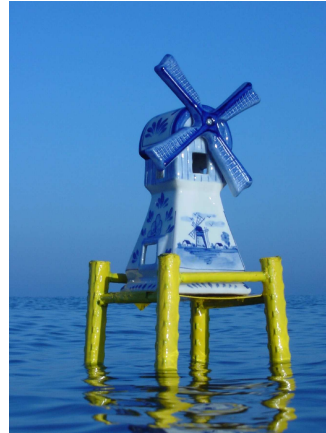


Wind Werkt

Prof.dr. Gerard J.W. van Bussel

Leerstoel Windenergie
29 Januari 2011



Wind Werkt.....met Weibull

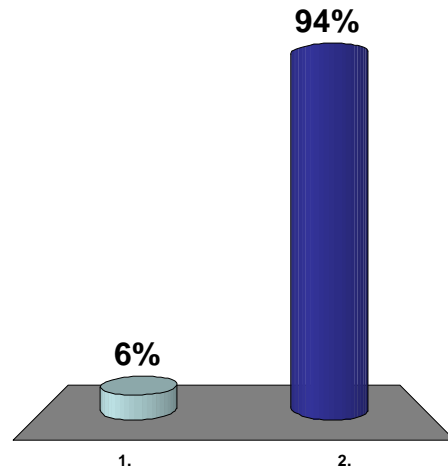
Prof.dr. Gerard J.W. van Bussel

Leerstoel Windenergie
29 Januari 2011



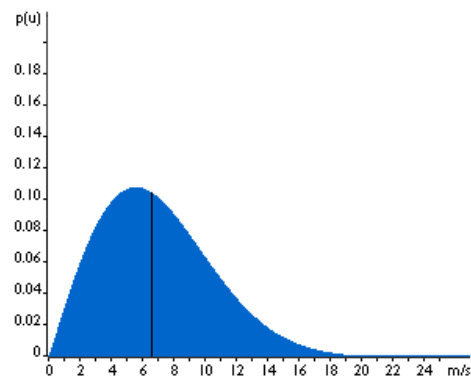
Wie weet wat Weibull functies zijn?

1. JA
2. NEE



Wie weet wat Weibull functies zijn?

1. JA
2. NEE

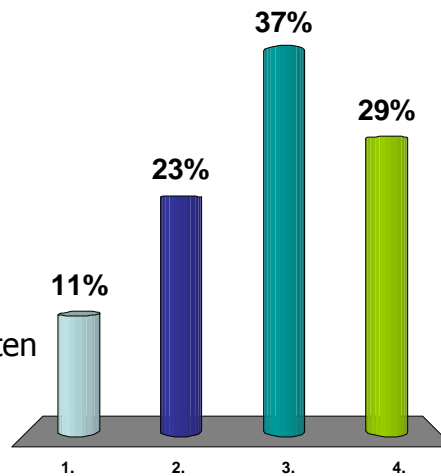


Scale $A = 7.9$; Shape $k = 2.0$; Mean = 7; Median = 6.60

Hoe duur is windstroom?

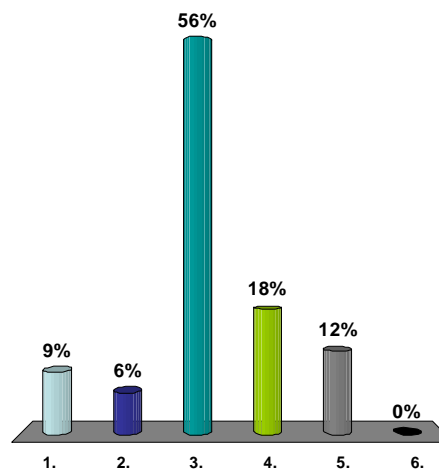
1. minder dan 5 €/kWh
2. tussen 5 - 8 €/kWh
3. tussen 8 - 13 €/kWh
4. meer dan 13 €/kWh

Het betreft hier de productiekosten



Hoeveel draagt wind bij aan de elektriciteitsvoorziening in Nederland

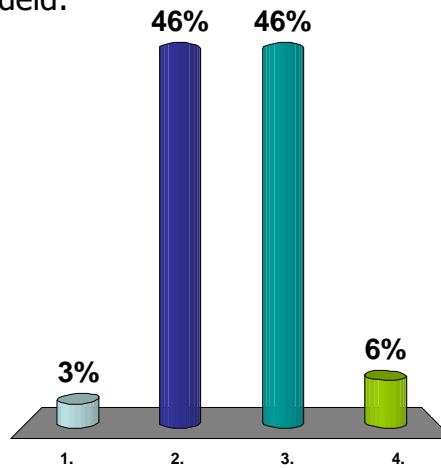
1. < 1 %
2. $1 < x < 2$ %
3. $2 < x < 4$ %
4. $4 < x < 8$ %
5. $8 < x < 16$ %
6. > 16 %



Windaanbod

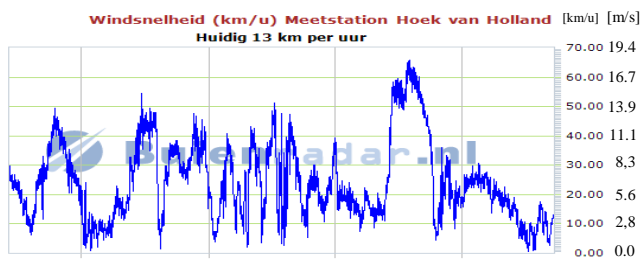
De hoeveelheid windenergie die aan de kust ons land binnenkomt bedraagt gemiddeld:

1. $P < 50$ Watt/ m²
2. $50 < P < 100$ Watt/ m²
3. $100 < P < 500$ Watt/ m²
4. $P > 500$ Watt/ m²

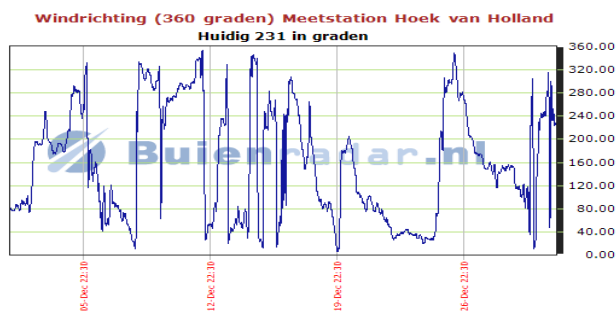


Het windveld in een punt in de ruimte

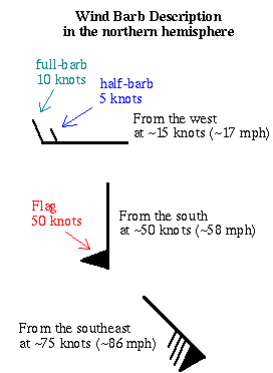
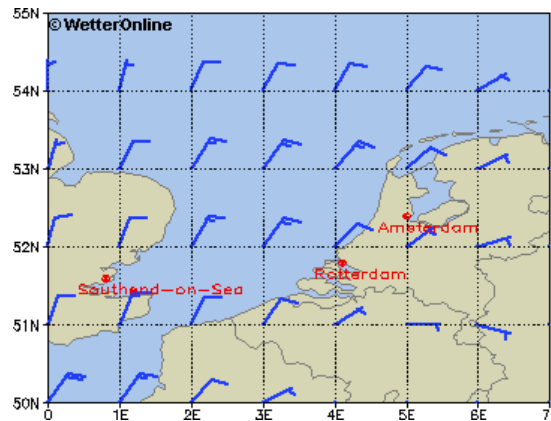
Windsnelheid als
functie van tijd
[km/u] of [m/s]



Windrichting als
functie van tijd
[graden]



Meteorologische weergave van een ruimtelijk windveld



Vectoriële representatie van een windveld in een punt (tijdsreeks)

- West-oost richting: $U(t)$ snelheid langs x - as
- Zuid-noord richting $V(t)$ snelheid langs y-as

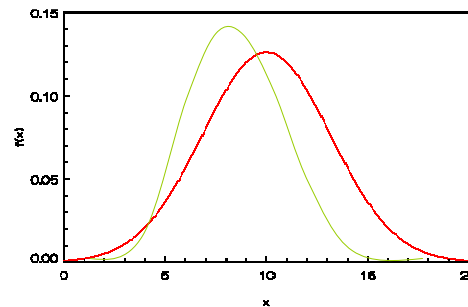
$$U(t) = |\vec{U}(t)| \cos \alpha(t)$$

$$V(t) = |\vec{U}(t)| \sin \alpha(t)$$

Stochastische verdeling van een windveld in een punt

- West-oost richting: $U(t)$ normaal verdeeld, parameters σ_1, μ_1
- Zuid-noord richting $V(t)$ normaal verdeeld, parameters σ_2, μ_2

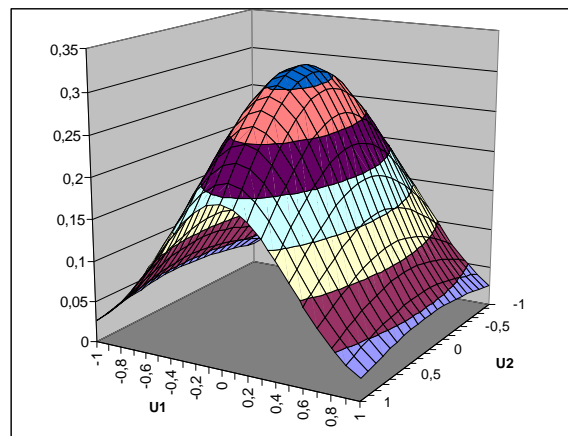
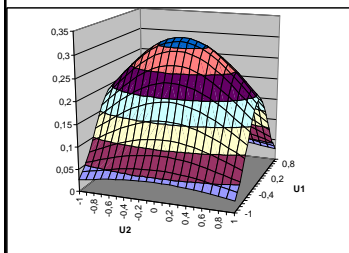
$$f(U) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{U-\mu}{\sigma}\right)^2}$$



3 dimensionale normale verdeling

$$f(U,V) = \frac{1}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{U-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2} \frac{1}{\sigma_2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{V-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2}$$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \mu_2 = 0 \\ \sigma_1 &\text{ en } \sigma_2 \neq 0 \\ \sigma_1 &\neq \sigma_2 \end{aligned}$$



Het beeld van bovenaf "contour plot"

"contour plot"

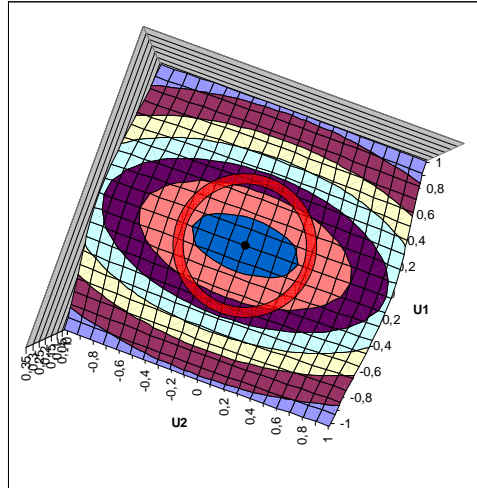
Gelijke windsnelheden:

- cirkels rond oorsprong

Waarschijnlijkheid U:

inhoud van cylinder:

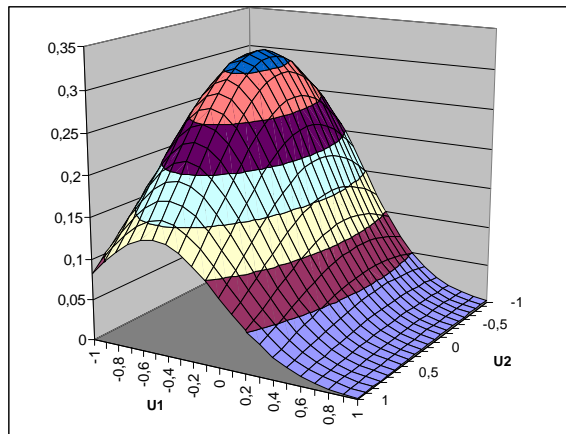
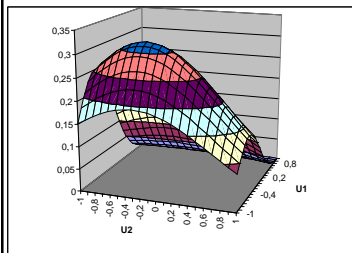
- wanddikte δU
- golvende hoogte



3 dimensionale normale verdeling

$$f(U,V) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{U-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2} \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{V-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2}$$

Nu met μ_1 en $\mu_2 \neq 0$:
(en: σ_1 en $\sigma_2 \neq 0$)



Het beeld van bovenaf "contour plot"

Nu met μ_1 en $\mu_2 \neq 0$:
(en: σ_1 en $\sigma_2 \neq 0$)

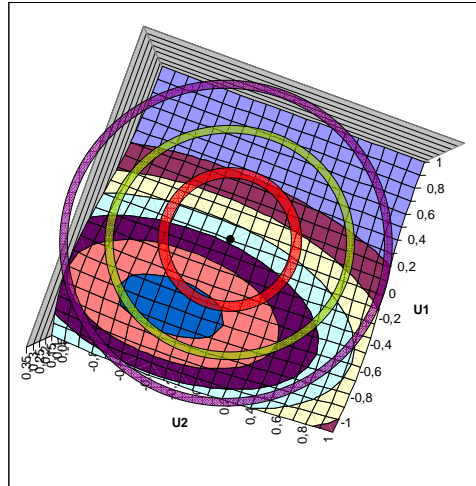
Gelijke windsnelheden:

- cirkels rond oorsprong

Waarschijnlijkheid U:

inhoud van cylinder:

- wanddikte δU
- golvende hoogte



3 dimensionale normale verdeling

$$f(U, V) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{U-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2} \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{V-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2}$$

Integreer over cirkel:

Eenvoudig geval:

$$\mu_1 = \mu_2 = 0:$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 \neq 0$$

$$U = |\vec{U}| \cos \alpha$$

$$V = |\vec{U}| \sin \alpha$$

$$f(|\vec{U}|) = f(U) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{U^2}{2\sigma^2}} U d\alpha$$

$$f(U) = \frac{U}{\sigma^2} e^{-\frac{U^2}{2\sigma^2}}$$

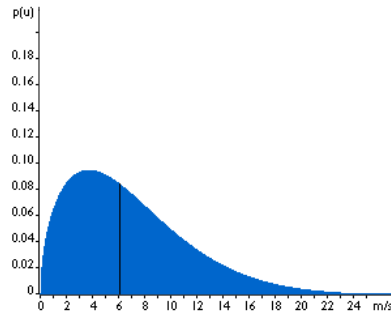
Weibull verdelingen voor windsnelheden

$$f(U) = \frac{U}{\sigma^2} e^{-\frac{U^2}{2\sigma^2}}$$

$$f(U) = \frac{k}{a} \left(\frac{U}{a}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{U}{a}\right)^k}$$

a: schaalfactor

k: vormfactor



Schaal $a = 7,76$; vorm $k = 1,5$; gemiddelde = 7; mediaan = 6,1

Wallodi Weibull

Ernst Hjalmar Waloddi Weibull
(18 June 1887-12 October 1979)

Zweeds ingenieur en wetenschapper

- 1924 PhD Uppsala
- 1939 paper over Weibull verdelingen
- **1951 ASME paper met 7 case studies** By Dr. Robert B. Abernethy
- 1978 Great gold medal Royal Swedish Academy of Sciences.



Wallodi Weibull 1887-1979
Photo by Sam C. Sandberg

Biography of Dr. E. H. Wallodi Weibull

Studio Classroom instructions:



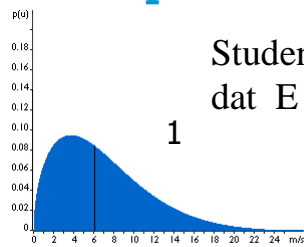
- Open the AE1105 blackboard site, section: Wind Energy Tutorial
- Background documents can be found in this section as well
- Open the multimedia online reader

[Online reader](#)

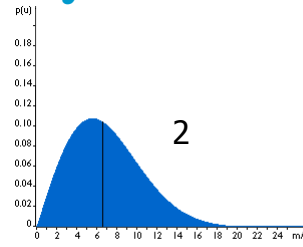
Weibull distribution and energy content

- Go to the **Wind description/Energy content** section subsection *Variability*
- Go to the Weibull Plotter Programme (bottom of page)
- Plot the Weibull curves for shape factor $k= 1.5, 2, 2.5$ and 3 and copy $k=1.5$ and $k=3.0$ into your document
- **Which shape factor yields the highest energy content?**
Discuss this in your group!

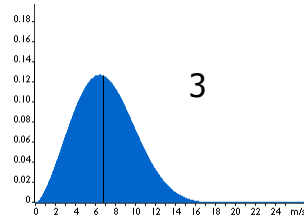
Weibull probability density functions



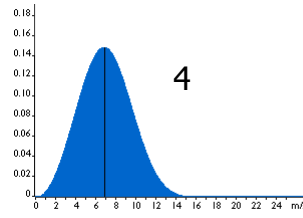
Scale A =7.76; Shape k =1.5; Mean = 7; Median = 6.10



Scale A =7.9; Shape k =2.0; Mean = 7; Median = 6.60



Scale A =7.88; Shape k =2.5; Mean = 7; Median = 6.8

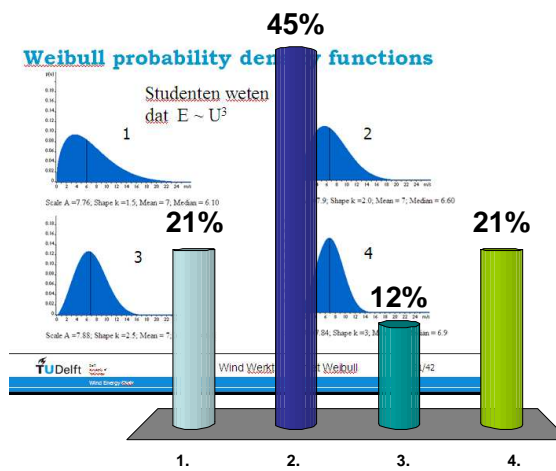


Scale A =7.84; Shape k =3; Mean = 7; Median = 6.9

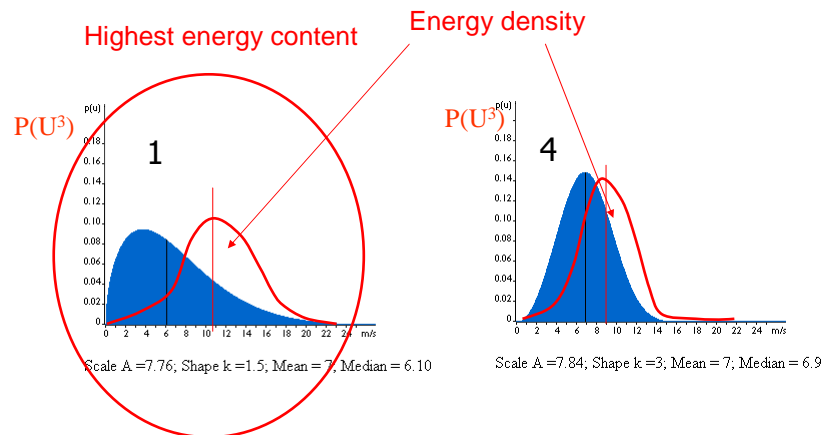
Weibull probability density functions

Welke vormfactor heeft de hoogste energie inhoud

1. vormfactor $k=1,5$
2. vormfactor $k=2$
3. vormfactor $k=2,5$
4. vormfactor $k=3$

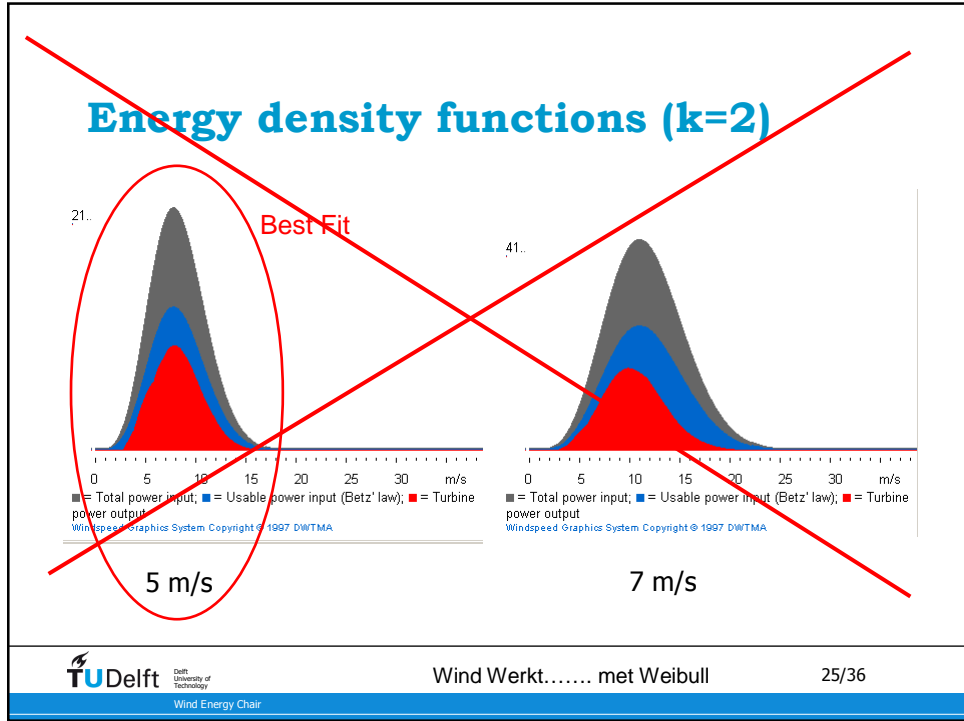


Weibull probability density functions



Energy output

- Go to **Turbine operation/Energy output**, subsection Rotor Operations
- Go to the Turbine Power Calculator
keep all data default, but play with mean wind speed
 - choose at least 5, 6, and 7 m/s mean wind speed
 - plot power densities for these wind speeds and copy in your document
 - for which wind speed is the default windturbine best suited?
Discuss this in your group!



Langste rotorblad tot nu toe: 61,5 m

LM 61.5 P

Product specifications

Blade type	LM 61.5 P
Rotor diameter (max.)	126.3 m
Blade regulation	Pitch
Length	61.5 m
Max. chord	4.600 m
Profiled area	183.0 m ²
Weight	17.740 kg*
Number of bolts	128
Size of bolts	M36
Bolt circle diameter	3.200 mm

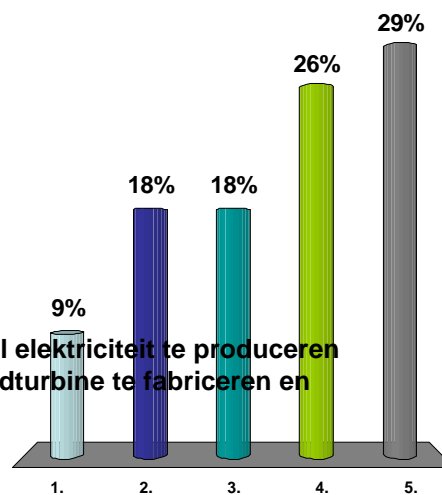
*Preliminary data



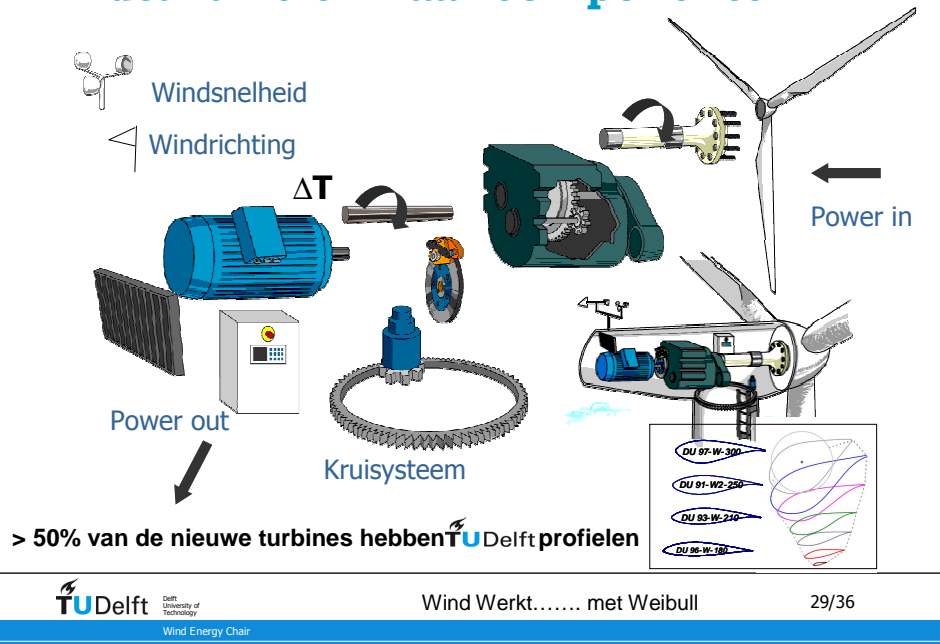
Wat is de energetische terugverdientijd van een windturbine?

1. minder dan 6 maanden
2. tussen 6 maanden en 1 jaar
3. tussen 1 en 2 jaar
4. tussen 2 en 4 jaar
5. meer dan 4 jaar

NB: dit is de tijd nodig om net zoveel elektriciteit te produceren dan de energie nodig om de windturbine te fabriceren en te installeren



Windturbine en haar componenten



Betrouwbaarheid en falen

t_f is het tijdstip van falen van een component

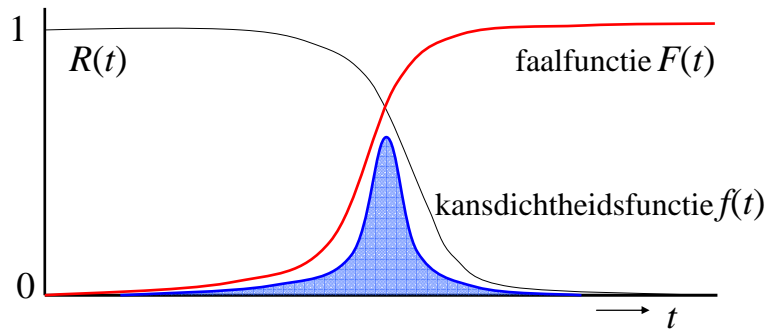
De betrouwbaarheidsfunctie $R(t)$ geeft de waarschijnlijkheid van falen na tijdstip t :

$$R(t) = P(t_f > t)$$

De faaldichtheid $f(t)$ geeft aan wanneer falen het meest optreedt:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

Voorbeeld van faal-, betrouwbaarheids- en kansdichtheidsfunctie

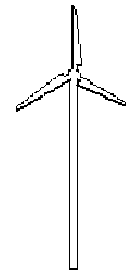
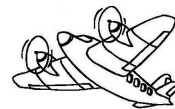


$$F(t) + R(t) = 1$$

Repareerbare producten

- Producten die na reparatie van een onderdeel weer net zo betrouwbaar zijn als ervoor

- Voorbeelden:
 - omafiets (?)
 - vliegtuig
 - windturbine



- => "hazard rate" constant

Hazard rate (faalintensiteit):

Voorwaardelijke kansdichtheid $h(t)$:

$$\frac{\text{Faalkans op tijdstip } t = t_f}{\text{Kans op niet falen vóór } t = t_f} = h(t) = \frac{f(t)}{P(t_f > t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Dus:
$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad [t^{-1}]$$

Constante "hazard rate":

$$h(t) = h_0 \rightarrow h_0 = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \rightarrow h_0 R(t) = -\frac{dR(t)}{dt}$$

$$R(t) = e^{-h_0 t}$$

$$\left. \begin{aligned} F(t) &= 1 - R(t) = 1 - e^{-h_0 t} \\ f(t) &= \frac{dF(t)}{dt} = h_0 e^{-h_0 t} \end{aligned} \right\} \text{Weibull} \begin{cases} \text{CDF} \\ \text{PDF} \end{cases}$$

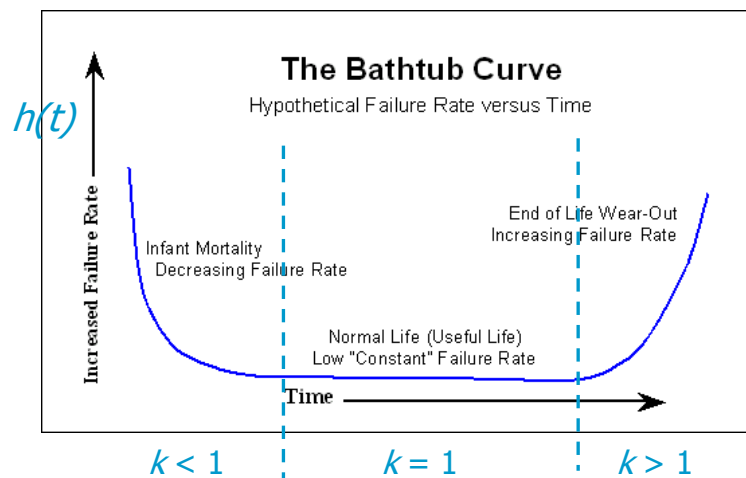
Generaliseerde Weibull PDF verdeling:

$$f(x, k, a) = \frac{k}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^k}$$

- $k = 1$ constant failure rate ($h_0 = 1/a$)
- $k < 1$ decreasing failure rate
- $k > 1$ increasing failure rate

Variatie in "hazard rate"

Bij repareerbare producten



Wind Werkt.....met Weibull wiskunde

aan uw en mijn duurzame toekomst

Enter question text...

1. Enter answer text...
2. Enter answer text...
3. Enter answer text...
4. Enter answer text...



TurningPoint

TurningPoint hardware en software