

VERTROUWELIJK

ECN-N--11-041
December 2011

Notitie Optimale verkaveling wind op zee

Aan	:	I. Klein	DNZ
		E.R. Buddenbaum	EL&I
		L. Berkenbosch	DNZ
Kopie aan	:		
Van	:	S.M. Lensink	ECN
		J. van Stralen	ECN

Samenvatting

Het vergroten van de dichtheid van het opgesteld vermogen is een dure methode om extra elektriciteit uit wind op zee op te wekken met marginale productiekosten van meistens boven de 20 €/kWh. Berekeningen zijn uitgevoerd op twee denkbeeldige gebieden van verschillende omvang (380 km² en 1300 km²). Het blijkt dat de kostendynamiek in de gebieden anders is, waardoor in het advies naar gebiedsgrootte gedifferentieerd dient te worden. Bij de invulling van grote gebieden zoals IJmuiden-ver wordt uit oogpunt van kostenefficiëntie geadviseerd te streven naar een dichtheid van maximaal 3 à 4 MW/km². Hoe de allocatie van een enkele nieuwe vergunningsaanvraag binnen zo'n gebied dient te geschieden, zonder dat het gebied 'geparasiteerd' wordt, is in deze grote gebieden verder vooral een geometrisch vraagstuk dat niet op basis van energiekenmerken van wind op zee beantwoord kan worden.

Voor de deelgebieden in het zoekgebied Hollandse Kust en voor het gebied Borssele – tot 380 km² aaneengesloten – leiden dichtheden van ca. 8 MW/km² pas tot productiekosten boven de 20 €/kWh. Een streven naar een dichtheid van 4 à 6 MW/km² voor kleine gebieden is qua kostenniveau in lijn met de eerder genoemde 3 à 4 MW/km² voor grote gebieden. Vele kostencomponenten voor een ontwikkelaar, zoals voorbereidingskosten of netaansluiting, hangen niet of in geringe mate af van het opgesteld vermogen. Daarom zal een ontwikkelaar in beginsel geen zeer kleine windparken op zee ontwikkelen, maar een eigen ondergrens voor te realiseren capaciteit hanteren. Een extra eis over te realiseren productiecapaciteit in de vergunningverlening zal daarmee – zeker voor de allerkleinste gebieden – geen meerwaarde hebben.

Tussen windparken kunnen kleine zones gecreëerd worden waarin de wind de gelegenheid heeft om te recupereren. Uit de berekeningen blijkt dat zulke zones beperkte meerwaarde hebben en zeer beperkt kunnen blijven. Indien een (al dan niet zelfgestelde) norm wordt gehanteerd om op een zeker gebiedoppervlak een vast aantal windturbines te plaatsen, dan zal een marktpartij de windturbines zo oriënteren dat zowel de elektriciteitsproductie maximaal is als de productiekosten minimaal is. Het stellen van normen om afstand te bewaren tot andere vergunde zeeruimte heeft dan geen meerwaarde bij kleine gebieden. Er lijkt ook geen reden vanuit perspectief van productiekosten of productiepotentieel te zijn om te verbieden dat nieuwe parken vastgebouwd worden aan bestaande parken. Wel wordt geadviseerd om aandacht te besteden aan de invloed die nieuwe parken kunnen hebben op bestaande, nabij gelegen parken.

Een mogelijke wijze van instrumentatie van dit advies is, dat bij vergunningsaanvragen voor parken in kleine gebieden (Hollandse Kust) een eis gesteld wordt met betrekking tot het minimaal opgestelde vermogen van het beoogde windpark. Bij grote gebieden kan een eis gesteld worden dat

het beoogde windpark tenminste een dichtheid van 3 tot 4 MW/km² (IJmuiden-ver) of 4 tot 6 MW/km² (Borssele) dient te hebben. Om de rentabiliteit van bestaande parken niet in gevaar te brengen, kan als randvoorwaarde tevens gesteld worden dat tussen een beoogd park en een bestaand windpark ten minste een open ruimte van 2 kilometer aangehouden dient te worden.

1. Inleiding

Achterliggend doel van de opdrachtgever is te komen tot een efficiënt ruimtegebruik binnen aangewezen windgebieden op zee. Daarvoor wordt voor door de opdrachtgever aangegeven gebieden op de Noordzee een berekening gemaakt van de gemiddelde kostprijs en elektriciteitsopbrengst van wind op zee, afhankelijk van een paar varianten van verkaveling met een dichtheid van 6 MW/km² en 4 MW/km². In deze notitie wordt een advies gegeven hoe initiatieven zodanig gestuurd kunnen worden, dat deze niet leiden tot suboptimale inrichting van een windgebied.

2. Aanpak

2.1 Rekenmodel

Het ECN-kostenmodel wind op zee, dat eerder is ingezet bij advisering rondom budgetbehoefte bij de 950 MW-tender en bij de MKBA Noordzee (Decisio), wordt gebruikt als rekeninstrument om elektriciteitsopbrengst en kostprijs te berekenen. Ten behoeve van deze opdracht is het model verfijnd door meeneming van de invloed van windparken op andere windparken via het zogenoemde zogeffect. Het zogeffect (zie Figuur 1) is het verschijnsel dat windturbines minder wind vangen als zij in de windschaduw van een andere turbine staan.



Figuur 1 *Windverstoring door turbines: het zogeffect*

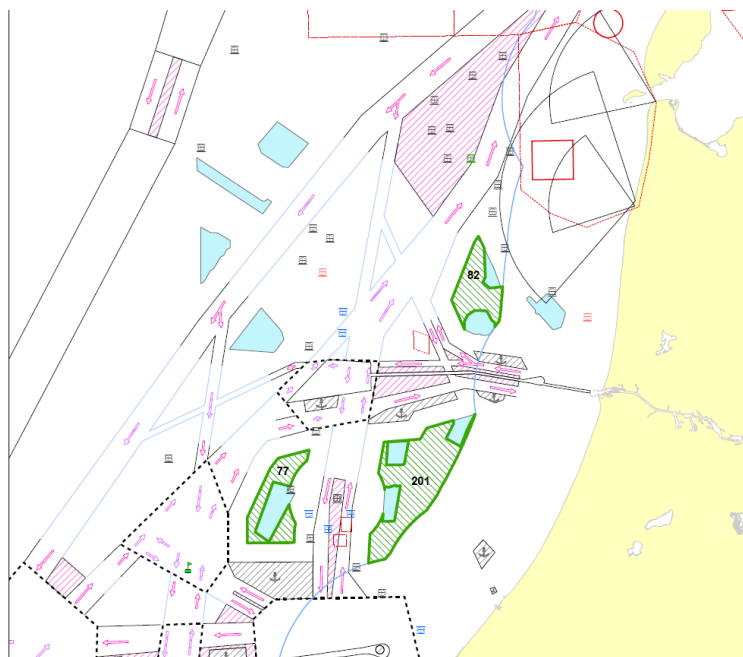
Het zogeffect leidt er in essentie toe dat de wind achter een windturbine afneemt. Na enige afstand herstelt de windsnelheid zich weer. De invloed van het zogeffect wordt in deze notitie op vereenvoudigde wijze benaderd, waarbij twee relaties centraal staan.

De eerste relatie is die tussen de dichtheid in een windpark (in MW aan opgesteld vermogen per km²) en de effectieve gemiddelde windsnelheid in het park. Naarmate een park dichter bebouwd is, neemt de gemiddelde windsnelheid af en neemt de productie, gemeten in vollasturen, ook af. De productiekosten nemen daarmee in lijn toe.

De tweede relatie is die tussen de afstand vanaf de laatste turbine van een windpark en het herstel (de toename) van de windsnelheid. Hoe verder twee parken vanaf elkaar afstaan, des te minder invloed zullen zij op elkaars windaanbod hebben.

2.2 Beschouwde gebieden

Deze notitie heeft betrekking op vijf gebieden op de Noordzee. Naast de gebieden uit het Nationaal Waterplan van Borssele en IJmuiden-ver, zijn het drie deelgebieden uit het zoekgebied Hollandse Kust: Hollandse Kust-Noord (82 km²), Hollandse Kust-Zuid (201 km²) en Hollandse Kust-West/Westrijn (77 km²). Zie Figuur 2.



Figuur 2 Groen gearceerd: de beschouwde deelgebieden

De vijf genoemde gebieden hebben onderscheidende productie. Voor deze gebieden zijn de productiekosten berekend van een park van 230 MW en een parkdichtheid van ruim 7 MW/km². Ten behoeve van de transparantie in deze notitie, is gekozen slechts één turbinetype in alle berekeningen te beschouwen van 3,6 MW. In Tabel 1 staan de berekende productiekosten in deze gebieden.

Tabel 1 Productiekosten in de vijf beschouwde gebieden

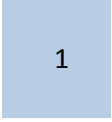
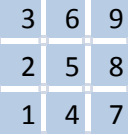



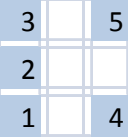

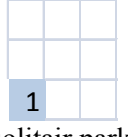
Lokatie	Diepte [m]	Ongestoorde windsnelheid [m/s]	Windsnelheid in park [m/s]	Basisbedrag [€/MWh]
HK-noord	24,5	9,744	9,074	170,3
HK-zuid	23,5	9,656	8,992	172,1
HK-west/Westrijn	24,5	9,836	9,160	176,7
Borsele	26,5	10,035	9,345	187,4
IJmuiden ver	29,2	9,980	9,294	193,3

2.3 Analysemethode

In deze notitie wordt geprobeerd om tot algemene inrichtingsregels voor windgebieden op zee te komen, waarbij die inrichtingsregels gebaseerd zijn op de te realiseren elektriciteitsproductie of op de productiekosten. Daartoe is een denkbeeldig maar representatief gebied van 380 km² op verschillende wijzen ingevuld met windturbines of windturbineclusters (windparken). De ongestoorde windsnelheid is gesteld op 9,7 m/s. De windroos is in 8 sectoren opgeknipt, waarbij (ter vereen-

voudiging) de gemiddelde windsnelheid niet afhankelijk is gemaakt van de windrichting. Door verschillende positioneringen van de windparken binnen een gebied en verschillende vermogensdichtheden binnen een park, wordt gekeken naar de gevolgen op productie en productiekosten bij 4 (4,2) MW/km² en 6 (5,5) MW/km². De verschillende inrichtingsvarianten staan in Tabel 2.

Tabel 2 *Verskillende inrichtingsvarianten. Zoekgebied wordt met tot 9 deelparken ingericht*

 <p>1 aaneengesloten park</p>	 <p>9 parken</p>	 <p>8 parken</p>	 <p>7 parken</p>
 <p>5 parken (centraal)</p>	 <p>5 parken (niet-centr.)</p>	 <p>4 parken</p>	 <p>solitair park (kleinere oppervlakte)</p>

3. Resultaten

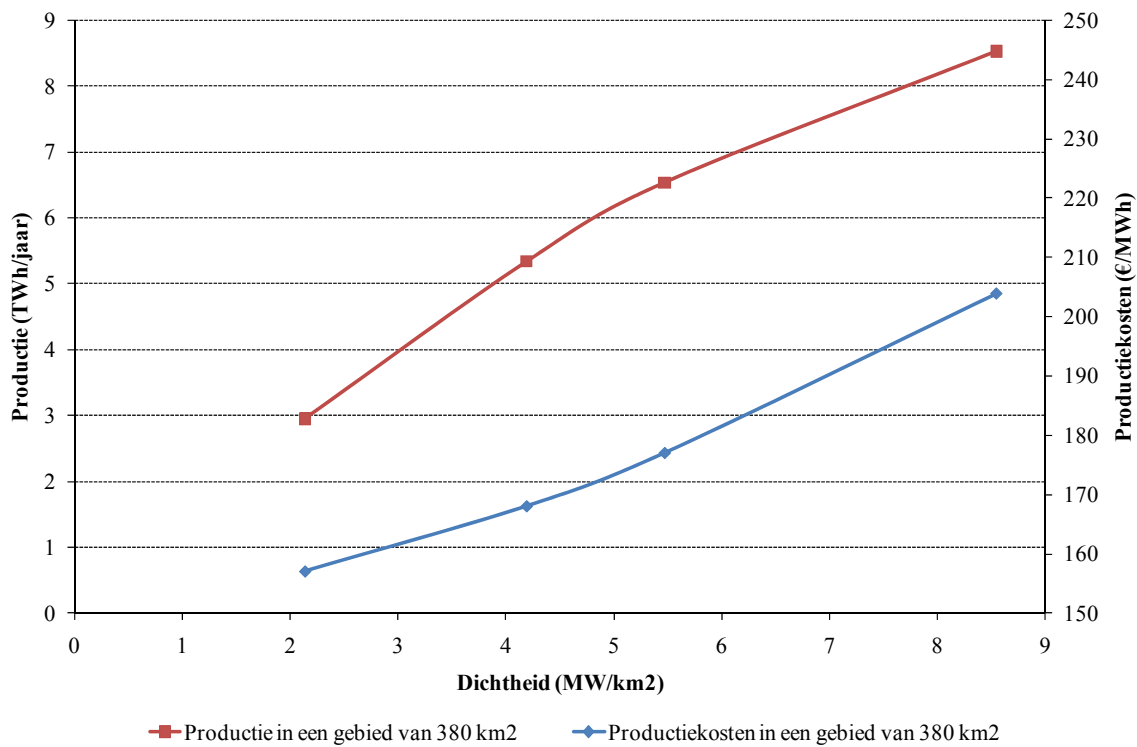
3.1 Dichtheid

Een windturbine zet een deel van de energie die in de wind zit, om in elektriciteit. Daardoor zal de wind achter de turbine enigszins in kracht afnemen. Naarmate meer turbines in een gebied staan, neemt de windsnelheid ook sterker af. Minder wind impliceert minder elektriciteitsproductie per windturbine en hogere productiekosten. In deze paragraaf wordt gekeken naar de invloed van de dichtheid (opgesteld vermogen per vierkante kilometer) op de totale elektriciteitsproductie uit dat gebied en de gemiddelde productiekosten. In Figuur 3 staat de invloed van de dichtheid voor een gebied van 380 km² als representant van een deellocatie in het zoekgebied Hollandse Kust.

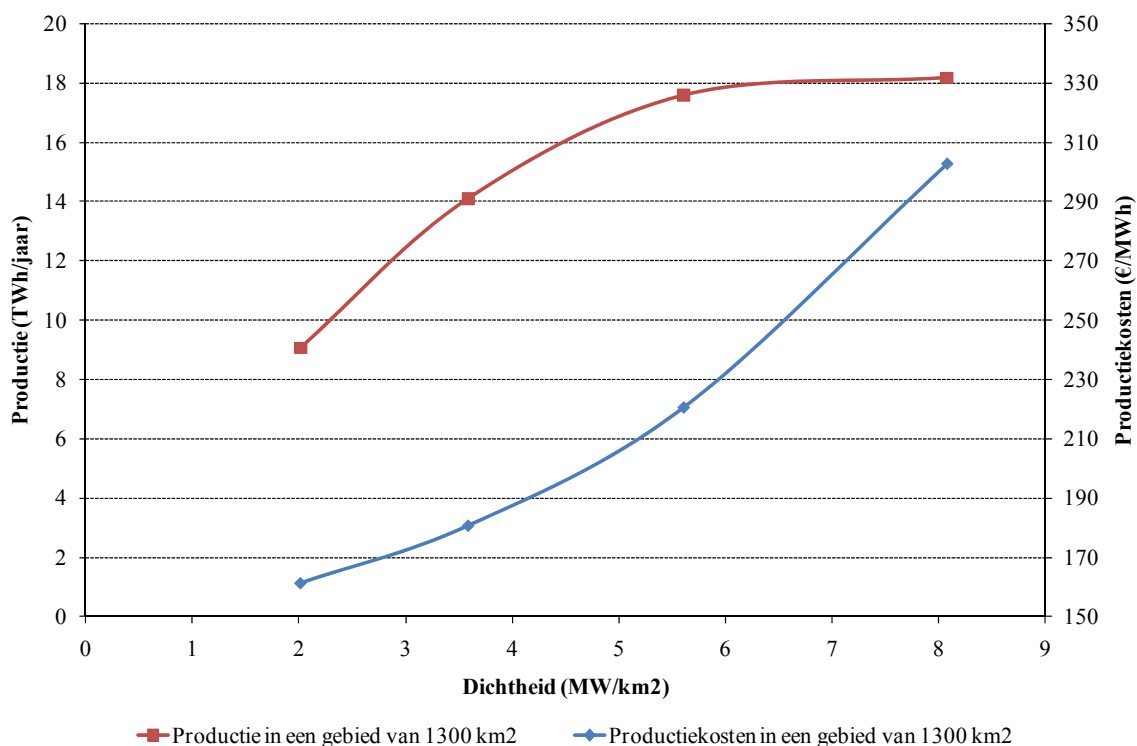
Bij een lage dichtheid van ca. 2 MW/km² kan 3 TWh/jaar worden geproduceerd. Door meer vermogen op te stellen kan de productie evenwel tot meer dan 8 TWh/jaar stijgen. Naarmate hoge dichtheid begint de toename van de productie echter wel licht af te vlakken. De productiekosten stijgen door grotere dichtheid van minder dan 16 €/kWh tot meer dan 20 €/kWh.

Figuur 4 toont de invloed van de dichtheid voor een groter gebied van 1300 km² – een representant voor het gebied IJmuiden-ver. De productie bedraagt 9 TWh/jaar bij een dichtheid van 2 MW/km² en kan toenemen tot een 18 TWh/jaar bij een dichtheid van 5,5 MW/km². Bij nog grotere dichtheden neemt de productie nauwelijks nog toe, terwijl de productiekosten wel exponentieel blijven stijgen tot meer dan 30 €/kWh bij een dichtheid van 8 MW/km².

Het blijkt dat de productie vergroot kan worden door de dichtheid toe te laten nemen – tot op zekere hoogte. De consequentie van de grotere dichtheid zijn stijgende productiekosten. Door de stijgende productiekosten af te zetten tegen de toenemende productie, worden de marginale meerkosten van een hogere dichtheid berekend. Figuur 6 toont de resultaten. De marginale meerkosten liggen in het merendeel van de onderzochte situaties boven de 20 €/kWh. Dit is een kostenniveau dat hoger ligt dan de productiekosten van een solitair park waar dan ook in de Nederlandse EEZ en ruim boven de ‘meetlat’ in de SDE+ van 15 €/kWh.

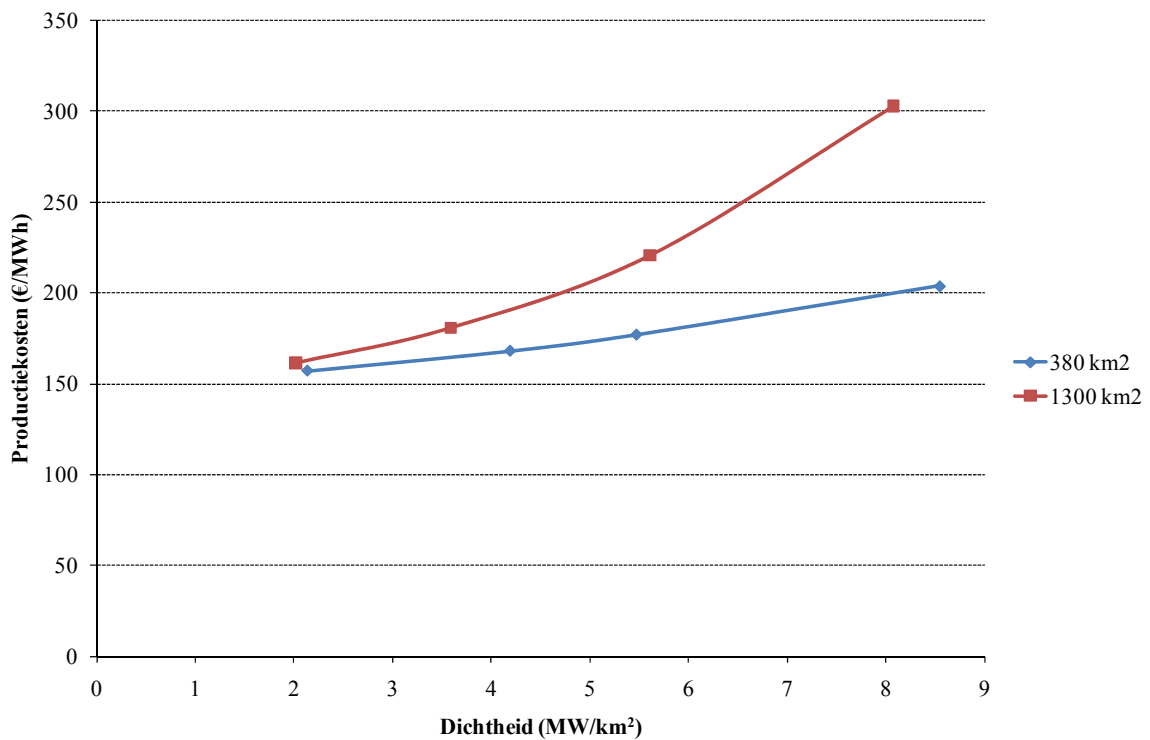


Figuur 3 *Verband tussen productiekosten en productie met opgesteld vermogen op 380 km²*

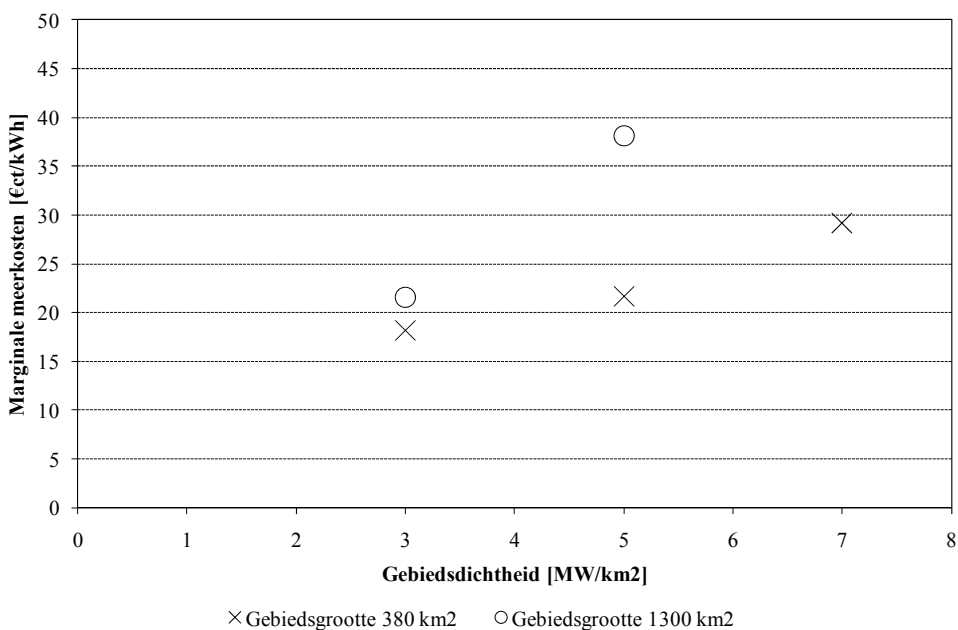


Figuur 4 *Verband tussen productiekosten en productie met opgesteld vermogen op 1300 km²*

In Figuur 5 worden de productiekosten voor beide gebieden in één grafiek getoond, waaruit duidelijk te zien is dat vooral in een groot gebied de kosten sterk toenemen met toenemende dichtheid.



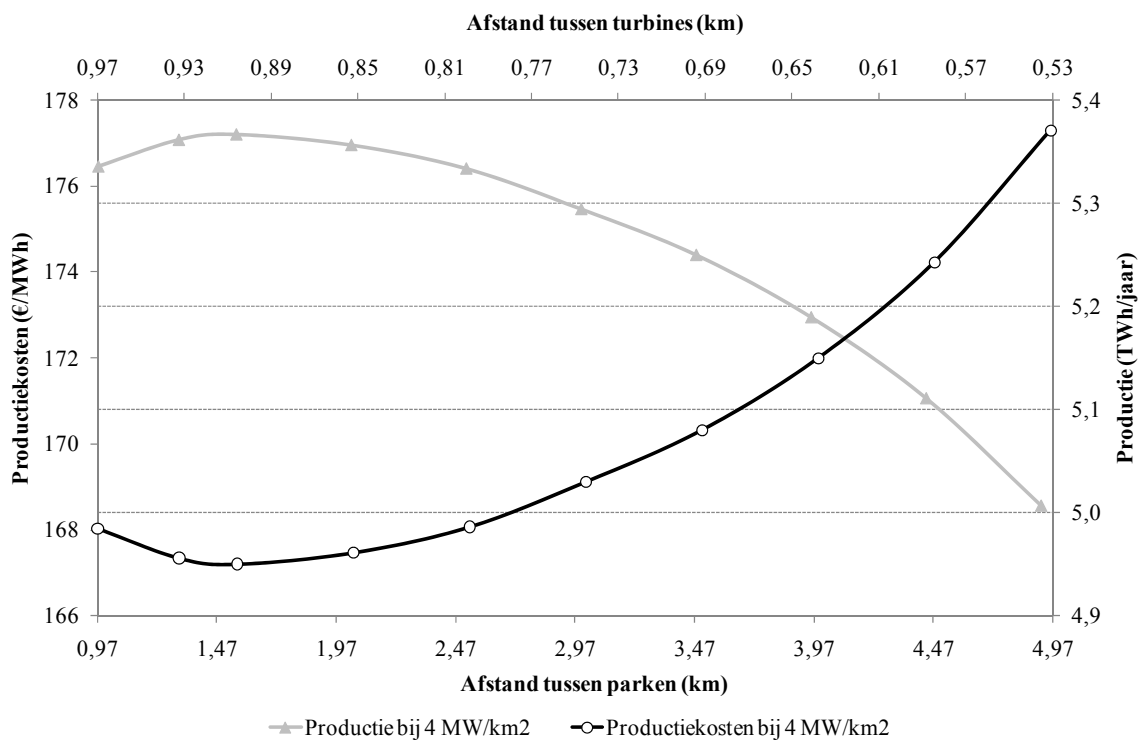
Figuur 5 Invloed van de dichtheid op de productiekosten voor een klein en groot gebied



Figuur 6 Marginale meerkosten van windenergie bij het verdichten van windgebieden op zee

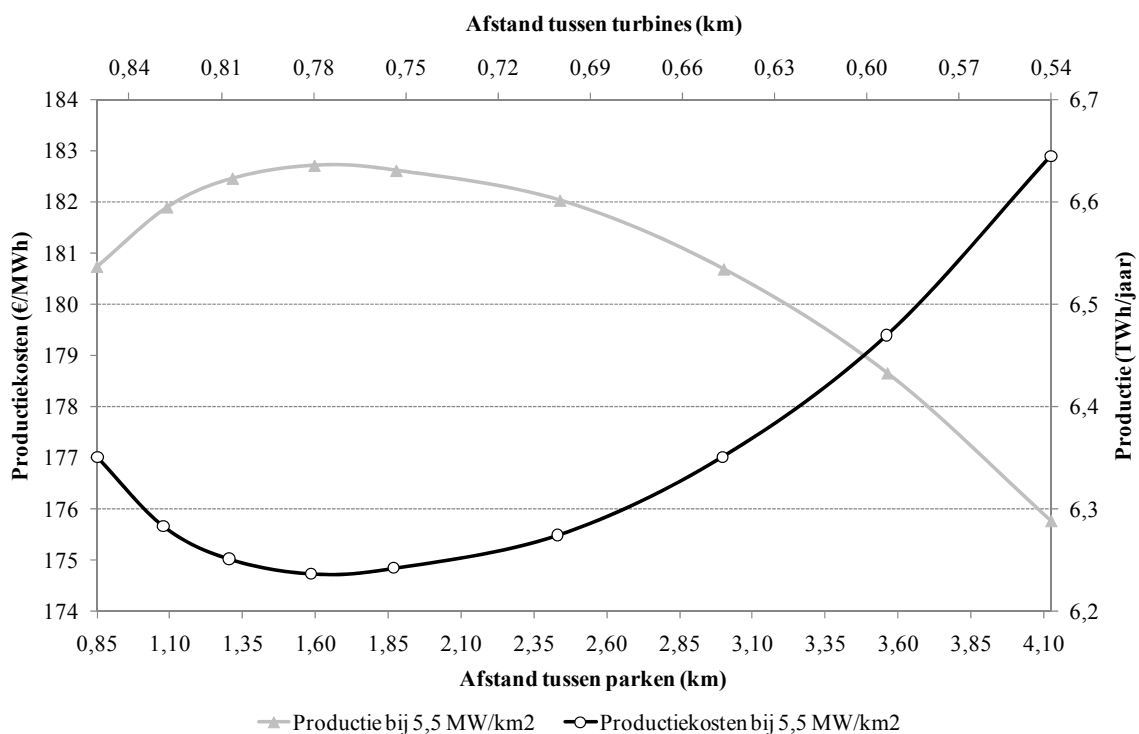
3.2 Inrichting

Voor de inrichtingsvarianten waarbij een gebied ingericht wordt met 9 vierkante parken, is gevarieerd met de grootte van de tussenruimtes en de intra-park-vermogensdichtheid. Hierdoor wordt de relatie zichtbaar tussen productie(kosten) en afstand tussen de parken. In Figuur 7 staat de relatie bij een gebiedsdichtheid van 4 MW/km². De minimale afstand tussen parken is 0,97 km. Dit is ook de maximale afstand tussen turbines voor de gekozen dichtheid en het gekozen turbinetype.



Figuur 7 Verband tussen productie en productiekosten met de parkafstand bij lage dichtheid

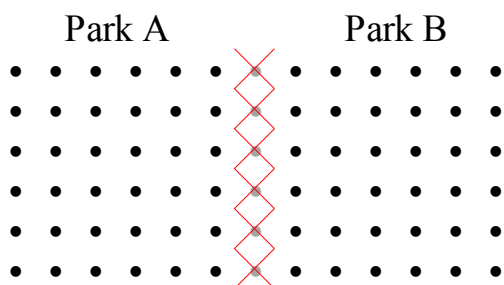
Voor zover gekeken wordt naar een vaste oppervlakte en een vaste dichtheid, bestaat er in het model een een-op-een-relatie tussen de elektriciteitsproductie en de productiekosten: hoe hoger de productie, des te lager de kosten.



Figuur 8 Verband tussen productie en productiekosten met de parkafstand bij hoge dichtheid

Voor de berekeningen van Figuur 7 en Figuur 8 is een denkbeeldig gebied genomen van 380 km² waarin een vast vermogen van 1,6 GW (Figuur 7) of 2,1 GW (Figuur 8) geplaatst worden. Het vermogen wordt verdeeld over negen parken. Naarmate de tussenruimte tussen parken toeneemt, komen de turbines binnen de parken dichter op elkaar te staan. Uit Figuur 7 en Figuur 8 blijkt dat grotere tussenruimtes niet tot een andere kostenstructuur leiden. Een optimalisatie naar hoogste productie, mogelijk vanuit optimaal ruimtegebruik gewenst, leidt tot hetzelfde ontwerpoptimum als optimalisatie naar laagste kosten. Het eisen van tussenruimtes tussen parken lijkt daarmee niet tot ander gedrag van ontwikkelaars te leiden. Daarmee is het stellen van een dergelijke eis een overbodig sturingselement.

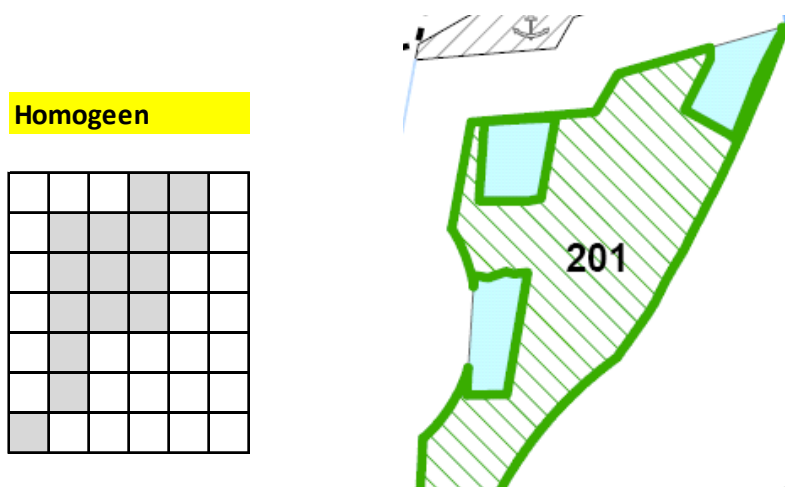
Een uniforme verdeling, waarbij de negen parken zodanig aan elkaar grenzen dat ruimtelijk gezien één groot park ontstaat (uiterst links in Figuur 7 en Figuur 8), is ca 0,1 tot 0,2 €/kWh duurder dan de optimale configuratie. In de optimale configuratie lijkt één turbinerij overgeslagen te moeten worden, zie Figuur 9. Dit kostenverschil is niet significant genoeg om uitspraken te doen over een specifieke locatie, omdat een ontwikkelaar met meerdere ontwerpkeuzes geconfronteerd wordt.



Figuur 9 Optimale configuratie van windparken

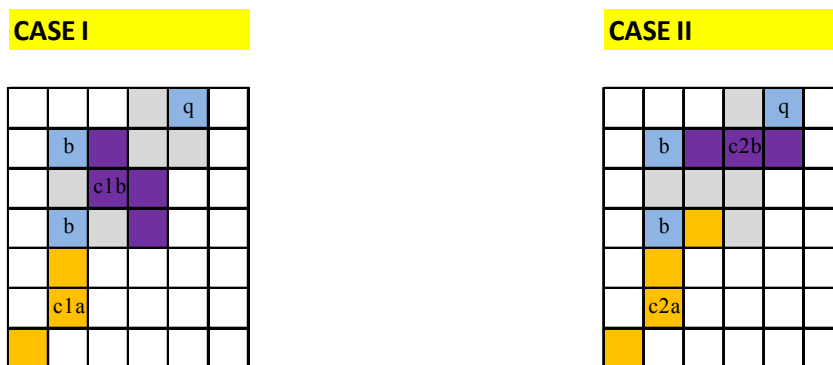
4. Discussie

In deze notitie wordt geadviseerd om niet tot zeer beperkt te sturen bij vergunningaanvragen in het zoekgebied Hollandse Kust. Als risicoanalyse is een berekening uitgevoerd waarin het gebied Hollandse Kust-Zuid op drie wijzen wordt volgebouwd: een variant met een homogene verdeling en twee varianten waarin nog twee parken worden gebouwd naast de reeds vergunde twee parken. Daartoe is eerst het gebied gestileerd, zie Figuur 10.



Figuur 10 Stilering van het gebied Hollandse Kust-Zuid in de variant 'homogeen'

Bij de homogene verdeling kan 4,5 GWh/jaar worden geproduceerd tegen 16,8 €/kWh. Bij de twee extra parken worden ook de vergunde parken Beaufort (b) en Q10 (q) meegenomen¹. Figuur 11 toont de beide varianten waarin de twee nieuw aan te vragen parken zijn aangeduid met de code c1a/c1b en c2a/c2b.



Figuur 11 *Stilering van twee varianten waarin twee extra parken gebouwd worden*

In beide varianten, Case I en Case II, daalt de totale productie van 4,5 GWh/jaar (homogene verdeling) naar 4,4 GWh/jaar en stijgen de productiekosten van 16,8 €/kWh naar 17,0 €/kWh. Voor de gemiddelde productiekosten van het hele gebied maakt de ruimtelijke invulling weinig verschil. Voor een concreet park kan de ligging van de nieuwe parken wel grote invloed hebben. Zo heeft het park Q10 in Case I productiekosten van 18,4 €/kWh. In Case II liggen de productiekosten op 19,0 €/kWh, ofwel een significante stijging van 0,6 €/kWh.

Uit deze berekeningen blijkt dat het stellen van specifieke eisen ten aanzien van het aanhouden van tussenruimtes tussen parken geen significante gevolgen heeft voor de gemiddelde productiekosten in het gebied, maar dat nieuwe parken wel grote nadelige invloed kunnen hebben op de productiekosten van bestaande parken.

¹ Omdat de berekening uitgaat van een vast turbinetype van 3,6 MW en de gestileerde oppervlakte niet exact overeenkomt met de oppervlakte van de afgegeven vergunningen, komen de vermogens van deze parken niet overeen met de vermogens die uit de vergunningen zijn af te leiden.

Bijlage A: Berekeningen bij Paragraaf 2.2

Enkelvoudige referentieparken per gebied

Rotordiameter

0,107 km

Lokatie	Diepte [m]	Afstand tot haven [km]	Afstand tot netaansluiting [km]	Ongestoorde windsnelheid [m/s]	Grootte park [MW]	Afstand tussen turbines [D]	Afstand tussen turbines [km]	Effectieve dichtheid [MW/km ²]	Windsnelheid in park [m/s]	Basisbedrag [€/MWh]	Vollasturen [uren/jaar]	Totale productie [GWh]	Toename kosten tov HK-N ref [€/MWh]
HK-noord	24,5	32	35	9,744	230,4	7,5	0,803	7,30	9,074	170,3	3509	808	0,0
HK-zuid	23,5	40	36	9,656	230,4	7,5	0,803	7,30	8,992	172,1	3459	797	1,8
HK-west/Westrijn	24,5	44	60	9,836	230,4	7,5	0,803	7,30	9,160	176,7	3529	813	6,4
Borsele	26,5	64	77	10,035	230,4	7,5	0,803	7,30	9,345	187,4	3625	835	17,1
Ijmuiden ver	29,2	75,3	87	9,980	230,4	7,5	0,803	7,30	9,294	193,3	3583	826	23,0

Kleine gebieden: wat als we deze helemaal volbouwen met dezelfde afstanden tussen turbines als in de referentiegebieden?

Lokatie	Diepte [m]	Afstand tot haven [km]	Afstand tot netaansluiting [km]	Ongestoorde windsnelheid [m/s]	Grootte park [MW]	Afstand tussen turbines [D]	Afstand tussen turbines [km]	Effectieve dichtheid [MW/km ²]	Windsnelheid in park [m/s]	Basisbedrag [€/MWh]	Vollasturen [uren/jaar]	Totale productie [GWh]	Toename kosten tov HK-N ref [€/MWh]
HK-noord	zie boven	zie boven	zie boven	zie boven	705,6	7,5	0,803	6,48	8,708	178,9	3311	2336	8,6
HK-west/Westrijn	zie boven	zie boven	zie boven	zie boven	810	8,5	0,910	6,42	8,738	186,8	3304	2676	16,5

Bijlage B: Berekeningen bij Paragraaf 3.1

Gebied van 379 km² met homogene verdeling, verschillende dichtheid

Omschrijving variant	Afstand tussen				Grootte park [MW]	Oppervlakte [km ²]	Dichtheid [MW/km ²]	Gemiddelde windsnelheid	Productie-kosten, gemiddeld [€/MWh]	Productie-kosten, hoogste [€/MWh]
	turbines [D]	Afstand tussen turbines [km]	Afstand tussen parken [D]	Afstand tussen parken [km]						
Dichtheid ca. 2 MW/km ²	13,0	1,391	13,0	1,391	810	379,23	2,14	9,327	157,1	157,8
Dichtheid ca. 4 MW/km ²	9,1	0,974	9,1	0,974	1587,6	379,23	4,19	8,791	168,0	170,9
Dichtheid ca. 6 MW/km ²	7,9	0,845	7,9	0,845	2073,6	379,23	5,47	8,422	177,0	182,2
Dichtheid ca. 8 MW/km ²	6,3	0,672	6,3	0,672	3240	379,23	8,54	7,566	203,9	219,6

Gebied van 1300 km² met homogene verdeling, verschillende dichtheid

Omschrijving variant	Afstand tussen				Grootte park [MW]	Oppervlakte [km ²]	Dichtheid [MW/km ²]	Gemiddelde windsnelheid	Productie-kosten, gemiddeld [€/MWh]	Productie-kosten, hoogste [€/MWh]
	turbines [D]	Afstand tussen turbines [km]	Afstand tussen parken [D]	Afstand tussen parken [km]						
Dichtheid ca. 2 MW/km ²	13,0	1,387	13,0	1,387	2624,4	1300	2,02	8,962	161,4	163,6
Dichtheid ca. 4 MW/km ²	9,6	1,030	9,6	1,030	4665,6	1300	3,59	8,200	180,8	188,5
Dichtheid ca. 6 MW/km ²	7,7	0,819	7,7	0,819	7290	1300	5,61	7,220	220,6	247,3
Dichtheid ca. 8 MW/km ²	6,4	0,680	6,4	0,680	10497,6	1300	8,08	6,165	302,7	401,8

Bijlage C: Berekeningen bij Paragraaf 3.2

Grote gebieden: dichtheid = 4,2 MW/km². Enkelvoudige referentiepark = 176,4 MW. Ongestoorde windsnelheid = 9,7 m/s

Omschrijving variant	Afstand tussen turbines		Afstand tussen parken [D]	Afstand tussen parken [km]	Grootte park [MW]	Oppervlakte [km ²]	Dichtheid [MW/km ²]	Gemiddelde windsnelheid	Productie-kosten, gemiddeld [€/MWh]	Productie-kosten, hoogste [€/MWh]	Productie-kosten, laagste [€/MWh]	Vollasturen [uren/jaar]	Totale productie [GWh]	Toename kosten tov enkelvoudige ref [€/MWh]
	[D]	Afstand tussen turbines [km]												
Enkelvoudig referentiepark	7,5	-	-	-	176,4	23,18	7,61	9,104	161,3	161,3	161,3	3529	623	0,0
Enkelvoudig park	9,1	-	-	-	176,4	34,13	5,17	9,246	158,5	158,5	158,5	3603	636	-2,7
Homogene verdeling	9,1	0,974	9,1	0,974	1587,6	379,23	4,19	8,791	168,0	170,9	165,5	3361	5336	6,8
9 parken	5	0,535	46	4,922	1587,6	379,23	4,19	8,424	177,3	179,3	175,4	3154	5007	16,0
9 parken	5,5	0,589	41,5	4,441	1587,6	379,23	4,19	8,538	174,2	176,1	172,5	3220	5111	13,0
9 parken	6	0,642	37	3,959	1587,6	379,23	4,19	8,625	172,0	173,8	170,3	3269	5190	10,7
9 parken	6,5	0,696	32,5	3,478	1587,6	379,23	4,19	8,693	170,3	172,1	168,6	3307	5250	9,1
9 parken	7	0,749	28	2,996	1587,6	379,23	4,19	8,744	169,1	171,0	167,4	3335	5295	7,8
9 parken	7,5	0,803	23,5	2,515	1587,6	379,23	4,19	8,788	168,1	170,0	166,3	3360	5334	6,8
9 parken	8	0,856	19	2,033	1587,6	379,23	4,19	8,815	167,5	169,5	165,6	3374	5357	6,2
9 parken	8,5	0,910	14,5	1,552	1587,6	379,23	4,19	8,826	167,2	169,4	165,1	3381	5367	5,9
9 parken	8,75	0,936	12,25	1,311	1587,6	379,23	4,19	8,820	167,3	169,8	165,1	3377	5362	6,1
5 parken	7,5	0,803	tussen 1&2 = 92D	9,844	882	379,23	2,33	8,959	164,3	165,4	163,4	3453	3045	3,0
4 parken	7,5	0,803	tussen 1&2 = 92D	9,844	705,6	379,23	1,86	9,031	162,8	163,2	162,4	3491	2463	1,5

Grote gebieden: dichtheid = 5,5 MW/km². Enkelvoudige referentiepark = 230,4 MW. Ongestoorde windsnelheid = 9,7 m/s

Omschrijving variant	Afstand tussen turbines		Afstand tussen parken [D]	Afstand tussen parken [km]	Grootte park [MW]	Oppervlakte [km ²]	Dichtheid [MW/km ²]	Gemiddelde windsnelheid	Productie-kosten, gemiddeld [€/MWh]	Productie-kosten, hoogste [€/MWh]	Productie-kosten, laagste [€/MWh]	Vollasturen [uren/jaar]	Totale productie [GWh]	Toename kosten tov enkelvoudige ref [€/MWh]
	[D]	Afstand tussen turbines [km]												
Enkelvoudig referentiepark	7,5	-	-	-	230,4	31,56	7,30	9,033	162,3	162,3	162,3	3492	805	0,0
Enkelvoudig park	7,9	-	-	-	230,4	35,13	6,56	9,079	161,4	161,4	161,4	3516	810	-0,9
Homogene verdeling	7,9	0,845	7,9	0,845	2073,6	379,23	5,47	8,422	177,0	182,2	172,5	3152	6537	14,7
9 parken	5	0,535	38,5	4,120	2073,6	379,23	5,47	8,217	182,9	185,9	180,2	3033	6288	20,6
9 parken	5,5	0,589	33,25	3,558	2073,6	379,23	5,47	8,335	179,4	182,3	176,8	3102	6433	17,1
9 parken	6	0,642	28	2,996	2073,6	379,23	5,47	8,419	177,0	179,9	174,4	3151	6534	14,7
9 parken	6,5	0,696	22,75	2,434	2073,6	379,23	5,47	8,476	175,5	178,5	172,7	3184	6602	13,2
9 parken	7	0,749	17,5	1,873	2073,6	379,23	5,47	8,500	174,8	178,2	171,8	3198	6631	12,5
9 parken	7,25	0,776	14,875	1,592	2073,6	379,23	5,47	8,504	174,7	178,3	171,5	3200	6636	12,4
9 parken	7,5	0,803	12,25	1,311	2073,6	379,23	5,47	8,494	175,0	179,0	171,5	3194	6623	12,7
9 parken	7,7	0,824	10,15	1,086	2073,6	379,23	5,47	8,470	175,7	180,1	171,8	3180	6595	13,3
5 parken, centrale verdeling	7,5	-	tussen 1&2 = 77D	8,239	1152	379,23	3,04	8,801	167,4	169,3	165,7	3367	3879	5,0
4 parken	7,5	-	tussen 1&2 = 77D	8,239	921,6	379,23	2,43	8,945	164,2	164,8	163,8	3445	3175	1,9
5 parken, geen centrale verdeling	7,5	-	12.25D (meer voor gat)	1,311	1152	379,23	3,04	8,848	166,3	169,5	164,0	3392	3908	4,0
8 parken	7,5	-	12.25D (meer voor gat)	1,311	1843,2	379,23	4,86	8,673	170,4	173,4	168,0	3296	6075	8,1
7 parken	7,5	-	12.25D (meer voor gat)	1,311	1612,8	379,23	4,25	8,705	169,6	170,9	168,0	3314	5344	7,3

Bijlage D: Berekeningen bij Hoofdstuk 4

Referentieberekeningen aan solitaire parken

Rotordiameter

0,107 km

Lokatie	Diepte [m]	Afstand tot haven [km]	Afstand tot netaansluiting [km]	Ongestoorde windsnelheid [m/s]	Grootte park [MW]	Afstand tussen turbines [D]	Afstand tussen turbines [km]	Windsnelheid in park [m/s]	Basisbedrag [€/MWh]	Vollasturen [uren/jaar]	Totale productie [GWh]
Beaufort	23,5	35	40	9,7	259,2	7	0,749	9,088	168,7	3514	911
Q10	25,0	35	40	9,7	129,6	7	0,749	9,120	183,1	3531	458
c1a	23,5	35	40	9,7	388,8	7	0,749	9,001	165,3	3468	1348
c1b	23,0	35	40	9,7	518,4	7	0,749	8,861	163,4	3393	1759
c2a	23,5	35	40	9,7	518,4	7	0,749	8,987	161,3	3460	1794
c2b	24,3	35	40	9,7	388,8	7	0,749	8,947	167,4	3439	1337

CASE I

Lokatie	Afstand tussen turbines [D]	Afstand tussen turbines [km]	Grootte park [MW]	Oppervlakte [km ²]	Dichtheid [MW/km ²]	Gemiddelde windsnelheid [€/MWh]	Productie-gemiddeld [€/MWh]	Vollasturen [uren/jaar]	Totale productie [GWh]	Toename kosten tov solitair park [€/MWh]
Beaufort	7	0,749	259,2			8,708	177,5	3308	858	8,8
Q10	7	0,749	129,6			9,075	184,2	3507	454	1,1
c1a	7	0,749	388,8			8,937	166,7	3434	1335	1,4
c1b	7	0,749	518,4			8,768	165,5	3342	1732	2,1
Totaal	-	-	1296	262,55	4,94		170,1	3379	4379	
Homogene verdeling	8,98	0,961	1296	262,55	4,94	9,015	167,8	3475	4504	

CASE II

Lokatie	Afstand tussen turbines [D]	Afstand tussen turbines [km]	Grootte park [MW]	Oppervlakte [km ²]	Dichtheid [MW/km ²]	Gemiddelde windsnelheid [€/MWh]	Productie-gemiddeld [€/MWh]	Vollasturen [uren/jaar]	Totale productie [GWh]	Toename kosten tov solitair park [€/MWh]
Beaufort	7	0,749	259,2			8,706	177,6	3307	857	8,8
Q10	7	0,749	129,6			8,818	190,6	3369	437	7,5
c2a	7	0,749	518,4			8,91	162,9	3419	1772	1,6
c2b	7	0,749	388,8			8,864	169,2	3394	1320	1,9
Totaal	-	-	1296	262,55	4,94		170,4	3384	4386	
Homogene verdeling	8,98	0,961	1296	262,55	4,94	9,015	167,8	3475	4504	