

Faculteit Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek

TU Delft

Windenergie Groep

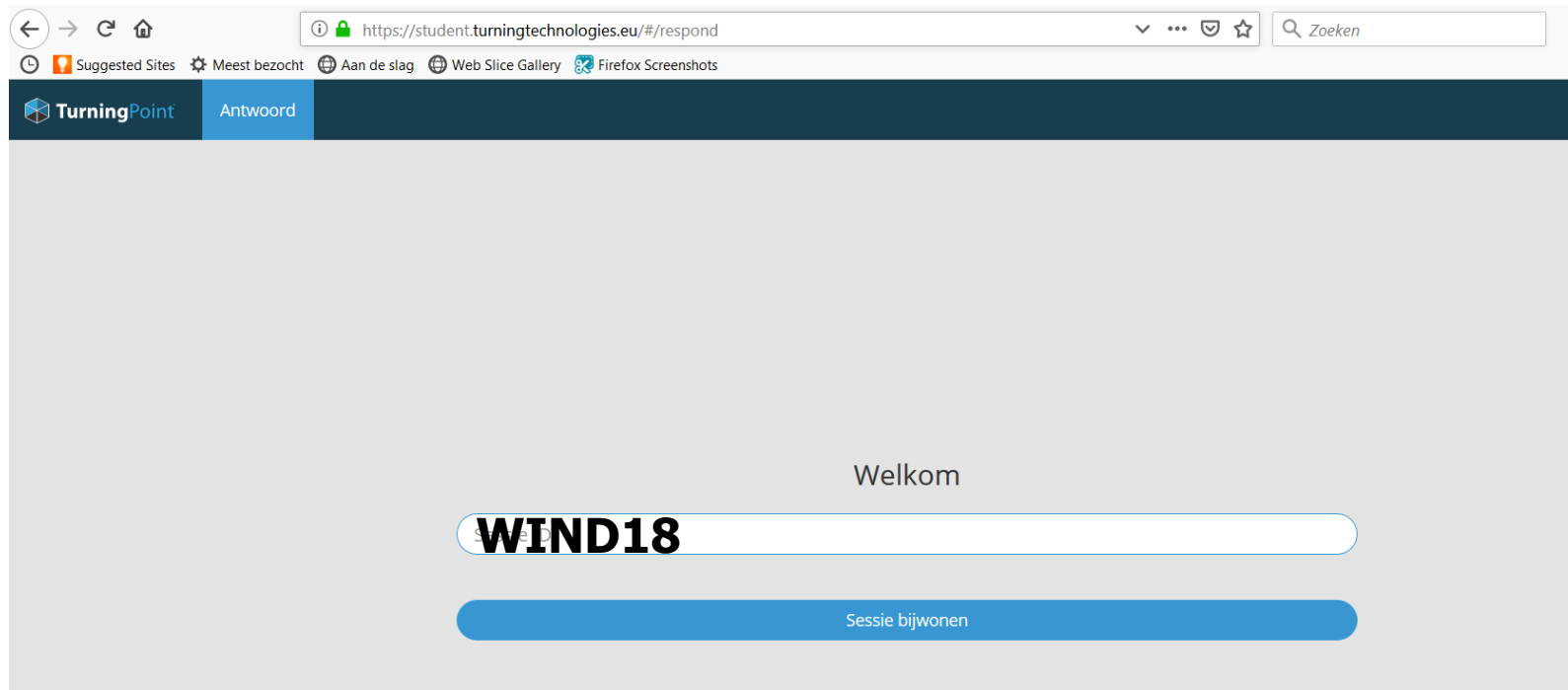
Prof.dr. Gerard J.W. van Bussel
Leerstoel Windenergie

TU Delft



**Windmolens, techniek
uit de oude doos?**

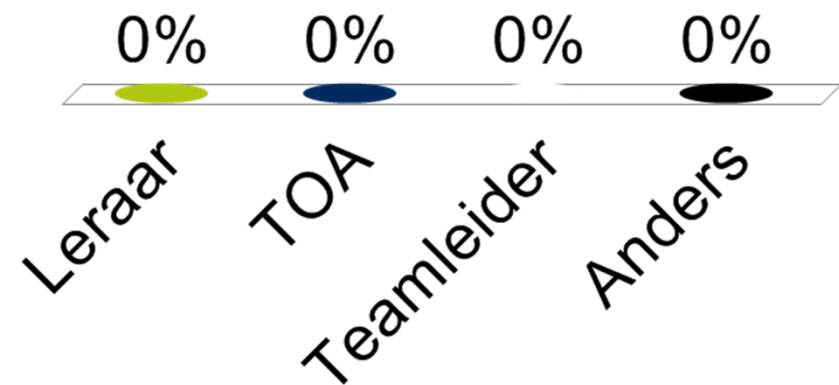
<https://responseware.turningtechnologies.eu/>





Test: Bent u leraar, TOA of teamleider?

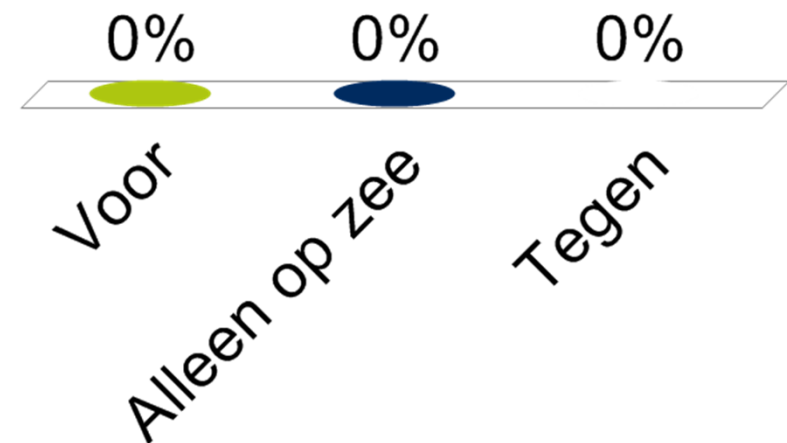
- A. Leraar
- B. TOA
- C. Teamleider
- D. Anders





Bent u voor of tegen het gebruik van meer windenergie in Nederland?

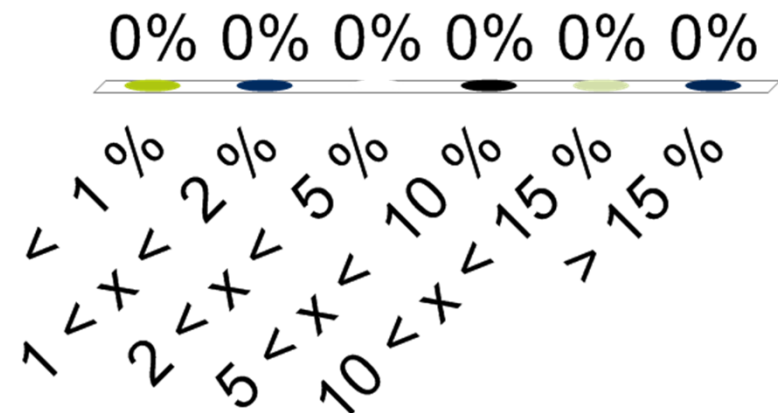
- A. Voor
- B. Alleen op zee
- C. Tegen



?

Hoeveel draagt windstroom bij aan de elektriciteitsvoorziening in Nederland?

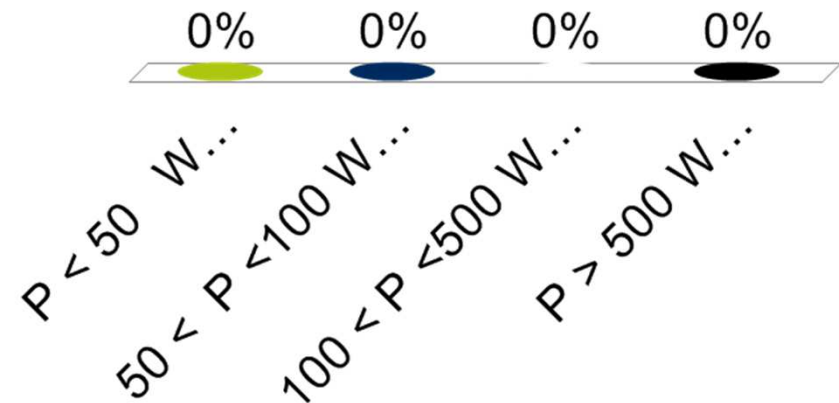
- A. $< 1 \%$
- B. $1 < x < 2 \%$
- C. $2 < x < 5 \%$
- D. $5 < x < 10 \%$
- E. $10 < x < 15 \%$
- F. $> 15 \%$



?

Hoeveel wind komt er (gemiddeld) binnen aan de kust in NL?

- A. $P < 50 \text{ Watt / m}^2$
- B. $50 < P < 100 \text{ Watt / m}^2$
- C. $100 < P < 500 \text{ Watt / m}^2$
- D. $P > 500 \text{ Watt / m}^2$



Windturbines 25 jaar geleden



Diameter gelijk aan “oudhollandse” molens.

~ 30 meter => 700 m² => 100kW (gemiddeld)

Moderne grote landturbines

- 100 m ashoogte
- 100 - 130 m Ø
- 2 - 4 MW

Diameter 100 meter $\Rightarrow$ 8000 m² $\Rightarrow$ 1,1MW (gemiddeld)

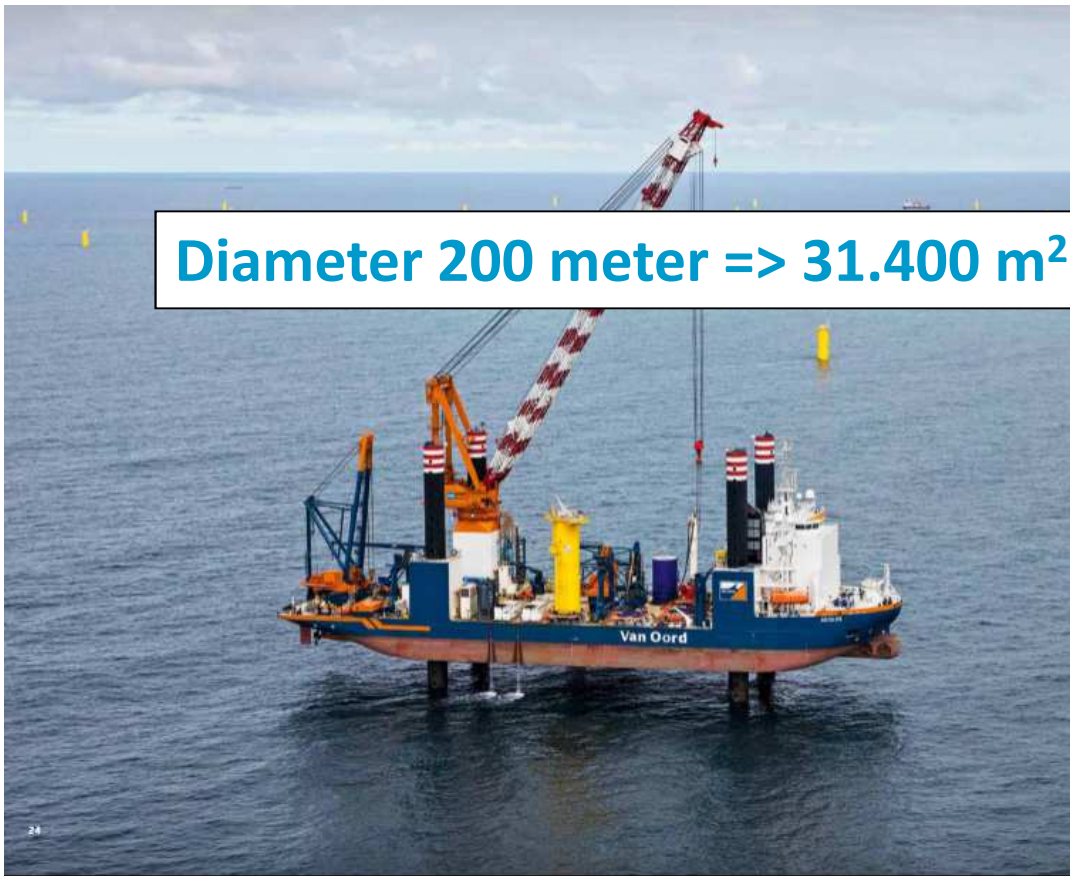


Binnenkort op Zee

- 150 m ashoogte
- 180 - 220 m Ø
- 8-12 MW



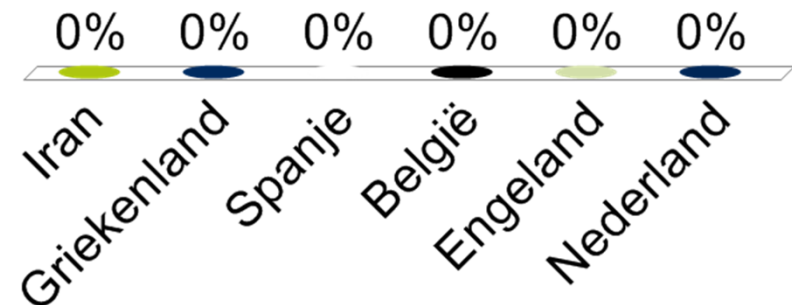
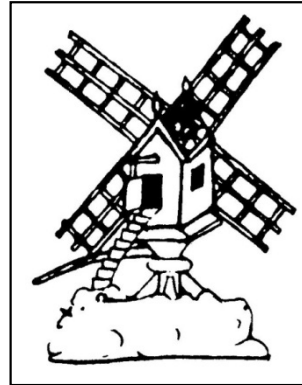
Diameter 200 meter => 31.400 m² => 4,7 MW (gemiddeld)



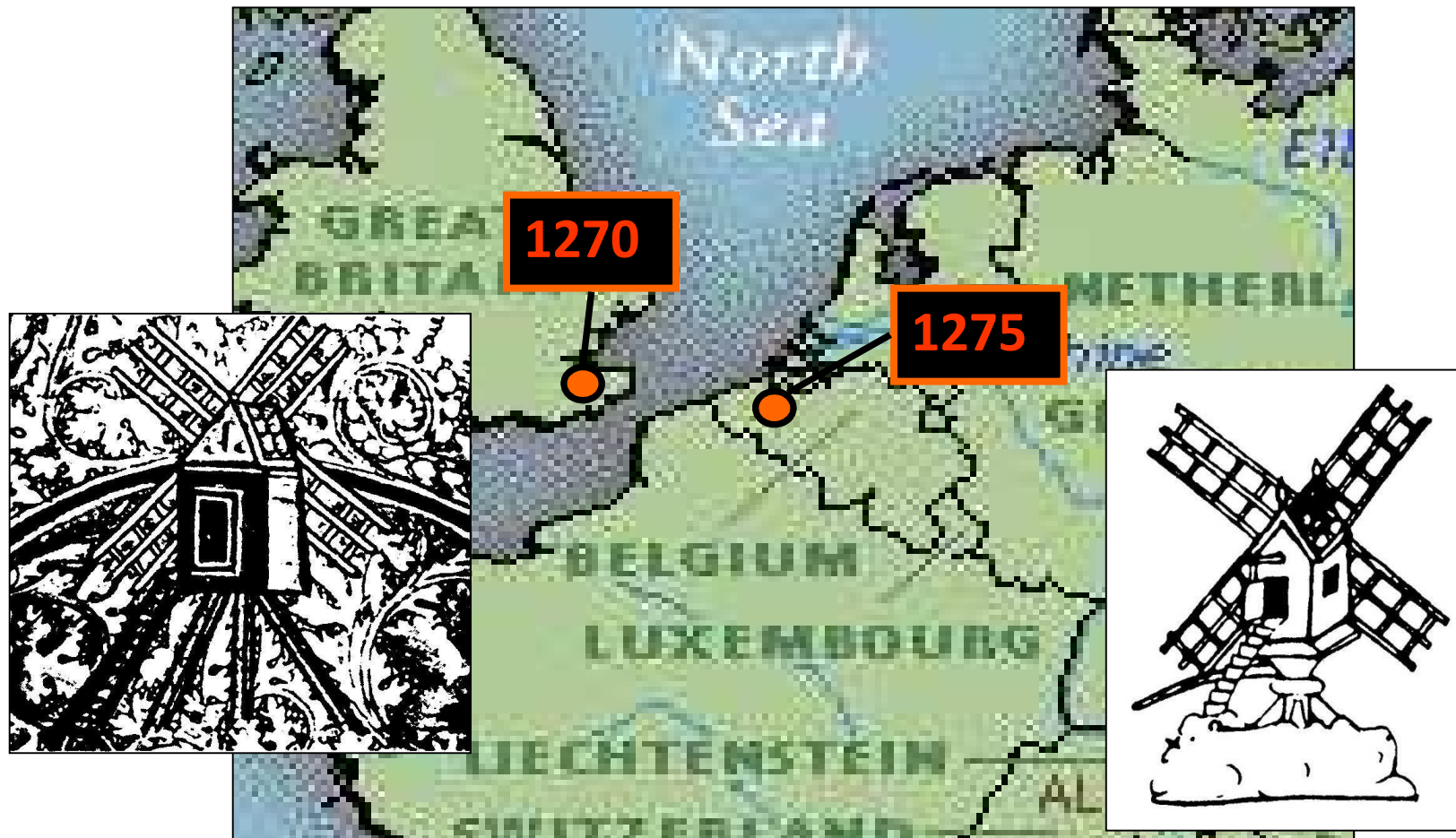
?

Waar is de “Hollandse Windmolen” ontstaan?

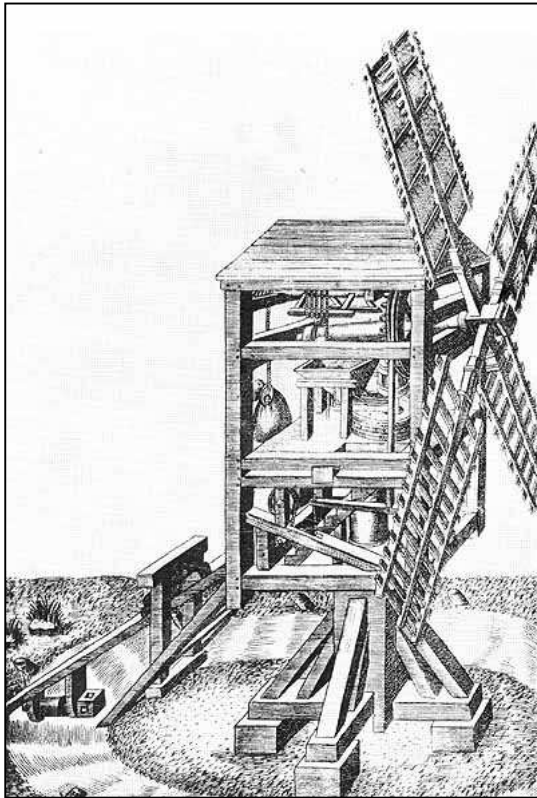
- A. Iran
- B. Griekenland
- C. Spanje
- D. België
- E. Engeland
- F. Nederland



Eerste windmolens rond de Noordzee



De vorm van het hekwerk verandert in de tijd

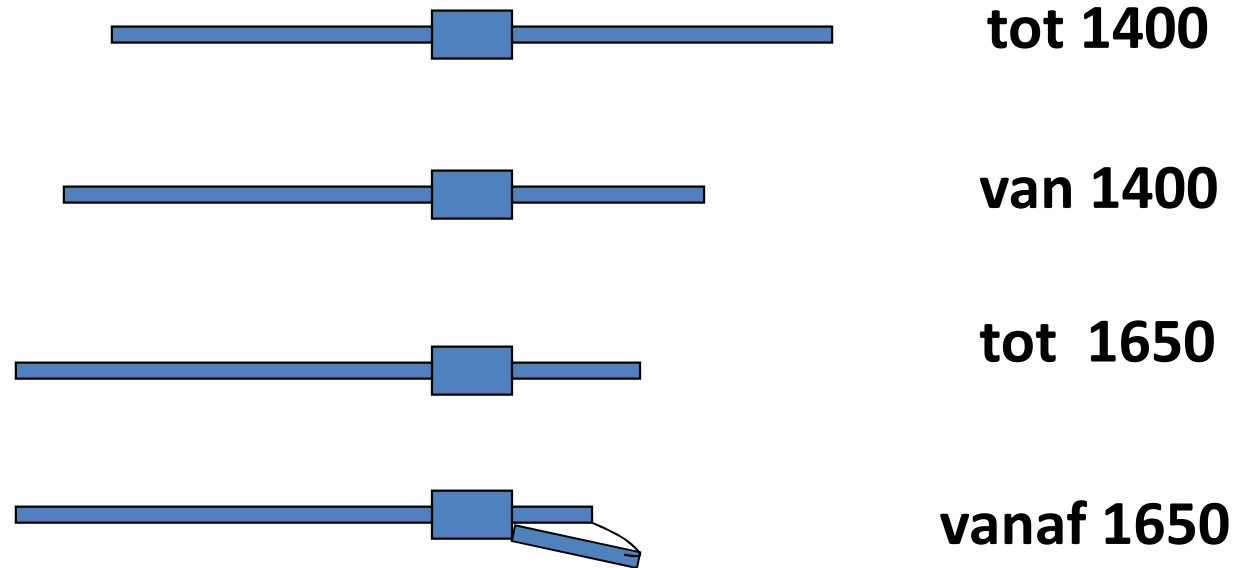


Ramelli 1588



D.E Lons 1631

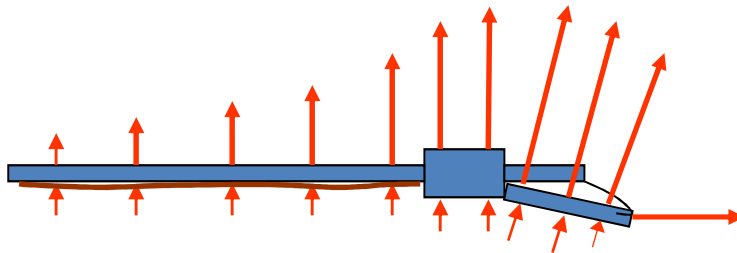
Ontwikkeling van het wiekprofiel



Verbetering van de wieken

Een hekwerk met welving

Het “Oud-Hollands” wiekprofiel



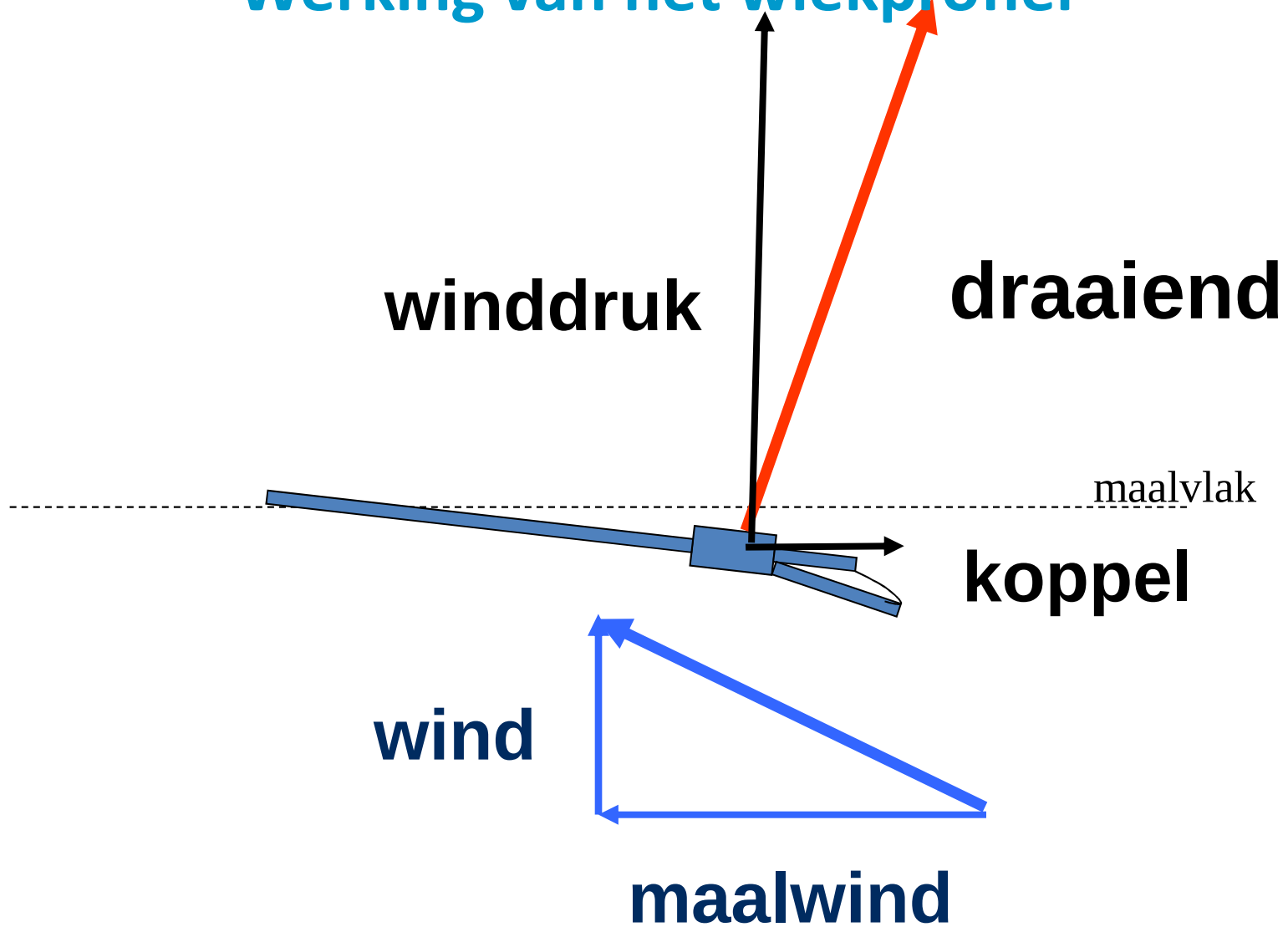
Profiel met welving

Uitgevonden door Jan Adriaensz

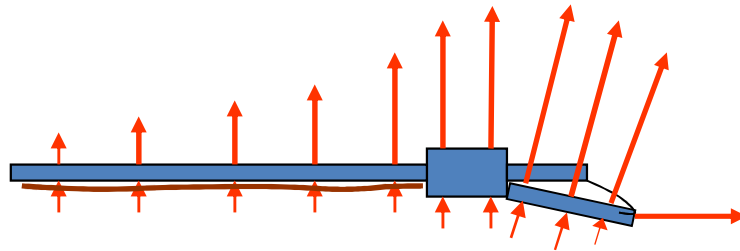
Leeghwater (1575-1650) bij zijn
proefnemingen op de molen van De Rijp



Werking van het wiekprofiel

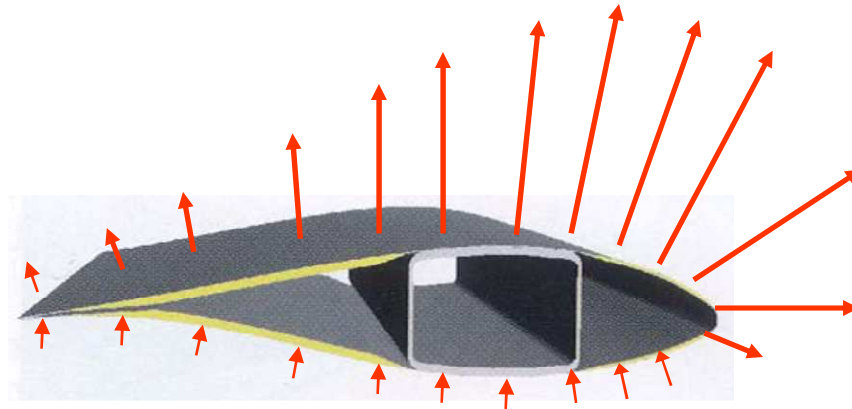


Werking van het wiekprofiel



“Oud-Hollands” wiekprofiel

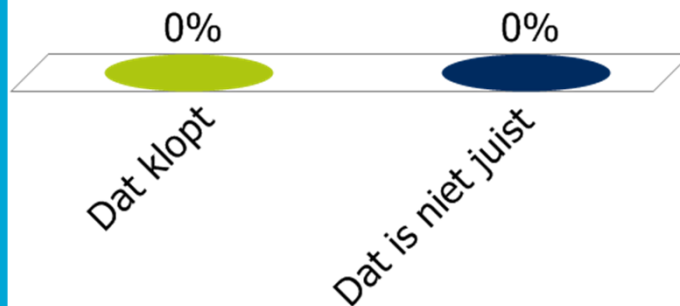
Modern windturbine
rotor profiel



?

Een molen met 3 wieken (rotorbladen) levert het hoogste vermogen

- A. Dat klopt
- B. Dat is niet juist



Lagerwey L82 (2MW)

Het aantal wieken (rotorbladen) maakt niet uit! (voor het opgewekte vermogen)

Waarom dan 3 rotorbladen?



Het antwoord (vanuit een fysisch perspectief)

- Wervel theorie: incompressibel+ niet visceus=> potentiaal theorie
- Wervels zijn zichtbaar te maken met rook



Het antwoord (vanuit een fysisch perspectief)

Neem aan dat dit de optimale zogstructuur is

Dit optimale **wervel systeem** is mogelijk voor alle soorten windturbines met:

- 1 rotorblad
- 2 rotorbladen
- 3 rotorbladen
- Veel rotorbladen

Als dit wervelsysteem hetzelfde is, is het vermogen dat ook:

- 1 rotorblad => zeer hoog toerental
- 3 rotorbladen => $1/3$ van het toerental
- etc etc



www.windpowerengineering.com

Rotorbladen, afwegingen

1 rotorblad:

- hoog toerental
- laag koppel
- **veel geluid!!**

Veel rotorbladen

- erg laag toerental
- hoog koppel (water pompen)
- geen geluid

3 rotorbladen: het beste compromis (op land):

- relatief hoog toerental
- beperkte geluidsproductie
- gemakkelijk te balanceren (aerodynamisch + zwaartekracht)
- esthetisch beter dan 2 bladen



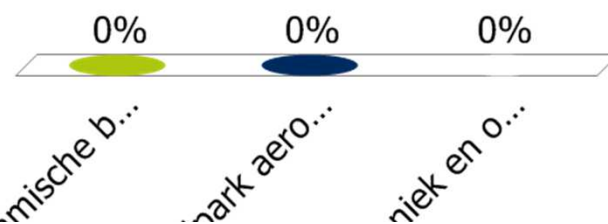
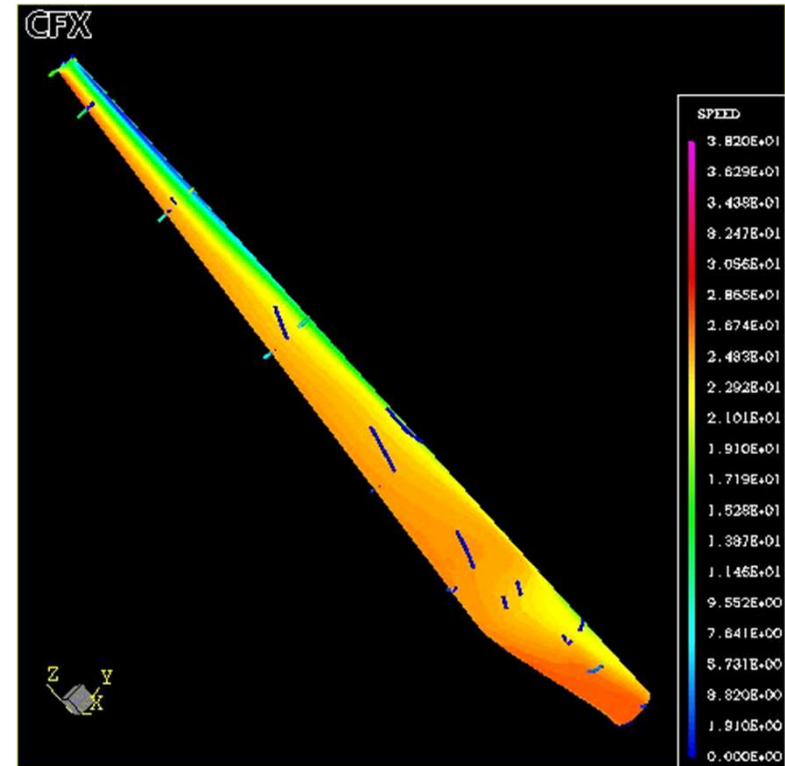
Envision 3,6 MW offshore prototype

Diameter bepaalt de energieopbrengst
niet het aantal wieken.

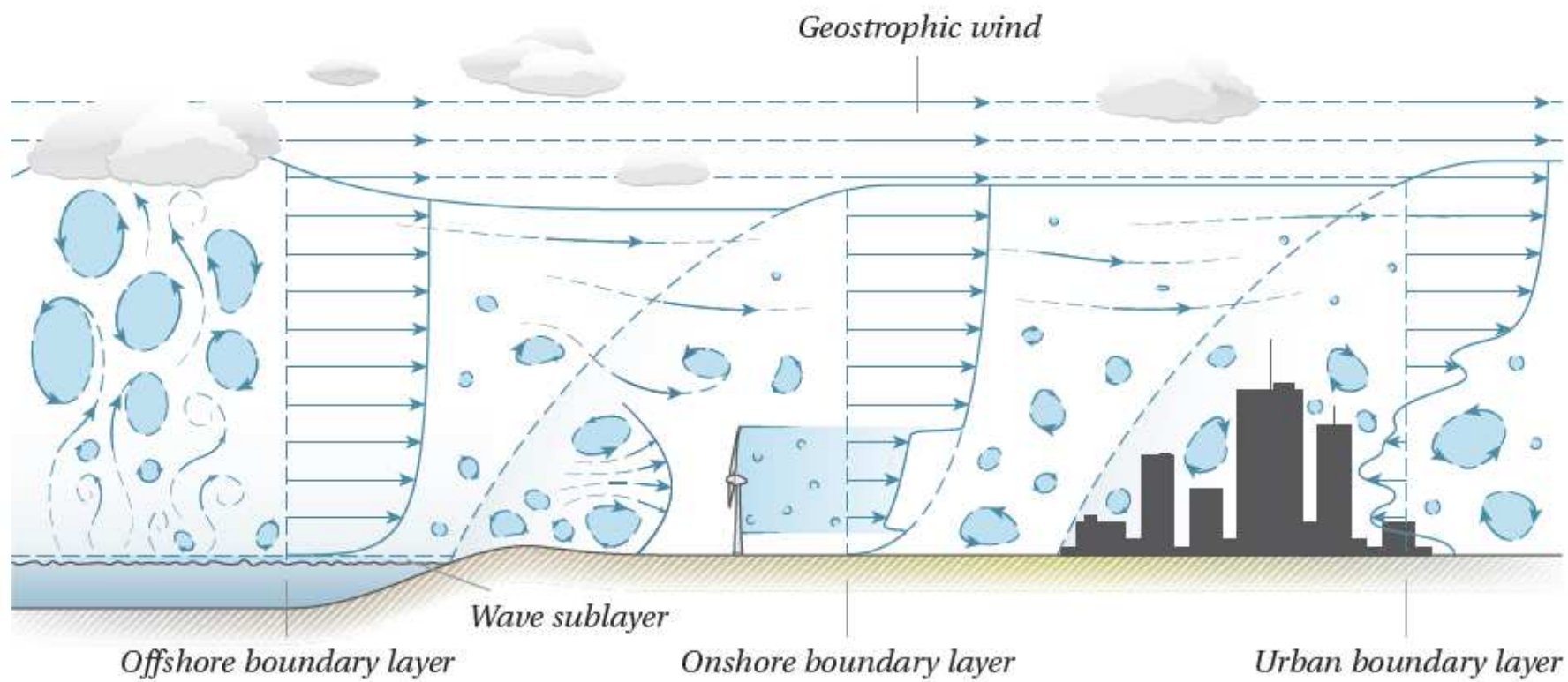


Hoe gaan we verder?

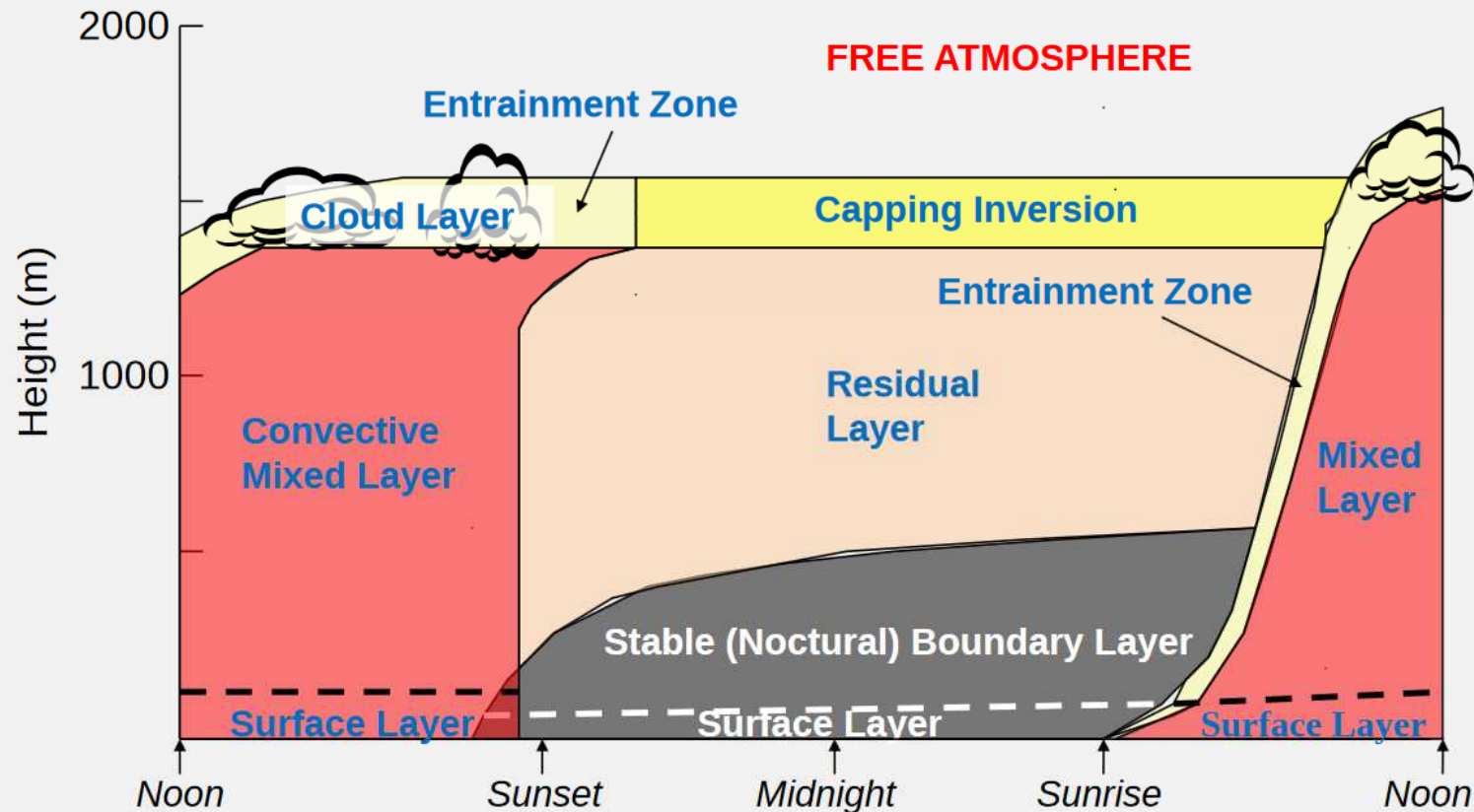
- A. Dynamische belastingen voorspellen
- B. Windpark aerodynamica
- C. Techniek en opbrengst van een offshore windpark



Complex wind conditions



24 uurs cyclus in opbouw van atmosferische grenslaag



ECMWF Weersvoorspellingen

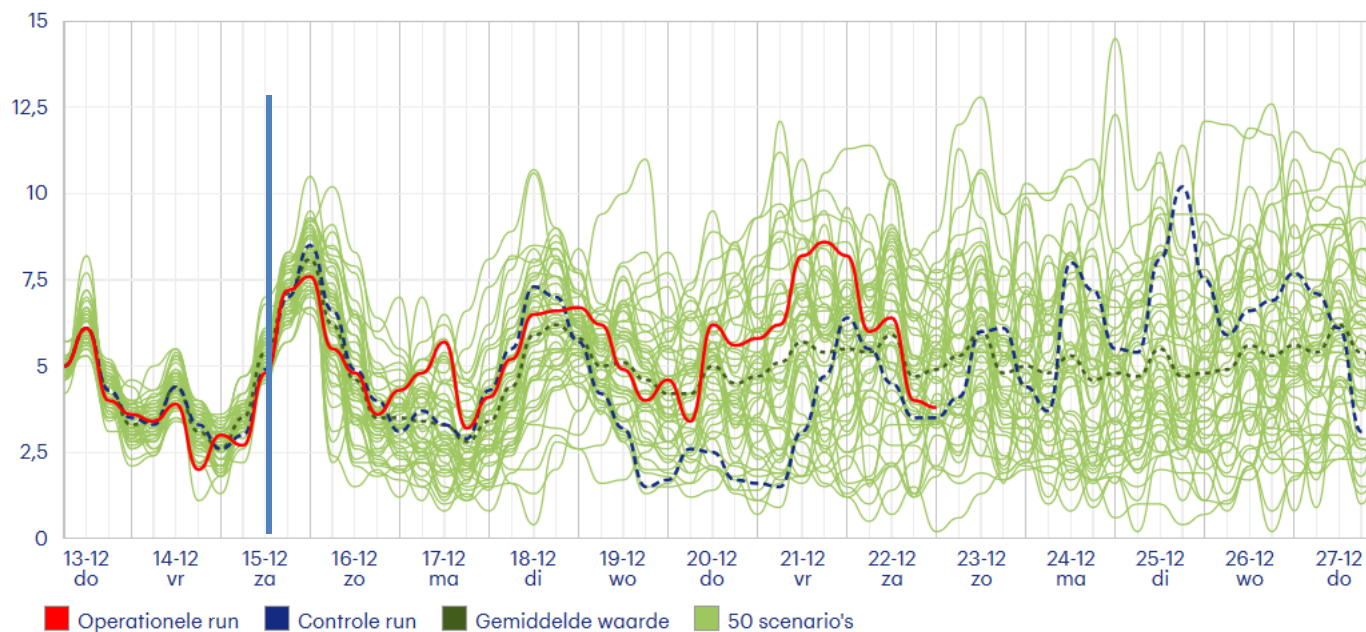


ECMWF is the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

De windvoorspelling voor zaterdag 15 december op donderdagmorgen 13 december 2018

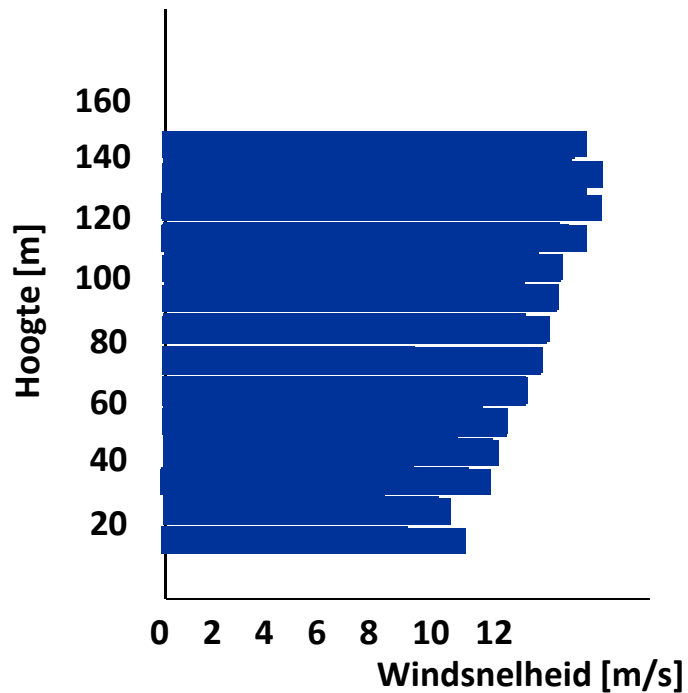
Windsnelheid op 10m in m/s
Regio Midden-West-Nederland

Model van 13-12-2018 07:00 uur

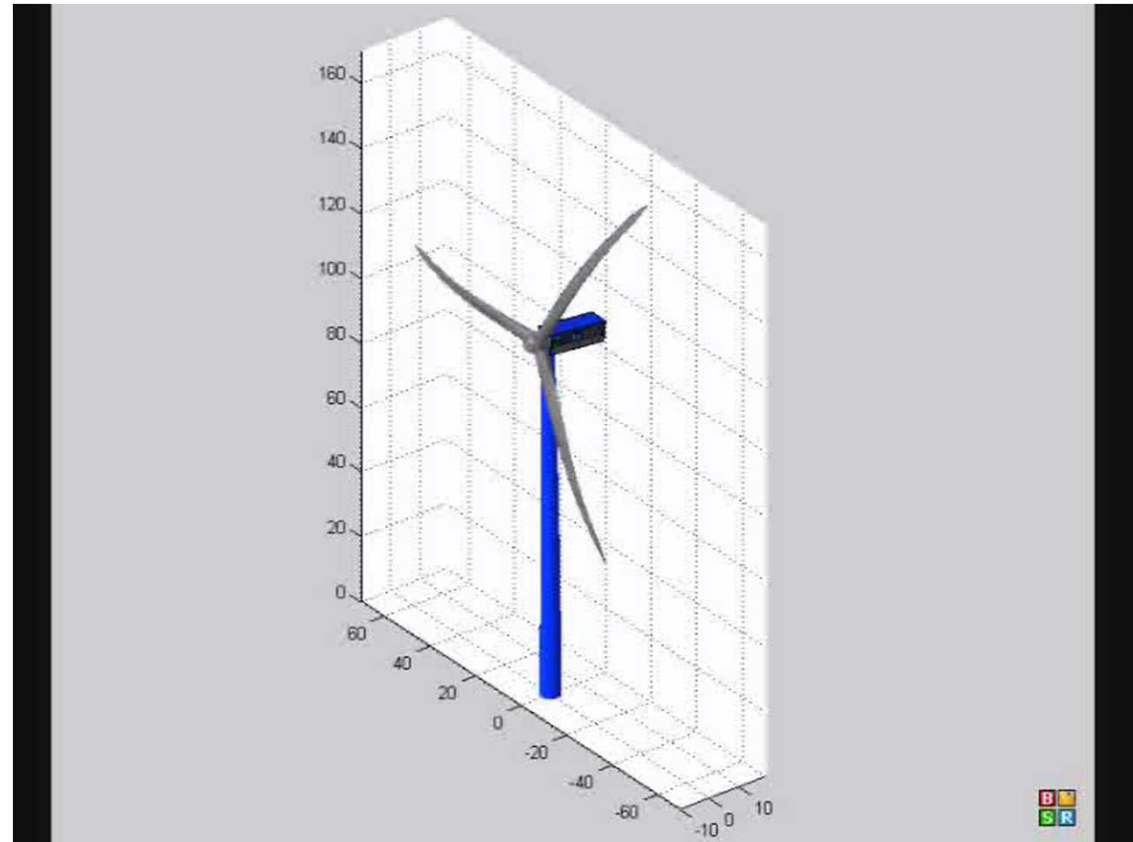


Bron: buienradar.nl

Dynamische belastingen voorspellen



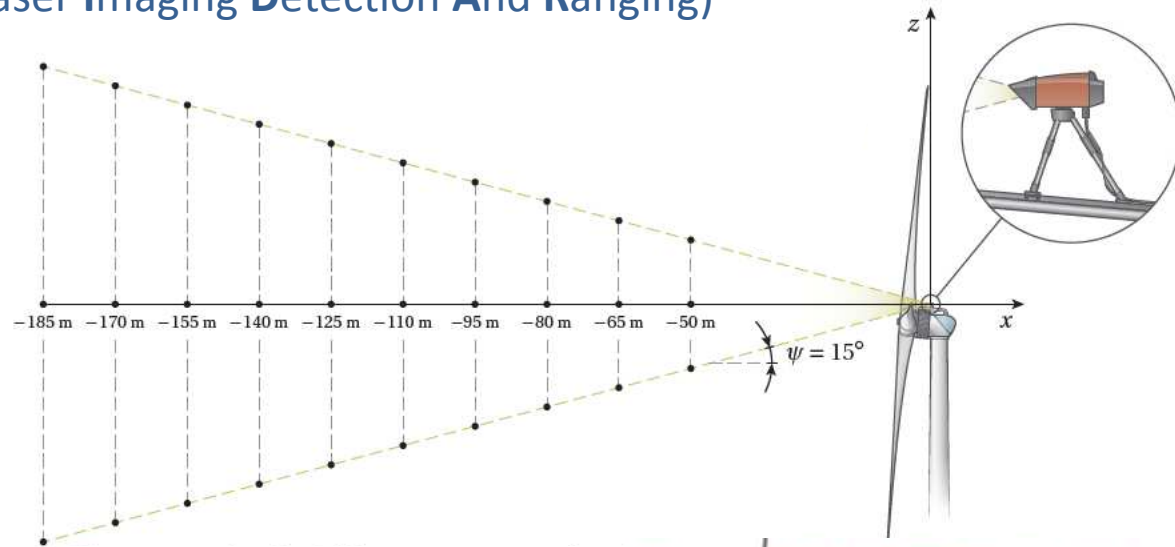
- wind-shear
- scheefstand
- turbulentie



YawDyn berekeningen Meng Fanzhong TU Delft

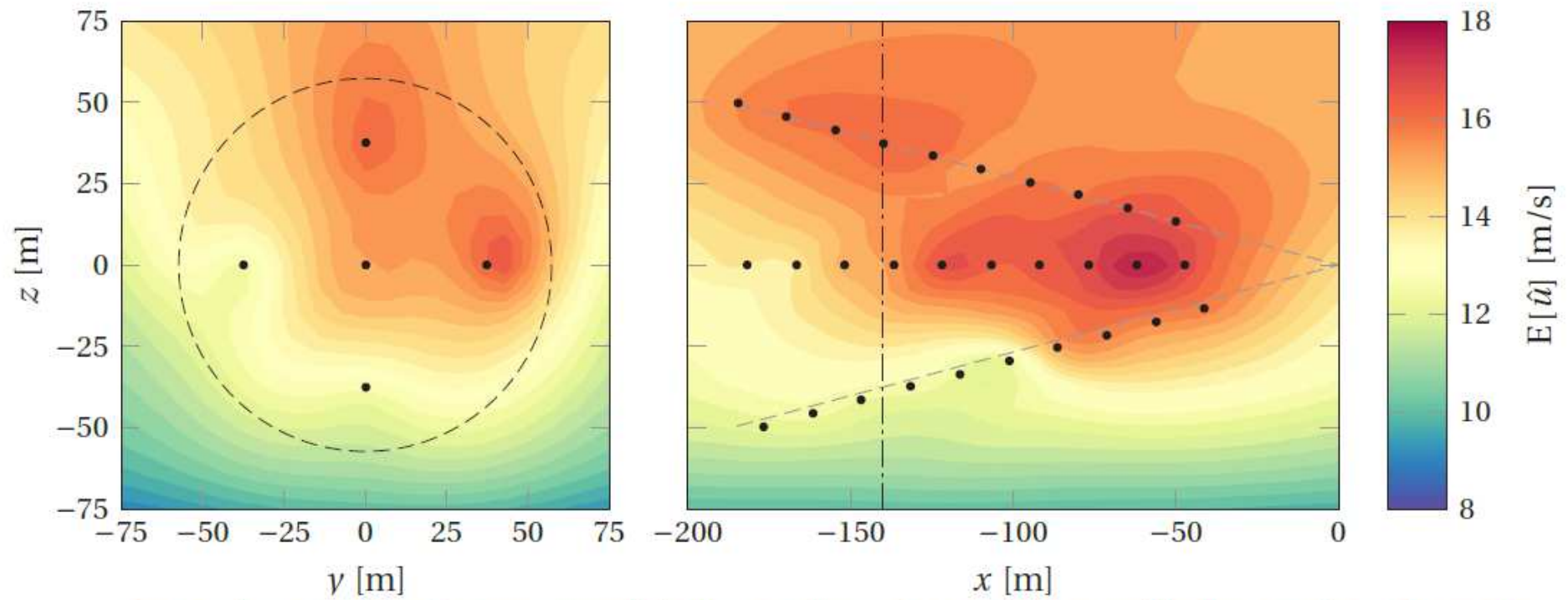
Lidar op de gondel om vooruit te “kijken”

(Laser Imaging Detection And Ranging)

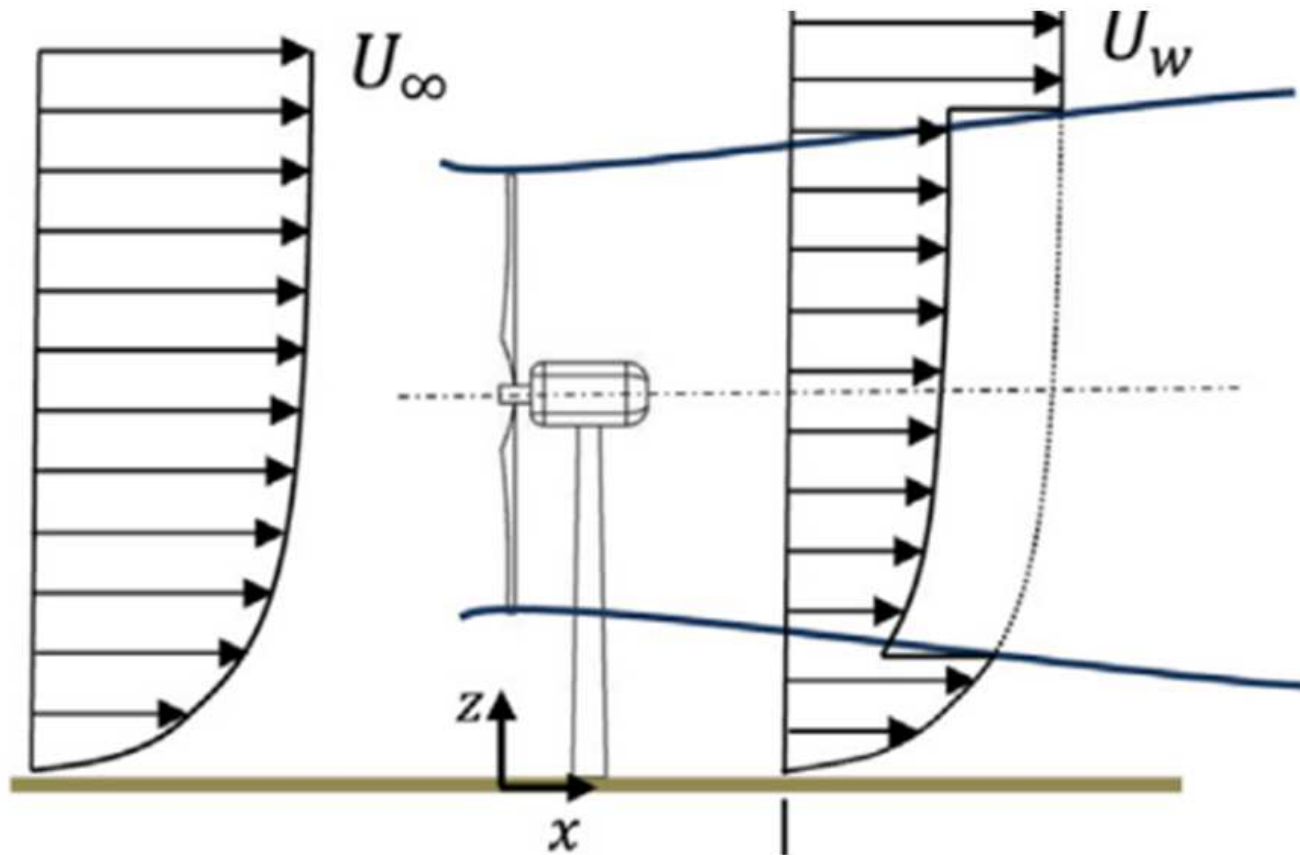


Darwind XD115-5MW windturbine.

De windsnelheid op 140 m voor de rotor, en een dwarsdoorsnede

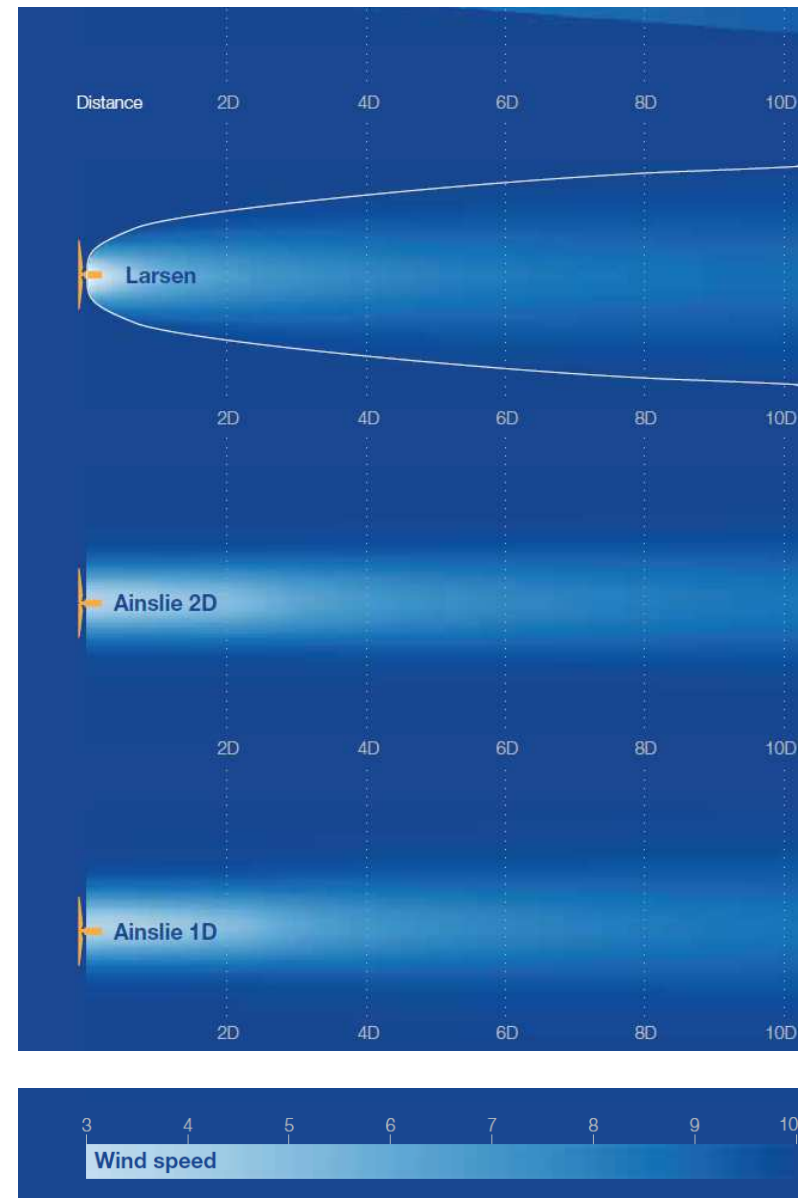


Achter de windturbine is de snelheid (flink) lager



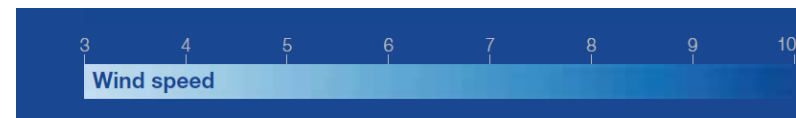
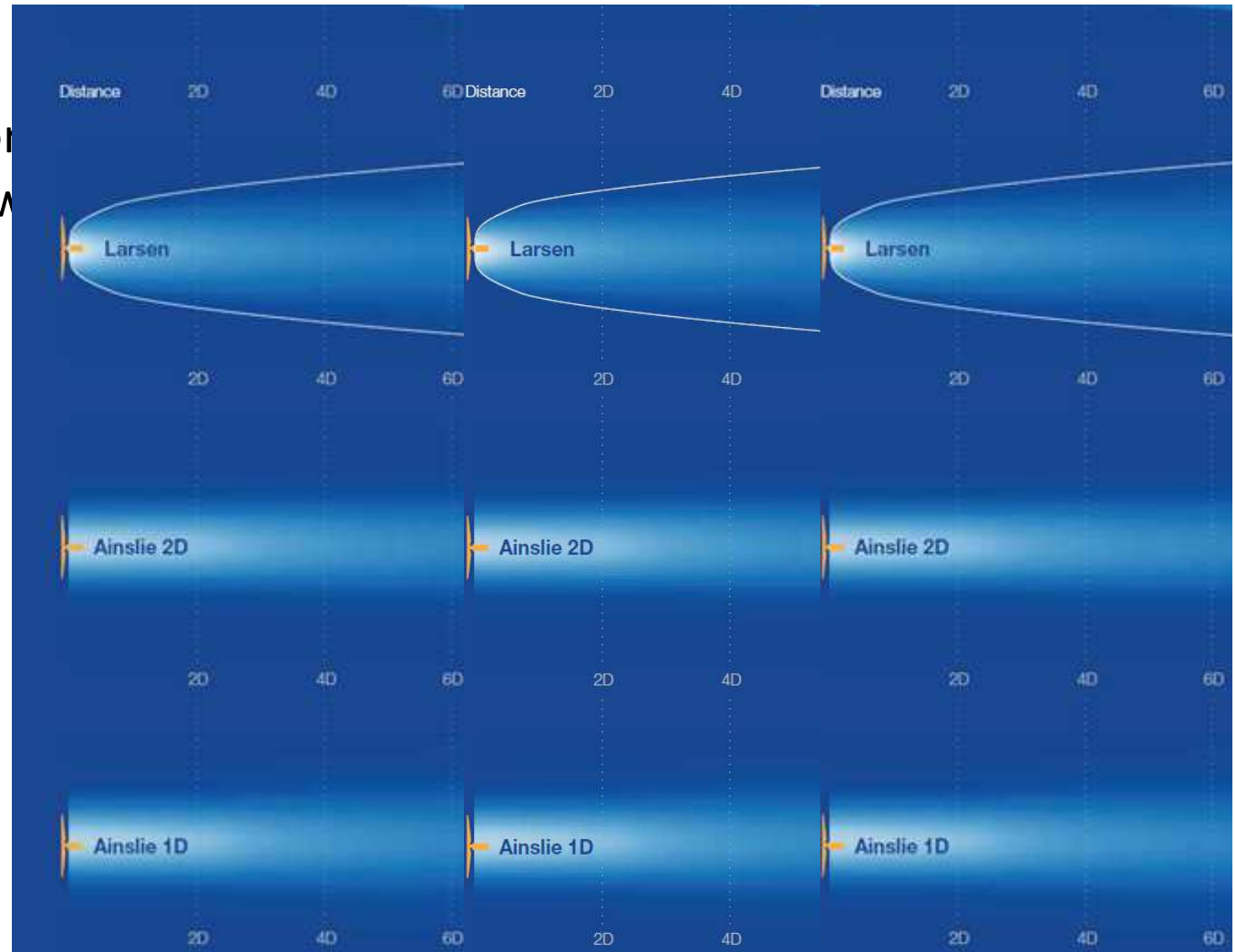
Windpark aerodynamica

- Zogmodellen voor de berekeningen in windparken
- Jensen
- Franes
- Ainsly
- Larsen



Windpark aerodynamica

- Zogmodellen voor berekeningen in w



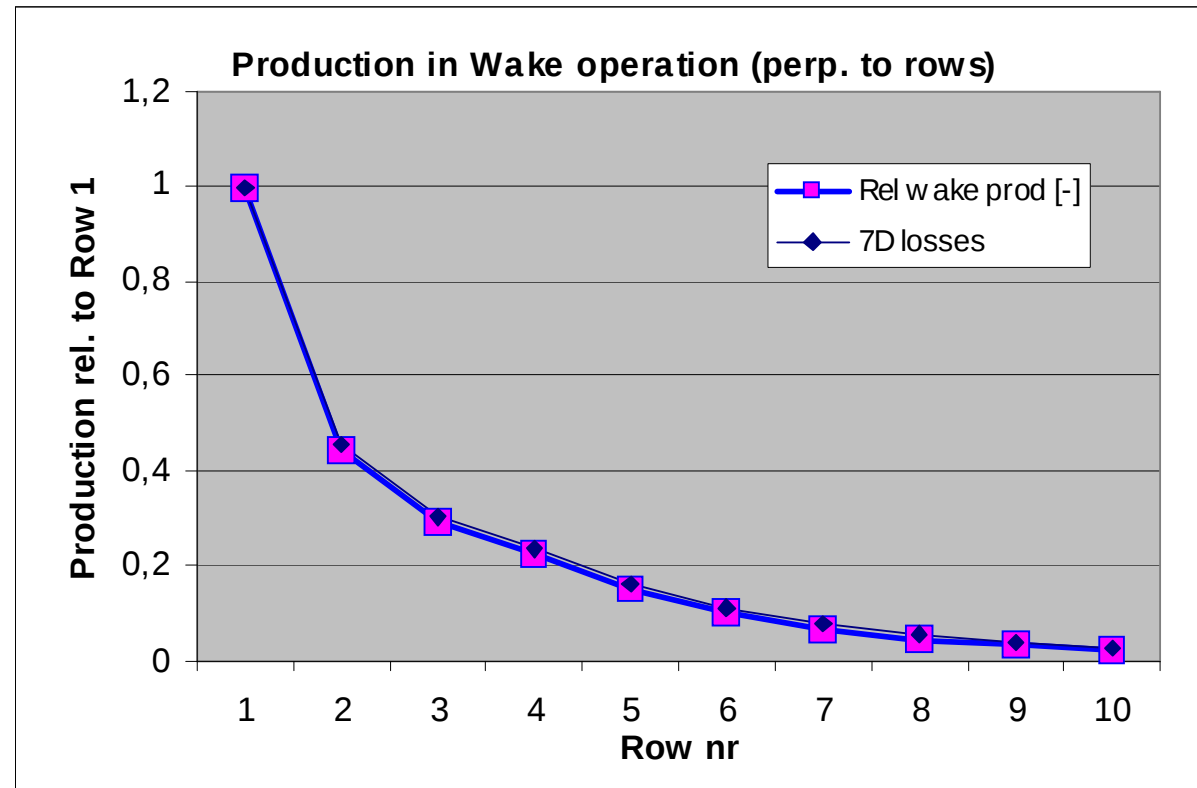
De luwtes (zoggen) in offshore windpark Horns Rev in Denemarken



Het effect van zeggen op de opbrengst

Hypothetisch
10 x 10 offshore
wind park

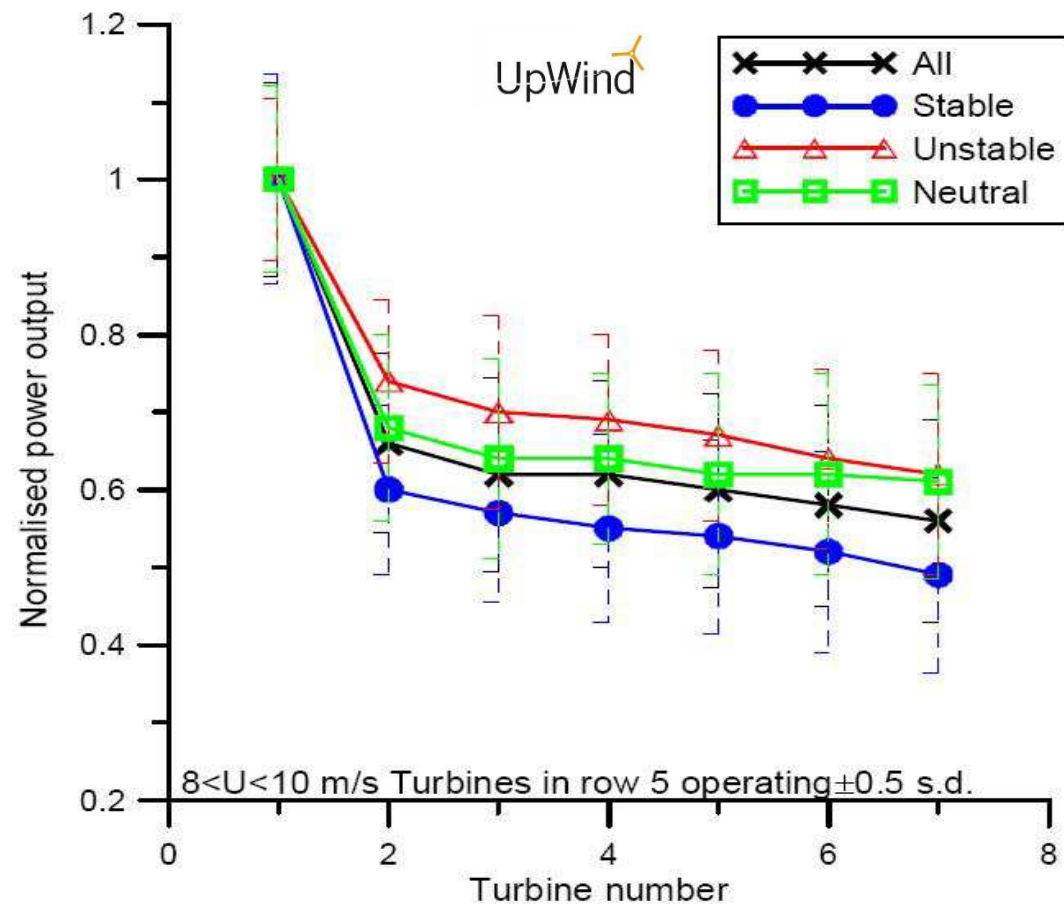
Afstand tussen
de rijen: 7D



Metingen uit het Deense offshore windpark Horns Rev (EU project UpWind)

Windsnelheid
 $v=8-10$ m/s

Effect van
atmosferische
stabiliteit op
zogverliezen

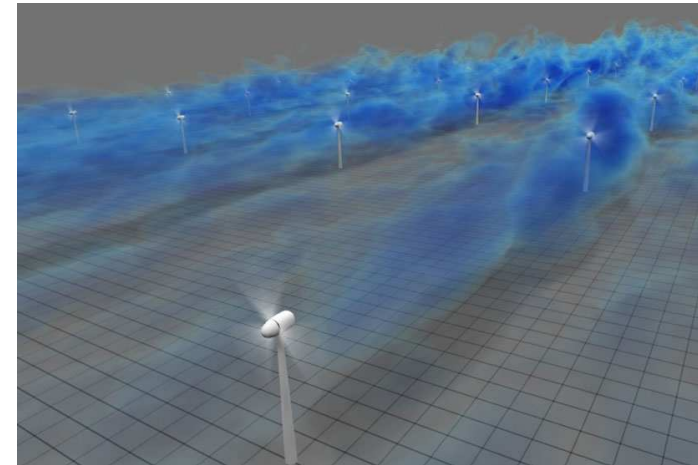


De zijwaartse beweging van het zog (het meanderen) was niet meegenomen

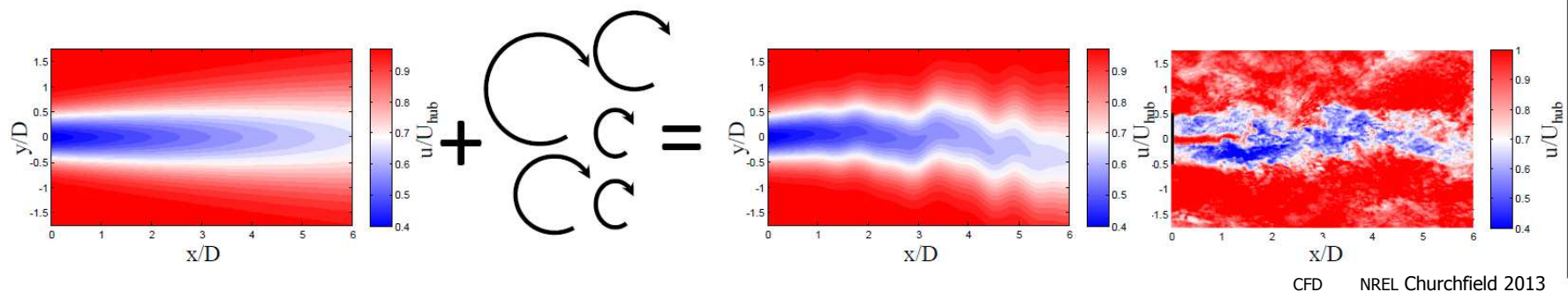


Flinke verandering voor wind park opbrengst voorspellings programma's bleek nodig

- Wake meandering wordt nu (empirisch) meegenomen in modellen
- Ainsly/Larsen + empirische windrichtings fluctuaties is nu de standaard
- Pure CFD is te duur en te traag



Phys.gov



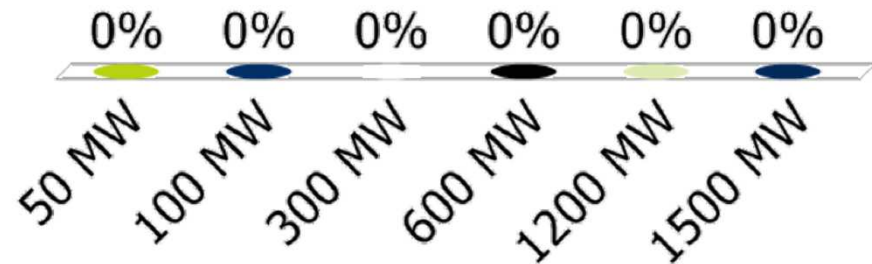
CFD NREL Churchfield 2013



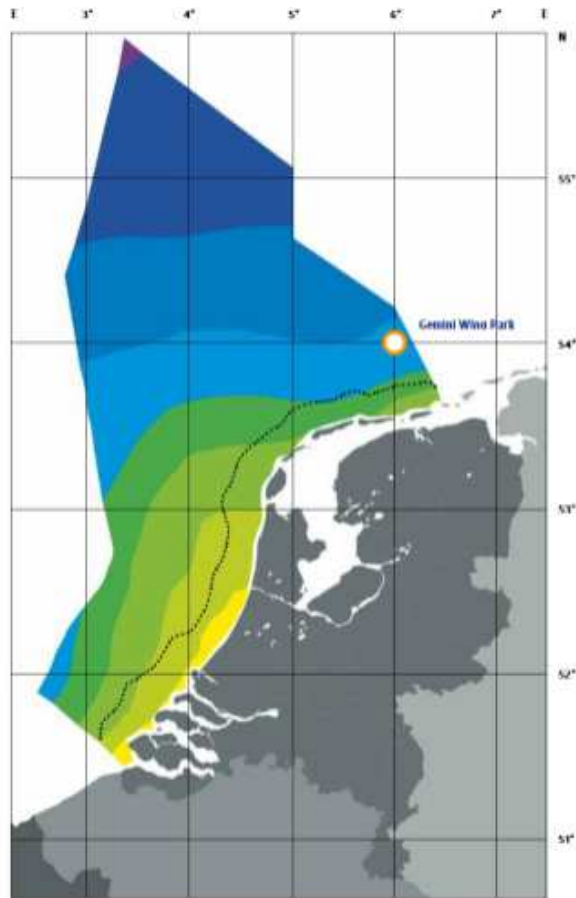
?

Het grootste windpark in bedrijf in NL
heeft een capaciteit van

- A. 50 MW
- B. 100 MW
- C. 300 MW
- D. 600 MW**
- E. 1200 MW
- F. 1500 MW



Gemini offshore wind farm

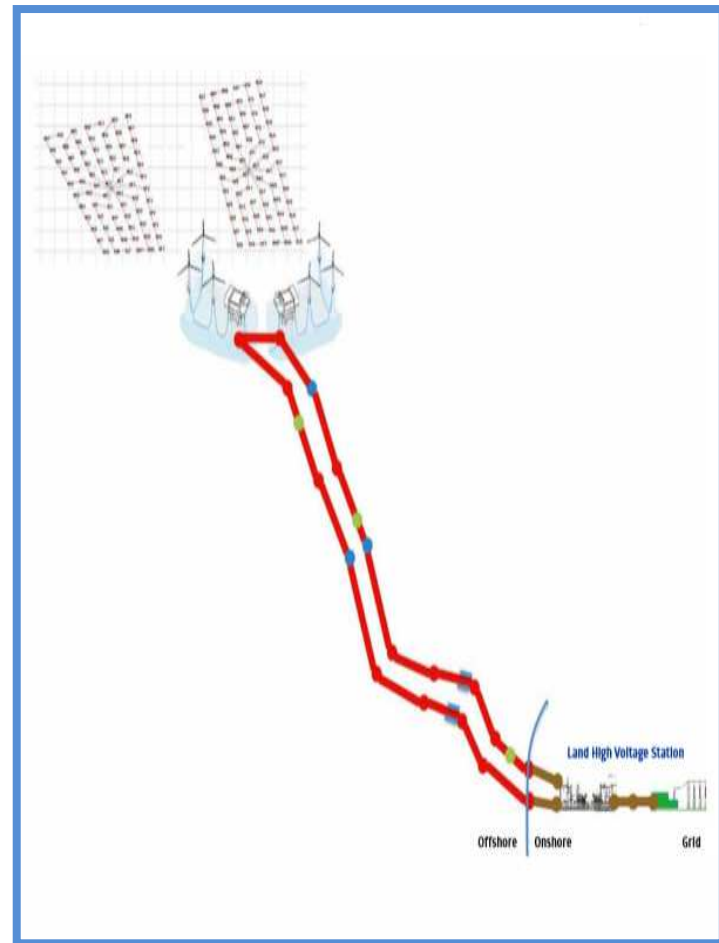
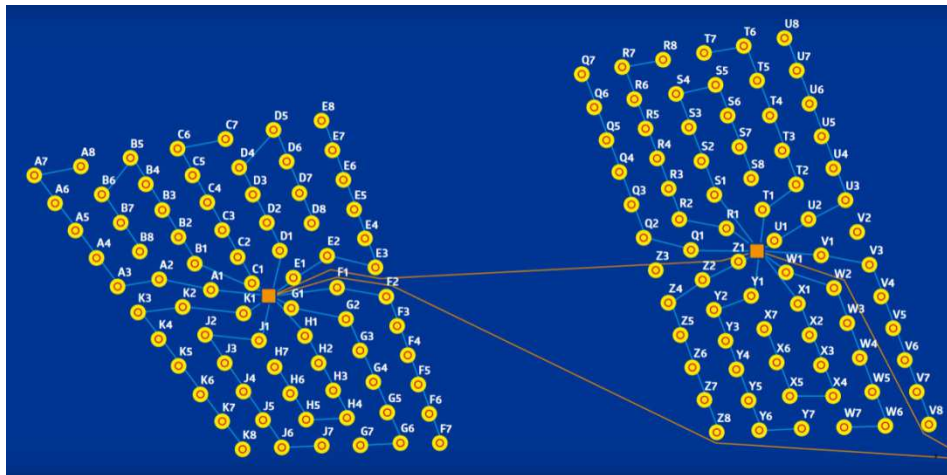


80 km ten noorden van Schiermonnikoog

150 windturbines van 4 MW

2 delen van ieder 300 MW

Aanlanden van stroom in Eemshaven

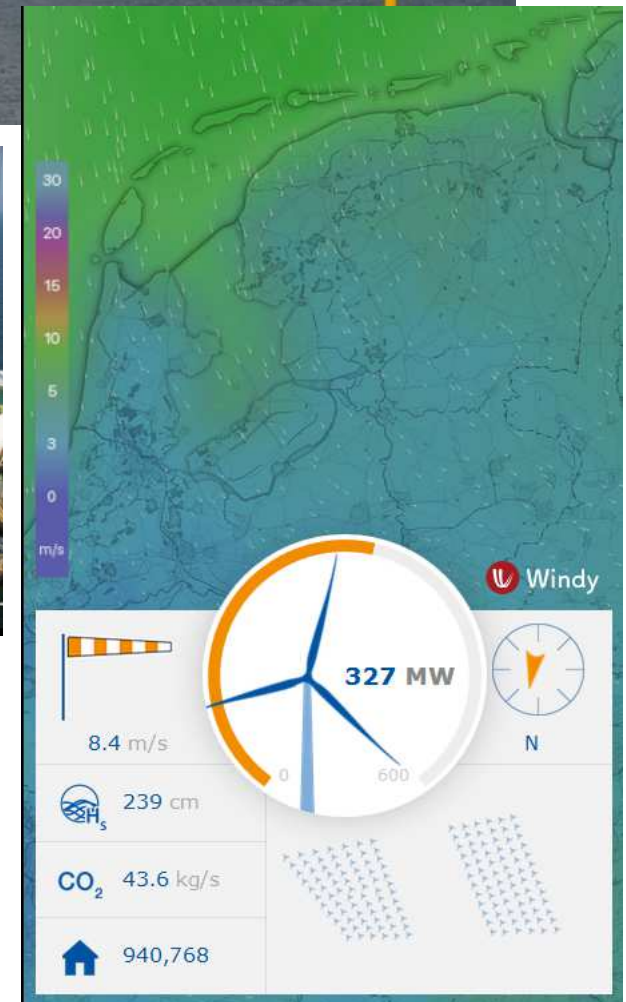


Safe - On Time - Within Budget
Gemini: a success story!





<http://livemegawatt.com/gemini/>

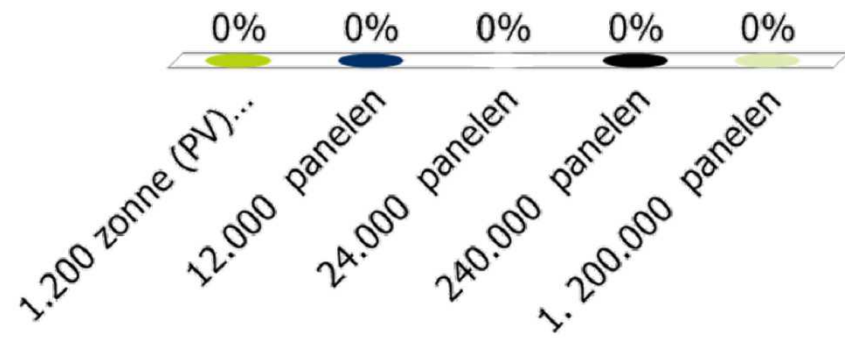


Gemini offshore windpark

600 MW, **150** wind turbines

Qua capaciteit (MW) gelijk aan:

- A. 1.200 zonne (PV) panelen
- B. 12.000 panelen
- C. 24.000 panelen
- D. 240.000 panelen
- E. 1. 200.000 panelen**



Gemini offshore windpark

600 MW, **150** wind turbines

Qua opbrengst (MWh) gelijk aan:

A. 4.800 zonne (PV) panelen

B. 48.000 panelen

C. 96.000 panelen

D. 960.000 panelen

E. 4.800.000 panelen

600.000 huizen

1.600 ha zonneweide

3.200 voetbalvelden

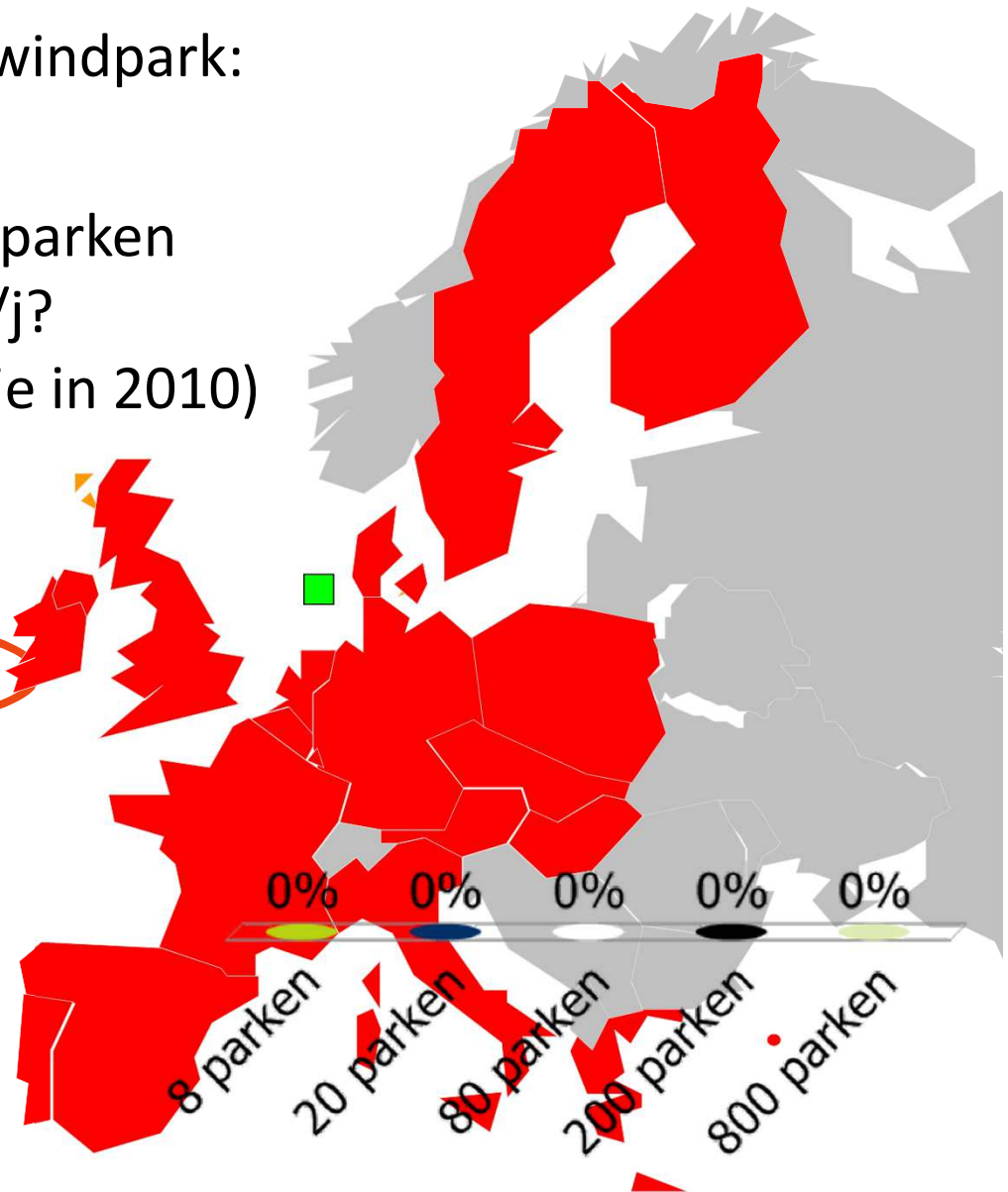
?

Gedachten experiment

1 giga groot offshore windpark:
100 x 100 km)

Hoeveel van deze gigaparken
nodig voor 3.500TWh/j?
(= EU elektr. consumptie in 2010)

- A. 8 parken
- B. 20 parken
- C. 80 parken
- D. 200 parken
- E. 800 parken



Europa's offshore WE potentieel

Acht 100x100 km
offshore windparken
kunnen ~ 3.500TWh/j
produceren.

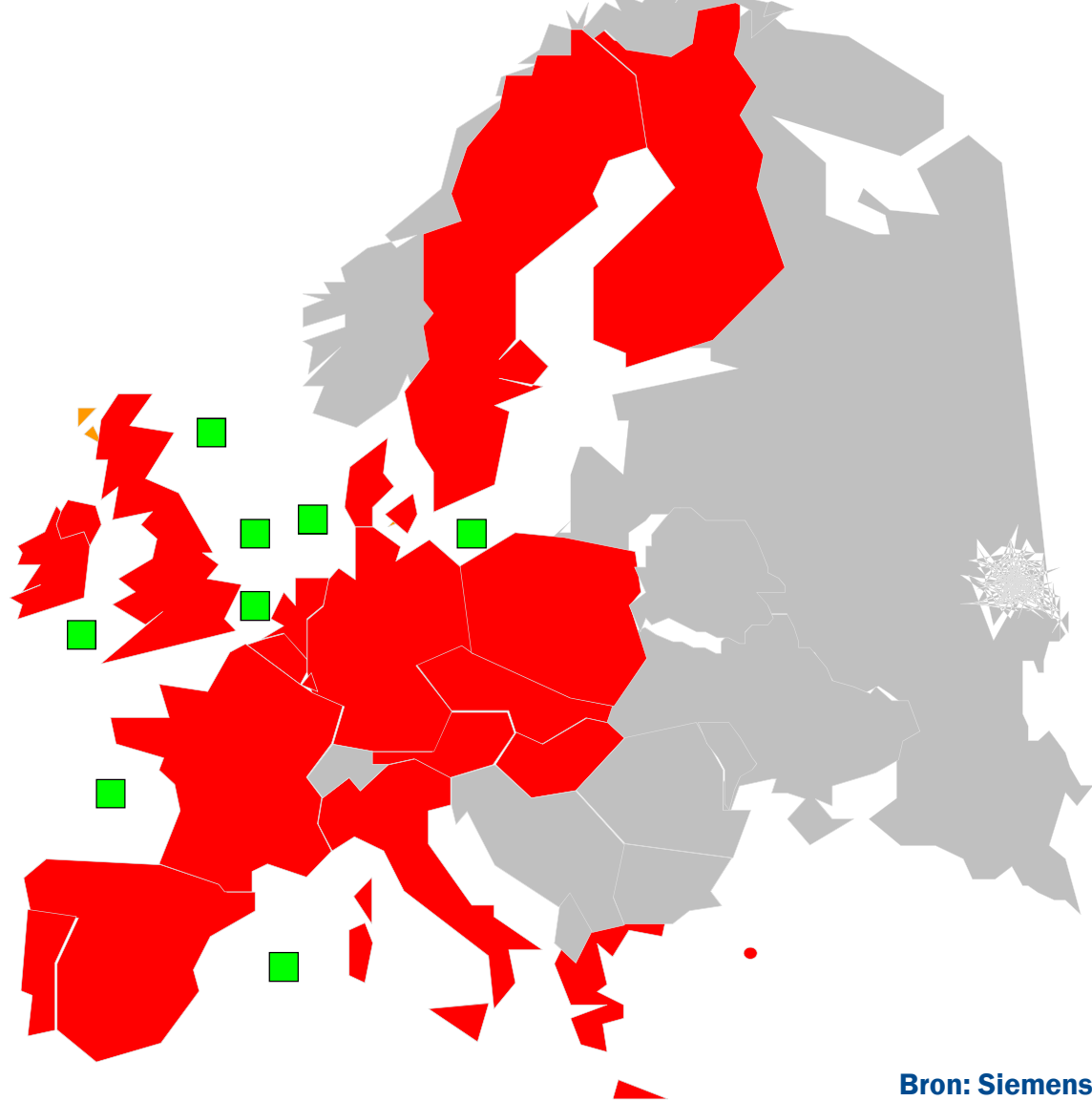
≈ gelijk aan elektriciteit
gebruik in EU in 2010

NL:

120 TWh
/jaar

60 km

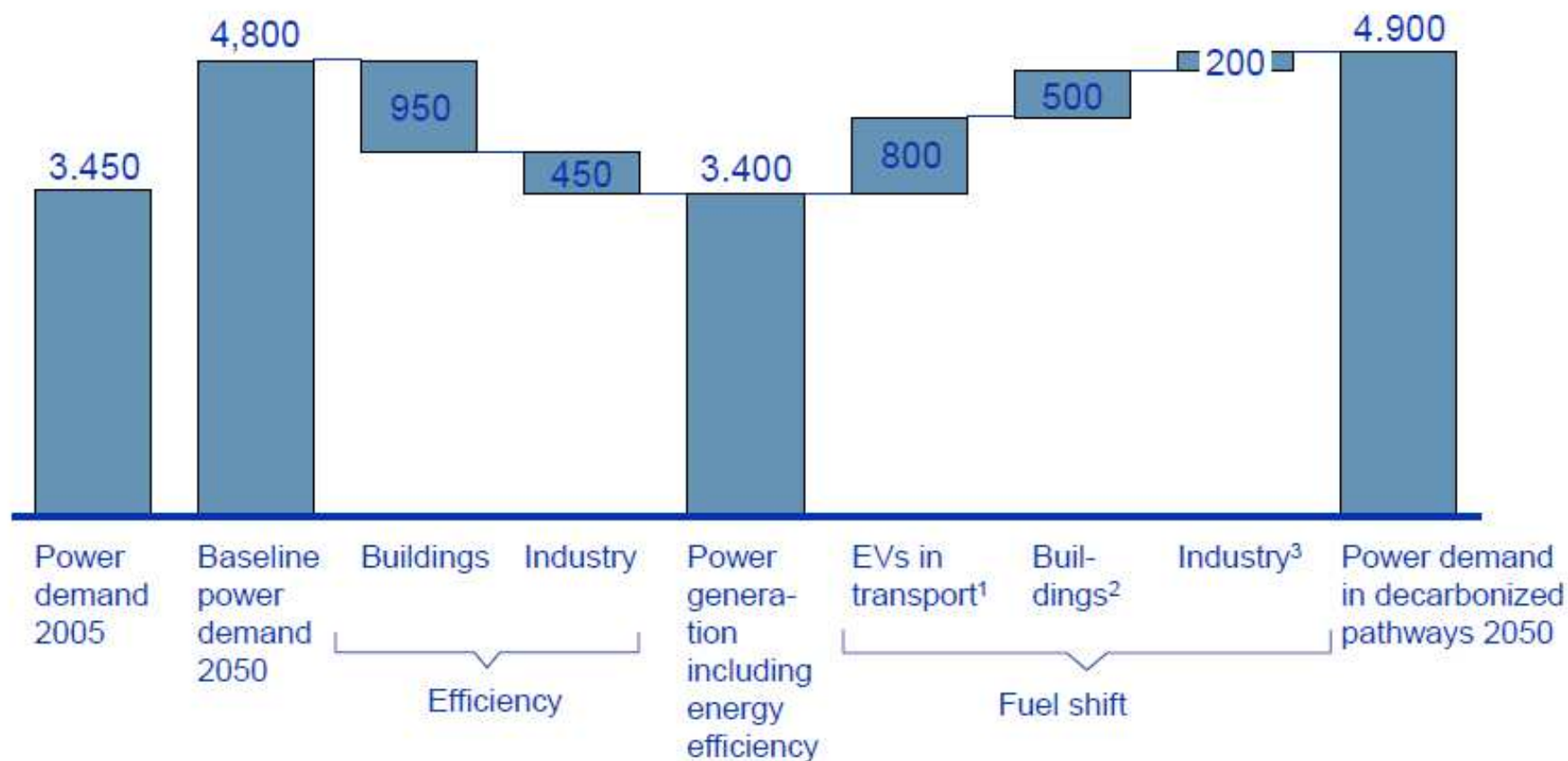
60 km



Bron: Siemens

Electriciteitsvraag groeit tot ~ 4.900 TWh in 2050

EU-27 plus Norway and Switzerland power demand, TWh per year



1 Electrification of 100% LDVs and MDVs (partially plug-in hybrids); HDVs remain emitting ~10% while switching largely to biofuel or hydrogen fuel cells

2 90% of remaining primary energy demand converted to electricity (heating/cooling from heat pumps); assumed 4 times as efficient as primary fuel

3 10% of remaining primary energy demand for combustion converted to electricity (heating from heat pumps); assumed 2.5 times as efficient as primary fuel

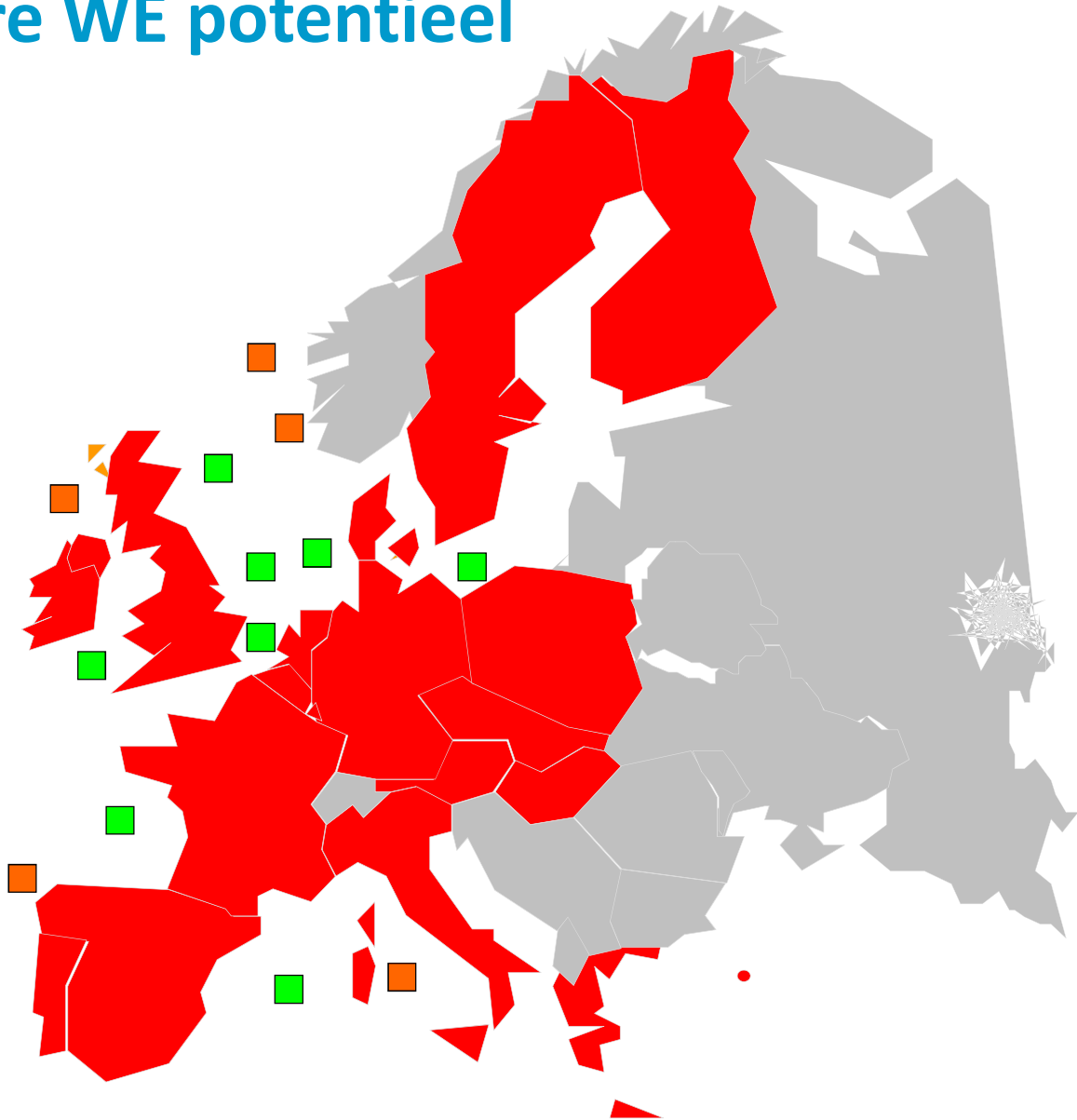
Source: EU roadmap 2050

Europa's offshore WE potentieel

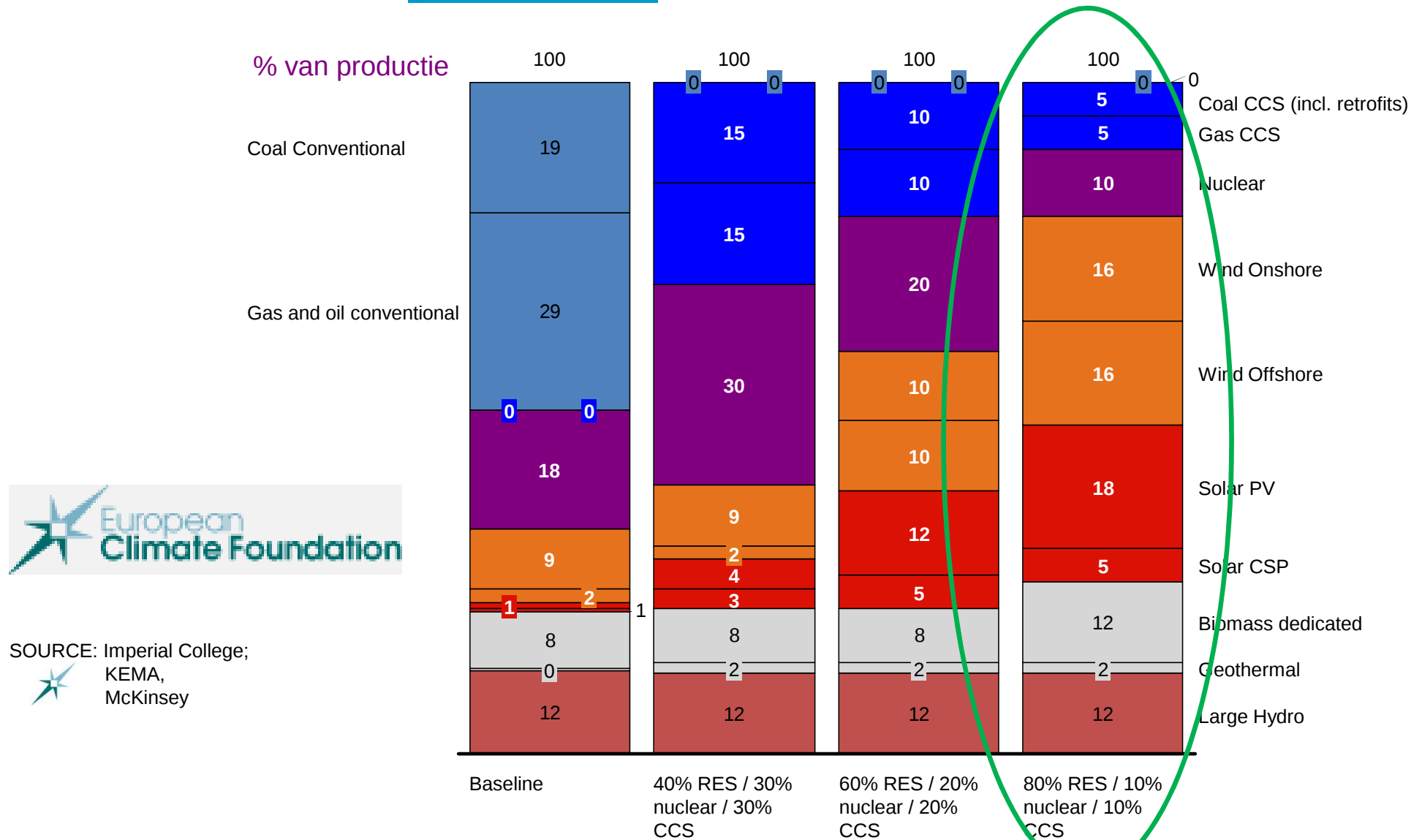
Twaalf 100x100 km
offshore wind parken.

Kunnen voorzien in de
elektriciteitsvraag
van 2050

Vaste en drijvende
offshore windturbines

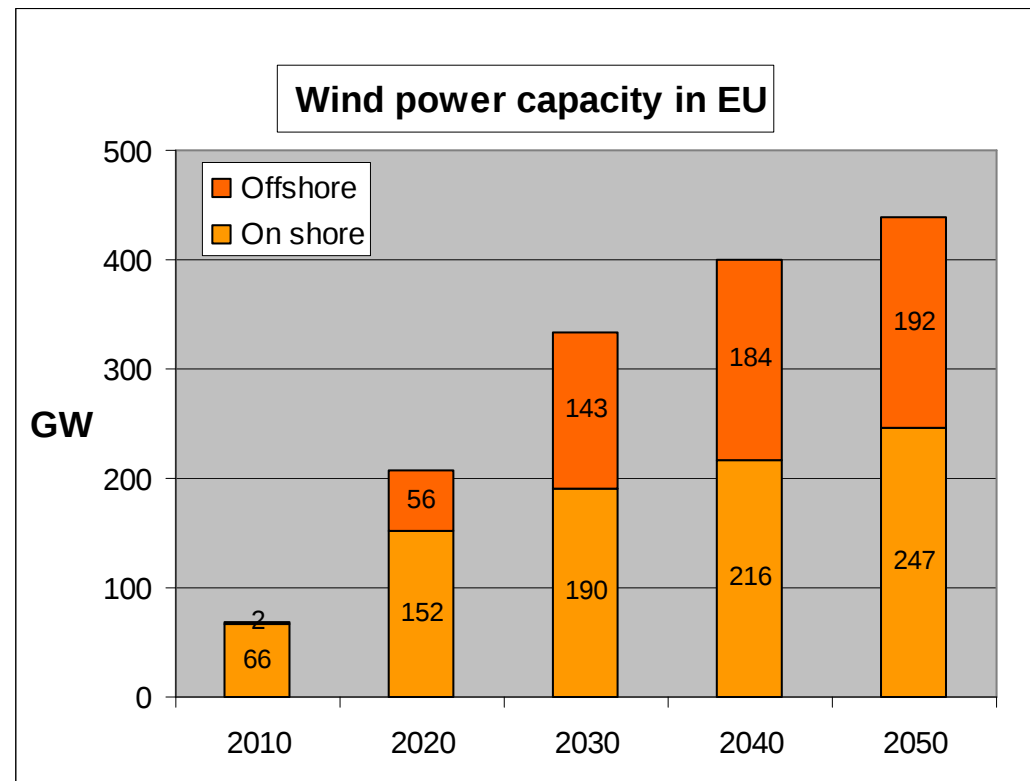


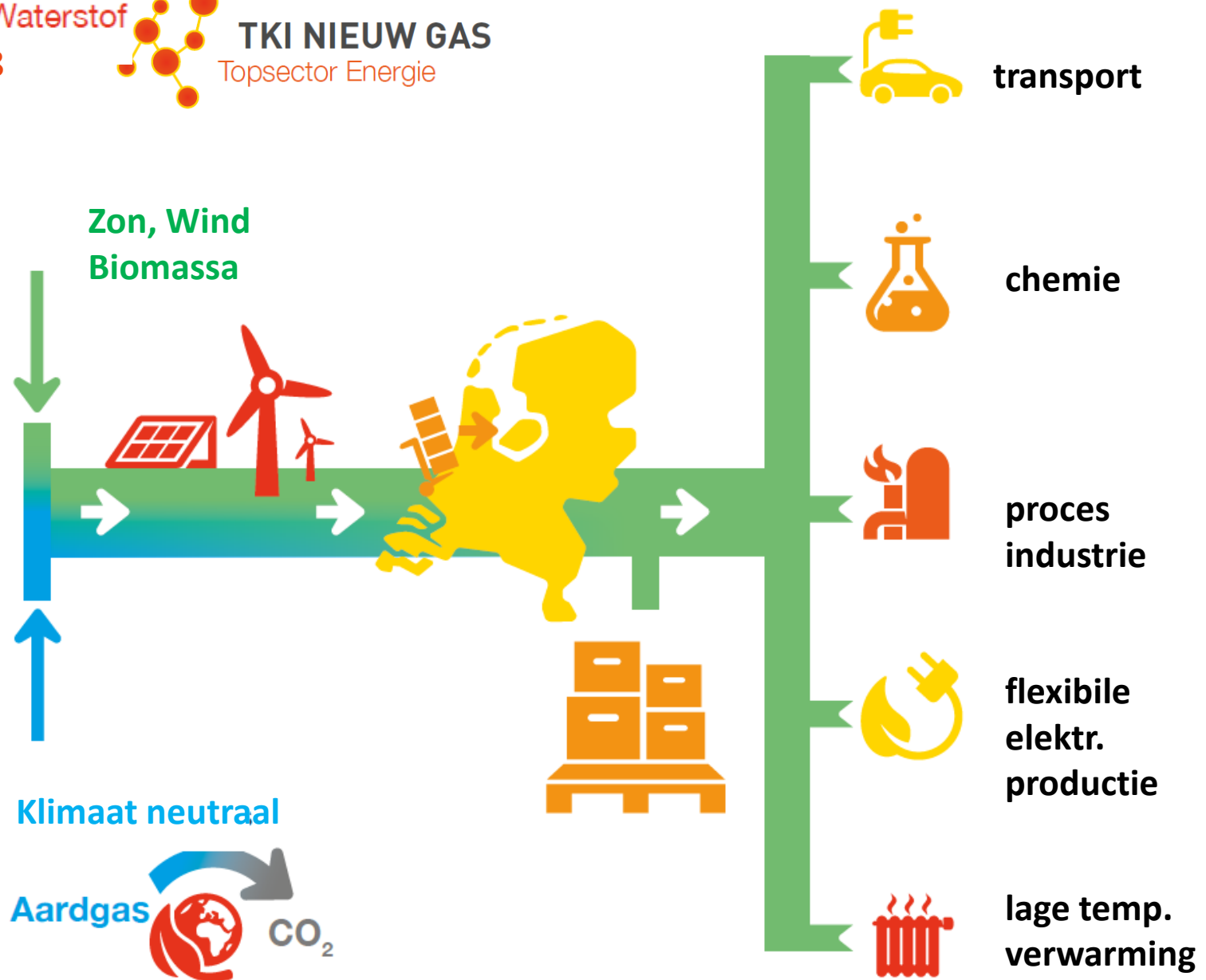
Electriciteitproductie mix in 2050 in EU



De groei van windvermogen in EU bij 80% hernieuwbare stroomproductie in 2050

- Tussen 2010 en 2030: groeit wind op land nog hard
- Vanaf 2025: groei in offshore wind
- In 2050: 440 GW totaal
- Voorziet in 32% van de elektriciteitsvraag in de EU





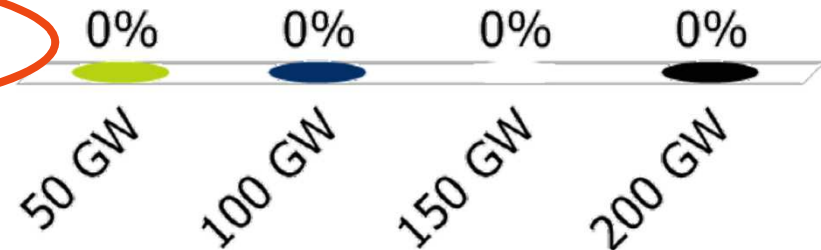


Hoeveel windstroom nodig voor totale hernieuwbare transitie in 2050?

Stel 40 GW wind in NL in 2050
voor stroom gerealiseerd.
(~5 GW nu, dus factor 8)

Ten opzichte
van 2018:

- A. 50 GW factor 10
- B. 100 GW factor 20
- C. 150 GW factor 30
- D. 200 GW factor 40





	Waterstofvraag		Wind op Zee Elektrolyse		Aardgas/CCS Reforming	
	PJ/j	Mton/j	TWh/j	GW	PJ/j	Mton CO ₂ /j
Hogetemperatuurwarmte: - Non-energetisch gebruik - Proceswarmte - Duurzame chemie - Duurzame brandstoffen - Staalproductie	50	0,4	21	4,8	67	3,8
	100	0,8	42	9,6	133	7,5
	480	4,0	202	46,1	640	46,2
	700	5,8	295	67,3	933	52,8
	20	0,2	8	1,9	27	1,5
Mobiliteit en Transport	125	1,0	53	12,0	167	9,4
Kracht en Licht	115	1,0	48	11,1	153	8,7
Lagetemperatuurwarmte	100	0,8	42	9,6	133	7,5
	1690	14,1	711	161	2253	128

Wind voor elektriciteitsproductie - Nu: op zee/totaal
In 2050?

4/10 1/5
120/150 30/40

Nog een factor 4-5
meer nodig!

**Dank voor uw
aandacht en
voor uw actieve
deelname!!**



Prof.dr. Gerard van Bussel
Hoogleraar Windenergie
TU Delft

