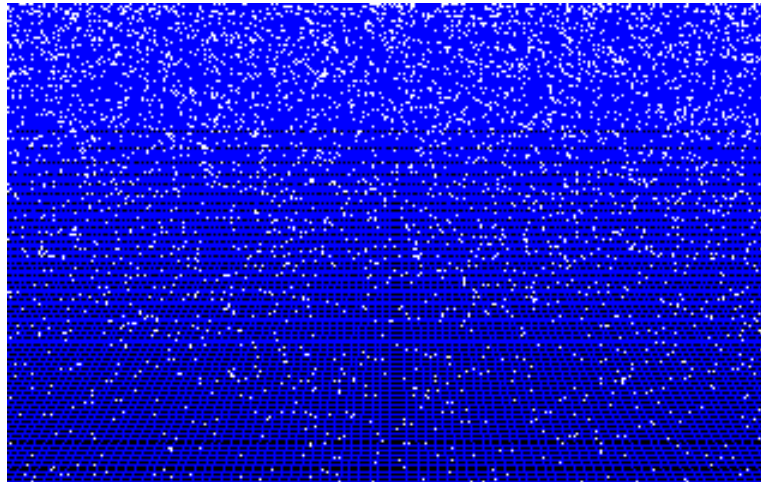


Kernenergie

FEW cursus



Jo van den Brand en Roel Aaij

www.nikhef.nl/~jo/energie

2 mei 2012

Inhoud

- **Jo van den Brand**

- Email: jo@nikhef.nl URL: www.nikhef.nl/~jo/energie
- 0620 539 484 / 020 598 7900, Kamer T2.69

- **Roel Aaij**

- Email: raaij@nikhef.nl

- **Dictaat**

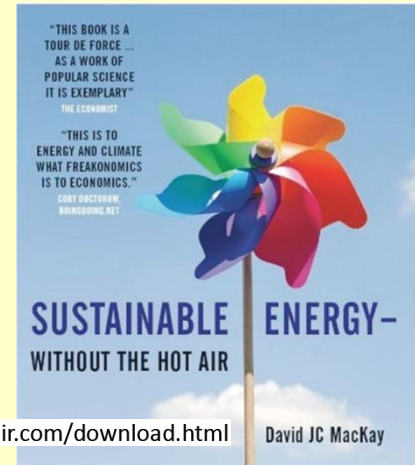
- **Werk in uitvoering**

- **Boeken**

- **Energy Science, John Andrews & Nick Jelley**
- **Sustainable Energy – without the hot air, David JC MacKay**
- **Elmer E. Lewis, Fundamentals of Nuclear Reactor Physics**

- **Inhoud van de cursus**

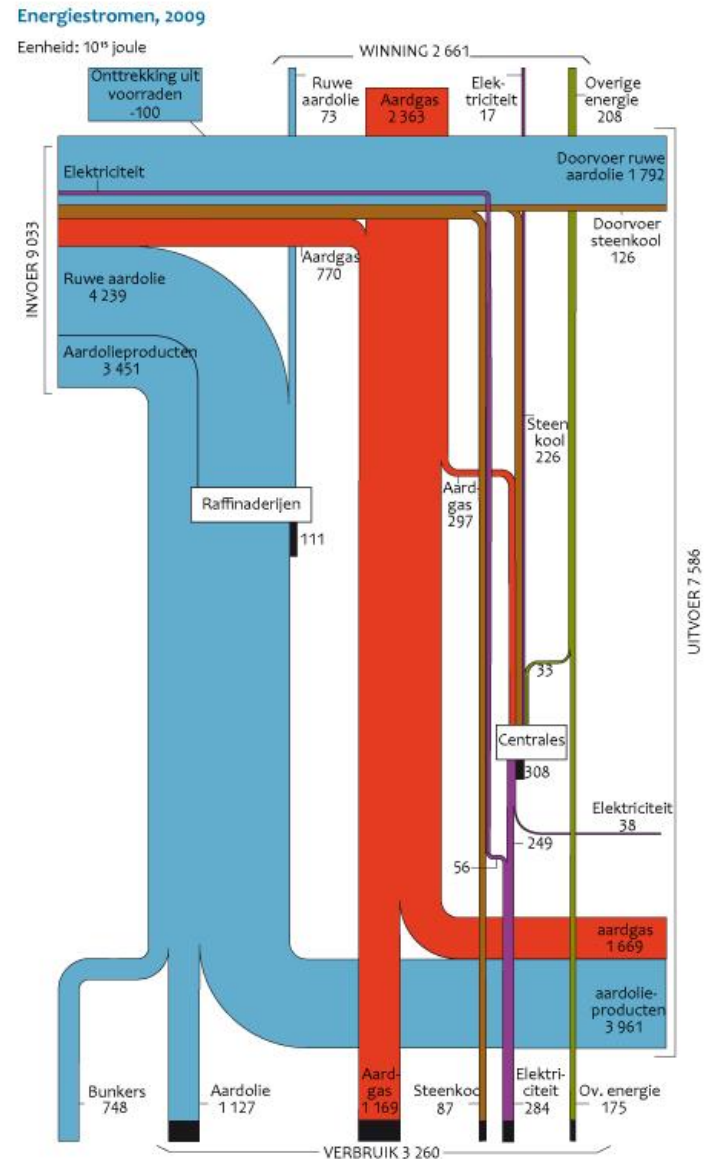
- Week 1 Motivatie, exponentiële groei, CO2 toename, broeikaseffect, klimaat
Energieverbruik: transport, verwarming, koeling, verlichting, landbouw, veeteelt, fabricage
- Week 2 Kernenergie: kernfysica, splijting
- Week 3 Kernenergie: reactorfysica
- Week 4 Kernenergie: maatschappelijke discussie (risico's, afval), kernfusie
- Week 5 Energie, thermodynamica
Entropie, enthalpie, Carnot, Otto, Rankine processen, informatie
Energiebronnen: fossiele brandstoffen (olie, gas, kolen), wind, zon (PV, thermisch, biomassa), waterkracht, geothermisch
- Week 6 Fluctuaties: opslag (batterijen, water, waterstof), transport van energie, efficiëntie
Energie: scenario's voor Nederland, wereld, fysieke mogelijkheden, politiek, ethische vragen, economische aspecten



Gratis te downloaden

Energiebalans NL

- Grootste deel van de aardolie wordt ingevoerd
 - 1/3 wordt gebruikt
 - 2/3 wordt uitgevoerd
- Grootste deel gas uit eigen winning
 - Grootste deel wordt geëxporteerd
- Totaal gebruik is 3 260 PJ
 - Gemiddeld 150.5 kWh/d per persoon
 - De zwarte blokjes
- Bunkers
 - Levering brandstof aan schepen en vliegtuig op NL grondgebied
 - Eigen voortstuwing in grensoverschrijdend verkeer
 - Wordt niet in als gebruik NL meegeteld
- Kernenergie
 - Verbruik 1.3% in 2009
 - 4% van de elektriciteit opgewekt in Borselle
 - 5% vande elektriciteit (kernenergie) wordt geïmporteerd
- Duurzame energie
 - Verbruik bijna 4% in 2009



N.B. De som van de zwarte blokjes is het totale energieverbruik.
In deze figuur zijn verschillende details verwaarloosd.

Bron: CBS.

Aanvoer en verbruik NL

- Aanvoer
 - Slechts 1/3 wordt in NL gebruikt
 - Rest is uitvoer
 - Vooral aardolie (en gas)
 - Energiebesparende maatregelen
 - Daling van het gebruik door isolatie, HR, etc.
- Elektriciteit
 - Productie door
 - Aardgas, steenkool, kernenergie
 - Rendement centrales verbeterd van 25% (1950) tot 43.5% (2009)

	Totaal	Steenkool en steenkool- producten ¹⁾	Aardolie en aardolie -producten ²⁾	Aardgas	Stoom uit kern- energie	Elektrici- -teit	Overige energie ³⁾
<i>PJ</i>							
Aanvoer 2009							
Winning	2 661	-	73	2 363	41	17	167
Invoer	9 033	516	7 690	770	-	56	-
Onttrokken aan voorraad	-100	-77	-24	1	-	-	-
Verbruik en uitvoer 2009							
Binnenlands verbruik	3 260	313	1 238	1 466	41	35	167
w.v. door energiebedrijven ⁴⁾	659	239	117	523	41	-284	23
door energie-afnemers	2 602	75	1 122	943	-	319	144
w.v. verbruik voor omzetting ⁵⁾	37	6	9	164	-	-52	-90
verbruik als grondstof en in ovens, ketels, kachels, etc.	2 565	69	1 113	779	-	370	234
Uitvoer	7 586	126	5 753	1 669	-	38	-
Bunkers 2009							
w.v. Scheepvaart	748	-	748	-	-	-	-
Luchtvaart	601	-	601	-	-	-	-
	146	-	146	-	-	-	-

Bron: CBS (2010).

CBS/dec10/0053

1) Onder andere bruinkool, cokesoven- en hoogovengas.

2) Onder andere petrocokes, lpg en restgassen.

3) Zoals stoom, warm water, biomassa en afval.

4) Door elektriciteit- en warmteproductiebedrijven, winningsbedrijven, vuilverbranding, distributiebedrijven, raffinaderijen en cokesfabrieken.

5) Omzetting in WKK en andere omzettingen.

NB. De negatieve getallen in de tabel duiden op het verbruik van energiedragers uit voorraden, respectievelijk de productie van energiedragers (bij energiebedrijven en afnemers grondstof).



Binnenlands verbruik

- Huishoudens
 - 13.0% van totaal
 - Ovens
 - Ketels
 - Kachels
- Verbruik 2009
 - Totaal 425 PJ
 - Gemiddeld 19.6 kWh/d
- Verbruik 2010
 - Totaal 466 PJ
 - Gemiddeld 21.5 kWh/d
- Overheidsbeleid
 - Sinds aardgasvondst
 - Stimuleer CVs
 - Stimuleer industrie met forse energiebehoefte

	1990	2000	2005	2008	2009	w.v.		
						als brandstof in	als	
						warmte- kracht- installaties ¹⁾	ovens, ketels, kachels, etc.	grondstof of als inzet voor omzetting in andere producten ²⁾
	<i>PJ</i>							
Totaal	2 723	3 065	3 311	3 334	3 260	440	2124	696
Energiebedrijven ³⁾	364	408	465	454	470	401	65	4
Industrie ⁴⁾	1 153	1 267	1 412	1 393	1 323	21	628	674
Huishoudens	.	432	425	424	425	-	425	-
Verkeer en vervoer	375	462	486	504	489	-	487	3
Overige energie-afnemers ⁵⁾	.	496	523	558	553	18	520	15

Bron: CBS.

CBS/dec10/0052

1) Voor omzetting in elektriciteit, stoom of warm water.

2) Inclusief verliezen bij omzetting.

3) Exclusief raffinaderijen en cokesfabrieken.

4) Inclusief raffinaderijen en cokesfabrieken.

5) Waaronder de land- en tuinbouw, bouw, en handel, diensten en overheid.

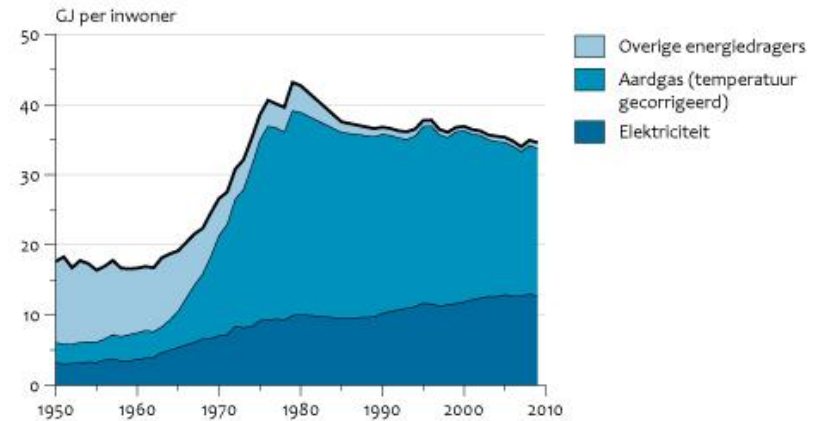
N.B. Met ingang van 2007 zijn de gegevens op een iets andere wijze berekend dan in de periode ervoor. Meer informatie geeft de technische toelichting.



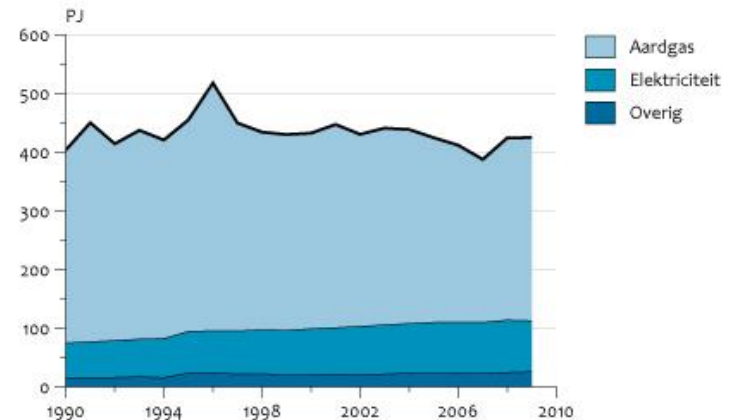
Huishoudelijk verbruik

- Aardgas
 - Verwarming 80%
 - Strengheid van winters (2009 zacht)
 - Koken 20%
 - Energiebesparende maatregelen
 - Daling van het gebruik door isolatie, HR
- Elektriciteit
 - Productie door
 - Aardgas, steenkool, kernenergie
 - Rendement centrales verbeterd van 25% (1950) tot 43.5% (2009)

Primair huishoudelijk energieverbruik



Energieverbruik door huishoudens



Windenergie

Wind

- Fysica van windturbine's
 - Hoeveel energie produceert een windturbine?
 - Wat is de maximale theoretische efficiëntie?
 - Hoe dicht kunnen we windmolens bij elkaar plaatsen?
- Windenergie in Nederland
 - Wat zijn de typische windkrachten?
 - Er zijn verschillende opties
 - Hoeveel windmolens kunnen op land plaatsen?
 - Wat zijn de offshore mogelijkheden?
- Financiële aspecten



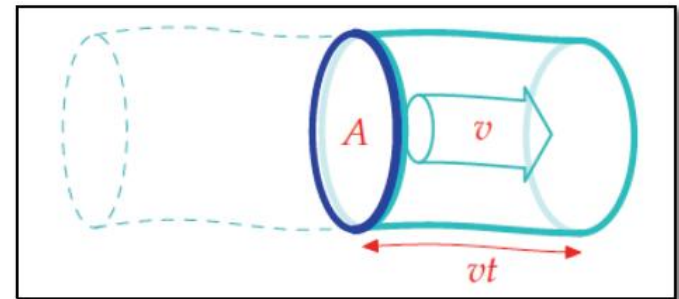
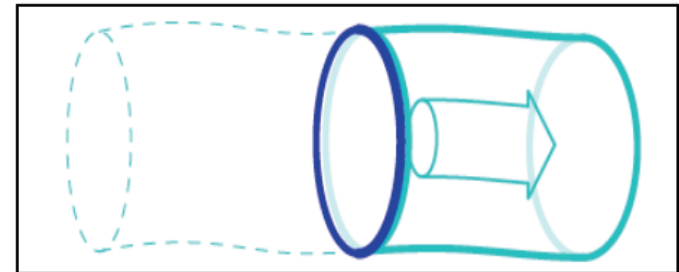
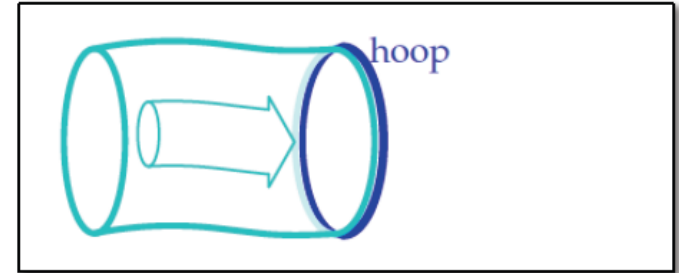
Hoe werkt een windmolen?

- Gebruik de kinetische energie van luchtmoleculen
 - Beschouw de massa lucht die door een lus gaat
 - Net voordat de lucht erdoor gaat hebben we
 - Even later is al deze massa door de lus gegaan
- Hoeveel energie gaat er door de lus?
 - Enkele definities
 - Doorsnede van de lus is A
 - Dichtheid van de lucht is ρ
 - Snelheid van de lucht is v
 - Natuurkunde geeft dan
 - Massa door de lus per tijdseenheid $m = A v t \rho$
 - Kinetische energie van deze massa lucht is

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \rho A v t v^2 = \frac{1}{2} \rho A t v^3.$$

- Delen door de tijd geeft het vermogen
- Herkent u dit?
- Dit is hetzelfde als het energieverlies van een auto door luchtweerstand!
- Zie les 2

$$\frac{\frac{1}{2} m v^2}{t} = \frac{1}{2} \rho A v^3.$$



Vermogen per rotor oppervlak

- Hoeveel vermogen krijgen we per eenheid rotor oppervlak?

- Hiervoor moeten we de windsnelheid weten

- Neem aan 6 m/s
- Voor dichtheid 1.3 kg/m³

$$\frac{1}{2}\rho v^3 = \frac{1}{2}1.3 \text{ kg/m}^3 \times (6 \text{ m/s})^3 = 140 \text{ W/m}^2.$$

- Sterk afhankelijk van windsnelheid
- Merk op dat kg/s³ gelijk is aan W/m²

- Voorbeeld

- Aannamen

- Diameter 25 m
- Efficiëntie conversie windenergie naar elektrische energie is 50%

- Vermogen is dan

$$\begin{aligned} & \text{efficiency factor} \times \text{power per unit area} \times \text{area} \\ &= 50\% \times \frac{1}{2}\rho v^3 \times \frac{\pi}{4}d^2 \\ &= 50\% \times 140 \text{ W/m}^2 \times \frac{\pi}{4}(25 \text{ m})^2 \\ &= 34 \text{ kW}. \end{aligned}$$

- Voor 90 m diameter vinden we 440 kW

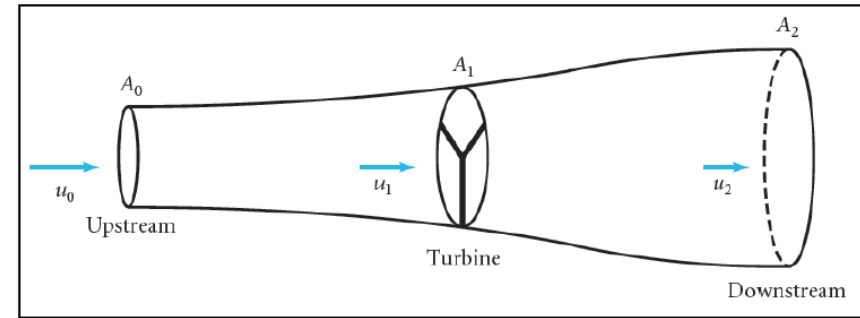
miles/ hour	km/h	m/s	Beaufort scale
2.2	3.6	1	force 1
7	11	3	force 2
11	18	5	force 3
13	21	6	force 4
16	25	7	force 4
22	36	10	force 5
29	47	13	force 6
36	58	16	force 7
42	68	19	force 8
49	79	22	force 9
60	97	27	force 10
69	112	31	force 11
78	126	35	force 12

Maximale efficiëntie - 1

- We namen een efficiëntie van 50% aan
 - Is dat realistisch?
 - Wat is het theoretisch maximum?
- Een meer realistisch model
 - Turbine haalt energie uit de wind
 - De lichtsnelheid neemt af als wind door turbine gaat
 - De diameter van de luchtkolom neemt toe
 - Kracht T (trust) op turbine door de wind
 - Afgeleide van de impuls
 - dm/dt is het massadebiet
 - Vermogen P dat we extraheren
 - We kunnen P uit anders uitdrukken
 - Als verlies van kinetische energie van de wind
 - Gelijkstellen geeft
 - We vinden

$$u_1 = \frac{1}{2}(u_0 + u_2), \text{ or}$$
$$u_2 = 2u_1 - u_0.$$

- Neem aan dat drukveranderingen klein zijn
 - Dichtheid van de lucht is constant
- Invullen in de uitdrukking voor P levert



$$T = \frac{dm}{dt}(u_0 - u_2)$$

$$P = Tu_1 = \frac{dm}{dt}(u_0 - u_2)u_1$$

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (u_0^2 - u_2^2)$$

$$(u_0 - u_2)u_1 = \frac{1}{2} (u_0^2 - u_2^2) = \frac{1}{2}(u_0 - u_2)(u_0 + u_2).$$

$$\frac{dm}{dt} = \rho u A = \rho u_1 A_1$$

$$P = 2\rho u_1^2 A_1 (u_0 - u_1).$$

Maximale efficiëntie - 2

- We hebben

- Introduceer de inductiefactor a
- Invullen levert
- Omcirkeld is het vermogen van de windbuis, zonder windmolen

$$P = 2\rho u_1^2 A_1 (u_0 - u_1).$$

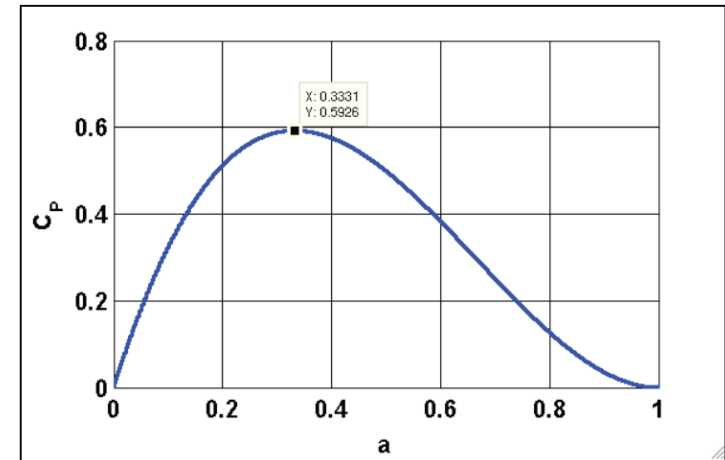
$$u_1 = (1 - a)u_0$$

$$P = \frac{1}{2}\rho u_0^3 A_1 \{4a(1 - a)^2\}.$$

- Power coefficient C_p

- Fractie van windvermogen dat door de windmolen wordt benut
- Voor welke a wordt C_p maximaal?
 - Los dat numeriek op
 - Zet de afgeleide dC_p/da gelijk aan nul
- In beide gevallen vinden we $a = 1/3$
 - Controleer dit
- Maximaal vermogen dat we kunnen extraheren
 - Dat is 59%
 - De factor 16/27 wordt de Lancaster-Betz limiet genoemd

$$C_p = P / \left\{ \frac{1}{2}\rho u_0^3 A_1 \right\} = 4a(1 - a)^2.$$



$$P_{\max} = \frac{1}{2}\rho u_0^3 A_1 \{16/27\}$$

Windpark – wat is de pakingsgraad?

- Windenergie van een windpark
 - Wat is de oppervlakte van het gebied?
 - Wat is de dichtheid van windmolens?
- Competitie tussen
 - Efficient gebruik van het land
 - Wind-schaduw van molens onderling
 - Meeste parken gebruiken 4 – 7 rotor diameters



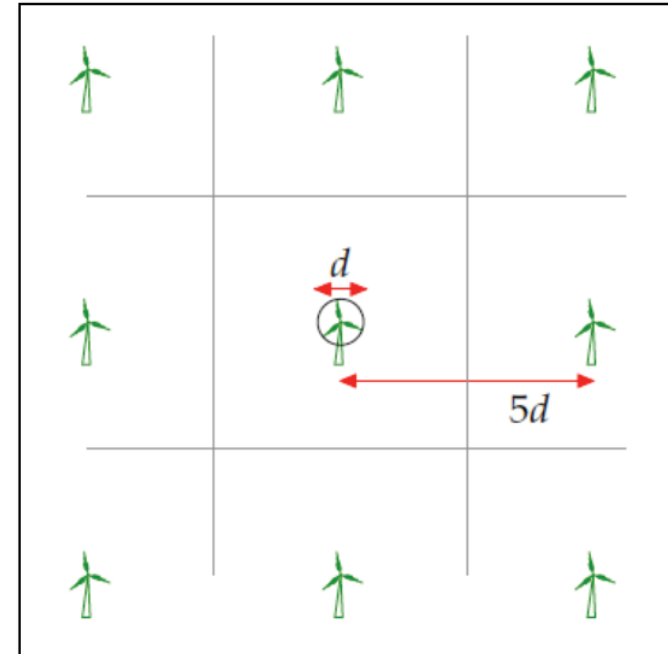
Windpark – wat is de pakingsgraad?

- Windenergie van een windpark
 - Wat is de oppervlakte van het gebied?
 - Wat is de dichtheid van windmolens?
- Competitie tussen
 - Efficient gebruik van het land
 - Wind-schaduw van molens onderling
 - Meeste parken gebruiken 4 – 7 rotor diameters
 - Voorbeeld: gebruik $5d$

- Oppervlak per turbine is $25 d^2$
- Per windmolen geldt
- Per eenheid oppervlak

$$50\% \times \frac{1}{2} \rho v^3 \times \frac{\pi}{4} d^2$$

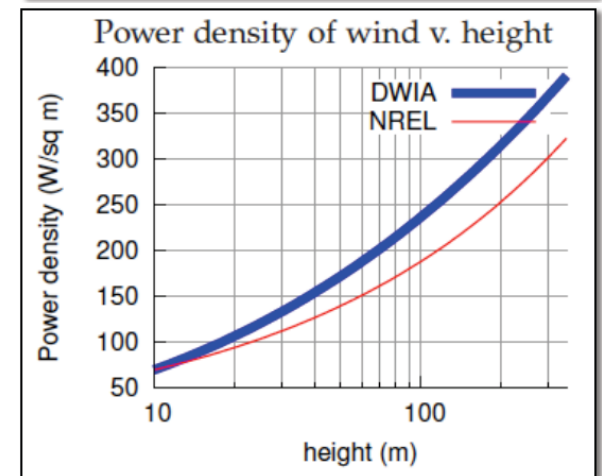
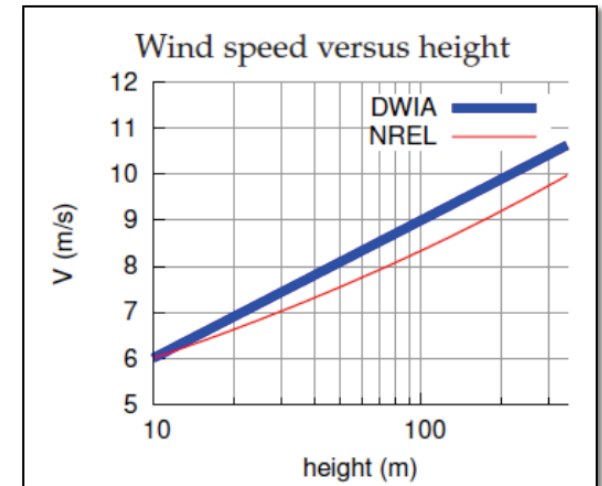
$$\begin{aligned} \frac{\text{power per windmill (B.4)}}{\text{land area per windmill}} &= \frac{\frac{1}{2} \rho v^3 \frac{\pi}{8} d^2}{(5d)^2} \\ &= \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho v^3 \\ &= 0.016 \times 140 \text{ W/m}^2 \\ &= 2.2 \text{ W/m}^2. \end{aligned}$$



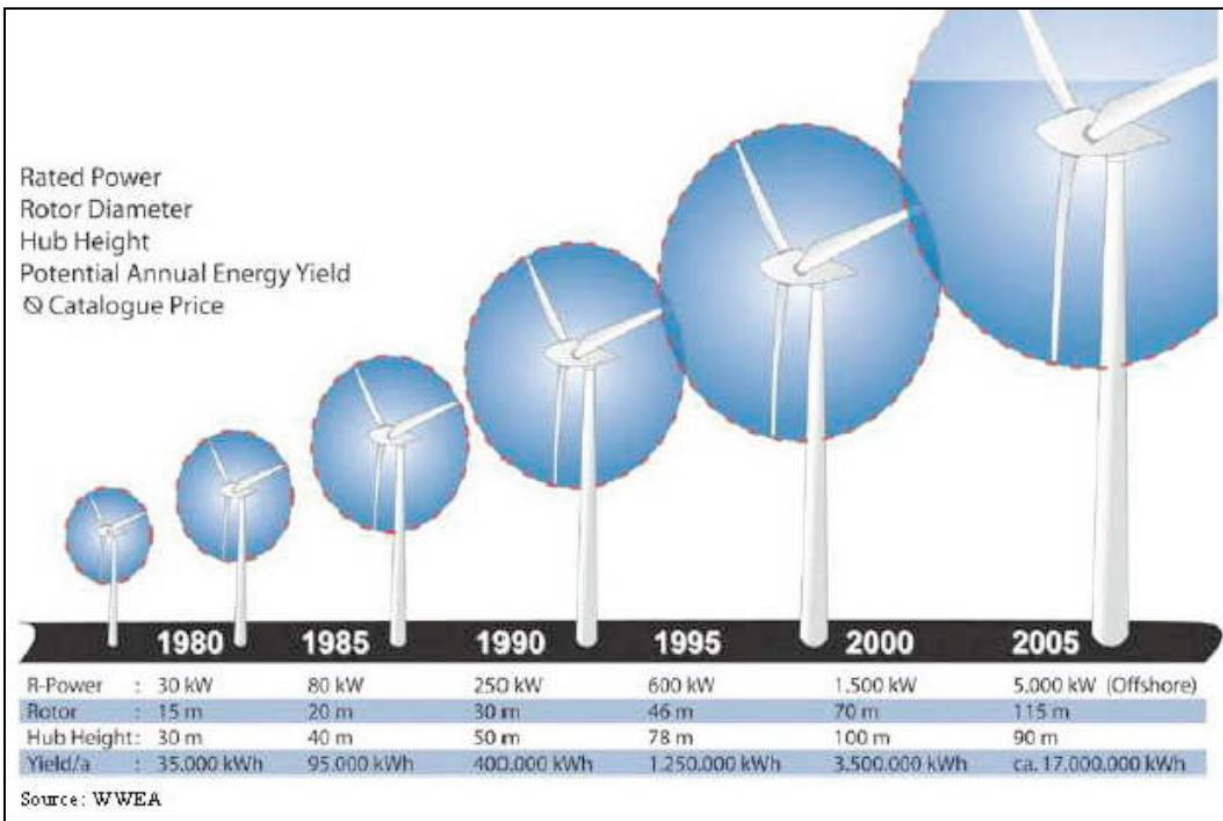
- Voor windsnelheid van 6 m/s vinden we 2 W/m² voor een windpark
 - Opgave: controleer dit aan een bestaand Nederlands windpark
 - Diameter van de rotor valt eruit in eerste orde
 - Waarom maken ze die turbines dan steeds groter en groter?

Windturbines

- Windsnelheid
 - Neemt toe met hoogte
- Economie/infrastructuur
 - Liever paar grote, dan veel kleine



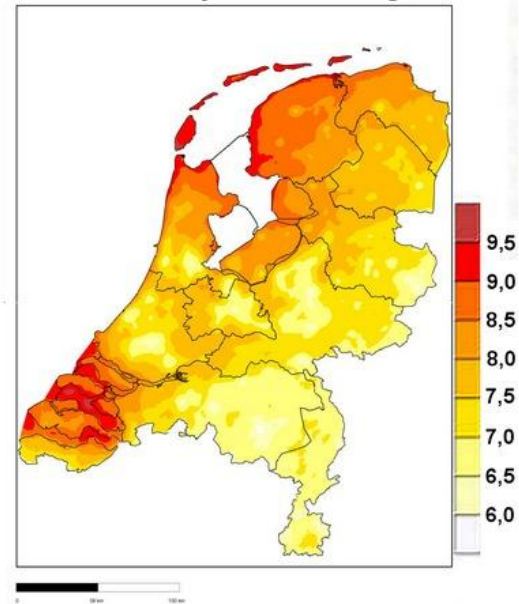
DWIA = Danish Wind Industry Association
 NREL = National Renewable Energy Laboratory



Nederland

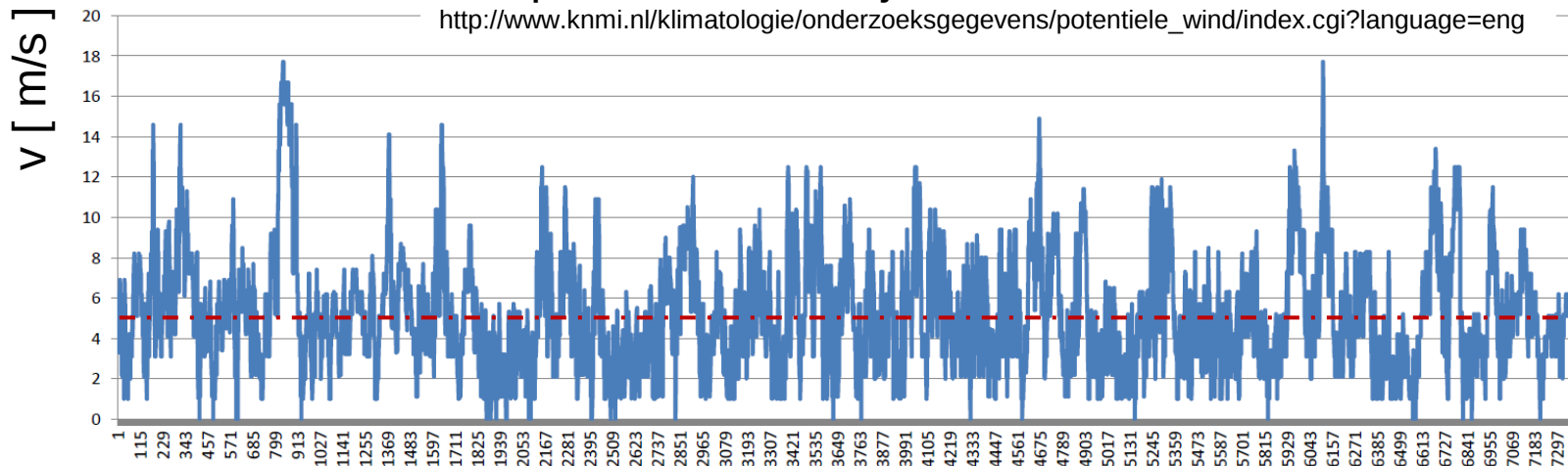
- Hoeveel wind hebben we?
 - Meer wind in de winter
 - De 6 m/s is aan de hoge kant voor $h = 10$ m
 - Op 100 m hoogte is er meer wind (aan de kust)
- Tijdsafhankelijkheid
 - Windsnelheid varieert fors
 - Energie opslaan voor als het niet waait
 - We moeten veel meer vermogen installeren dan wat er gemiddeld nodig is
 - Opgave
 - Bepaal P als $v = 5$ m/s (constant)
 - De helft van de tijd 0 m/s en de helft 10 m/s

Windkaart op 100 m hoogte



Schiphol $h = 10$ m: 1 januari – 4 november 2011

http://www.knmi.nl/klimatologie/onderzoeksgegevens/potentiele_wind/index.cgi?language=eng



5.1 m/s

Status windenergie in NL

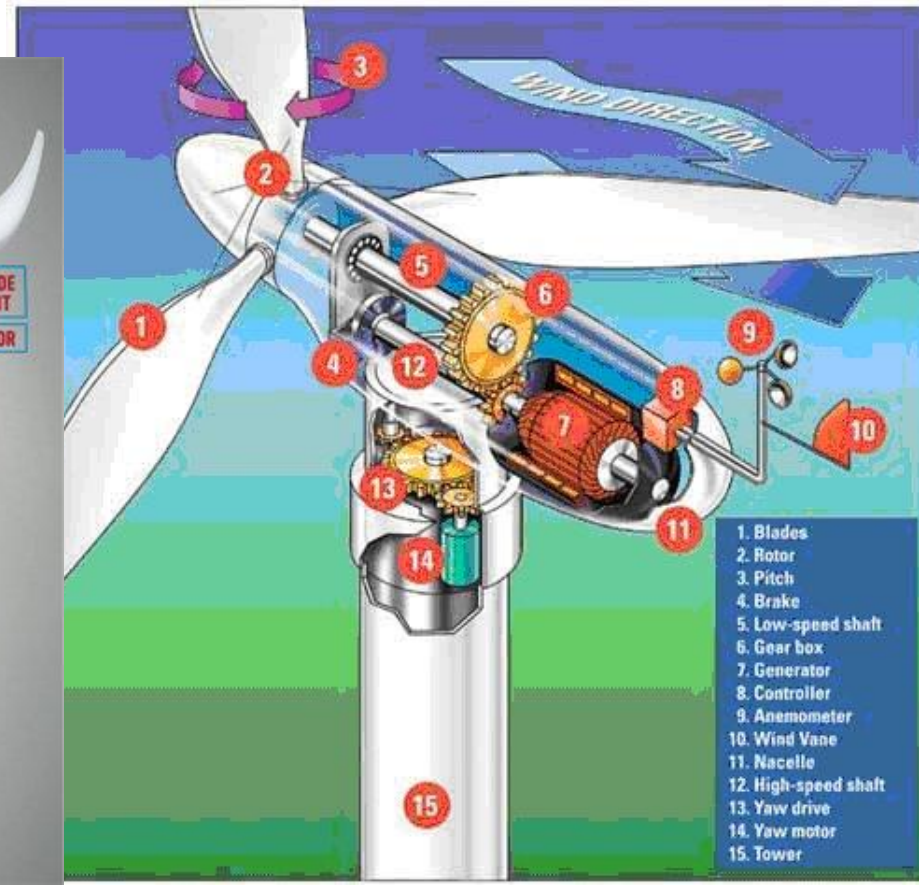
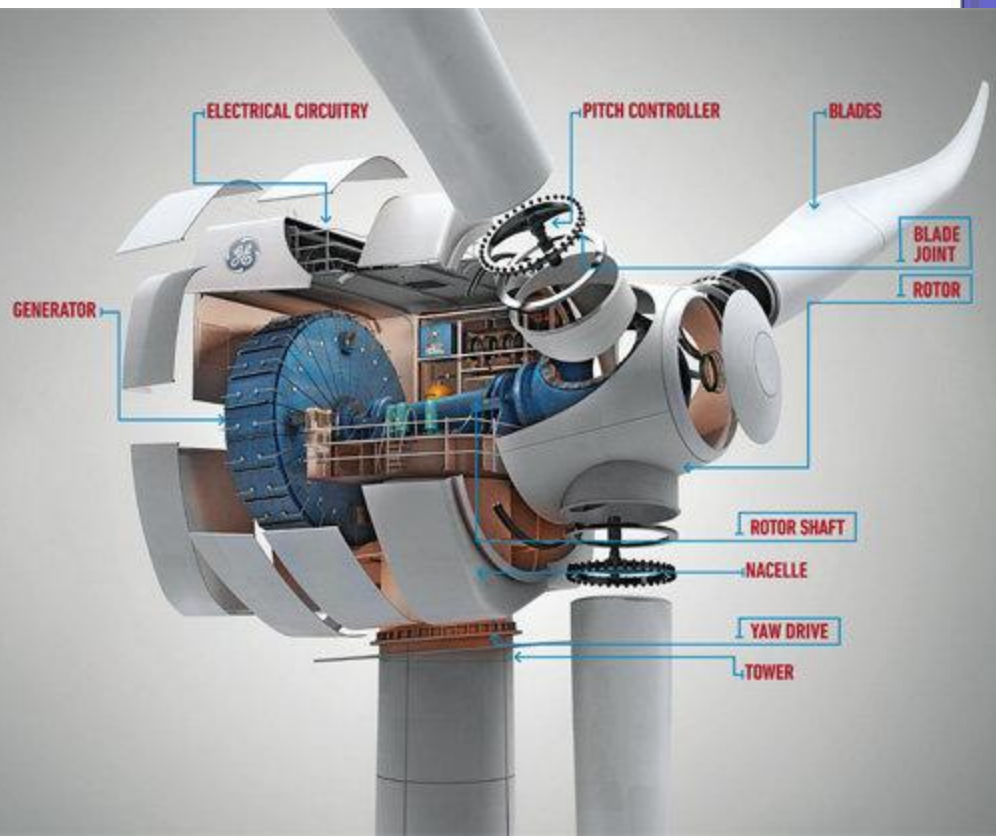
- Status on-shore windenergie in Nederland (december 2009)
 - 1879 on-shore wind turbines met 1993 MW capaciteit
 - Capaciteit is niet hetzelfde als gemiddelde energieproductie
 - Grootste park staat in Eemshaven, Groningen: 204 MW
 - 21 Vestas V90 3 MW (GroWind)
 - 47 Enercon E82 3 MW (Westereems)
 - Andere windparken
 - Delfzijl-zuid (72 MW)
 - Lelystad (46 MW)
 - Terneuzen, Koegorspolder, Biddinghuizen
 - Meest windenergie wordt in Flevoland geproduceerd
- Status off-shore windenergie in Nederland
 - Egmond aan Zee Offshore Wind Farm (2006)
 - 36 Vestas V90 3 MW (108 MW)
 - Kosten Meuro 272 (Shell en Nuon)
 - Princess Amalia Wind Farm bij IJmuiden
 - 60 Vestas V80 2 MW (120 MW)
 - Kosten MEuro 522.3 (Econcern en Eneco)



Wind turbines



Principe turbine



Vesta V90

- Vestas Wind Systems A/S
 - Deens bedrijf
 - 20 000 werknemers
- 3 rotorbladen
- 3 MW
- Pitch control
- Double fed induction generator (50 Hz)
- Meer dan 500 units geïnstalleerd



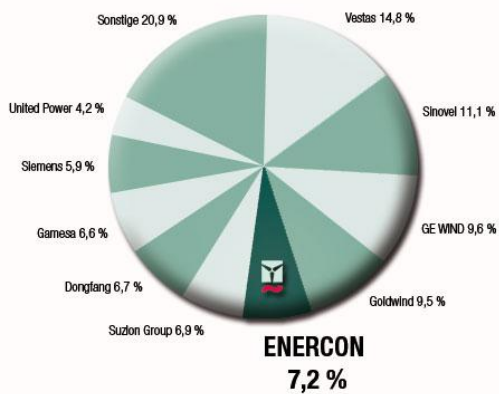
Highlights for the Group

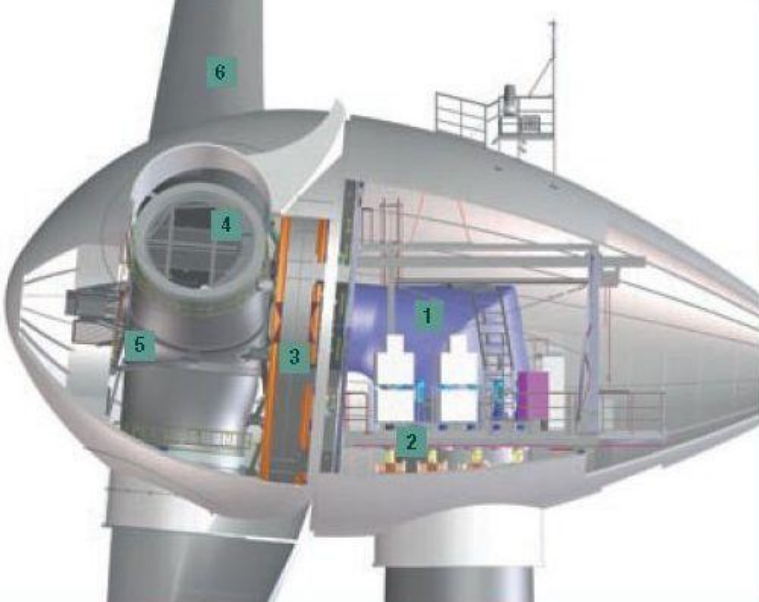
mEUR	2010	2009 ⁽¹⁾	2008 ⁽¹⁾
HIGHLIGHTS			
INCOME STATEMENT			
Revenue	6,920	5,079	5,904
Gross profit	1,175	836	1,125
Profit before financial income and expenses, depreciation and amortisation (EBITDA) before one-off costs	747	469	749
Operating profit/(loss) (EBIT) before one-off costs	468	251	614
Profit before financial income and expenses, depreciation and amortisation (EBITDA)	684	469	749
Operating profit/(loss) (EBIT)	310	251	614
Profit/(loss) of financial items	(72)	(48)	46
Profit/(loss) before tax	238	204	660
Profit/(loss) for the year	156	125	470



Enercon E126

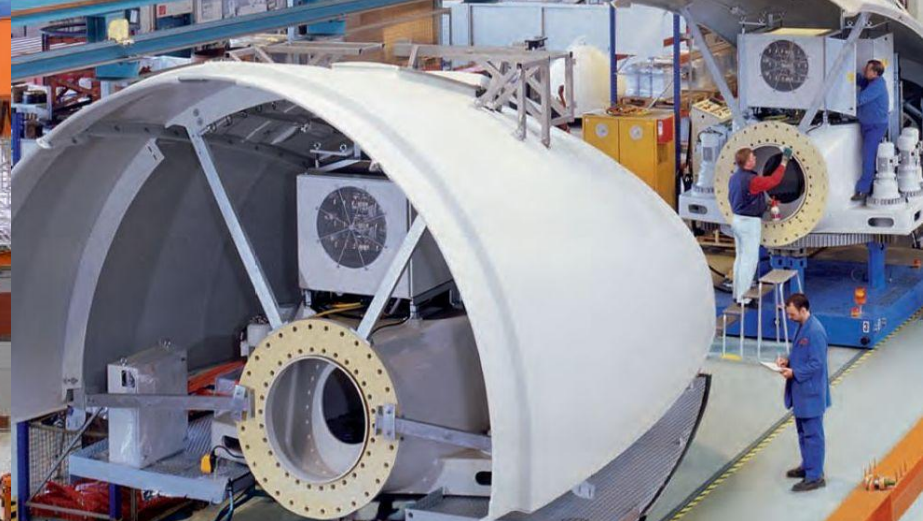
- Enercon
 - Duits bedrijf
 - 24 GW geïnstalleerde capaciteit
 - 18 000 installaties wereldwijd
- 3 rotorbladen
 - 126 m diameter
 - 135 m hoog (totale hoogte 198 m)
- 7.5 MW
 - 6000 ton totaal gewicht
- N.O. Polder: 38 turbines
 - Goedkeuring 1-6-2011





- 1 Main carrier
- 2 Yaw drive
- 3 Annular generator
- 4 Blade adapter
- 5 Rotor hub
- 6 Rotor blade







Kleine windturbines

- Test in Zeeland (1 april 2008 – 31 maart 2009)
 - [Energy Ball v100](#) (4,304 euro) : 73 kWh per year (average output of 8.3 watts)
 - [Ampair 600](#) (8,925 euro) : 245 kWh per year (28 W)
 - [Turby](#) (21,350 euro) : 247 kWh per year (28.1 W)
 - [Airdolphin](#) (17,548 euro) : 393 kWh per year (44.8 W)
 - [WRE 030](#) (29,512 euro) : 404 kWh per year (46 W)
 - [WRE 060](#) (37,187 euro) : 485 kWh per year (55.4 W)
 - [Passaat](#) (9,239 euro) : 578 kWh per year (66 W)
 - [Skystream](#) (10,742 euro) : 2,109 kWh per year (240.7 W)
 - [Montana](#) (18,508 euro) : 2,691 kWh per year (307 W)
 - Drie windturbines zijn gebroken
- Gemiddelde windsnelheid was 3.8 m/s
 - In een open veld met veel wind
 - In bebouwd gebied zullen de prestaties aanzienlijk minder zijn



Energy Ball



Turby



Nederland

Trendkaart Nederland 2040

Achtergrondrapport bij het project

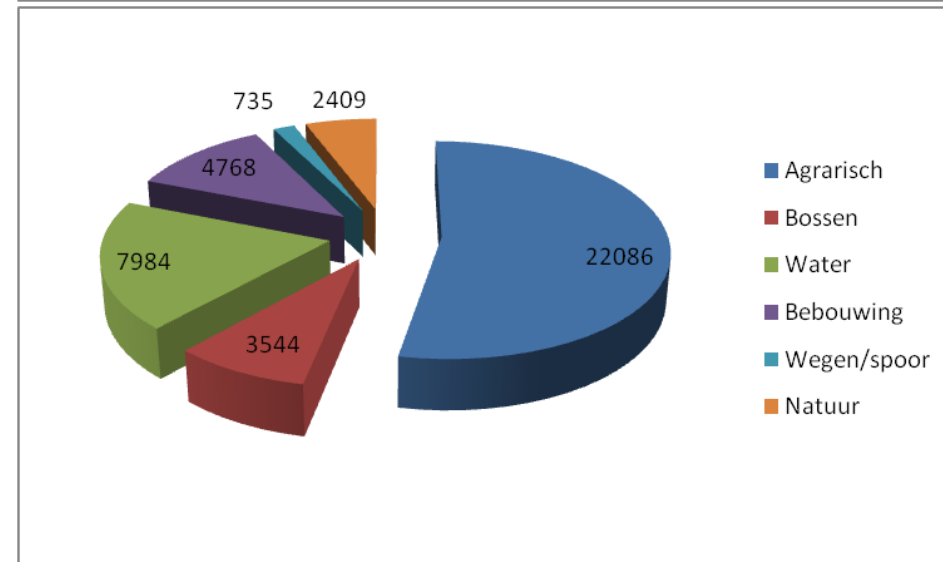
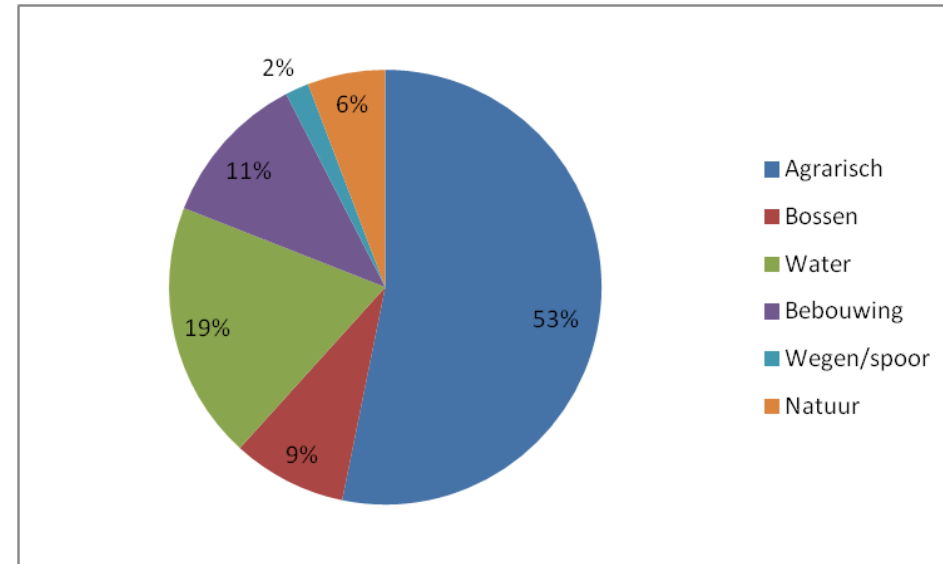
'Nederland Later'



Code	Klasse	LGN6 (ha)
1	Agrarisch gras	1153563
2	Mais	266336
3	Aardappelen	171966
4	Bieten	77330
5	Granen	228034
6	Overige landbouwgewassen	144067
61	Boomkwekerijen**	19680
62	Fruittkwekerijen**	22524
8	Glastuinbouw	14404
9	Boomgaard	3001
10	Bollen	22021
26	Bebouwing in buitengebied	85665
11	Loofbos	201584
12	Naaldbos	152821
16	Zoet water	363837
17	Zout water	434609
18	Bebouwing in primair bebouwd gebied	212362
19	Bebouwing in secundair bebouwd gebied	11482
20	Bos in primair bebouwd gebied****	14195
21	Naaldbos in bebouwd gebied	
22	Bos in secundair bebouwd gebied****	18417
23	Gras in primair bebouwd gebied	156956
24	Kale grond in bebouwd gebied	1078
28	Gras in secundair bebouwd gebied**	62359
25	Hoofdwegen & spoorwegen	73490
30	Kwelders	10001
31	Open zand in kustgebied	8665
32	Duinen met lage vegetatie (<1m)****	23157
33	Duinen met hoge vegetatie (>1m)****	2686
34	Duinheide	1226
35	Open stuifzand en/of rivierzand	3206
36	Heide	19966
37	Matig vergraste heide	11375
38	Sterk vergraste heide	10811
39	Hoogveen	5706
40	Bos in hoogveengebied	2210
41	Overige moerasvegetatie	8767
42	Rietvegetatie	25828
43	Bos in moerasgebied	7040
44	Veenweidegebied	
45	Natuurgraslanden	100288
46	Kale grond in natuurgebied***	
Totaal		4152712

Nederland

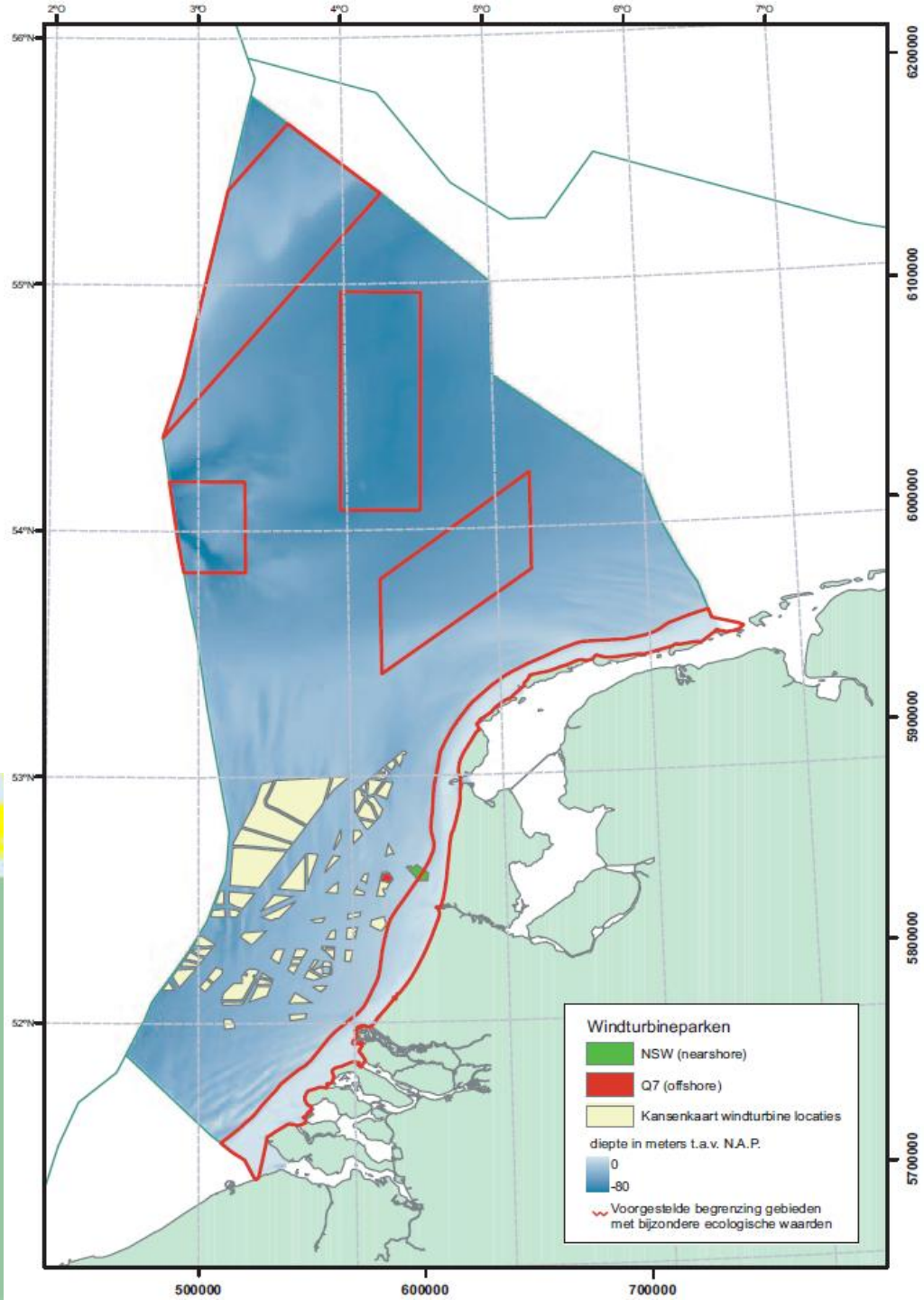
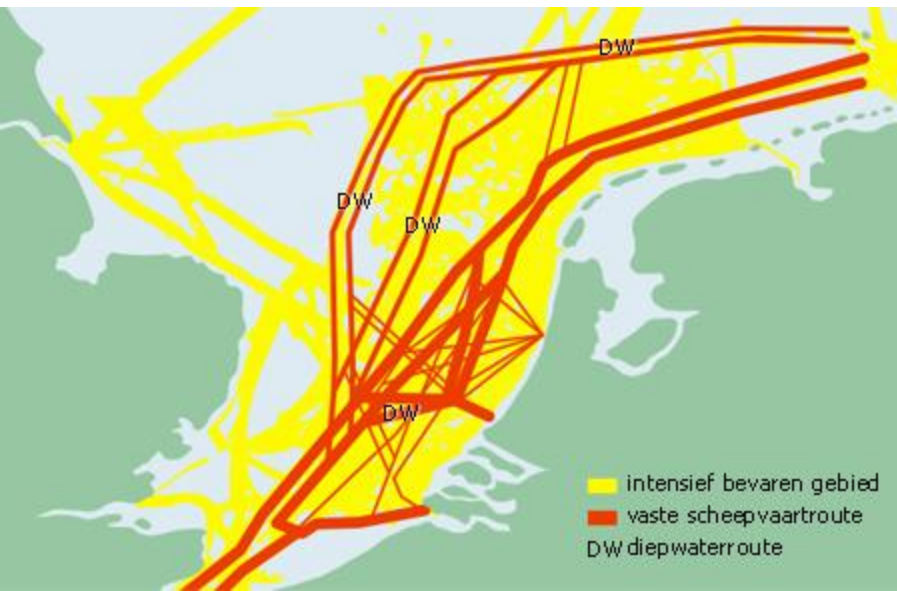
- Grondgebruik in Nederland
 - In percentages
 - In vierkante kilometers



Nederland

- Nederlands Continentaal Plat

- 57 000 km²
- Windenergie
 - Near Shore Park, 8 mijl bij Egmond
 - Q7 park
- 1000 km² voor windenergie
 - Tot 2020 voor 6000 MW
 - Buiten 12-mijlszone



Hoeveel windenergie hebben we?

- On-shore windenergie in Nederland

- Ruwe schatting

- Oppervlakte van Nederland 41 543 km², waarvan 33 719 km² land
 - Aantal personen 16.7 miljoen, dus 2030 m² per persoon
 - Dat levert

$$2 \text{ W/m}^2 \times 2019 \text{ m}^2/\text{persoon} \approx 4000 \text{ W per persoon}$$

Wind OnS:
10 kWh/d

- In onze favoriete eenheden is dat $4 \text{ kW/p} = 4 \text{ kW} * 24 \text{ h/d/p} = 96 \text{ kWh/d/p}$

- Iets meer realistisch voor on-shore

- Neem aan dat we 10% van Nederland volbouwen

- Dat is 1/3 van alle weilanden!
 - Dan hebben we 10 kWh/d/p

- Opgave

- Op dit moment zijn er xx windmolens op Aarde
 - Bereken hoeveel windmolens we dan in Nederland moeten plaatsen

- Off-shore windenergie in Nederland

- Waarom niet de zee op, het waait er ook harder

- Kentish Flats windmolen park heeft vermogensdichtheid van 3 W/m²
 - Dat is 50% meer dan voor on-shore windparken

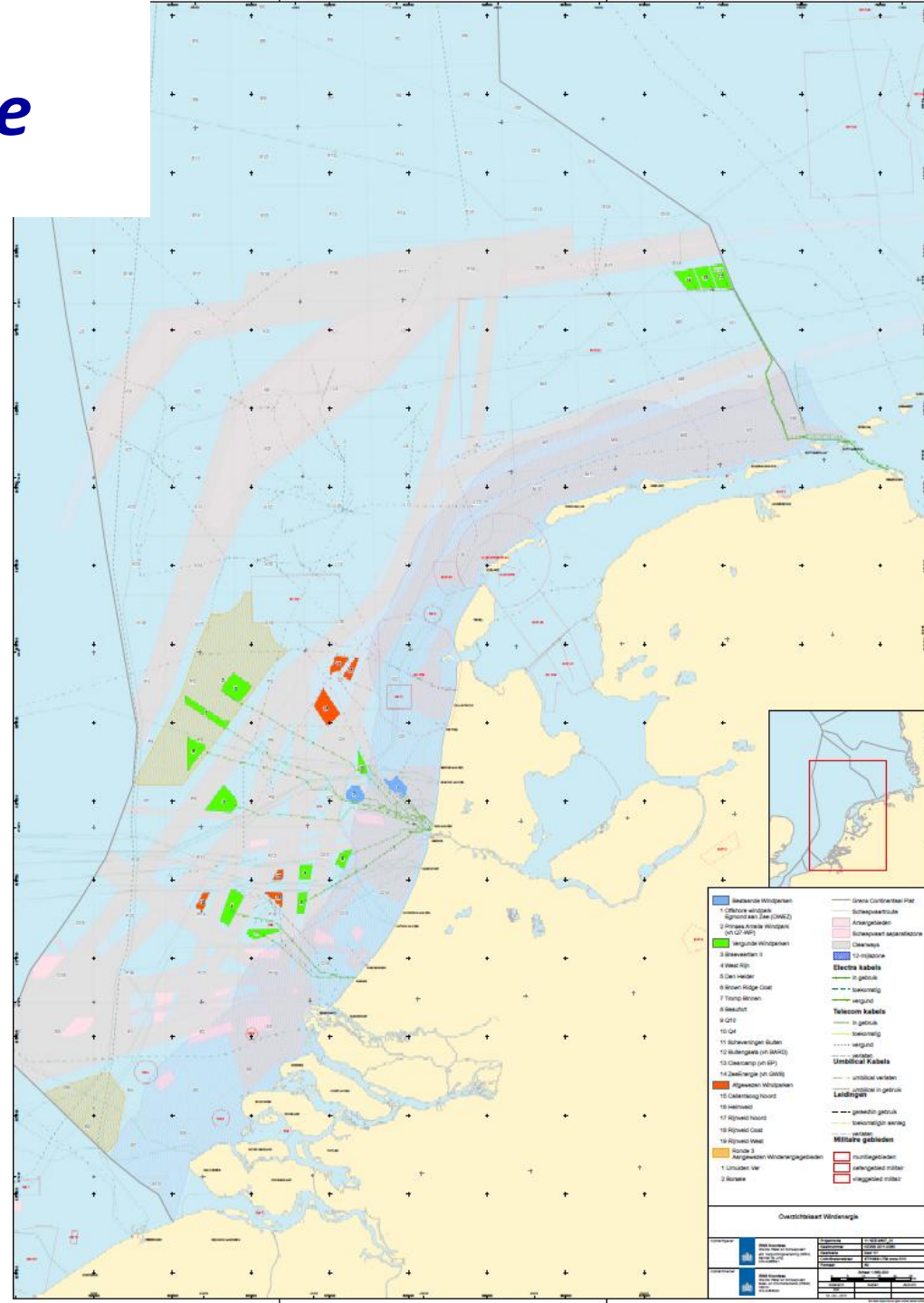


Off-shore windenergie

- Ondiep off-shore oppervlak
 - Waterdiepte minder dan 25 m
 - Totaal ongeveer 20 000 km²
- Diep off-shore oppervlak
 - Waterdiepte tussen 25 en 50 m
 - Ongeveer 20 000 km²
- Aannamen
 - We kunnen niet alles gebruiken vanwege vaargeulen voor schepen, vissersboten, etc. We gebruiken 33% voor windparken
 - $40\,000\text{ km}^2 * 1/3 * 3\text{ W/m}^2 = 40\text{ GW}$
 - Favoriete eenheden geeft 57 kWh/d
 - Dat is voldoende voor onze reisbehoefte

Wind OffS:
57 kWh/d

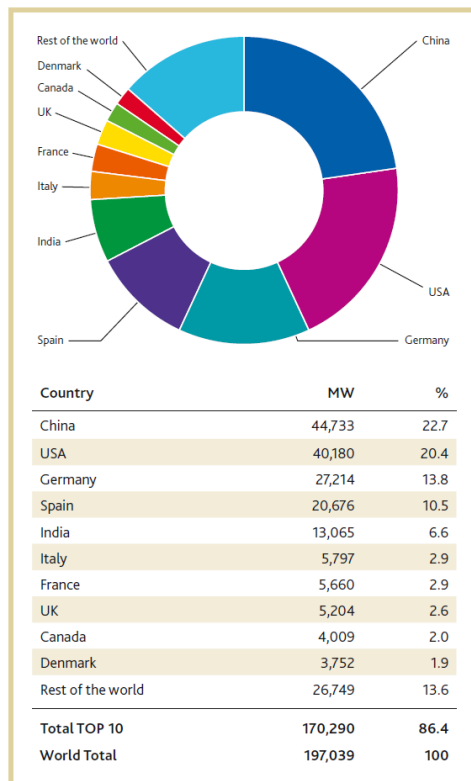
Wind OnS:
10 kWh/d



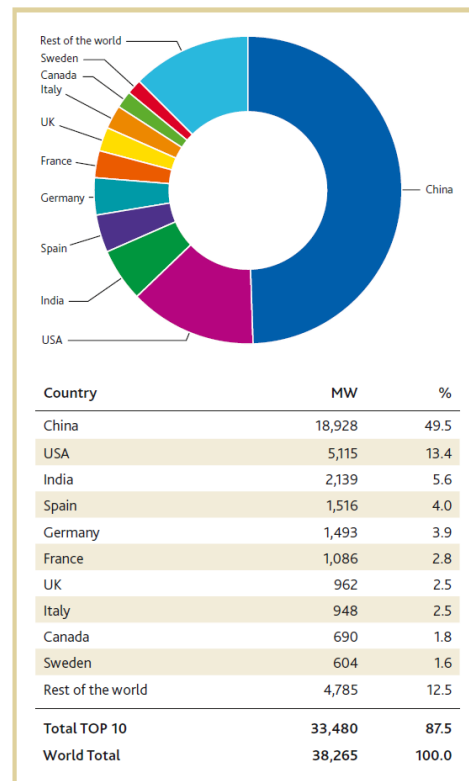
Wereldwijd

- Capaciteit eind 2010
 - 197 GW
 - Groei van 24% in 2010 (38 GW)
 - De helft van deze groei in China

TOP 10 CUMULATIVE CAPACITY DEC 2010



TOP 10 NEW INSTALLED CAPACITY JAN-DEC 2010



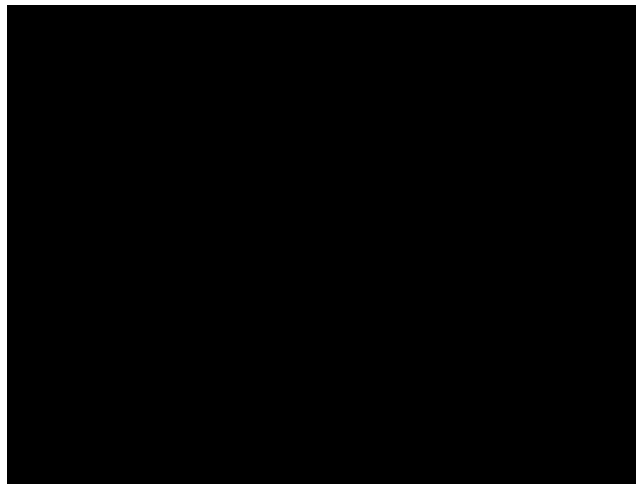
GLOBAL INSTALLED WIND POWER CAPACITY (MW) – REGIONAL DISTRIBUTION

		End 2009	New 2010	End 2010
AFRICA & MIDDLE EAST	Egypt	430	120	550
	Morocco	253	33	286
	Tunisia	54	60	114
	Iran	92	0	92
	Other ¹⁾	37	0	37
	Total	866	213	1,079
ASIA	China	25,805	18,928	44,733
	India	10,926	2,139	13,065
	Japan	2,085	221	2,304
	Taiwan	436	83	519
	South Korea	348	31	379
	Philippines	33	0	33
	Other ²⁾	6	48	54
	Total	39,639	21,450	61,087
EUROPE	Germany	25,777	1,493	27,214
	Spain	19,160	1,516	20,676
	Italy	4,849	948	5,797
	France	4,574	1,086	5,660
	UK	4,245	962	5,204
	Denmark*	3,465	327	3,752
	Portugal	3,535	363	3,898
	Netherlands	2,215	32	2,237
	Sweden	1,560	604	2,163
	Ireland	1,310	118	1,428
	Turkey*	801	528	1,329
	Greece	1,087	123	1,208
	Poland	725	382	1,107
	Austria	995	16	1,011
	Belgium	563	350	911
	Rest of Europe ³⁾	1,610	1,070	2,684
	Total	76,471	9,918	86,279
	<i>of which EU-27 ⁴⁾</i>	<i>75,090</i>	<i>9,295</i>	<i>84,278</i>
LATIN AMERICA & CARIBBEAN	Brazil	606	326	931
	Mexico	202	316	519
	Chile	168	4	172
	Costa Rica	123	0	123
	Caribbean	91	8	99
	Argentina	34	27	60
	Others ⁵⁾	83	23	106
	Total	1,306	703	2,008
NORTH AMERICA	USA	35,086	5,115	40,180
	Canada	3,319	690	4,009
	Total	38,405	5,805	44,189
PACIFIC REGION	Australia	1,712	167	1,880
	New Zealand	497	9	506
	Pacific Islands	12	0	12
	Total	2,221	176	2,397
	World total	158,908	38,265	197,039

Wat kost windenergie?

- Offshore windpark van 48 kWh/d/p
 - 60 miljoen ton beton en staal
 - American Liberty Ships waren 19 miljoen ton staal
 - Als we hiervoor kerncentrales zouden bouwen, dan gebruiken we
 - 8 miljoen ton staal
 - 0.14 miljoen ton beton
- Wat zijn de kosten?
 - Installatie van 1 kWh/d/p offshore power kost 8 Gpound
 - Dus 48 kWh/d/p kosten 384 Gpound
 - Dat betekent dat 48 kWh/d/p elke inwoner 6400 pond kost
- Hoe zit het met die dode vogels?
 - 30 000 slachtoffers per jaar door kortwieken
 - Ongeveer 1 miljoen te pletter tegen de voorruit
 - Terwijl 55 miljoen worden verorberd door de poes
 - Die zijn dan wel niet zo groot
 - Kleine vogels waaien weg

Risico's met turbines



Risico's met turbines



VIEW FROM GOLF CLUB



HYANNIS PORT





Windpark Estinnes in België



Pilot Demonstration of Eleven 7MW-Class WEC at Estinnes in Belgium

- Pilot project

- 11 turbines van 7 MW

- Enercon E-126 7.5 MW
 - Dat is per maand meer dan 5.4e6 kWh

- Data

- Fundament E-126: 29 m diameter, 1400 m3 beton, 120 ton staal
 - Toren bestaat uit 35 prefab betonnen ringen (gewicht tot 40 t per ring)
 - 's Werelds grootste mobiele hijskraan: van 1600 ton: hijst hub met rotorbladen (300 ton) 135 m hoog

- On-line performance

- Actueel: <http://www.windvision.be/index.php?id=340>
 - Historisch: <http://www.windvision.be/index.php?id=339>

Historical data wind turbine 3

Month	Energy Production (kWh)	Average Wind Speed (m/s)	Total Operating Hours (h)
June 2011	841766	6.10	602
July 2011	678834	5.10	617
August 2011	786758	5.80	581
September 2011	1098648	6.5	627
October 2011	1257833	6.7	682



Zonne-energie

Zonne-energie en PV

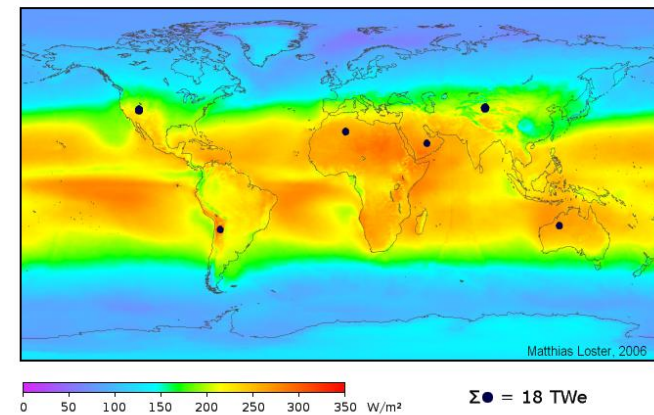
- Wat is zonne-energie?
 - Thermische energie
 - Gebruik zonne-energie voor directe verwarming van gebouwen en water
 - Fotovoltaïsch
 - Opwekken van elektriciteit
 - Biomassa
 - Maak biobrandstof, chemicalien en bouw materiaal door het gebruik van bomen, bacterien, algen, mais, sojabonen, oliezaden
 - Voedsel: net als biomassa, maar nu eten wij (of andere dieren) het op
 - Verder nog (maar dat laten we buiten beschouwing) wind, golven

- Oppervlaktedichtheid van zonnestraling

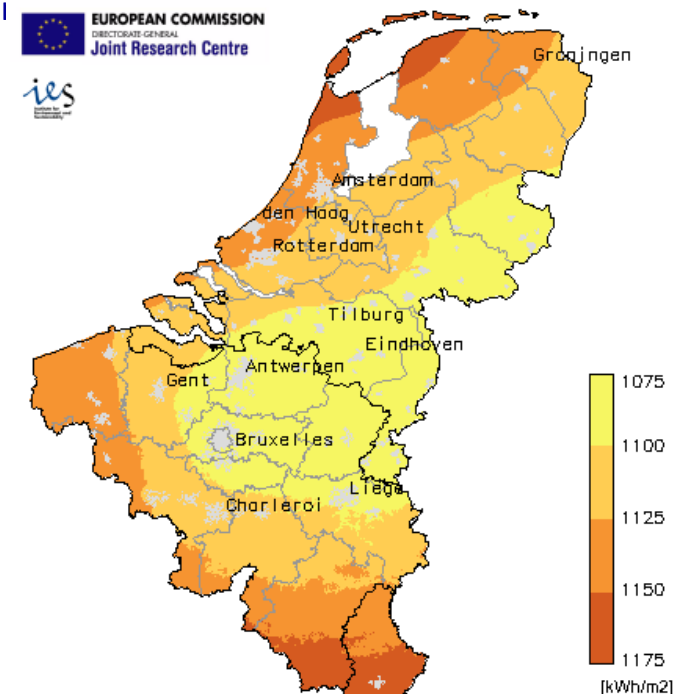
- Nederland is niet de meest ideale lokatie
 - Sterke variatie met hoogtegraad, dag en nacht, weer, seizoenen
 - Nederland telt 1400 – 1600 zonuren per jaar
 - Wintermaand (januari) gemiddeld 52 zonuren, juli en augustus 200 zonuren
 - Er is behoefte aan opslag van energie

- Nederland

- Gemiddeld ongeveer 1100 kWh/y/m²
- Delen door 365 dagen x 24 uur: 125 W/m²
- Dit is voor optimaal georiënteerde PV modules
- Er is ongeveer 800 km² dak, waarvan 130 km² plat dak
 - Dat is gemiddeld 48 m² per persoon
 - Hiervan is 25% op het zuiden: 12 m²



Yearly sum of global irradiation received by optimally-inclined PV modules
Belgium, Netherlands, and Luxembourg



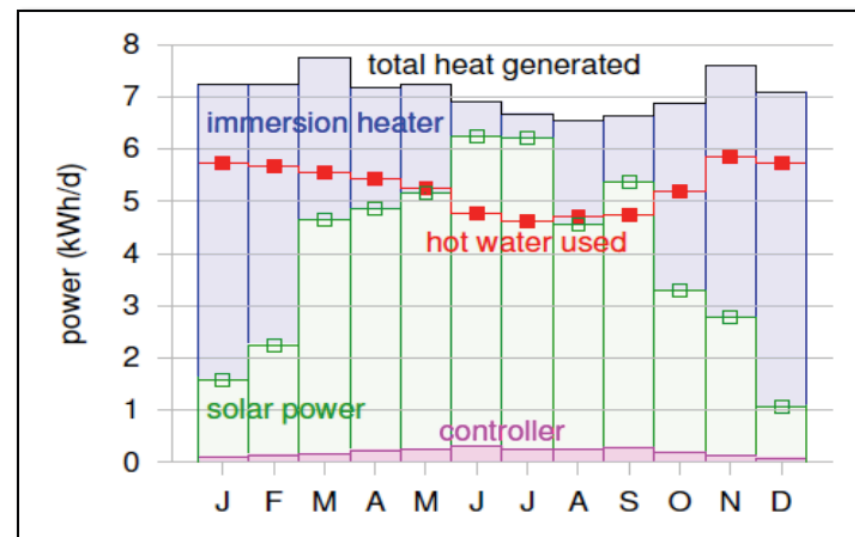
Zonneboiler – voorbeeld

- 3 m² warm water paneel (groen)
- Additioneel benodigde warmte (blauw)
- Energie nodig voor besturing (paars)
- Warm water gebruik (rood)
- Warmteverlies is 1.5 – 2 kWh/d
- Gemiddeld vermogen
 - Testhuis van Viridian
 - 3.8 kWh/d gemiddeld voor 3 m²
 - 100 l water van 60 oC per dag
 - $3.8 \text{ kWh/d} / 3 \text{ m}^2 = 3.8 \text{ kWh/d} / (24 \text{ h/d}) / 3 \text{ m}^2 = 53 \text{ W/m}^2$

Zon Th:
18 kWh/d

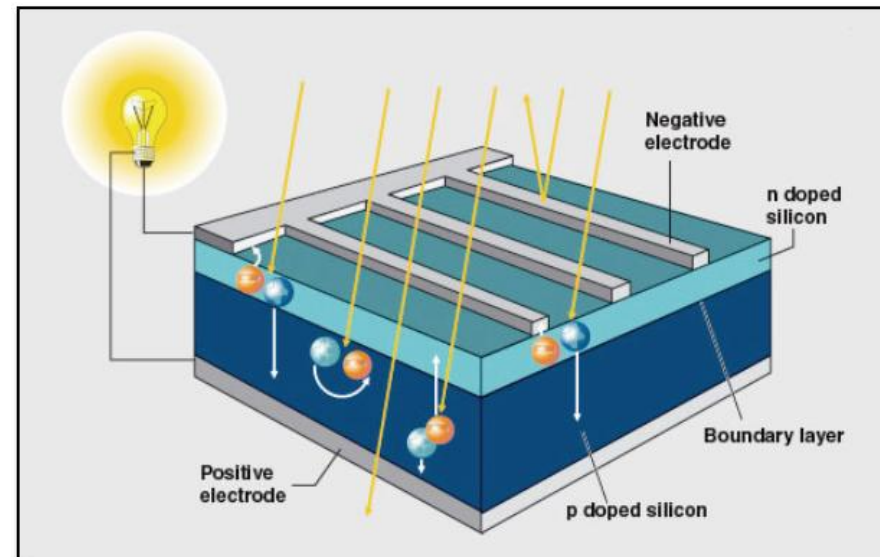
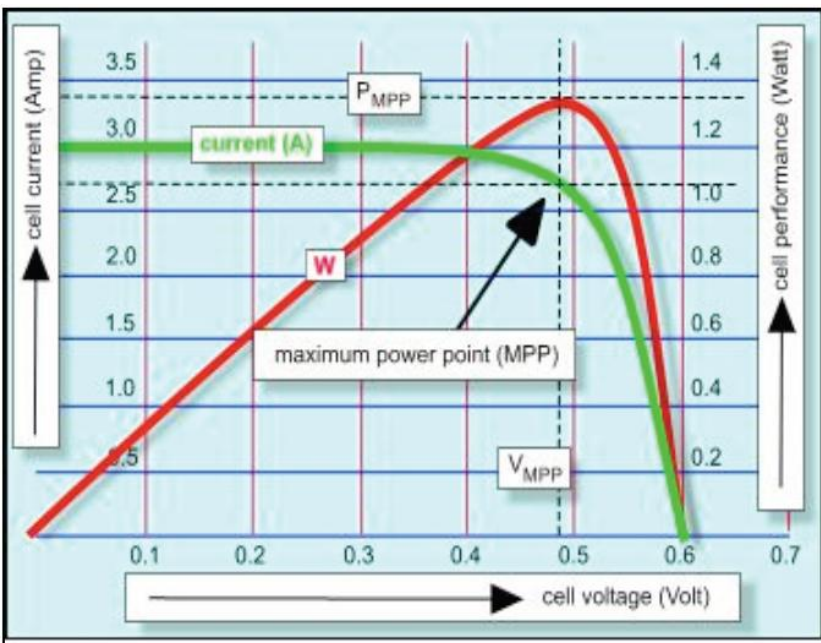
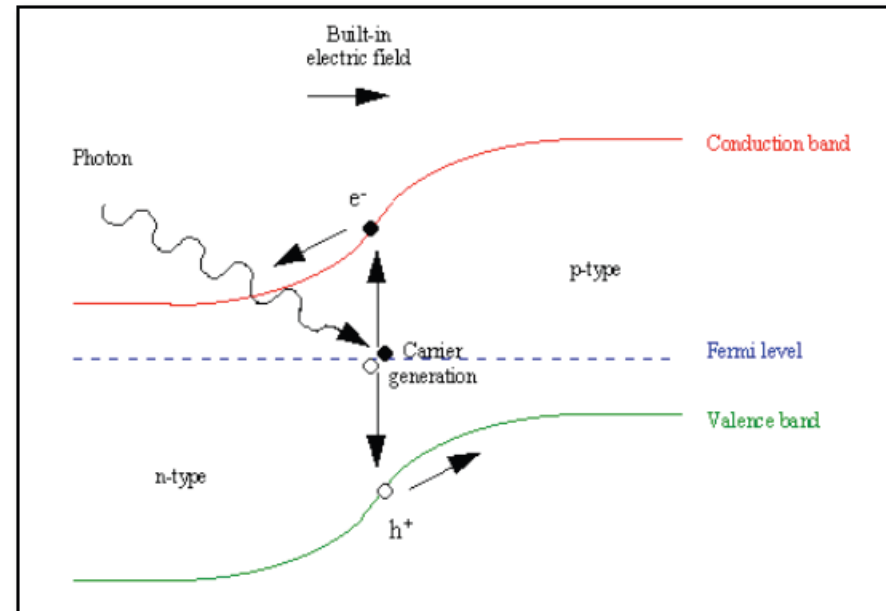


- Oefening voor Nederland
 - Voorzie alle daken op het zuiden van zonneboilers
 - Dat is 12 m² per persoon
 - Neem aan 50% efficiëntie en 125 W/m²
 - $0.5 \times 12 \text{ m}^2/\text{p} \times 125 \text{ W/m}^2 = 750 \text{ W/p}$
 - $750 \text{ W} \times 24 \text{ h/d/p} = 18 \text{ kWh/d/p}$
 - Dit is hoge entropie energie
 - Geen elektriciteit
 - Minder waarde dan bijvoorbeeld windenergie
 - Verknoeid als je het niet gebruikt
 - Niet voldoende voorhanden waar nodig (in steden!)
 - Sterk seizoensafhankelijk



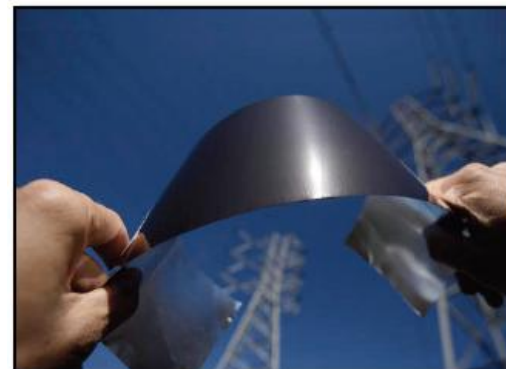
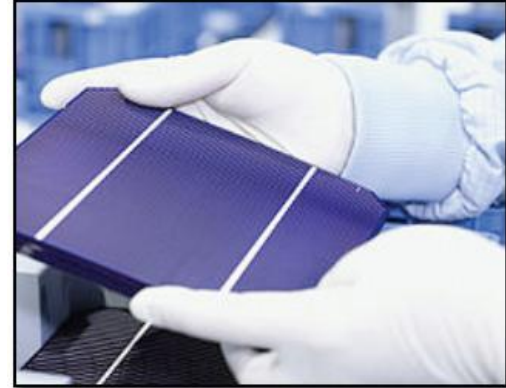
Fysica van een zonnecel

- P-N halfgeleider overgang
 - Depletielaag met elektrisch veld
 - Fotonen kunnen elektron-gat paren maken als hun energie groter is dan de bandgap
 - Elektroden worden aan de halfgeleider vastgemaakt om de ladingen te laten geleiden
- PV cel belast met optimale weerstand
 - Oneindige weerstand: 0.6 V, maar 0 A
 - Kortsluiting: 3 mA, maar 0V
 - Optimale weerstand: 0.48 V en 2.7 mA



Materialen voor PV cellen

- Kristallijn silicium
 - Hoge efficiëntie (tot 27%)
 - Stabiel
 - Zeer hoge kosten
 - Geringe absorptie (dik materiaal nodig)
 - Bandgap van 1.1 eV (amorf Si heeft 1.7 eV)
- Polikristallijn silicium
 - Vergelijkbaar met mono-kristallijn silicium, maar iets goedkoper en iets minder efficient (tot 20%)
- Amorf silicium (dikke film)
 - Zeer hoge absorptie → veel minder materiaal
 - Goedkoop
 - Kosten gedomineerd door glas of metaal waarop het Si wordt neergeslagen
 - Flexibel gebruik
 - Eenvoudig te integreren in gebouwen
 - Minder efficient (12%)
 - Niet stabiel
 - Degradatie door lichtinval



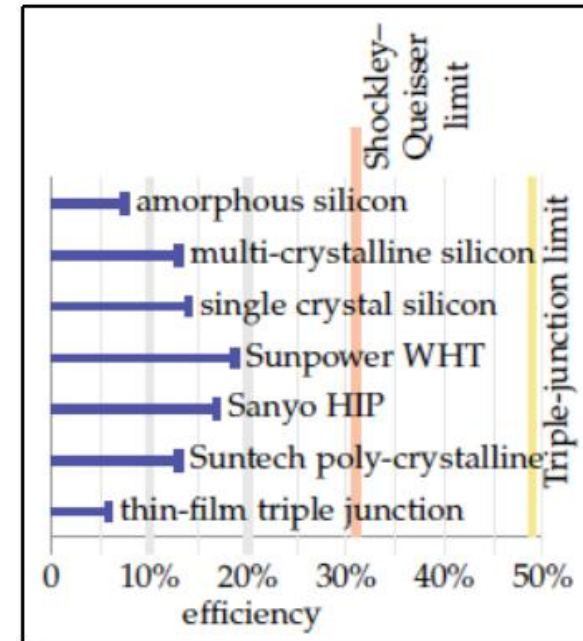
Fotovoltaïsche energie

- Aannamen

- We investeren in dure cellen met 20% efficiëntie
$$20\% \times 125 \text{ W/m}^2 = 25 \text{ W/m}^2$$
- Neem 12 m² dak op het zuiden per persoon
$$12 \text{ m}^2 \times 25 \text{ W/m}^2 \times 24 \text{ h/d} = 7.2 \text{ kWh/d}$$
- Klopt, we gebruiken het dak twee keer
 - Voor zowel zonneboiler als voor PV

- Conclusie

- Installatiekosten voor PV zijn ongeveer 4 keer hoger dan voor een zonneboiler, terwijl de energieopbrengst slechts de helft is
- Kostenefficiëntie is 1:8 voor PV versus zonneboiler
 - We hebben nu wel lage entropische energie
 - We wekken elektriciteit op



Zon PV:
7 kWh/d



PV oefening

- PV farm voor Nederland

- We bedekking 20% van Nederlandse landbouwgrond met PV cellen

- Lage efficiëntie van 10% (want die zijn het goedkoopste)

$$10\% \times 125 \text{ W/m}^2 \times 132 \text{ m}^2 / \text{p} \approx 40 \text{ kWh/d/p}$$

- In 2008 werd er in Nederland 104 TWh opgewekt
- Dat is 17 kWh/d/p
- Maar we willen ook transport elektrificeren

- PV farm kan best samen met windturbines

- Context

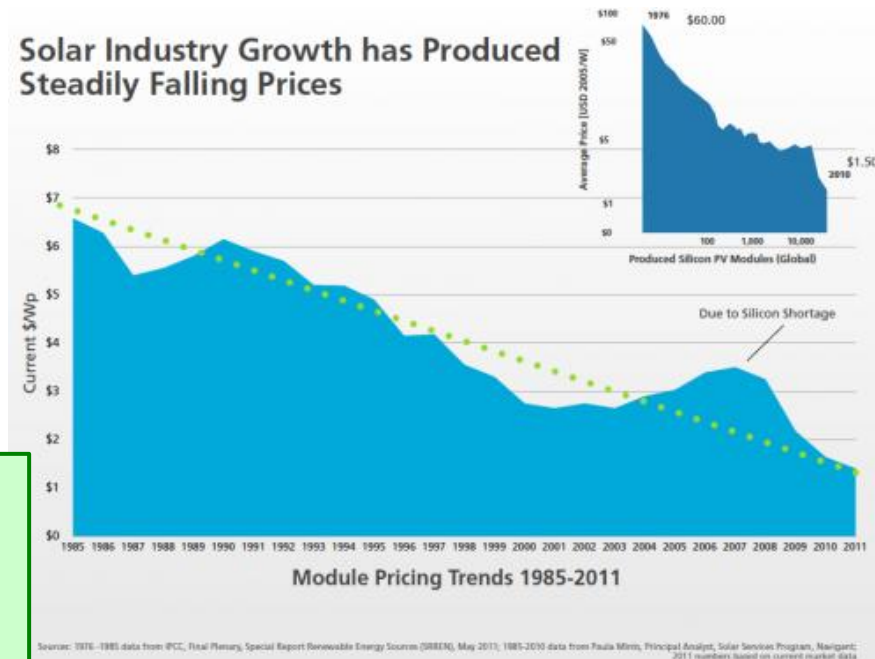
- Wereldwijd is 40 000 MW (2010) geïnstalleerd
- Dat is capaciteit in MW-piek en niet MW gemiddeld

- 1 Wp (Watt-peak) is gedefinieerd voor een lichtinval van 1000 W/m², waarbij de PV cel een temperatuur heeft van 25 oC
- In Nederland is de gemiddelde lichtinval 125 W/m²
- Dat betekent dat we 8 keer meer PV cellen moeten installeren, dan men op basis van Wp zouden verwachten

- We installeren dan ongeveer 100 keer het totale PV vermogen dat nu op Aarde aanwezig is
- Het zou op dit moment 630 G\$ kosten
- Verdere problemen

- Schaarste materialen
- Opslag van energie

PV farm
(132 m²/p)
40 kWh/d



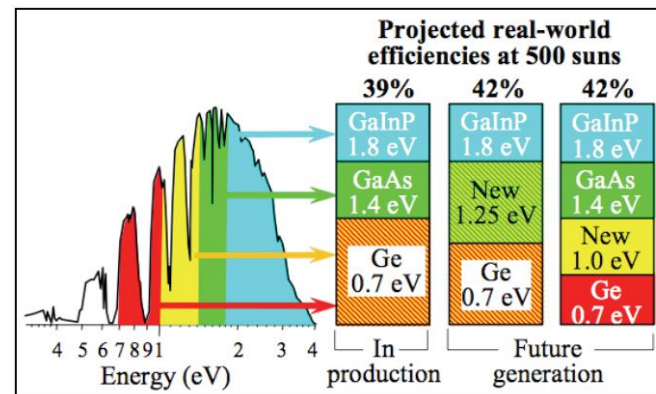
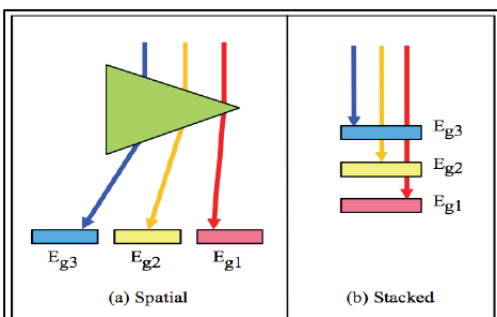
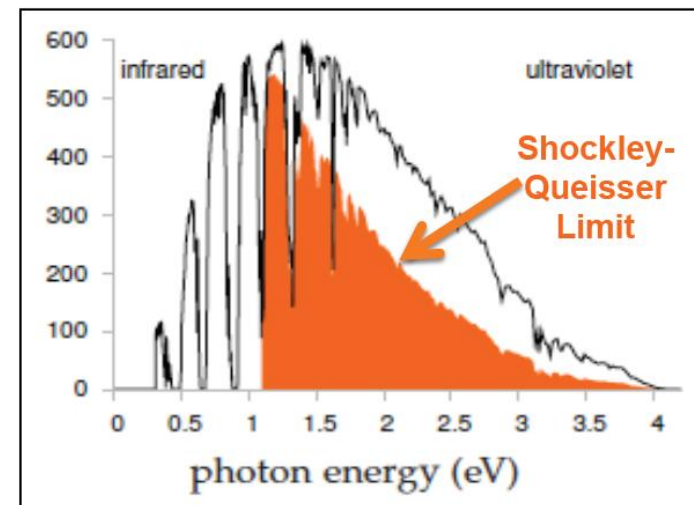
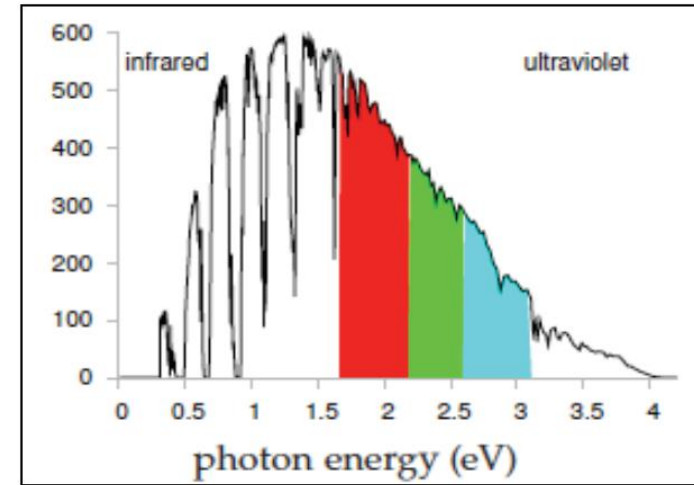
Efficientie van PV cel

- Wat limiteert de efficientie?

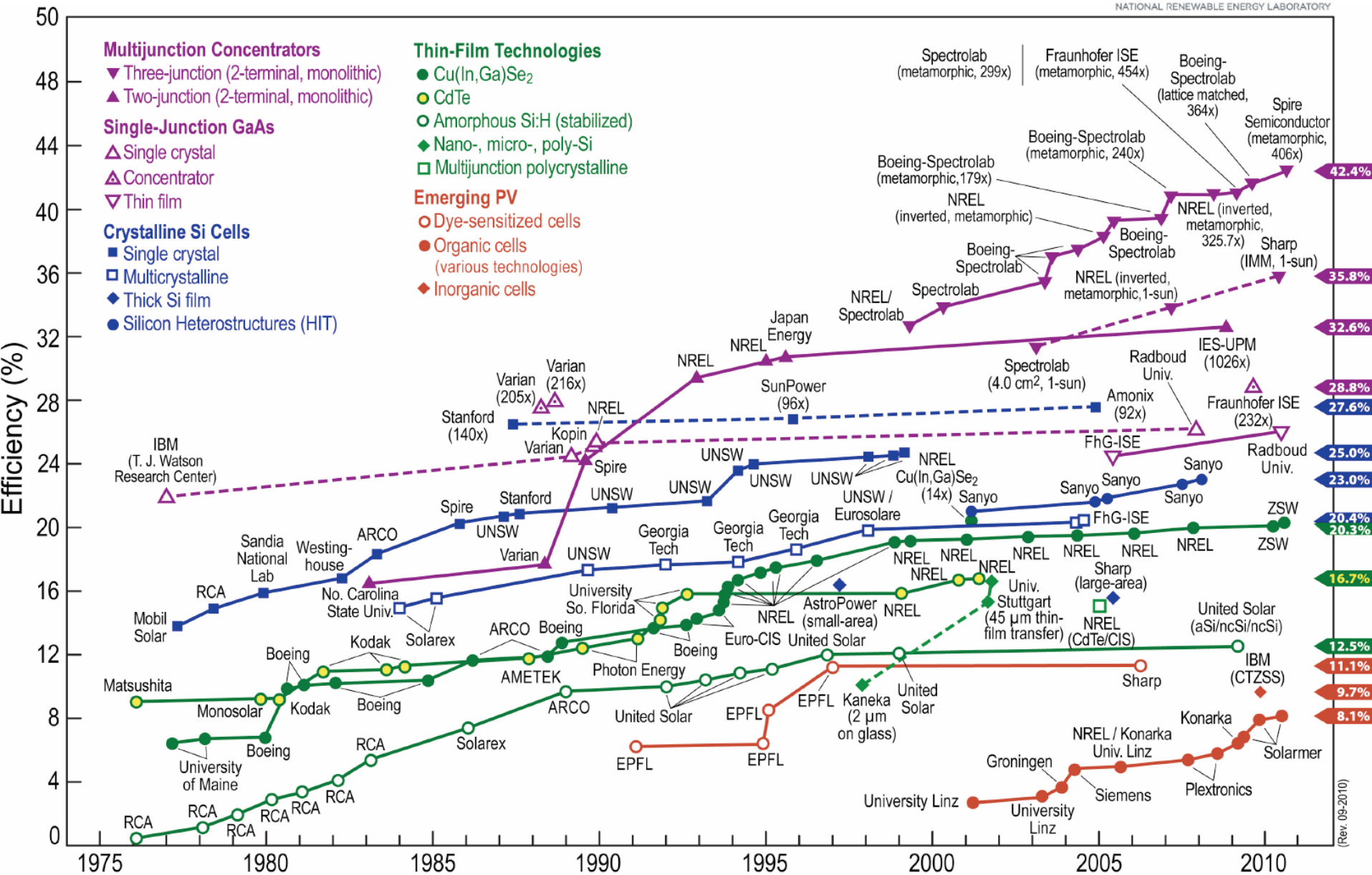
- Zwarte curve toont spectrum zon op aardoppervlak
 - Band gap kristallijn (1.1 eV) en amorf silicium (1.7 eV)
- We verliezen alle fotonen met energie kleiner dan band gap
- Van de fotonen met energie groter dan band gap wordt slechts een fractie van de energie geabsorbeerd
 - De rest van de energie leidt tot opwarming van het paneel
 - Dat is de Shockley – Queisser limiet
- Verlies door recombinatie van ladingen

- Multi-junction PV cel

- Twee manieren om de Shockley-Queisser limiet te passeren
 - Separeer licht met diffractie
 - Gebruik multi-junction cellen met verschillende band gaps
 - Materiaal met de hoogste bandgap boven
 - Fotonen met lagere energie gaan erdoor naar het tweede materiaal
- Theoretische limiet voor een 3-junction PV cel is 48%



NREL
NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY



PV sprookje

- “Productie van een zonnepaneel verbruikt meer energie dan het ooit zal opleveren”
 - Energy yield ratio: verhouding van de energie die door het systeem gedurende de levensduur geleverd wordt ten opzichte van wat nodig is voor productie
 - Voor een dakpaneel, aangesloten op het net in Europa: 4
 - Voor een levensduur van 20 jaar
 - Als we het paneel in Australie plaatsen wordt het 7
 - Windturbines hebben een energy yield ratio van 80
 - Voor 20 jaar levensduur



Biomassa

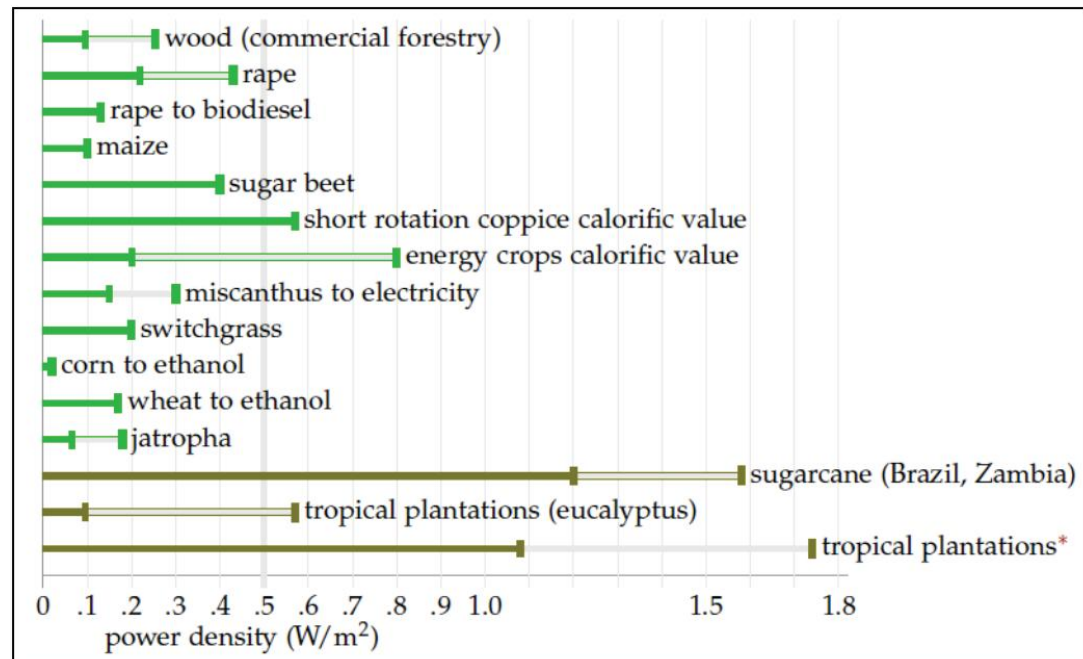
Biomassa

- Kolensubstitutie
 - Teel planten en verstook ze in een centrale om elektriciteit op te wekken of om warmte te produceren (of beide)
- Petroleumsubstitutie
 - Teel speciale planten
 - Oliezaden, suikerriet, mais, etc
 - Produceer ethanol of biodiesel
 - Gebruik in auto's, treinen, vliegtuigen, etc.
 - Kweek genetisch gemanipuleerde bacteriën
 - Cyanobacteriën, maar ook algen
 - Produceer water, ethanol, butanol, maar ook direct elektriciteit
- Biologisch afval
 - Stroo, kippestront
 - BMC Moerdijk: 440.000 ton pluimveemest per jaar (1/3 van NL mest)
 - Groene stroom (36.5 MW per jaar)
 - Vlieggas (fosfor en kalium) → kunstmest
 - Duurzaam zolang we afval hebben
- Voedsel



Gewassen

- Energiedichtheid
 - Sterk afhankelijk van lokatie, bodem, bemesting, etc.
 - Beste gewassen in NW Europa leveren 0.5 W/m²
- Hoeveel energie kunnen we uit biomassa halen?
 - Zonlicht: 125 W/m²
 - Gewassen leveren 0.5 W/m²
 - Verliezen
 - Kunstmest, tractorbrandstof, etc.
 - Processen: oliepersen, raffineren, etc.



Oefening biomassa

- Aannamen

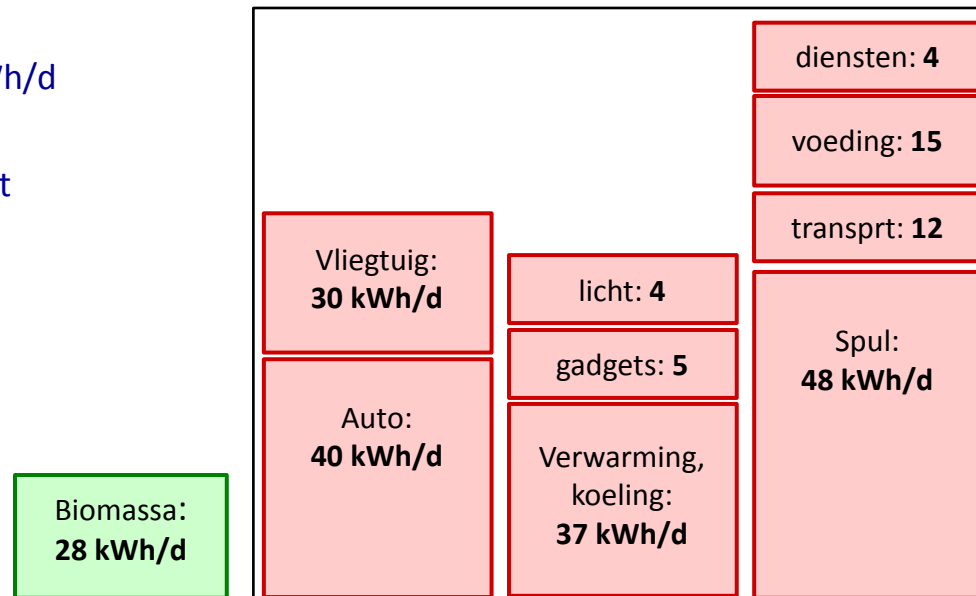
- Stel dat we alle landbouwland in Nederland gebruiken om biobrandstof voor onze auto's en vliegtuigen te produceren
 - Landbouwgrond: 22086 km² in Nederland
 - Aantal inwoners: 16.7 miljoen in 2011
 - Dat is 1322 m² per persoon
- Efficiëntie voor telen gewassen naar benzine, stel 67%
 - Als je hout in een kachel verbrandt dan verlies je al 20% warmte door de schoorsteen

- Dit levert

$$0.5 \text{ W/m}^2 \times 1323 \text{ m}^2 \text{ per persoon} = 661 \text{ W/p} = 28 \text{ kWh/d per persoon}$$

- Context

- Voor het rijden van auto's hadden we 40 kWh/d
- Voor vliegtuigen waren nodig 30 kWh/d
- Geen ruimte over voor landbouw en veeteelt



Conclusie

- Als we alle daken (op het zuiden) gebruiken
 - 13 kWh/d hoge entropie warmte of
 - 5 kWh/d lage entropie PV elektriciteit
- Installatiekosten voor PV cellen zijn 4 keer hoger dan voor zonneboilers
- Als we ons landschap industrialiseren en voor 10% bedekken met PV cellen
 - 40 kWh/d aan elektriciteit
 - Vereist 100 meer PV cellen dan nu wereld geïnstalleerd
- Als we alle landbouwgrond gebruiken om biobrandstoffen te maken
 - Voorzien in ongeveer 1/3 van onze brandstofbehoefte
 - Geen grond meer voor landbouw en veeteelt
- Massaal windturbines plaatsen on en offshore

