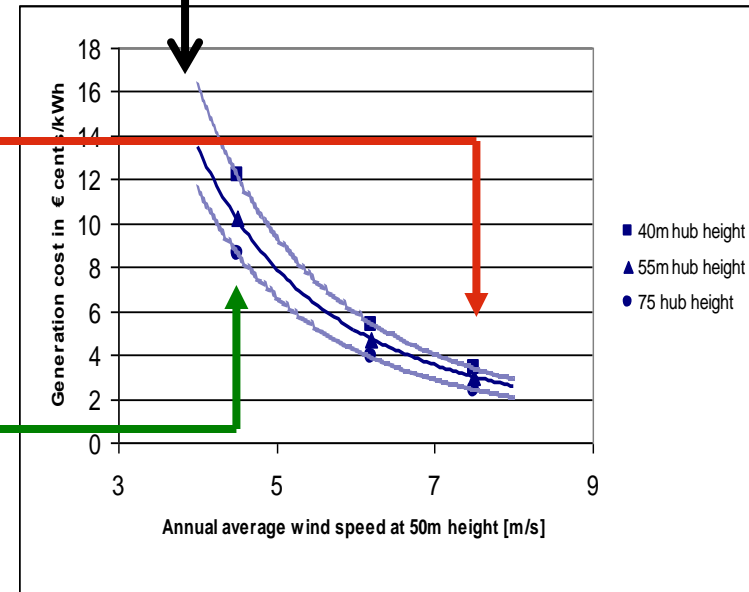
2016-10



# Geïnstalleerde capaciteit



Offshore

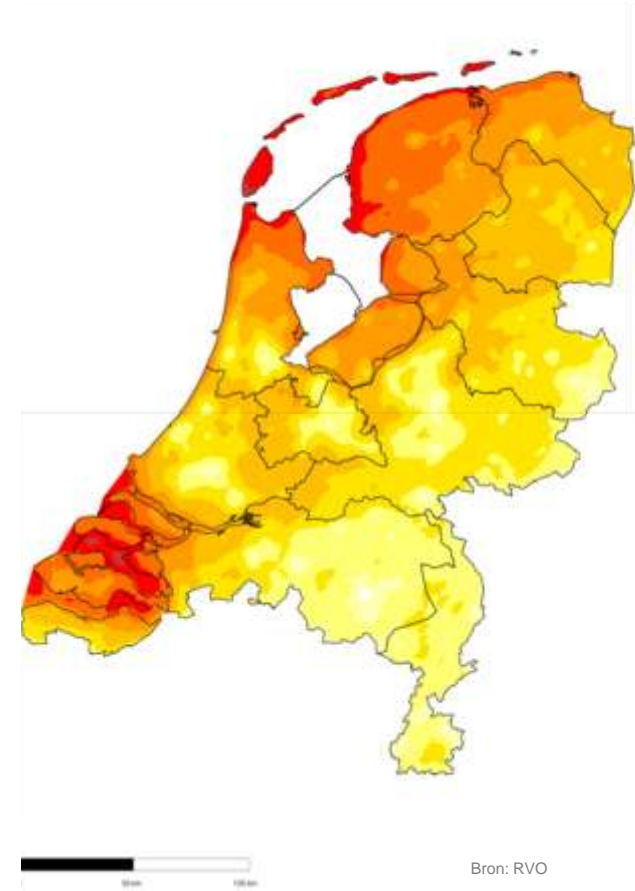
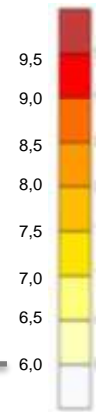
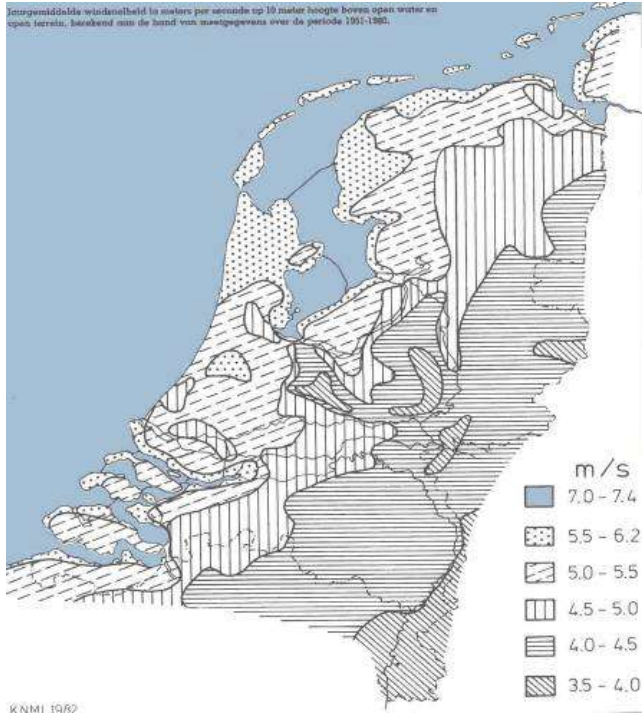


# Geïnstalleerde capaciteit

10 meter hoogte

= 0,3 X

100 meter hoogte



# Geïnstalleerde capaciteit

Eenheid [MW]

Eenheid [ $10^6$  MWh]



© Centraal Bureau voor de Statistiek, Den Haag/Heerlen 15-10-2016

© Centraal Bureau voor de Statistiek, Den Haag/Heerlen 15-10-2016

Bron: CBS

- Concentratie in windrijke gebieden
- MW's zeggen niet alles!!!



# Geïnstalleerde capaciteit



Urk, Westermeerwind



© Jos Beurskens

Urk, afgebroken



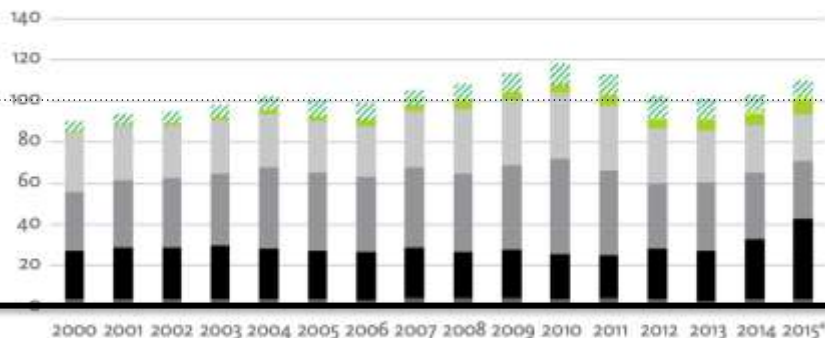
Zuidlob-Vattenfall-NUON



# Geïnstalleerde capaciteit

**Figuur 4.3** Ontwikkeling van de elektriciteitsproductie naar energiedrager 2000-2015.

Elektriciteitsproductie (terawattuur)



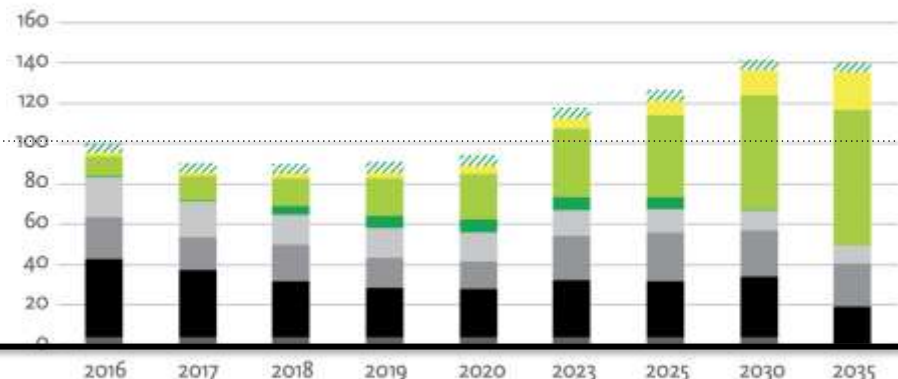
- Nucleair
- Centraal aardgas & overig fossiel
- Wind
- ◁ Overig<sup>b</sup>
- Steenkool
- Decentraal aardgas & overig fossiel
- Zon-PV

a 2015 zijn voorlopige cijfers

b afval, waterkracht, biomassa stand alone, biomassa meestook, stoom, voedingswater, elektriciteit uit gasexpansie

**Figuur 4.4** Ontwikkeling van de elektriciteitsproductie naar energiedrager in de periode 2016-2035.

Elektriciteitsproductie (terawattuur)



- Nucleair
- Gascentrales
- Meestook biomassa
- Zon-PV
- Kolen
- Gas decentraal
- Wind
- ▷ Overig<sup>a</sup>

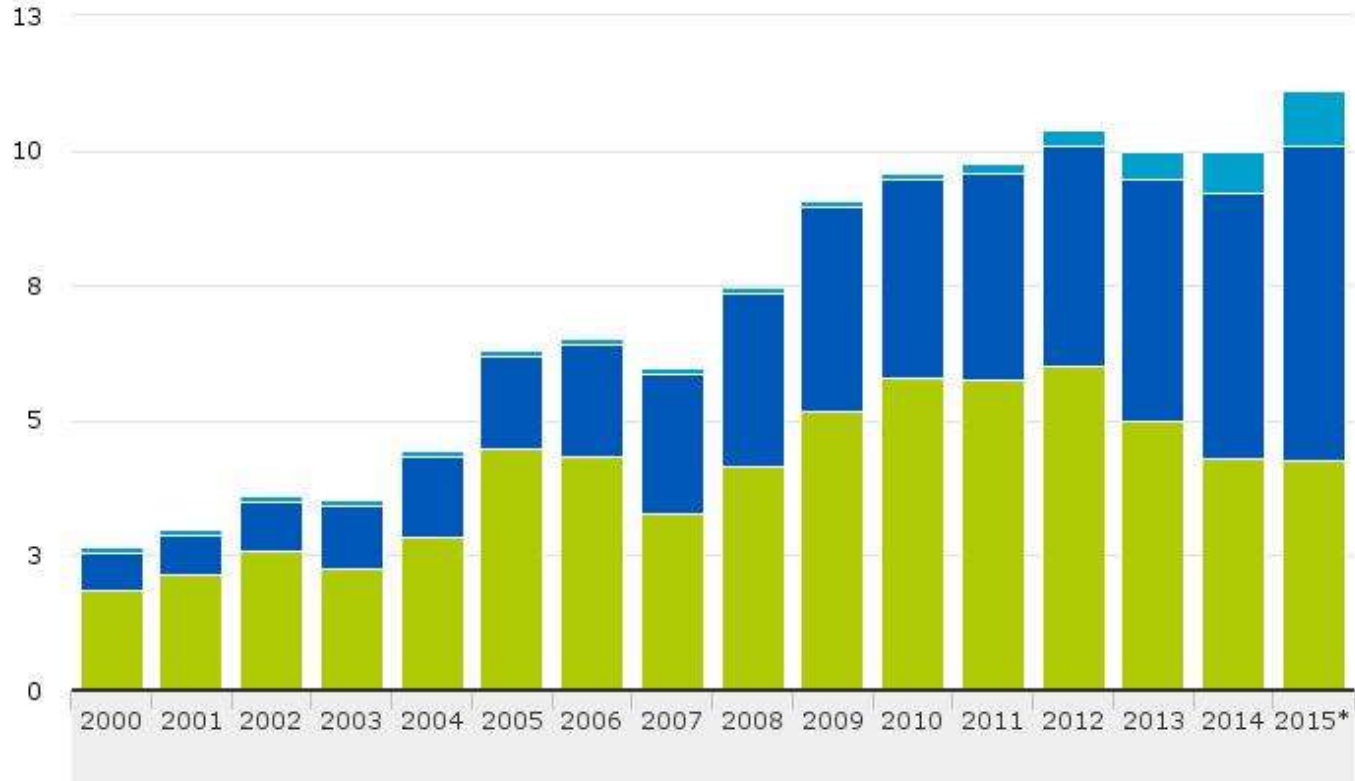
a afval, waterkracht, biomassa stand alone

Bron: NEV

# Geïnstalleerde capaciteit

## Productie hernieuwbare elektriciteit

% van totaal verbruik



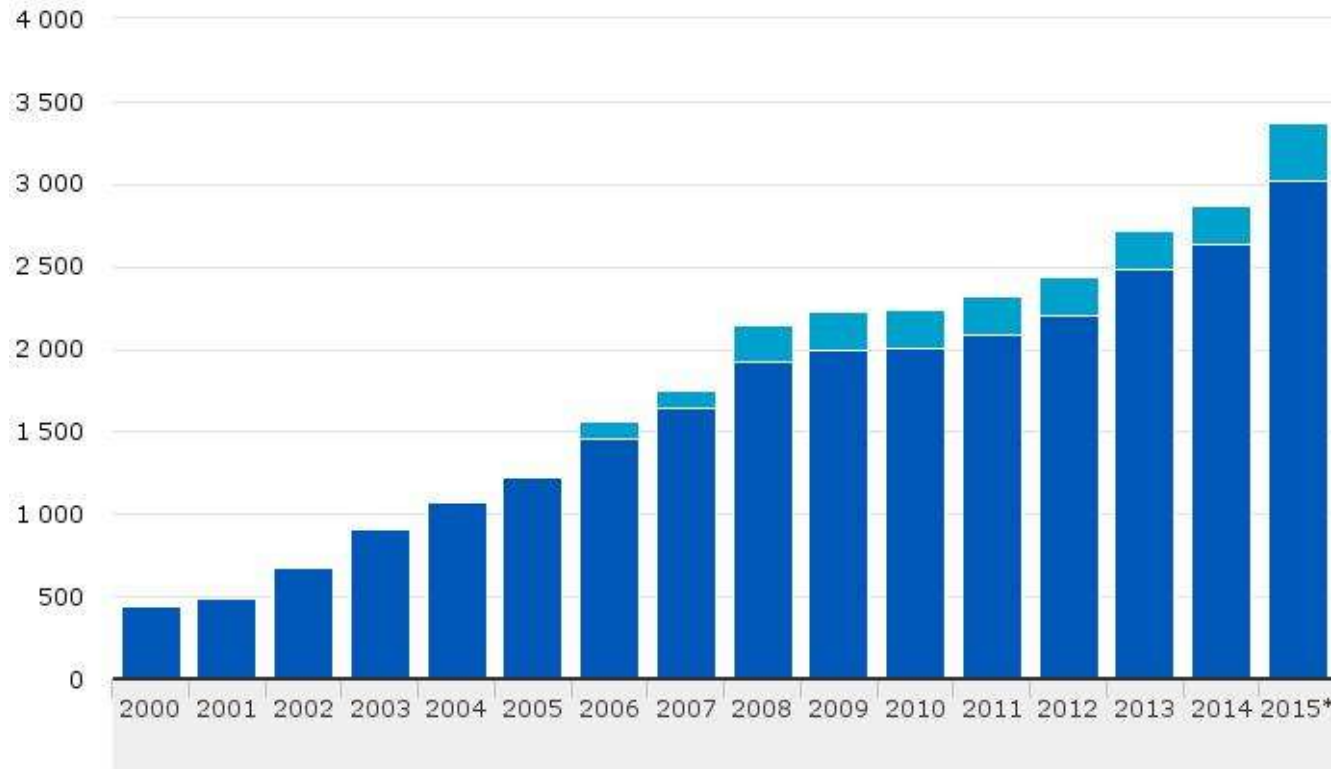
Waterkracht en zon Wind Biomassa

Bron: NEV

# Geïnstalleerde capaciteit

## Capaciteit windenergie

Megawatt



Op zee Op land

Bron: NEV

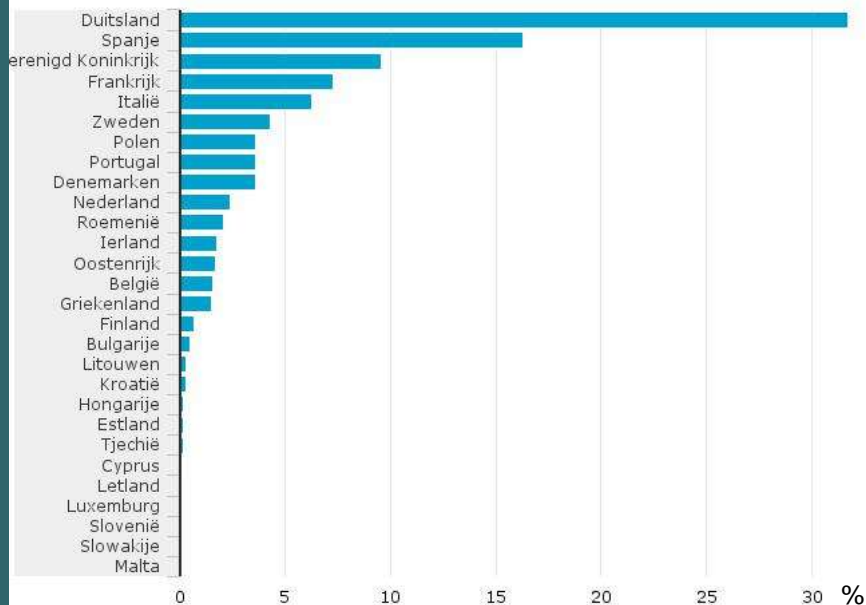
# Geïnstalleerde capaciteit

2015	Installed power [MW]	Bestreken rotoroppervlak [m <sup>2</sup> x 1000]	Jaarlijkse elektriciteitsproductie [PJ <sub>e</sub> ]	% van landelijk elektriciteitsverbruik
Op land	3031	6952	23,2	6,4
Op zee	357	954	4,1	1,1
Totaal	3388	7906	27,3	7,6

Bron: CBS/Beurskens

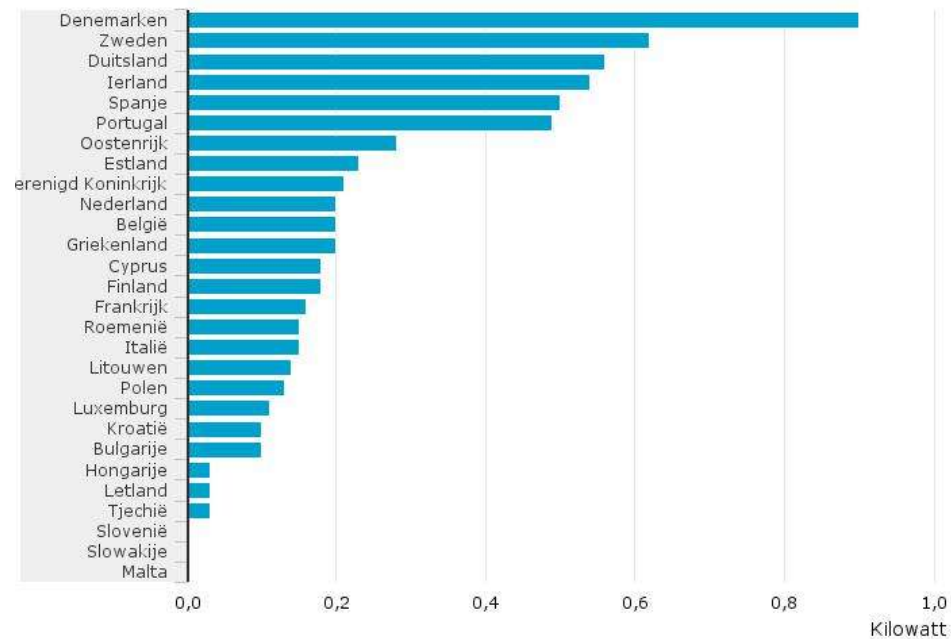
# Geïnstalleerde capaciteit

Aandeel windenergievermogen in EU-28, 2015



Bron: EWEA

Capaciteit windenergie per inwoner, 2015



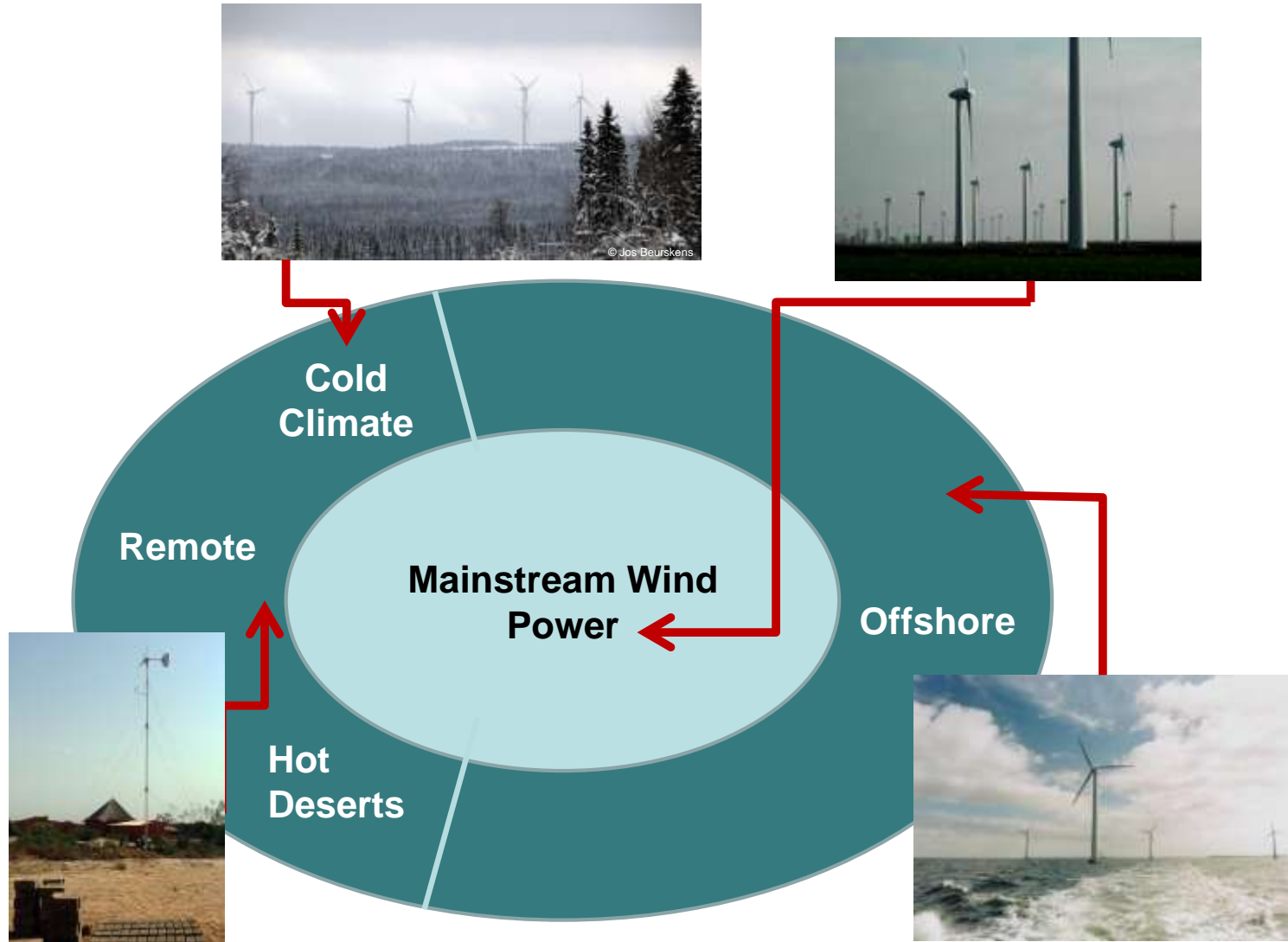
Bron: EWEA en Eurostat

Nederland: 0,2 kW/inwoner (nr. 11)

Denemarken; 0,9 kW/inwoner (nr. 1)

Een mens verbruikt ongeveer 0,1 kW continu

# Extreme klimaten



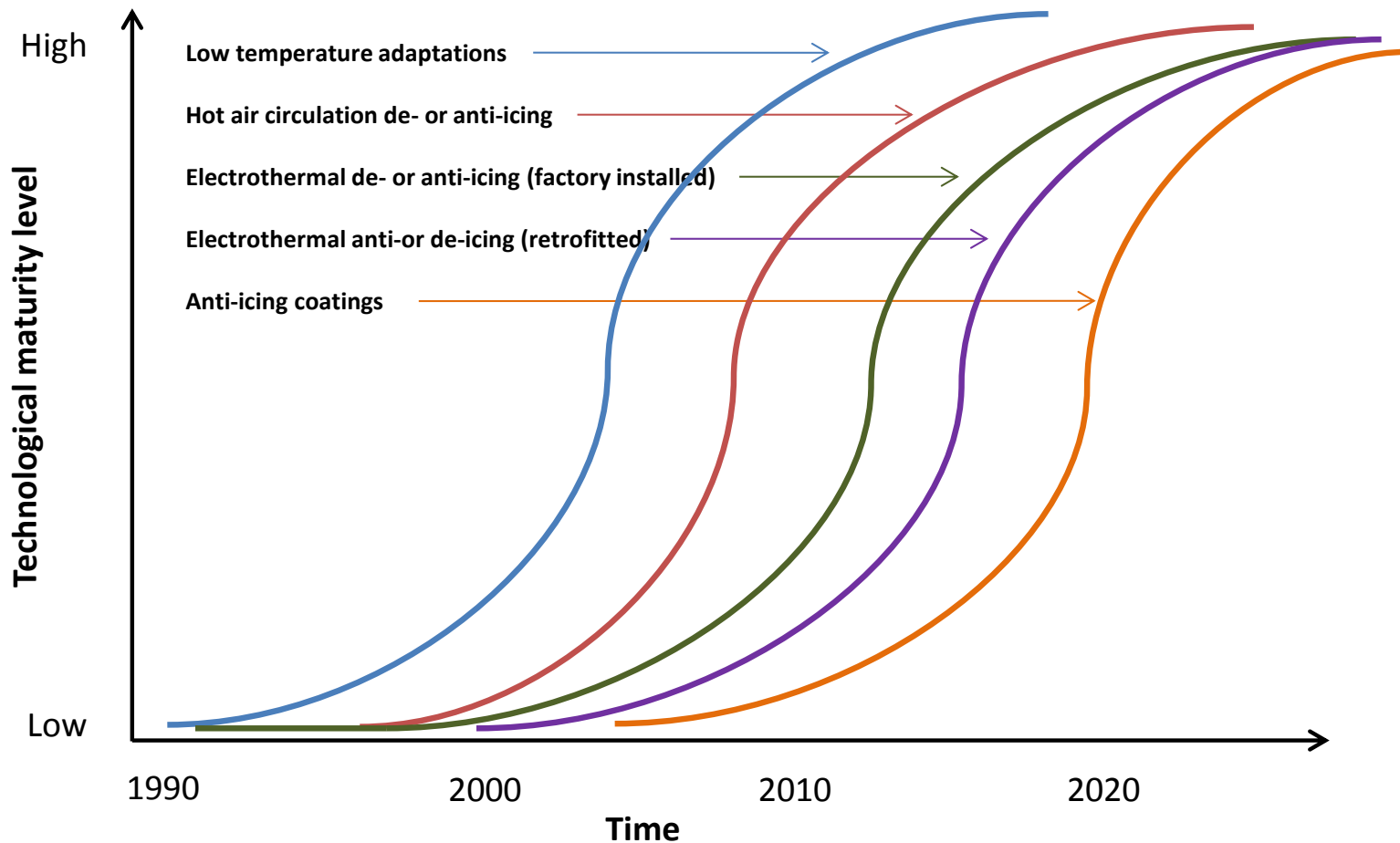


# Extreme klimaten

Annual Energy production (P90)	100%
No operation during icing	72%
Maximum Icing protection	99%

VTT, Winterwind 2013

## Technology maturity curves for Cold Climate adaptations

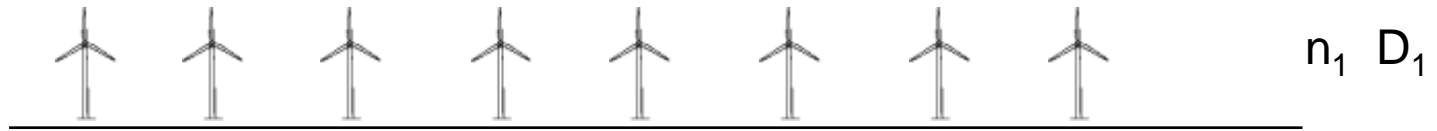


# Extreme klimaten

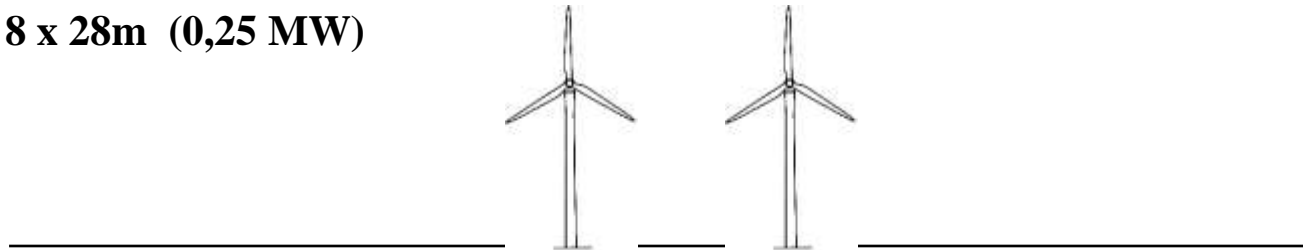


© Jos Beurskens

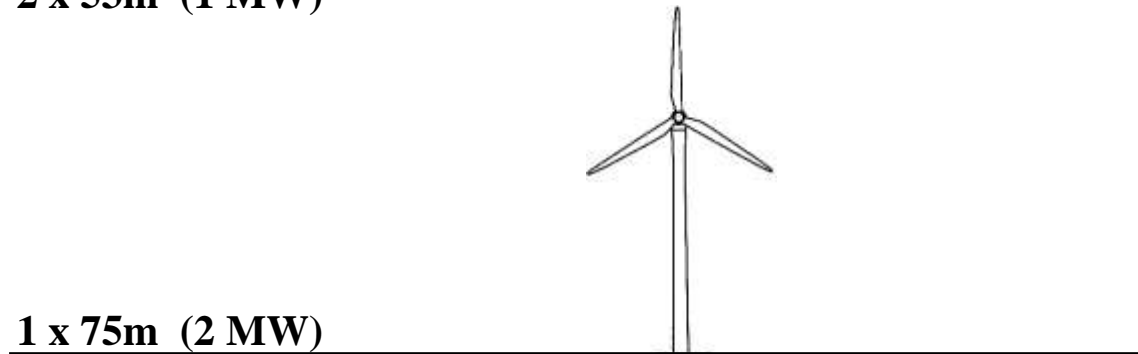
# Acceptatie & Impact (visuele impact, opschalen)



**8 x 28m (0,25 MW)**



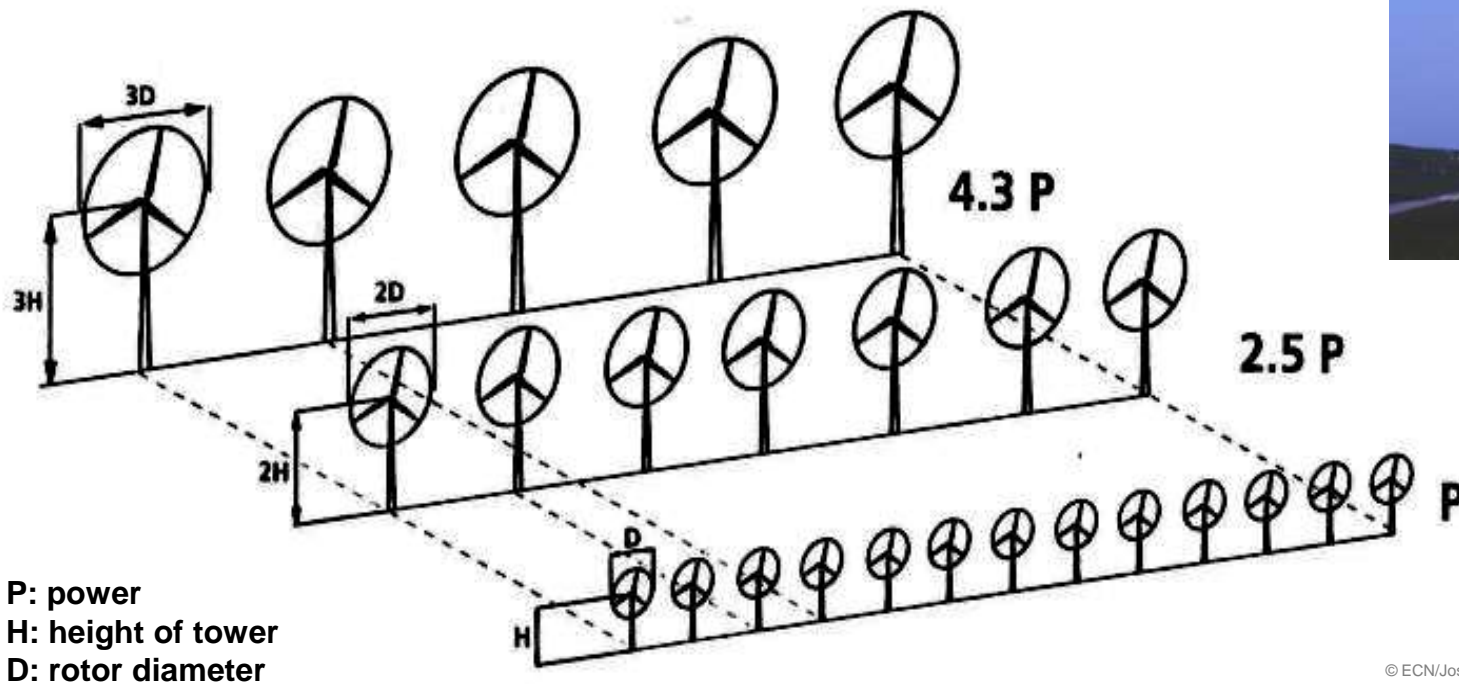
**2 x 53m (1 MW)**



**1 x 75m (2 MW)**

$$\frac{n_1}{n_2} = \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2$$

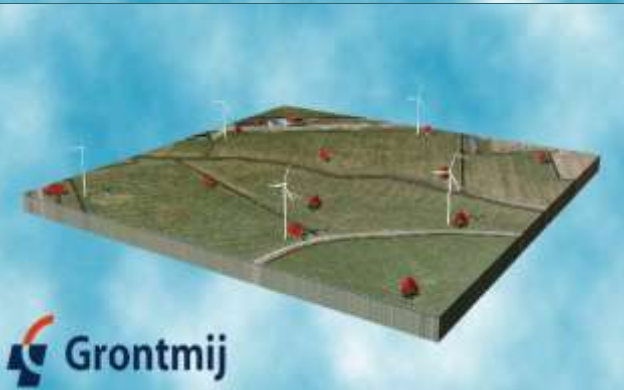
# Acceptatie & Impact (visuele impact, opschalen)



© ECN/Jos Beurskens

# Acceptatie & Impact (visuele impact, opschalen)

## Voor- en nadelen opschalen



Rotordiameter:	x 2	
Aantal turbines:	x 1/5	(+)
Toerental:	x 1/2	(+)
Zichtbaarheidsafstand:	x 2	(-)



= 10 x





# Acceptatie & Impact (opschalen)

$$\lambda = \frac{V_{\text{tip}}}{V_{\text{wind ongestoord}}} = \frac{\Omega \cdot R}{V_{\text{wind ongestoord}}}$$

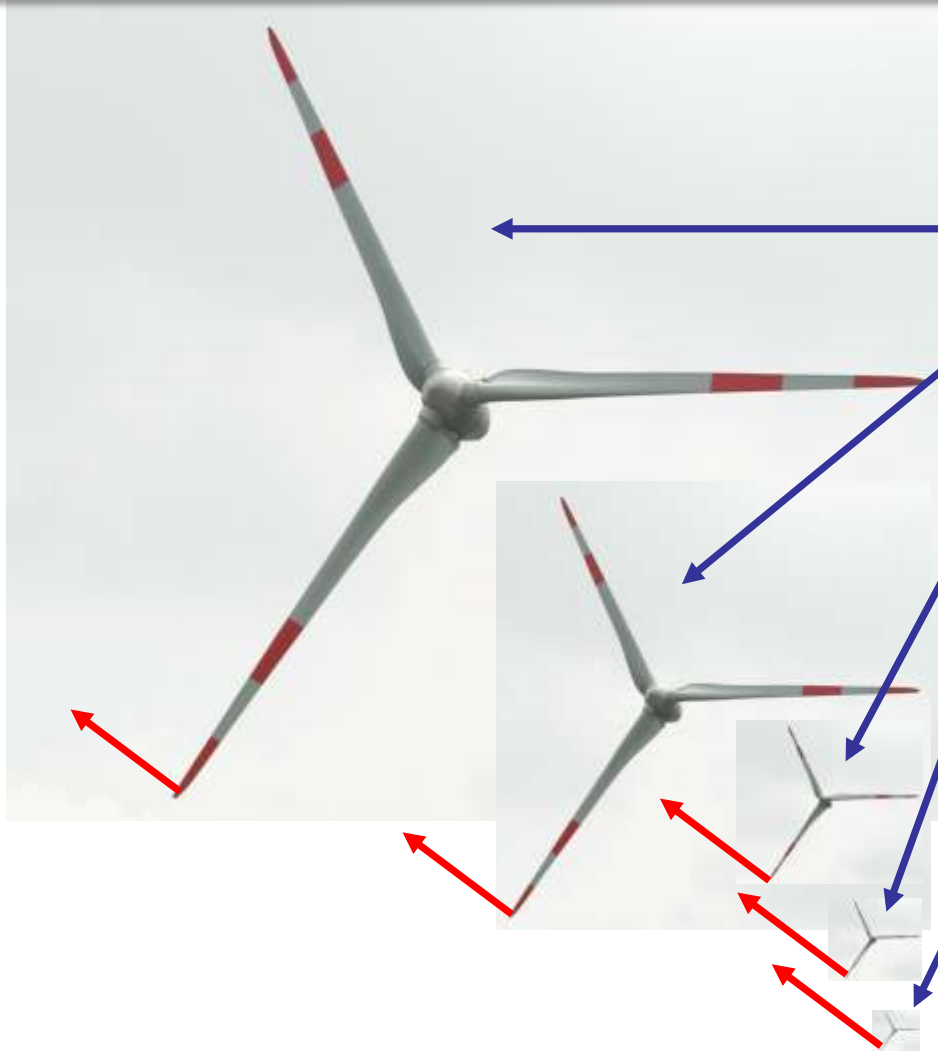
$$\Omega = \frac{\lambda \cdot V_{\text{wind ongestoord}}}{R}$$

$$\Omega \sim \frac{1}{R}$$



Lager toerental vermindert negatief visuele impact

# Acceptatie & Impact (veiligheid voor omgeving)



D [m]	P	Omw/s	Omw/min
120	5 MW	0,13	7,5
60	1,2 MW	0,26	15,3
20	150 kW	0,75	46
10	35 kW	1,53	92
2	1,5 kW	7,6	460

Figures apply for a wind speed of approximately 8 m/s; Beaufort 4/5.

Rotational speed decreases with increasing rotor diameter  
(Same number of blades and wind speed)

# Acceptatie & Impact (veiligheid voor omgeving)



# Acceptatie & Impact (energieterugverdiensijd)

Windenergie is een van de hoogstscorende energieomzettingstechnieken.

Material	Weight: [Tons / MW]
Concrete	456
Steel/iron	134
GRP	12
Copper	3
Gravel	3
Aluminum	< 2
Lubricants	< 1
PET/PVC/PUR	< 1
Other	<< 1
<b>Total</b>	<b>612</b>

Process	Energy needed [MWh/ MW]
Manufacturing	880
Installation	220
O&M	250
Scrapping (net)	-100
<b>Total</b>	<b>1250</b>

Energy payback time:

**4 to 6 months !!**

(2 to 3 months on primary energy basis)

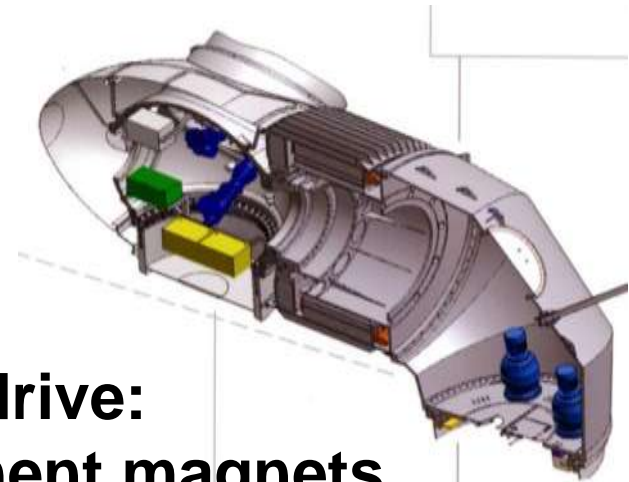
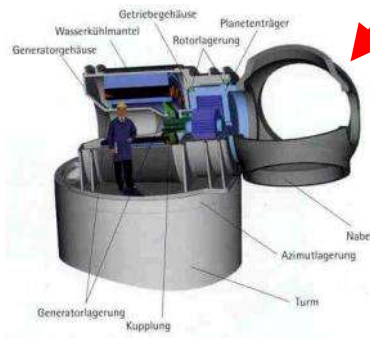


**Dank u voor uw aandacht !**



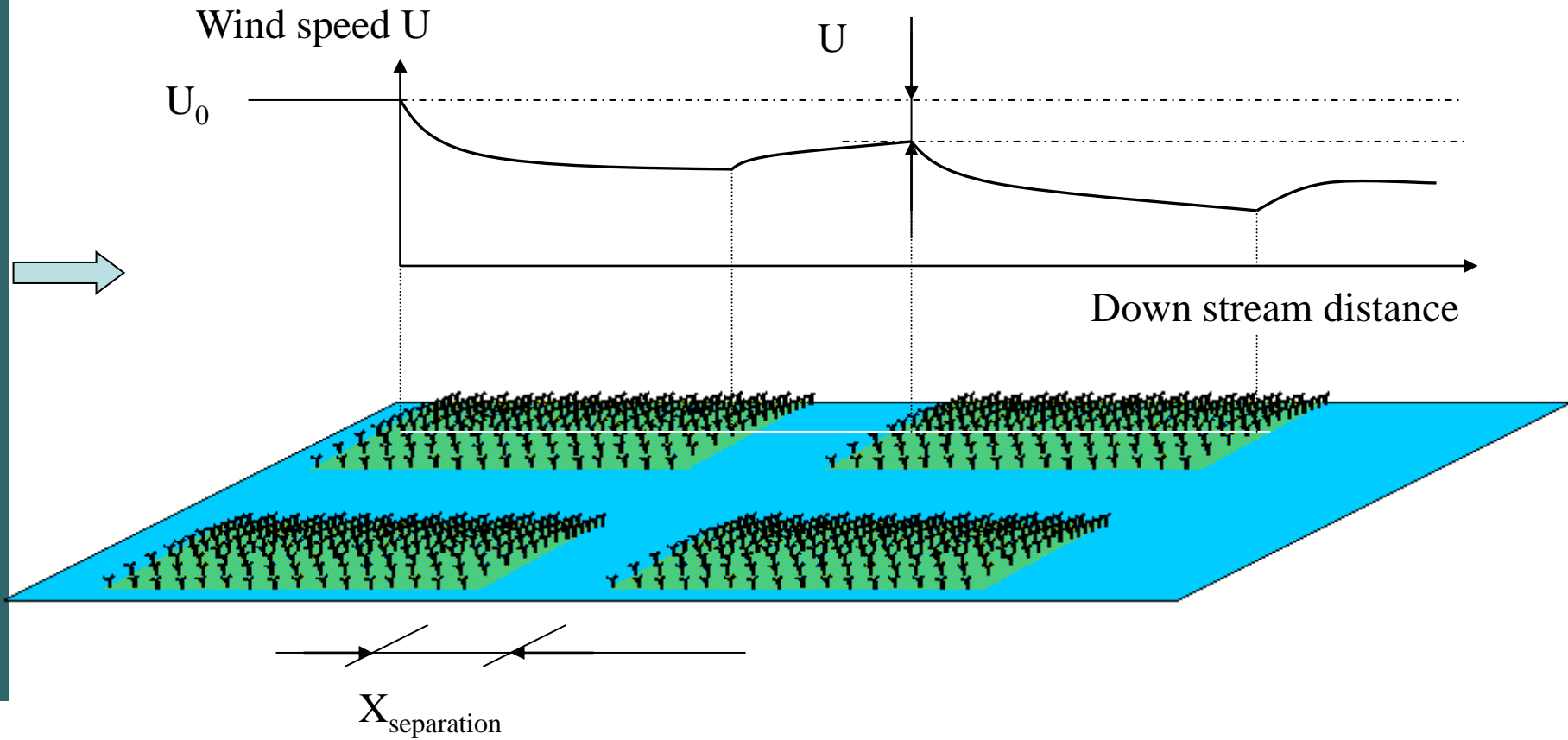


# de Windturbine



**Direct drive:**  
**Permanent magnets**  
 (Scarcity of Neodymium?)  
**HTS** (high temperature super conductivity)

# Windparken



Bron:Risø

# Geïnstalleerde capaciteit

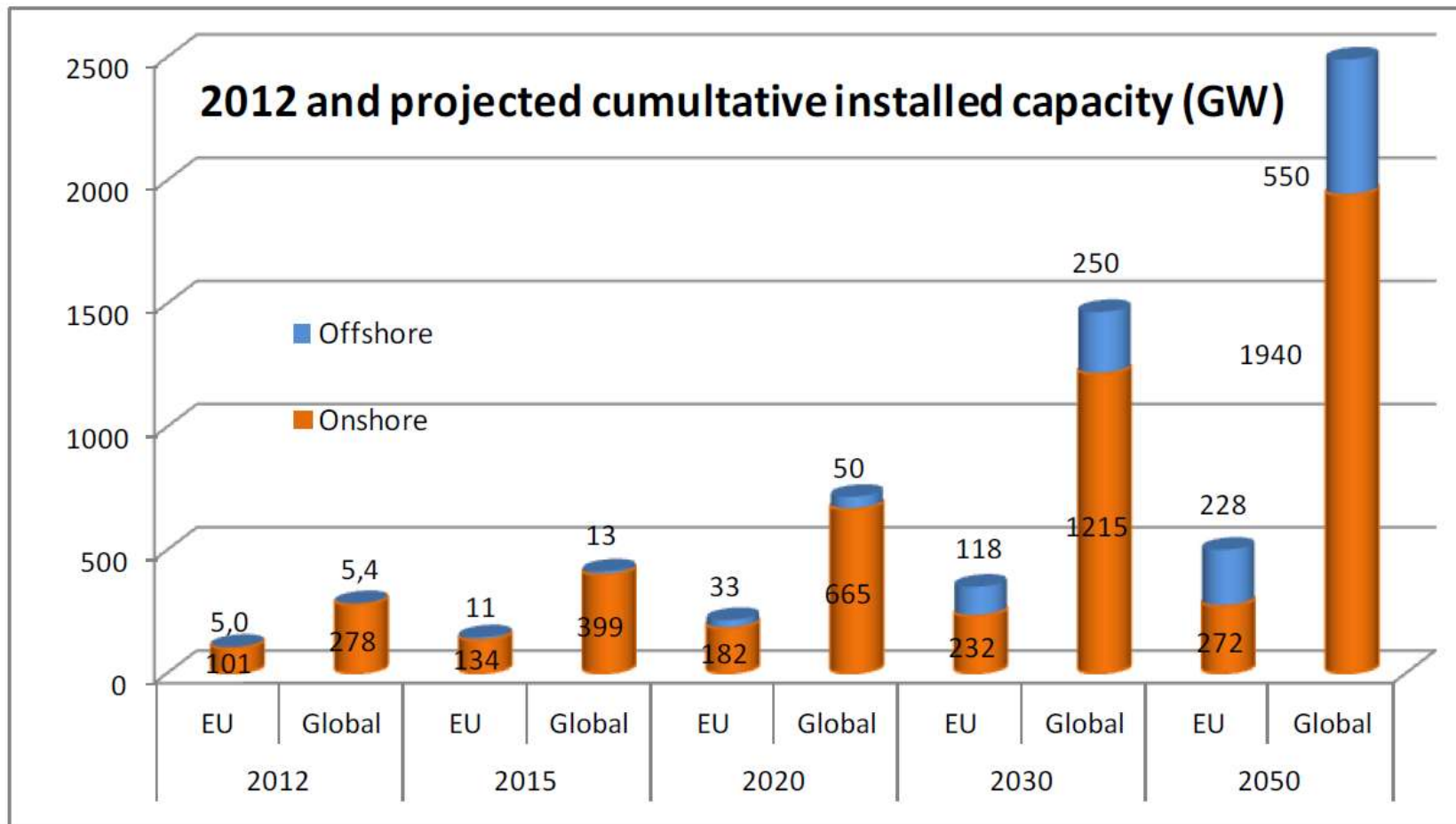
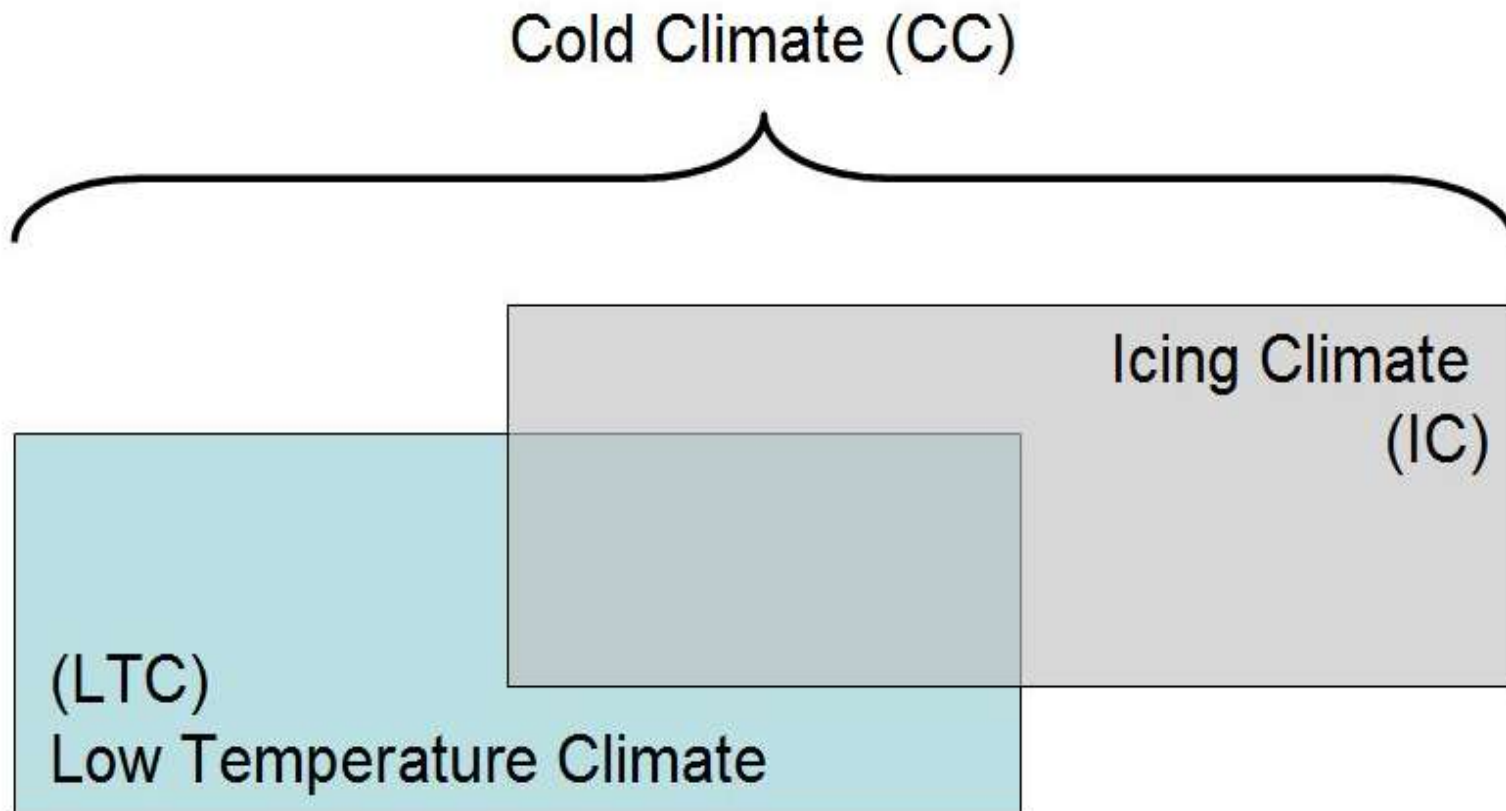


Figure 15: Projected cumulative installed capacity (GW). Source: JRC

# Extreme klimaten



Source: *Expert Group Study on Recommended Practices for Wind Energy Projects in Cold Climates. IEA Wind Recommended practices no. 13. 2012.*

Cold Climate wind energy about 25% of global wind power, but growth potential is similar to world growth rate:

Sufficient track records for investors

&

Enormous room for application of innovations for cost reduction