

# Beschikbaarheid van wind in Nederland

Marc van der Sluys  
Lectoraat Duurzame Energie  
Hogeschool van Arnhem en Nijmegen

3 december 2015

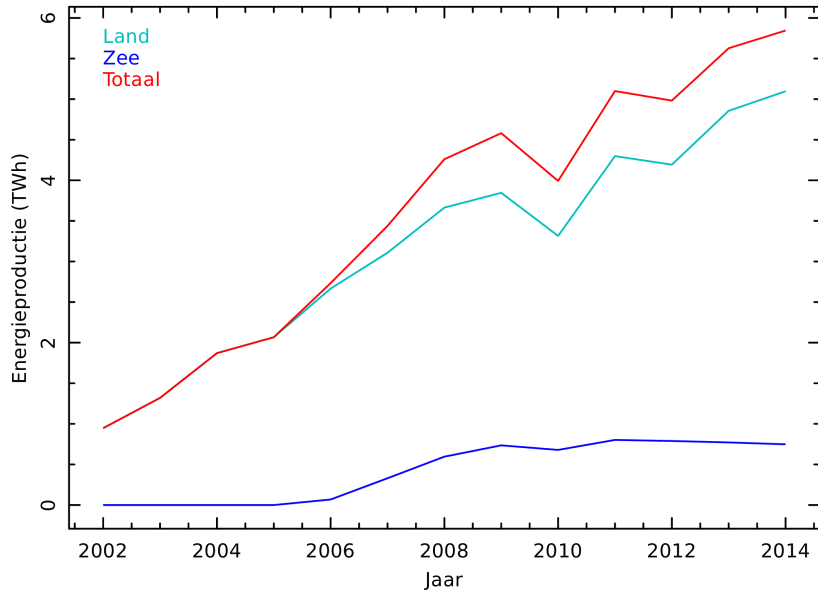
## Trefwoorden

Wind, windenergie, windturbine, windmolen

## **1 In Nederland is op zee circa 62% meer windenergie beschikbaar dan op land; overdag kan meer energie uit wind worden opgewekt dan ‘s nachts, en in de winter meer dan ‘s zomers**

In Nederland is op land voldoende wind beschikbaar om jaarlijks ongeveer 2 GWh aan electriciteit op te wekken met een windturbine van 1 MW. Op zee is dat zo'n 3,2 GWh, circa 62% meer. De totale energieproductie uit windenergie in Nederland is tussen 2002 en 2014 toegenomen van 1 TWh naar bijna 6 TWh per jaar (Figuur 1). In 2014 werd circa 87% van alle windenergie in Nederland opgewekt op land [2].

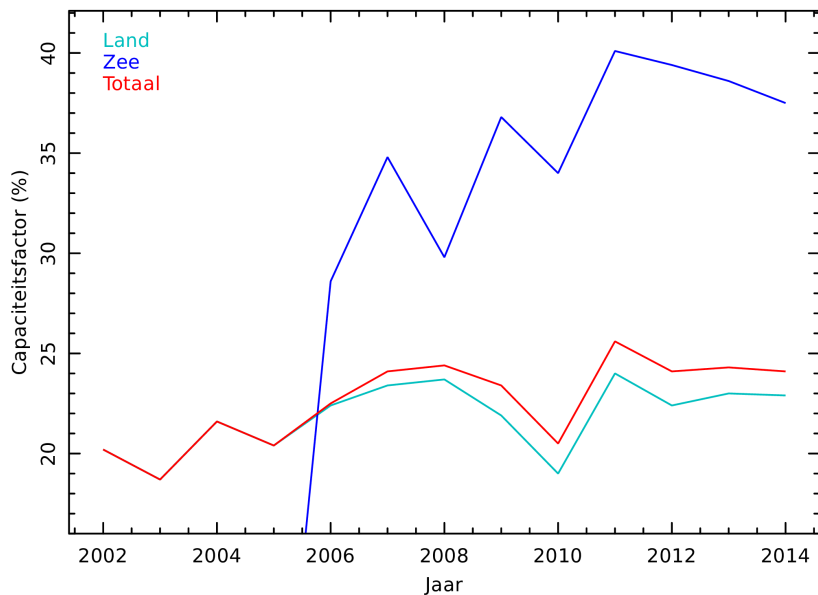
In de zomer is in Nederland circa 30% minder windenergie beschikbaar dan het langjarig gemiddelde. In de winter is dat bijna 40% meer dan gemiddeld [2]. Voor de dagelijkse variatie in de opwek van windenergie zijn gegevens lastig te vinden, maar een ruwe schatting leert dat er 's nachts 20% minder windenergie beschikbaar is dan gemiddeld, en aan het begin van de middag 60–70% meer dan gemiddeld (Sectie 5).



Figuur 1: Jaarlijkse productie van windenergie op land (lichtblauw), zee (donkerblauw) en totaal (rood) in Nederland, tussen 2002 en 2014 (data CBS [2]). De dippen in 2003 en 2010 worden veroorzaakt door een geringe hoeveelheid wind in die jaren. Windenergie op zee is sinds 2006 beschikbaar.

## 2 Een windturbine van 1 MW in Nederland wekt op land per jaar circa 2 GWh aan electriciteit op

Het CBS [2] publiceert jaarlijkse getallen over de capaciteit en werkelijke productie van elektrische energie uit wind in Nederland tussen 1990 en 2014. De *capaciteitsfactor* (productiefactor) is de verhouding tussen die twee grootheden en is gegeven vanaf 2002. De capaciteitsfactor omvat zowel de efficiëntie van de windturbine als de beschikbaarheid van wind en vormt dus een empirische conversiefactor tussen de specificaties van een opgestelde turbine en de werkelijke opwek.



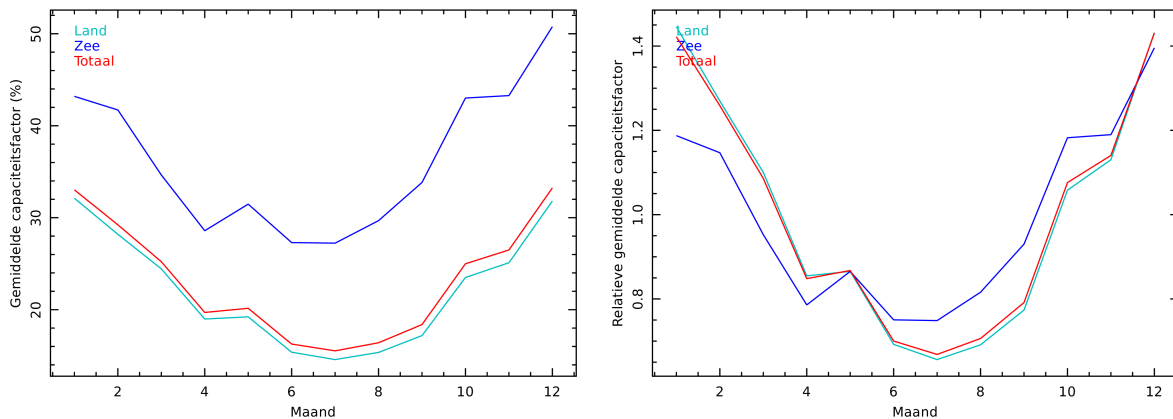
Figuur 2: Jaarlijkse capaciteitsfactor van windenergie op land (lichtblauw), zee (donkerblauw) en totaal (rood) in Nederland, tussen 2002 en 2014 (data CBS [2]). De stijging in de capaciteitsfactor tot 2008 kan vermoedelijk worden toegeschreven aan efficiëntere turbines.

Figuur 2 toont de capaciteitsfactor van de Nederlandse windenergie op land tussen 2002 en 2014. De gemiddelde waarde, gewogen naar het opgestelde vermogen, bedraagt  $22.1 \pm 1.6\%$ . Als deze periode als typisch wordt beschouwd betekent dit dat iedere megawatt aan opgestelde turbine ongeveer 1,9 GWh aan electriciteit per jaar opwekt.

### 3 Een windturbine van 1 MW in Nederland in zee wekt per jaar circa 3,2 GWh aan electriciteit op

De gemiddelde capaciteitsfactor van de Nederlandse windenergie op zee tussen 2007 en 2014 (zie Figuur 2), weer gewogen naar het opgestelde vermogen, bedraagt  $36.0 \pm 3.9\%$ . Dit houdt in dat iedere megawatt aan opgestelde turbine jaarlijks ongeveer 3,2 GWh aan electriciteit opwekt, circa 62% meer dan een megawatt-turbine op land (zie Appendix A.2).

### 4 In de zomer is circa 30% minder windenergie beschikbaar; in de winter is dat bijna 40% meer dan gemiddeld



Figuur 3: (a) (links) Maandelijkse capaciteitsfactor van windenergie op land (lichtblauw), zee (donkerblauw) en totaal (rood) in Nederland, gemiddeld over de jaren waarvoor data beschikbaar zijn en gewogen naar het opgestelde vermogen. (b) (rechts) Dezelfde data, ten opzichte van het gemiddelde van alle data ( $\equiv 1$ ; data CBS [2]).

Figuur 3 toont de invloed van de seizoenen op de capaciteitsfactor. De variatie voor windturbines in zee over een gemiddeld jaar lijkt iets minder dan die voor land, maar het verschil is niet groot. Afgaand op de totale energieproductie (land en zee) wordt in de zomermaanden circa 30% minder windenergie geproduceerd dan gemiddeld, in de wintermaanden (met name december en januari) is dat bijna 40% meer dan het meerjarig gemiddelde.

### 5 ‘s Nachts is er 20% minder wind, aan het begin van de middag 60–70% meer wind dan gemiddeld

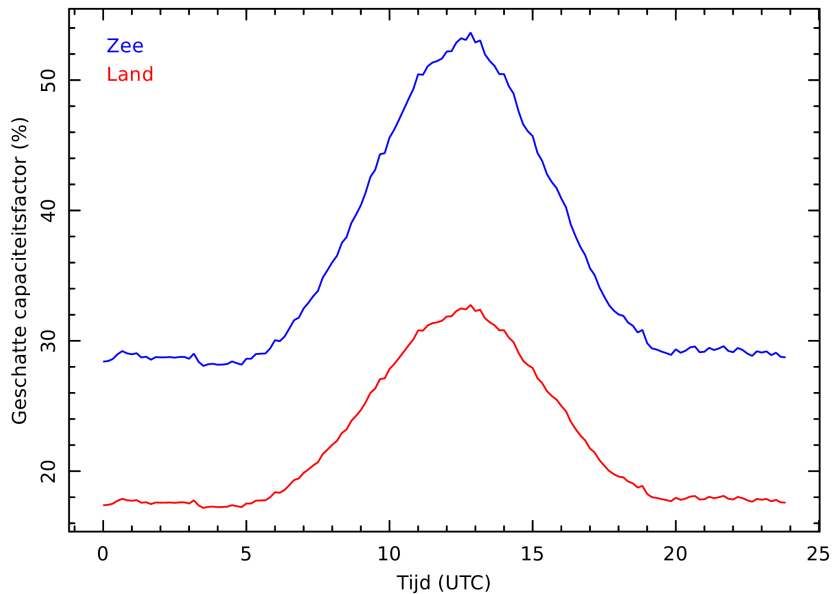
Voor de dagelijkse variatie zijn ten minste uurlijkse meetwaarden nodig, maar deze lijken niet voorhanden. Om toch een idee te krijgen geven we hier een grove benadering tussen de gemeten windsnelheid op 10 meter hoogte boven land in Wageningen [3], en de capaciteitsfactor voor windturbines op land, zoals gegeven door het CBS. De relatie is afgeleid in Appendix A. We gebruiken voor land

$$\begin{aligned} \text{CF}(\%) &= 6.0 + 0.14 \cdot v^3 && \text{voor } v < 6.6 \text{ m/s;} \\ \text{CF} &= 46.5\% && \text{voor } v \geq 6.6 \text{ m/s,} \end{aligned} \quad (1)$$

en voor zee

$$\begin{aligned} \text{CF}(\%) &= 9.7 + 0.23 \cdot v^3 && \text{voor } v < 6.6 \text{ m/s;} \\ \text{CF} &= 75.3\% && \text{voor } v \geq 6.6 \text{ m/s.} \end{aligned} \quad (2)$$

Als inputdata nemen we opnieuw de gemeten weerdata uit Wageningen [3], waarbij we voor elk slot van 10 minuten de gemiddelde waarde berekenen van de derde macht van de windsnelheid op 10 meter hoogte ( $\langle v^3 \rangle$ ) over 10 jaar (het gemiddelde van 3652 meetwaarden). Voor elk van deze gemiddelde waarden schatten we de capaciteitsfactor van windturbines op land in Nederland met behulp van vergelijking 1 en op zee door middel van vergelijking 2. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 4.



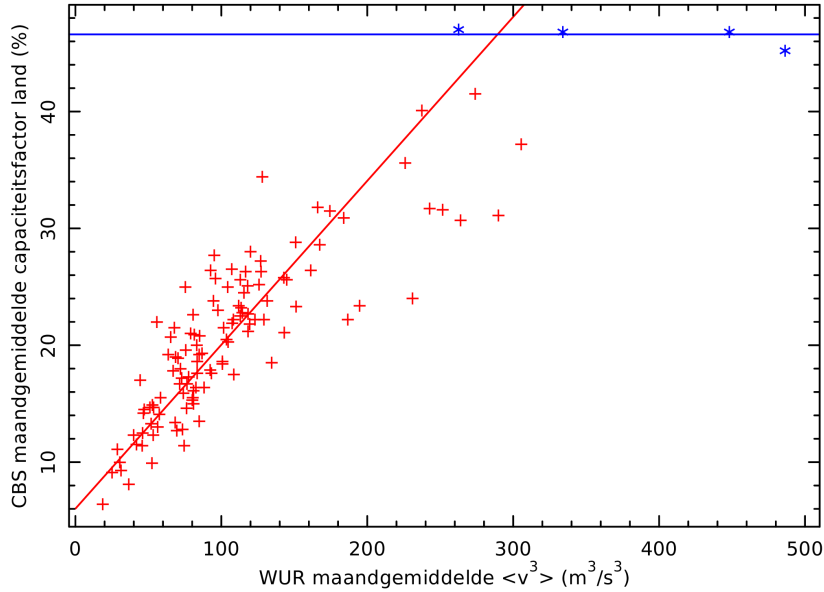
Figuur 4: De geschatte capaciteitsfactor voor windturbines op het land (onderste, rode lijn) en in zee (bovenste, blauwe lijn) als functie van de tijd, berekend uit de winddata gegeven door de WUR [3].

De figuur toont de dagelijkse variatie in de capaciteitsfactor als functie van de tijd. Het is duidelijk dat er ‘s nachts een lange periode met weinig wind is, waardoor de capaciteit typisch circa 80% van het gemiddelde bedraagt. Overdag is de opbrengst sterk gepiekt, met maximale waarden van het opgewekte vermogen aan windenergie die in het begin van de middag circa 60–70% hoger liggen dan gemiddeld.

## A Verband tussen gemeten windsnelheid en capaciteitsfactor

### A.1 Windturbines op land

Voor het bepalen van de dagelijkse variatie zijn ten minste uurlijkse meetwaarden nodig, maar deze lijken niet voorhanden. Om toch een idee te krijgen, leiden we hier een grove benadering af tussen de gemeten windsnelheid boven land, als gemeten in Wageningen door de WUR [3], en de capaciteitsfactor voor windturbines op land, zoals gegeven door het CBS [2]. De twee datasets overlappen voor de volledige jaren 2002–2011. De WUR heeft volledige meetdata voor de windsnelheid op 10 meter hoogte, voor iedere 10 minuten. Aangezien het opgewekte vermogen schaalst met de derde macht van de windsnelheid [zie b.v. 1] is uit de winddata het maandgemiddelde van de derde macht van de windsnelheid bepaald ( $\langle v^3 \rangle$ , niet  $\langle v \rangle^3$ ) en vergeleken met de maandelijkse capaciteitsfactor voor dezelfde periode.



Figuur 5: De capaciteitsfactor voor windturbines op het land als gegeven door CBS [2] uitgezet tegen het maandelijks gemiddelde van de derde macht van de windsnelheid op 10 m hoogte, door de WUR [3].

Figuur 5 toont een duidelijk verband tussen de windsnelheid en de capaciteitsfactor, ondanks het feit dat de correlatie tussen de twee datasets met 0.84 niet extreem sterk is. Hoewel de data voor hoge windsnelheden beperkt zijn, lijkt de productiefactor te verzadigen. De gemiddelde capaciteitsfactor voor de hoogste vier waarden (alle boven 45%) bedraagt 46.5% (blauwe horizontale lijn); we nemen hier aan dat dit de maximale waarde is die kan worden bereikt. Door de overige punten (ongewogen) te fitten met een rechte lijn (rood in de Figuur) vinden we het volgende verband tussen de capaciteitsfactor en de windsnelheid:<sup>1</sup>

$$\begin{aligned} \text{CF}(\%) &= 6.0 + 0.14 \cdot \langle v^3 \rangle && \text{voor } \langle v^3 \rangle < 289 \text{ m}^3/\text{s}^3; \\ \text{CF} &= 46.5\% && \text{voor } \langle v^3 \rangle \geq 289 \text{ m}^3/\text{s}^3. \end{aligned} \quad (3)$$

Wanneer we aannemen dat dit verband niet alleen geldt voor de maandgemiddelden, maar ook voor de instantane waarden voor de windsnelheid, kunnen we uurlijkse waarden voor de capaciteitsfactor van windturbines op het land in Nederland afschatten (zie Sectie 5).

## A.2 Windturbines in zee

Voor windenergie op zee is het verband tussen de maandelijks gemeten waarden in Wageningen en de opbrengst van de windturbines logischer wijze veel zwakker (een correlatie van 0.43). Indien we desondanks een zeer ruwe schatting willen maken van de dagelijkse variatie, kunnen we kijken naar Figuur 3b, waarin we zien dat de *relatieve* variatie in de opwek van windenergie op zee over de seizoenen in eerste benadering lijkt op diezelfde variatie voor windturbines op land. Als we de grove aanname maken dat deze relatieve variaties hetzelfde zijn, en dat deze ook hetzelfde zijn voor de *dagelijkse* variatie, dan kunnen we de dagelijkse variatie van opgewekte windenergie op zee afschatten door de resultaten die we in de vorige sectie verkregen voor windenergie op land schalen met de gemiddelde capaciteitsfactor over de periode waarvoor meetgegevens beschikbaar zijn. Hiervoor bepalen we de gemiddelde capaciteitsfactor opnieuw, voor de periode 2007–2014, waarvoor zowel land- als zeedata volledig beschikbaar zijn. Voor land geeft dit  $22.1 \pm 1.6\%$ , voor zee opnieuw  $36.0 \pm 3.9\%$ . De ratio tussen deze twee gemiddelden is  $1.62 \pm 0.19$ , dus een capaciteitsfactor voor windenergie op zee die circa 62% hoger ligt dan die voor windenergie op land. Wanneer we vergelijking 3 vermenigvuldigen met de factor 1.62 levert dit

$$\begin{aligned} \text{CF}(\%) &= 9.7 + 0.23 \cdot \langle v^3 \rangle && \text{voor } \langle v^3 \rangle < 289 \text{ m}^3/\text{s}^3; \\ \text{CF} &= 75.3\% && \text{voor } \langle v^3 \rangle \geq 289 \text{ m}^3/\text{s}^3. \end{aligned} \quad (4)$$

<sup>1</sup>Het punt  $\langle v^3 \rangle = 289 \text{ m}^3/\text{s}^3$  is het snijpunt van de twee lijnen in Figuur 5.

**Note: Merk op dat we hiermee aannemen dat de verzadigingswaarde voor windturbines in zee eveneens 62% hoger ligt dan voor die op land.**

## Referenties

- [1] T. Burton. *Wind energy: handbook*. J. Wiley, 2001. ISBN 9780471489979.
- [2] CBS. Windenergie op land; productie en capaciteit per provincie. URL <http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=70960NED>. visited 2015-11-12.
- [3] WUR. Meteostation Haarweg, Wageningen. URL <http://www.met.wau.nl/haarwegdata/>. visited 2014-11-19.