

Ontwerp- en Beheersplan

Windturbinepark Borssele II



Locatie:	Delft	
Datum:	13 januari 2017	
Opdrachtgever:	Rijkswaterstaat, De Haagse Hogeschool	
Projectcode:	PROENT	
Projectgroep:	Projectteam 1	
Auteurs:	Ricardo Molenaar	R.Molenaar@student.hhs.nl
	Martijn van Essen	M.T.vanEssen@student.hhs.nl

Versiebeheer

Versiehistorie			
Versie	Datum	Wijzigingen	Auteur
vA01	01-12-2016	Lay out opstellen en indeling document	M.T. van Essen
vA02	06-12-2016	Windturbine onderzoek uitgevoerd	R. Molenaar M.T. van Essen
vA03	19-12-2016	Windanalyse en ontwerpkeuzes	M.T. van Essen
vA04	05-01-2016	Inleiding geschreven, Ontwerpkeuzes uitgewerkt & bodem-/distributienetanalyse uitgevoerd	R. Molenaar M.T. van Essen
vA05		Gehele document aangevuld en afgerond. Oplever-versie.	R. Molenaar M.T. van Essen

Voorwoord

Dit ontwerp- en beheersplan is afkomstig van Molenaar & van Essen - research and engineering: een jong dynamisch bedrijf van twee studenten bachelor elektrotechniek (Ricardo Molenaar & Martijn van Essen) aan De Haagse Hogeschool te Delft. Dit plan is geschreven naar aanleiding van een aanvraag door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu: het aanleveren van een ontwerp- en beheersplan voor het windturbinepark Borssele II.

De vorm en inhoud van dit ontwerp- en beheersplan is informatief. Dit plan bevat de informatie omtrent de gemaakte keuzes bij het ontwerpen en opstellen van een beheersplan voor Borssele II.

Dit ontwerp- en beheersplan is bestemd voor alle stakeholders: de coördinatoren, het Ministerie van Infrastructuur en Milieu en dient als naslagwerk voor Molenaar & van Essen - Research and Engineering. Daarnaast kan dit rapport worden gebruikt om daadwerkelijke bouw van dit windturbinepark te realiseren.

Deze rapportage is mede tot stand gekomen door inbreng van diverse stakeholders. In het bijzonder willen wij drs. C.F.M. Dirksen, ir. J.B. Woudstra, ir. G. Hoogendorp en de lezing-houders ing. T. Collete en ing. J. Jacobs bedanken voor de geleverde informatie. Tot slot willen wij ir. Guido Bakema bedanken voor zijn inzichten op het ontwerpplan. Dit was een zeer waardevolle inbreng in dit ontwerp- en beheersplan.

Ricardo Molenaar
Martijn van Essen

Molenaar & van Essen - Research and Engineering

Samenvatting

Dit document behandelt de analyse, het ontwerp en het beheersen van het Borselle II windturbinepark. Opgesteld door Molenaar & van Essen Research and Engineering. Dit document heeft als doel om de eerder genoemde punten uit te werken en toe te lichten om de effectiviteit van het windturbinepark aan te tonen.

In september 2013 zijn meer dan 40 organisaties akkoord gegaan met het Energieakkoord [1]. In dit akkoord is afgesproken om in 2023 het aandeel van hernieuwbare energie met 16% te verhogen.

Om dit plan te realiseren heeft Rijkswaterstaat een aantal kavels aangewezen voor de Nederlandse kust. Op deze kavels zullen windmolenparken gebouwd worden welke bijdragen aan het aandeel hernieuwbare energie. In dit ontwerp betreft dit het kavel Borselle II.

Het ontwerp- en beheersplan beschrijft hoe het ontwerp voor het park tot stand is gekomen, hoe de keuzes hiervoor zijn gemaakt en uiteindelijk hoe het eind-ontwerp er uit ziet. Daarnaast wordt beschreven hoe het park na realisatie beheerd kan worden. Hiervoor worden de risico's, onderhoudswerkzaamheden en andere factoren in rekening gebracht om vervolgens een advies te geven voor een winstgevende exploitatie van het windpark.

Inhoudsopgave

Afkortingen en begrippen	5
1. Inleiding	6
2. Ontwerpplan	7
2.1. Analyse	7
2.2. Ontwerp keuzes	11
2.3. Gedetailleerde uitwerking ontwerp	16
2.4. Conclusie	18
3. Beheersplan	19
3.1. Analyse beheer	19
3.2. Ontwerp beheersplan	19
3.3. Conclusie	22
4. Eindconclusie / Aanbevelingen	24
Bijlagen	27
Bijlage A: Onderzoek geschiktheid windturbines	27
Bijlage B: Totale energie in de wind Borselle II	34

Afkortingen en begrippen

Begrip/Afkorting	Betekenis
Wake-effect	Het wake effect wordt veroorzaakt door het opeen plaatsen van windturbines. Dit effect heeft invloed op de productie van het windpark doordat windturbines invloed uitoefenen op de windsnelheden en turbulentie van de achterliggende windturbines [2].
Cut-in windspeed	Windsnelheid waarbij de windturbine energie gaat opwekken.
Rated windspeed	Windsnelheid waarbij de windturbine zijn maximaal vermogen gaat opwekken.
Cut-out windspeed	Windsnelheid waarbij de windturbine stopt met het opwekken van energie. Dit om schade aan de windturbine te voorkomen.
MTBF	Mean Time Between Failure: de tijd tussen twee defecten van een systeem/onderdeel. De reparatietijd wordt hierbij niet meegerekend. Dit betreft de tijd dat het systeem actief is [3].
String	Aan elkaar gekoppelde reeks windturbines.

1. Inleiding

Duurzaamheid heeft in de hedendaagse maatschappij een prominente rol en dit zal in de toekomst sterk toenemen. Het belang is groot, aangezien opwarming van de aarde dient te worden tegengegaan. Een oplossing hiervoor is het aanleggen van windturbineparken (op zee). Het ontwerpen van een windturbinepark heeft een lange ontwikkeltijd: van de aanbesteding tot de bouw; hierbij zijn talloze stakeholders betrokken. Molenaar & van Essen - Research and Engineering neemt binnen het project Windturbinepark - Borssele II het opstellen van een ontwerp- en beheersplan voor haar rekening.

Dit ontwerp- en beheersplan beschrijft op welke wijze het windturbinepark Borssele II volgens Molenaar & van Essen - Research and Engineering kan worden voorzien van windturbines en een indeling hiervan. Dit om een stap dichterbij de doelstelling van de Nederlandse overheid te komen: $4.450 MW$ aan windenergie te verkrijgen vanaf windturbineparken opgesteld op de Noordzee. Hierbij wordt eerst een omgevingsanalyse uitgevoerd om het met windturbines te bestrijken gebied in kaart te brengen, waarna het ontwerp wordt behandeld. Tot slot volgt er een beheersplan ten behoeve van het exploiteren van het windturbinepark Borssele II.

In hoofdstuk 2 wordt het ontwerpplan beschreven, waarin een analyse zal worden uitgevoerd van de standplaats van de windturbines (Borssele kavel II) en de windsnelheden in deze omgeving in kaart worden gebracht. Vervolgens zal een bodem- en distributienetanalyse worden beschreven, waarna een analyse van beschikbare windmolens uiteen wordt gezet. Daarnaast zullen de ontwerpkeuzes voor de windturbine, fundering, opgestelde lay-out en het distributienet worden verantwoord. Dit ontwerpplan eindigt met een deelconclusie. In hoofdstuk 3 zal het beheersplan aan bod komen, waar eerst een analyse zal worden beschreven op welke aspecten dit betrekking heeft. Deze worden naderhand uitgewerkt. Tevens wordt een deelconclusie van dit beheersplan beschreven. Tot besluit volgt er een eindconclusie over het ontwerp- en beheersplan tezamen.

2. Ontwerpplan

In dit hoofdstuk zal het ontwerp voor het kavel besproken worden. Dit ontwerp zal besproken worden aan de hand van een analyse van het vraagstuk. Hierop volgt het daadwerkelijke ontwerp. Aan de hand hier van wordt een conclusie getrokken.

2.1. Analyse

Hier volgt een analyse van de situatie en mogelijkheden in en rond het kavel Borselle II.

2.1.1. Windanalyse

Tijdens het uitzoeken van de kavels zijn ook onderzoeken gedaan naar de windsnelheden en windrichtingen in het Borssele gebied. Uit deze onderzoeken kunnen een aantal gegevens gehaald worden welke relevant zijn voor het ontwerp van het park. Deze gegevens zijn weergegeven in tabel 1.

Tabel 1: Windgegevens Borssele II [4]

Windrichting	Windstreek	Frequentie	Gemiddelde windsnelheid op 100 m hoogte [m/s]
345° - 15°	N	7.0%	7.578
15° - 45°	NNO - NO	5.9%	7.576
45° - 75°	NO - ONO	7.5%	8.853
75° - 105°	O	6.3%	8.601
105° - 135°	OZO - ZO	4.7%	8.150
135° - 165°	ZO - ZZO	4.7%	8.169
165° - 195°	Z	10.3%	10.555
195° - 225°	ZZW - ZW	15.3%	11.418
225° - 255°	ZW - WZW	14.0%	10.639
255° - 285°	W	9.6%	9.742
285° - 315°	WNW - NW	7.4%	8.815
315° - 345°	NW - NNW	7.3%	8.043
Totaal	–	100%	9.447

Op basis van de gegevens uit tabel 1 kan geconcludeerd worden dat de meest voorkomende windrichting Zuid-West is. Daarnaast blijkt dat de gemiddelde windsnelheid in het gebied 9.4 m/s bedraagt.

Met deze gemiddelde windsnelheid kan tevens het gemiddeld verwacht vermogen worden bepaald. Dit kan met onderstaande formules [6]:

De kansberekening voor wind:

$$p = \frac{k}{\lambda} * \frac{v}{\lambda} * e^{(-\frac{v}{\lambda})^k} \quad (2.1)$$

Mét:

- p = kans (probability);
- v = windsnelheid;
- k = vormfactor;
- λ = schaalfactor.

Op basis van de gegevens uit [5] kan deze curve benaderd worden. Hieruit volgt dat $k = 2,18$ en $\lambda = 10,9$. De curve die hieruit volgt is weergegeven in figuur 2.1.

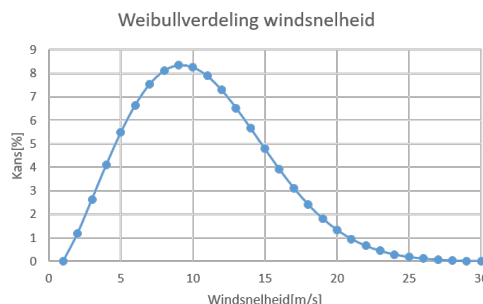
De formule om het vermogen uit de wind te kunnen berekenen:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} * \rho_l * A * v^3 * t \quad (2.2)$$

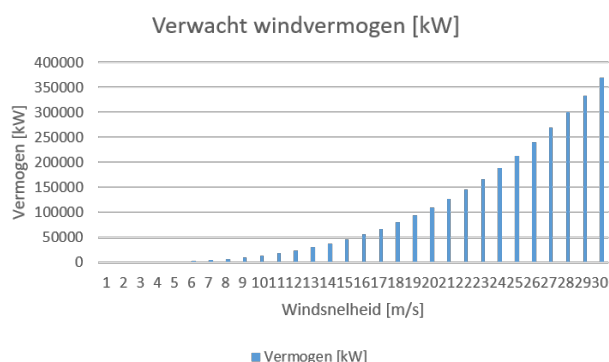
Mét:

- P_{wind} = het in de wind aanwezige vermogen uitgedrukt in Wh;
- ρ_l = de dichtheid van lucht = $1,293 \frac{kg}{m^3}$;
- A = het rotoroppervlak in $m^2 = \frac{1}{4} * \pi * D^2$ (met D = rotordiameter)
- v = de windsnelheid in m/s;
- t = tijd in uren.

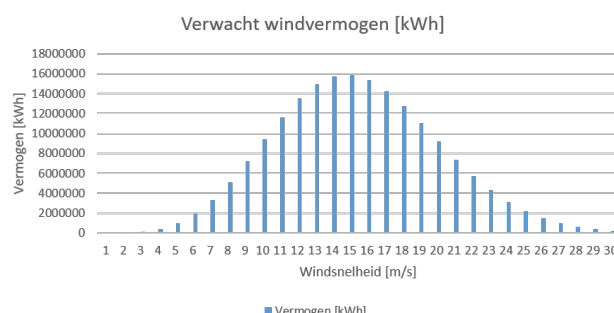
Deze formules leggen de basis voor de potentiële windenergie uit Borssele II. Een berekening met behulp van bovenstaande formules is in bijlage B te raadplegen. In figuur 2.2 is een visualisatie van deze berekening weergegeven. Hieruit volgt dat er $189,2 GWh$ aan potentiële windenergie aanwezig is.



Figuur 2.1: Weibullverdeling windsnelheid[5]



(a) Verwacht windvermogen in kW



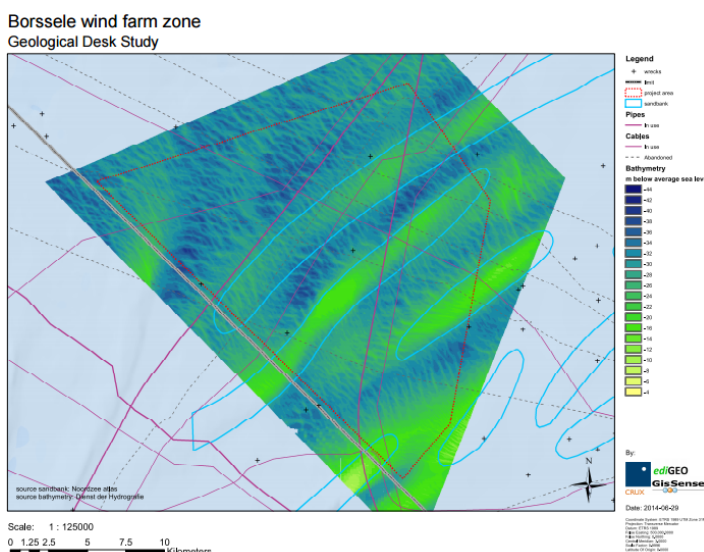
(b) Verwacht windvermogen in kWh

Figuur 2.2: Gegevens Vestas V164 - 8.0MW

2.1.2. Bodemanalyse

In figuur 2.3 is een bodemanalyse van Borssele II te raadplegen. Hierin zijn de verschillende dieptes van het kavel weergegeven. Daarnaast blijkt uit onderzoek dat de bodem uit verschillende structuren bestaat. Deze betreffen:

- "beschutte gebieden tussen de zandgolven tonen fijnere sedimenten, terwijl grovere sedimenten zijn aangetroffen op de toppen van de zandbanken";
- "in de Tertiaire afzettingen zijn vijf seismische units aangetroffen. De grens tussen de Tertiaire en Kwartaire afzettingen wordt gevormd door een erosievlak. De Kwartaire unit worden gevormd door rivier en ondiepe marine afzettingen. Ze bestaan voornamelijk uit zand, met verdeelde voorkomens van grind of klei.";
- "gebieden met grover zand en grind zijn sporadisch aangetroffen";
- "in het zuidwestelijke deel van Borssele is de bodem-dynamiek groot. In het noordoostelijke en zuidoostelijke deel is de bodem-dynamiek minder groot" [8].



Figuur 2.3: Bodemanalyse Borssele II [7]

In figuur 2.3 is te zien dat er diverse variaties in de bodem aanwezig zijn. In het kader van de fundering is het van belang zoveel mogelijk de (licht)groene gebieden te gebruiken. Hierbij wordt het te overbruggen verschil minimaal gehouden, wat in het voordeel werkt voor de toe te passen fundering.

Op basis hiervan kunnen de ontwerp keuzes met betrekking tot de plaatsing, alsmede de fundering, van de windturbines worden opgesteld. Dit wordt in paragraaf ?? nader toegelicht.

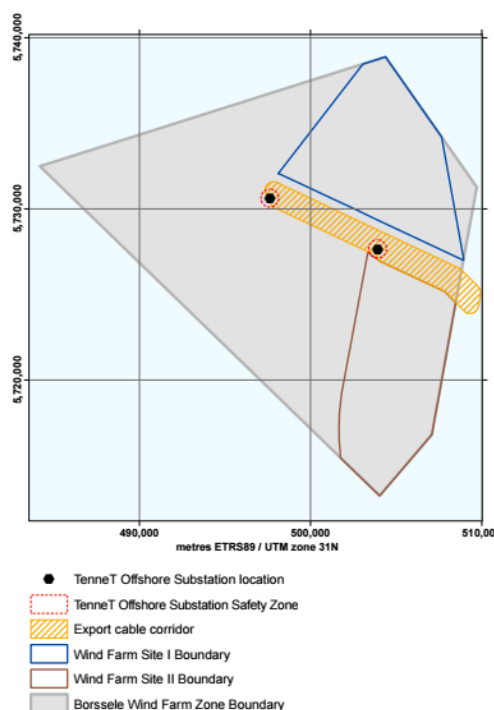
2.1.3. Distributienet analyse

Het distributienet wordt aangesloten op het verdeelstation van Tennen. De positie van dit verdeelstation is weergegeven in figuur 2.4 (grenzend aan het kader van kavel II). Hier dient een wisselspanning van 66 kV te worden afgeleverd. Op basis van de het aantal te plaatsen windmolens kan met de onderstaande formule de stroom afkomstig van één windturbine worden berekend:

$$I_{turbine} = \frac{P}{U} = \frac{8 * 10^6}{66.000} = 121,21A \quad (2.3)$$

Nu de stroom bekend is die per windturbine kan de dikte van de kabels binnen het distributienet worden bepaald. Daarnaast zullen de toegepaste kabels van isolatie moeten zijn voorzien welke hoogspanning niet laten overslaan.

Ook dienen deze kabels tegen het zoute water in combinatie met zand en klei bestand te zijn. De gekozen leverancier voor de kabels is Prysmian; in de datasheet zijn diverse kabels uiteengezet [10]. Een keuze voor een specifieke kabel zal in overleg met een expert moeten plaatsvinden; de benodigde ader-diameter zal in paragraaf 2.2.4 worden verantwoord.



Figuur 2.4: Verdeelstation van Tennen (66 kV) - Borssele II [9]

2.1.4. Type windturbine

Er zijn talloze windturbines beschikbaar voor offshore toepassing. Op basis van toegepast onderzoek is er een tabel tot stand gekomen, welke is te raadplegen in bijlage A. In dit overzicht zijn diverse beschikbare, conceptuele en geannuleerde windturbines uiteengezet. Bij dit onderzoek is gekeken naar de volgende factoren:

- vermogen van de windturbine;
- rotor-diameter;
- maximaal en minimaal aantal turbines;
- energieopbrengst per turbine;
- tandwielkast: of de windturbine beschikt over een tandwielkast of een direct drive systeem. Dit is een belangrijke factor in het kader van het te verrichten onderhoud (en heeft grote invloed op het beheersplan; zie hoofdstuk 3);
- cut-in windspeed;
- rated windspeed;
- cut-out windspeed;
- beschikbaarheid: prototypes vallen af, aangezien de beschikbaarheid niet kan worden gegarandeerd. Dit is niet gewenst, omdat de opdrachtgever een realisatie op korte termijn wenst;
- prestatiefactor (C_p).



Figuur 2.5: Visualisatie wake-effect [11]

In paragraaf 2.2.1 volgt de keuzeverantwoording omtrent de toegepaste windturbine.

2.2. Ontwerp keuzes

In dit hoofdstuk wordt het ontwerp voor het kavel behandeld. Hierbij zal worden ingegaan op welke keuzes zijn gemaakt, welke afwegingen hierbij zijn gemaakt en welke alternatieven beschikbaar waren.

2.2.1. Windturbine

In dit park is gekozen voor 45 windturbines van Vestas, type: V164 - 8.0MW (zie figuur 2.6). Dit betreft een windturbine met een vermogen van 8MW en een rotordiameter van 164 meter. Dit resulteert in een parkvermogen van 360MW. De vermogenscurve van deze windturbine is weergegeven in figuur 2.7 (a) [13].



Figuur 2.6: Vestas V164 - 8.0 MW turbine [12]

De keuze is op deze windturbine gevallen om de volgende redenen:

- De windturbine heeft de beste efficiëntie bij de geldende windsnelheden in het Borssele gebied.
- De windturbine is reeds leverbaar door de fabrikant.
- De windturbine heeft meerdere awards gewonnen.
- De windturbine is vaker gebruikt in andere windparken en heeft daar geen grote problemen geleverd.
- Het was de windturbine met het grootste vermogen welke reeds op de markt is en waarover genoeg informatie beschikbaar is.

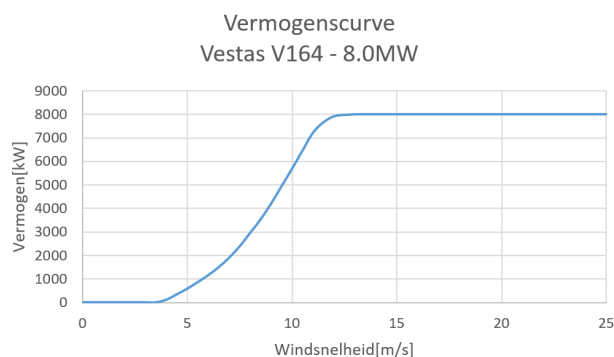
Met behulp van de vermogenscurve en de weibull-verdeling uit figuur 2.1 kan een benaderde opbrengst per windturbine berekend worden.

Uit een vermenigvuldiging van de vermogens-curve met de weibull-curve volgt de grafiek zoals te zien in figuur 2.7 (b). Hierin is de energie af te lezen welke bij elke windsnelheid gegenereerd wordt per jaar. Uit een optelling van deze waarden volgt dat elke windmolen per jaar 38,8GWh aan energie levert. Dit betekent dat het gehele park 1746GWh per jaar kan leveren (parkeffect niet meegerekend). Dit komt neer op 513.000 huishoudens.

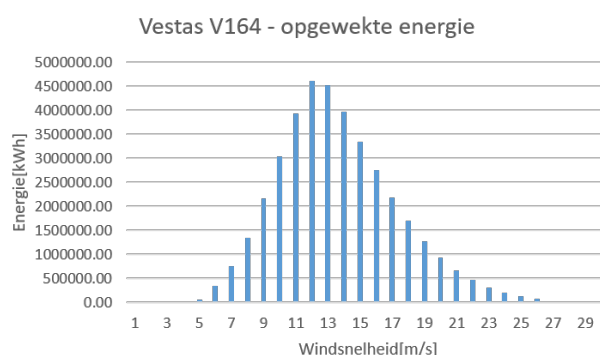
Met behulp van de gegevens in bijlage B kan de verwachte prestatiefactor worden uitgerekend. Deze is weergegeven in vergelijking 2.4

$$C_p = \frac{P_{windturbine}}{P_{wind}} * 100\% = \frac{38,8}{189,2} * 100\% = 20,5\% \quad (2.4)$$

Deze windturbine beschikt over een tandwielkast. Dit is nadelig in het kader van onderhoud. Er is toch



(a) Vermogenscurve



(b) Berekende opgewekte energie

Figuur 2.7: Gegevens Vestas V164 - 8.0MW [13]

voor een windturbine met een tandwielkast gekozen. Dit, omdat er op het moment van uitvoeren van het project geen windturbines beschikbaar waren op de markt waarvan genoeg gegevens beschikbaar waren. Hierdoor was het niet mogelijk voor Molenaar & van Essen om kwalitatief te volstaan aan de ontwerpeisen met deze windturbines.

Er dienen sensoren te worden toegepast om een inzicht te krijgen van de actuele conditie van de windmolen. In het beheersplan wordt dit nader toegelicht (zie tabel 2).

De hoogte van de windturbine is volgens de fabrikant locatie-afhankelijk. Voor deze locatie is gekozen voor een hub-hoogte van 100 *m* boven het gemiddelde wateroppervlak. Hiermee hebben de rotorbladen ook tijdens hoge golven een ruime marge ten opzichte van het water.

2.2.2. Fundering

In dit park zal, waar mogelijk, gebruik gemaakt worden van een monopile fundamente.¹ Dit omdat de kosten voor dit fundamente het laagste zijn. Dit type fundamente is geschikt voor een bodem-diepte tot 30 meter. Wanneer het niet mogelijk is een windturbine dusdanig te plaatsen dat er gebruik gemaakt kan worden van een monopile, zal er gebruik gemaakt worden van een zwaartekracht gebaseerd fundamente. De kosten van dit fundamente zijn hoger dan een monopile, maar dit fundamente is te gebruiken tot 50 meter. Ook is deze optie goedkoper dan andere fundamente die voor grotere dieptes beschikbaar zijn.

2.2.3. Lay-out

Om de impact van de windturbines op elkaars opbrengst te minimaliseren, is er gekozen om minimaal vijf rotor-diameters afstand te houden in de meest voorkomende windrichting en vier rotor-diameters in de minst voorkomende windrichting. Gezien de beschikbare ruimte is op veel plekken een grotere afstand gebruikt.

Voor de indeling van de windturbines in het park is gekozen om strings van 8 windturbines te maken. Deze groepen worden in een octagonale opstelling geplaatst met op elke punt van het octagon een turbine.

Door de octagonale opstelling staan ten alle tijden maximaal twee turbines dicht achter andere turbines. Dit is weergegeven in figuur 2.11. Deze opstelling verminderd daardoor het effect dat de turbines op elkaar uitoefenen.

Bij een ster-opstelling zouden de turbines ook weinig effect hebben op elkaar om dezelfde reden. Echter is het in deze opstelling duurder om redundantie te introduceren doordat de hoeveelheid extra kabel groter is dan in een octagon-opstelling.

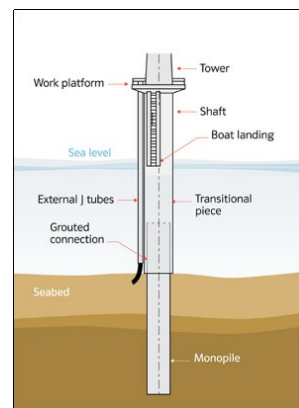
2.2.4. Bekabeling

Voor de bekabeling van de windturbines is ook gekozen voor de octagon vorm. In deze vorm worden alle turbines parallel aan elkaar geschakeld. Vervolgens wordt elke octagon met een kabel aangesloten op het Tennet station. Deze kunnen direct verbonden worden aangezien zij beiden een 66 kV systeem zijn.

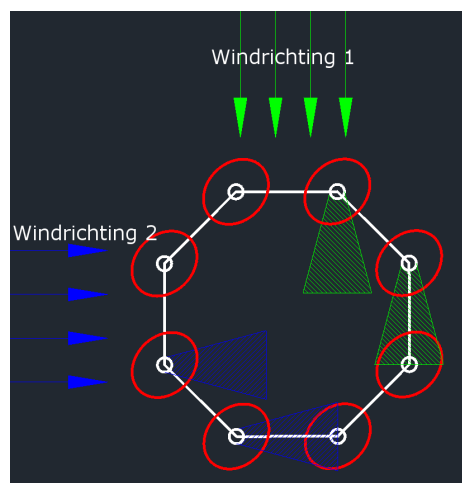
Doordat de turbines aan elkaar gekoppeld zijn, kan er in het geval van een kabelbreuk binnen de octagon nog steeds geproduceerd worden. Door deze extra maatregel heeft het park een kleinere kans op (gedeeltelijke) uitval.

In elk octagon worden acht turbines parallel geschakeld. Dit resulteert in een maximum vermogen van 64MW. Dit komt tevens overeen met de specificatie van het maximale vermogen per verbinding van het Tennet station in [15].

Uit de berekening in vergelijking 2.3 volgt dat elke windturbine 121,21A levert. Dit betekent dat elk string windturbines $8 \times 121,21 = 969,7A$ levert. Om deze reden is er voor gekozen vanaf elke string kabels naar



Figuur 2.8: Monopile fundamente [14]



Figuur 2.9: Windinvloeden met octagon-opstelling

¹Op dit onderwerp wordt verder niet diep ingegaan, omdat dit buiten het vakgebied van Molenaar & van Essen - Research and Engineering valt.

het Tennet station te leggen welke geschikt zijn voor 1000A.

Binnen een string is niet op elk punt een kabel welke voor 1000A geschikt is nodig. In het kader van kostenbesparing is hierom gekozen om elk punt waar tijdens normale operatie niet meer dan 500A stroomt, te vervangen door een kabel welke geschikt is voor 500A.

Kabel keuze

Met behulp van deze specificaties kan vervolgens een kabel worden gezocht. Hierbij is het van belang dat een goede balans wordt gevonden tussen de weerstand en reactantie van de kabel (om het verlies en het blindvermogen te verlagen) en de kostprijs van de kabel. Voor de informatie over de kabels is Prysmian als partner gekozen.

Aangezien de aansluiting door middel van een drie-fasen systeem gebeurd, zal elke individuele kabel in de 1000A aansluiting de volgende stroom kunnen geleiden:

$$I_{phase} = \frac{I_{line}}{\sqrt{3}} = \frac{1000}{\sqrt{3}} = 577,4A \quad (2.5)$$

In de 500A aansluiting bedraagt dit:

$$I_{phase} = \frac{500}{\sqrt{3}} = 288,7A \quad (2.6)$$

Vanuit de catalogus van Prysmian [10] wordt de volgende kabel gekozen voor de 1000A verbinding:

- type: EYLRvld;
- geleider: Aluminium;
- doorsnede: 630 mm^2 ;
- aardscherm: Aluminium;
- isolatie: XLPE;
- buitenlaag: PE.

Voor de 500A verbinding betreft dit een soortgelijke kabel met als enige verschil een doorsnede van 240 mm^2 .

Er is gekozen voor een aluminium geleider. Hoewel een koperen geleider minder verliezen zou geven, zou deze ook kostbaarder zijn. Om kosten te besparen is daarom voor een aluminium geleider gekozen.

In de standaard vorm van deze kabel is het aardscherm van lood gemaakt. Gezien de toename in gewicht en negatieve gevolgen van lood op het milieu, is er gekozen om met de fabrikant in overleg te gaan om de kabel uit te rusten met een aluminium aardscherm.

De verdere eigenschappen van de kabel zijn overgenomen op basis van de door de fabrikant geleverde informatie.

Redundantie kabel

Om te voorkomen dat de stroom op een andere manier vloeit dan gewenst, wordt tijdens normale operatie de redundantie-kabel tussen de eerste en laatste windturbine afgeschakeld. In het geval van een kabelbreuk wordt deze link aangeschakeld waardoor alle turbines na de kabelbreuk deze nieuwe verbinding kunnen gebruiken om alsnog energie te leveren.

Afhankelijk van de locatie van de kabelbreuk is het mogelijk dat er meer dan 500A door deze kabel zou vloeien. In dit geval worden de windturbines via de aansturing gelimiteerd om binnen de maximaal toegestane hoeveelheid stroom te blijven waar de kabel geschikt voor is.

Om de beheersbaarheid en controle over het windpark te vergroten, is er voor gekozen de windturbines elk uit te rusten met sensoren. Om er voor te zorgen dat de aansturing en deze sensoren kunnen communiceren door het gehele park, is er voor gekozen om een netwerk aan te leggen met behulp van een glasvezelkabel. Deze kabel kan verwerkt worden in de reeds benodigde kabels waardoor er geen extra kabels gelegd hoeven te worden. In samenspraak met Tennet zal verder gekeken moeten worden hoe deze verbindingen vanaf

het Tennet station doorgevoerd kan worden naar het vaste land.

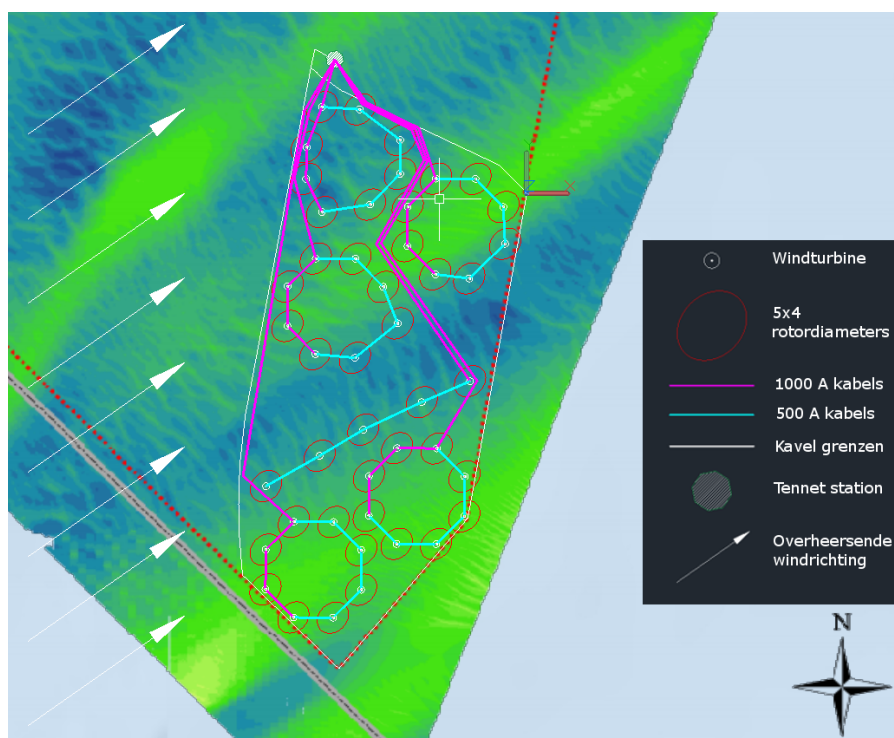
De uiteindelijke opstelling en kabeldiktes die uit deze keuzes volgt is weergegeven in figuur 2.10.

2.3. Gedetailleerde uitwerking ontwerp

Deze paragraaf beschrijft de details van het ontwerp van het windturbinepark. Hierin wordt allereerst ingegaan op het totaaloverzicht, waarna de plaatsing van de windturbines en bekabeling zal worden toegelicht.

2.3.1. Overzicht

Op basis van de beschikbare ruimte in het park, is er voor gekozen om 45 turbines te plaatsen. Zoals al eerder is genoemd bevat het windturbinepark een opstelling met zogenaamde octagons. Dit zorgt voor een sterk reducerende invloed van het wake-effect. Daarnaast is rekening gehouden met de bodem-diepte. Uit de analyse bleek dat er zandbanken in het gebied Borssele II aanwezig zijn. Om rede van dit feit is gekozen de octagons zoveel mogelijk in deze hoger gelegen gebieden te plaatsen en de overgebleven windturbines in een rij op te stellen. Dit wordt nader toegelicht in paragraaf 2.3.2. Hierdoor wordt gezorgd dat eenzelfde fundering kan worden toegepast, wat inkooptechnisch een belangrijk voordeel levert. Daarnaast is gekozen om elke octagon en de lijn windmolens te voorzien van een aansluiting op het verdeelstation van Tennet. De kabeldiktes worden in paragraaf 2.3.3 toegelicht. In figuur 2.10 is het overzicht van het ontwerp Borssele II te raadplegen.



Figuur 2.10: Overzicht ontwerp windturbinepark Borssele II

2.3.2. Plaatsing windturbines

De plaatsing van de windturbines is zo georganiseerd dat er octagonale vormen ontstaan (zie figuur 2.11). De positionering hiervan is op zodanige wijze dat dezelfde fundering voor alle exemplaren kan worden toegepast. Deze fundering betreft de monopile (zoals reeds genoemd in 2.2.2). De octagons zijn ingedeeld zodat voornamelijk de hoogste bodemlagen worden gebruikt. De losse substring is tot stand gekomen doordat het maximale te verkrijgen vermogen van 380 MW uit dit park werd overschreden indien er een zesde octagon werd geplaatst. Om rede van dit feit is er gekozen om vijf turbines in een string langs de twee onderste windturbines te plaatsen. Deze plaats is gekozen opdat de bodem hier het meest toereikend was met betrekking tot de diepte. Hierdoor kan op deze plaats tevens een monopile fundering worden toegepast.

2.3.3. Plaatsing bekabeling

Voor de plaatsing van de bekabeling zijn een aantal belangen tegen elkaar afgewogen:

- redundantie van het windturbinepark;
- onderhoudsmarge (de ruimte om inspecties en reparaties uit te kunnen voeren);
- te overbruggen afstanden (in het kader van de kostbaarheid van de gebruikte kabels/verliezen in kabels);
- de aderdoorsnede van de kabels.

De redundantie van het windturbinepark is als volgt gerealiseerd: elke octagon is voorzien van strings, waar de betreffende windturbine parallel aan is geschakeld. Vervolgens wordt deze bekabeling teruggeleid naar het verdeelstation van Ten-net. Voor de onderhoudsruimte tussen de kabels en windturbines is ten minste 100 meter gehouden. Hierdoor is bij een eventuele kabelbreuk voldoende ruimte om dit te kunnen herstellen met een schip dat onderzeese kabels aanlegt en repareert. Zie figuur 2.12.

In figuur 2.11 zijn de kabeldiktes binnen elk octagon aangegeven. Hierbij is ook de redundantie-kabel van 500A weergegeven. Wanneer in het slechtste geval de eerste 1000A kabel breekt, dan zal de stroom van 7 windturbines door de 500A kabel moeten. Dit is echter niet mogelijk waardoor in het geval van een kabelbreuk de windturbines mogelijk niet op volledig vermogen kunnen draaien.

$$\frac{500}{7 * 121,21} * 100\% = 58,9\% \quad (2.7)$$

Zoals te zien in vergelijking 2.7 zal in het ergste geval wanneer de windturbines allen op vol vermogen kunnen produceren gezien de windsnelheid, de productie terug moeten naar 58,9%. Doordat zij toch grotendeels kunnen blijven produceren, worden verliezen geminimaliseerd.



Figuur 2.11: Plaatsing windturbines in octagon-opstelling



Figuur 2.12: Offshore schip om zeekabels mee te plaatsen [16]

2.4. Conclusie

Tot besluit van dit ontwerpplan volgt er een conclusie.

De volgende ontwerp keuzes zijn gemaakt:

- De gekozen windturbine betreft de Vestas V164 - 8.0MW, aangezien deze door het relatief hoge vermogen met weinig exemplaren het benodigde vermogen 342 MW - 380 MW kan worden gerealiseerd.
- De fundering van alle windturbines betreft een monopile. Dit is relatief gezien goedkoper. De bijkomende overlast voor het milieu zijn door alternatieve werkwijzen bij het heien tot een minimum beperkt.
- De windturbines zijn geplaatst in een octagon opstelling, met uitzondering van de in een string geplaatste windturbines. Dit laatste is uitgevoerd om dezelfde fundering toe te kunnen passen in het gehele windturbinepark.
- De bekabeling is uitgevoerd in een kabel per octagon en een kabel naar de substring vanaf het Tennet verdeelstation. De aangeboden spanning bedraagt 66 kV wisselspanning.
- De bekabeling wordt geleverd door Prysmian [10] en is verschillend in aderdiameter, namelijk:
 - kabelpaar geschikt voor 500A (aderdiameter per kabel: $240mm^2$);
 - kabelpaar geschikt voor 1000A (aderdiameter per kabel: $630mm^2$).
- De octagons zijn voorzien van redundantie, waarbij de string in kwestie bij de meest ongunstige kabelbreuk nog steeds op 58,9% van zijn volle vermogen kan produceren. De substring is niet voorzien van redundantie, omdat de hoeveelheid extra benodigde kabel te groot zou zijn. De beschikbaarheid van het park wordt hierdoor aanzienlijk vergroot ten opzichte van uitvoering zonder redundantie.
- De hub-hoogte van de windturbine bedraagt 100 m.

3. Beheersplan

In dit hoofdstuk zal het beheersplan worden uitgewerkt. Dit plan omvat een volledig plan met betrekking tot onderhoud van het windpark voor de levensduur van 25 jaar. Hierbij wordt voorafgaand een analyse uitgevoerd (mee te wegen aspecten binnen het windturbinepark, risicofactoren, mean time between failure), opdat het ontwerp op de juiste draagvlakken wordt opgesteld. Tot besluit volgt een conclusie met aanbevelingen voor het onderhoud aan het windturbinepark.

3.1. Analyse beheer

De gekozen windturbine heeft in relatief opzicht een risicofactor extra: een tandwielkast. Dit houdt in dat er mogelijk meer preventief onderhoud benodigd is ten opzichte van een windturbine zonder tandwielkast. Hierdoor kan correctief onderhoud worden vermeden of op tijd worden gesignaleerd, zodat uitval van (een deel) het windturbinepark tot een minimum wordt gereduceerd.

Binnen de beheersfilosofie zijn er verschillende factoren die een rol spelen. Deze zijn deels geïnterpreteerd op basis van [17]. Dit betreffen de risico's waarmee rekening gehouden dient te worden omtrent de exploitatie en onderhoud van het windturbinepark. Deze omvatten:

- invloeden van buitenaf: hieronder vallen de weersinvloeden, zoals de invloeden van zout water (corrosiebevorderend door hogere geleidbaarheid van dit water);
- Mean Time Between Failure (MTBF);
- levensduur van de windturbines (en afzonderlijke componenten). Dit wordt onderverdeeld in fysieke en economische veroudering;
- uitvoering onderhoud;
- tandwielkast;
- toegankelijkheid;
- kabelbreuk;
- beschikbaarheid;
- personeelsveiligheid.

De actiepunten naar aanleiding van deze risico's omvatten:

- reguliere preventieve inspecties;
- preventief en correctief onderhoud;
- conditiebewaking;
- afspraken met Vestas over beschikbaarheid;
- gekwalificeerd personeel inzetten.

Deze actiepunten zullen in paragraaf 3.2 worden toegelicht. Daarnaast wordt het onderwerp afschrijving van het windturbinepark Borssele II behandeld.

3.2. Ontwerp beheersplan

Deze paragraaf beschrijft alle hiervoor genoemde aspecten en geeft een toelichting op hoe deze worden afgedekt.

3.2.1. Reguliere preventieve inspecties

Om de risico's tot falen en hieruit volgend correctief onderhoud te verlagen, zullen de windturbines regelmatig geïnspecteerd worden. Dit zullen uitwendige en inwendige inspecties zijn. Hiervoor zal gebruikt gemaakt worden van de volgende methoden:

- drone-inspecties;
- inspectie van interne onderdelen door personeel.

Door middel van uitwendige inspecties met een drone kunnen gebreken worden achterhaald welke vervolgens verholpen kunnen worden. Het voordeel van inspecties door middel van een drone is dat er geen persoon

de windturbine hoeft te betreden. Deze inspectie kan vanaf een schip worden uitgevoerd. Dit scheelt niet alleen tijd en geld, maar verlaagd ook het risico voor de werknemers doordat zij de windturbine niet hoeven te betreden.

Hoewel deze manier van inspecteren wel scheelt qua tijd, is het nog steeds noodzakelijk dat de windturbine in kwestie tijdens de inspectie uitgeschakeld wordt. Dit heeft een negatieve invloed op productie van het windpark.

Frequentie

De uitgebreide uitwendige inspecties van de windturbine zullen eens in de twee jaar worden uitgevoerd. Dit is gebaseerd op adviezen uit eerder onderzoek [18]. Door de turbines eens in de twee jaar te inspecteren wordt een goede middenweg gevonden tussen veiligheid en inspectiekosten. In het jaar dat de windturbine niet uitgebreid wordt geïnspecteerd, zal deze met een drone worden geïnspecteerd.

Inwendige inspecties zullen tevens elke twee jaar geïnspecteerd worden. Deze zullen dus met een gelijke frequentie als de uitwendige inspecties plaatsvinden. Ook dit is gebaseerd op adviezen uit [18].

Kabelinspecties

Tijdens de uitgebreide inspecties zullen ook de kabels gecontroleerd worden om hiermee eventuele defecten te detecteren.

Naast deze metingen zullen ook inspecties worden uitgevoerd middels een ROV [19] zoals weergegeven in figuur 3.1. Hierbij zal worden gecontroleerd of de kabel nog volledig ingegraven ligt.



Figuur 3.1: ROV inspectie voertuig [19]

3.2.2. Conditiebewaking

In het kader van conditiebewaking van de windturbines zullen deze worden uitgerust met sensoren. Naast de sensoren die essentieel zijn voor de aansturing van de windturbine en het monitoren van de wind gaat het hierbij om de sensoren welke genoemd zijn in tabel 2.

Tabel 2: Sensoren aanwezig in windturbine [20]

Sensor	Onderdeel waarbij van toepassing
Temperatuursensoren	Lagers, transformator- en generatorwindingen
Versnellingsmeters	Tandwielkast en slingeren van de gehele windturbine
Vloeistofkwaliteit	Olie in de tandwielkast
Vloeistofniveau	Hoeveelheid olie in de tandwielkast en in het hydraulisch systeem
Druksensoren	Hydraulische systemen

3.2.3. Preventief en correctief onderhoud

Aan de hand van de eerder genoemde inspecties en conditiebewaking, zal er onderhoud gepleegd worden. Om onvoorziene uitval van het windpark te voorkomen zal dit hoofdzakelijk preventief onderhoud zijn.

Preventief

In samenspraak met de fabrikant zullen verwachtingen voor de levensduur van de componenten worden opgesteld. Ook zullen hierbij de kenmerken van het binnenkort falen van componenten onderzocht worden. Voor de tandwielkast is de richtlijn om de 5-7 jaar [18]. Afhankelijk van de resultaten uit de preventieve inspecties zal een exacte termijn worden opgesteld waarin de componenten vervangen moeten worden.

Op basis van deze gegevens kan vervolgens een gedetailleerd onderhoudsplan worden opgesteld.

Methode

Wanneer de levensduur van de individuele componenten bekend is, kan preventief onderhoud gepland worden. Door dit het preventief vervangen van componenten is het ook mogelijk om deze te reviseren. Hierbij is het dus mogelijk om met slechts één reserve paar alle windturbine langs te gaan. Dit kan door bij de eerste windturbine de componenten te vervangen, deze vervolgens te reviseren en in de volgende windturbine te plaatsen. Deze cyclus kan herhaald worden totdat uiteindelijk één gereviseerd paar overblijft.

Toepassing

De hierboven genoemde methode kan toegepast worden op de mechanische en structurele onderdelen van de windturbine. Hierbij gaat het om:

- rotorbladen;
- tandwielkast;
- generator;
- transformator.

Planning

Binnen de planning van het onderhoud wordt zo veel mogelijk onderhoud gegroepeerd. Hierdoor hoeft er minder vaak personeel en uitrusting naar het park vervoerd te worden. Ook hoeft er minder vaak uitrusting en transportvoertuigen ingeschakeld te worden. Door deze punten worden de kosten van het onderhoud lager gehouden.

Correctief

Wanneer er ondanks het preventieve onderhoud toch iets mis gaat, is het noodzakelijk om dit probleem zo snel mogelijk te verhelpen. Wanneer correctief onderhoud uitgevoerd dient te worden aan onderdelen van de windturbine, zal dit via de fabrikant gebeuren. Voor dit soort gevallen zullen afspraken gemaakt moeten worden met de fabrikant. Dit wordt verder toegelicht in paragraaf 3.2.5.

Kabel

Om te zorgen dat een kabelbreuk snel verholpen kan worden is er voor gekozen om één kabel paraat te hebben liggen. Het gaat hierbij om de langste en dikste kabel die binnen de octagons voorkomt. Dit betreft een kabel van 1km welke geschikt is voor 1000A.

Er is hierbij gekozen om niet de langste kabel uit het park te nemen (één van de kabels die een octagon met het Tennet station verbindt). Deze kabel zou te duur zijn om klaar te hebben liggen. Wanneer één van deze kabels breekt zal deze gerepareerd worden.

Windturbine onderdelen

Er is gekozen om een aantal windturbine onderdelen paraat te hebben voor onderhoud. Dit betreft de volgende onderdelen:

- sensoren;
- sturingssysteem;
- interne bekabeling;
- benodigde middelen om oppervlakkige schade te repareren.

3.2.4. Risico's tijdens onderhoud

Tijdens het onderhoud zullen uiteraard ook risico's optreden. Hierbij gaat het om de volgende twee hoofdcategorieën:

- bedrijfsongevallen;
- materiële schade.

Bedrijfsongevallen

Om bedrijfsongevallen zo veel mogelijk te voorkomen, zullen richtlijnen voor werkomstandigheden worden opgesteld. Hierin wordt vastgelegd in welke omstandigheden er wel en niet gewerkt kan worden. Door tijdens risicovolle omstandigheden niet te werken, wordt het risico op bedrijfsongevallen verlaagd. Daarnaast zal

worden gezorgd voor trainingen voor het personeel zodat zij op een correcte manier met deze risico's om zullen gaan.

Materiële schade

Onder materiële schade valt de schade welke gedurende het onderhoud veroorzaakt kan worden. Denk hierbij aan botsingen met de turbine, schade door incorrect onderhoud en menselijk falen (demontage/hermontage fouten; fouten door gebruik verkeerd gereedschap of op foutieve manier). Opnieuw zal hieraan gewerkt worden door richtlijnen voor werkomstandigheden op te stellen en het personeel te trainen om op een correcte manier met de risico's om te gaan.

3.2.5. Afspraken met Vestas over beschikbaarheid

Bij aanschaf van de windturbines is het essentieel om afspraken te maken met de fabrikant over de beschikbaarheid van de windturbines. Hierbij kunnen afspraken gemaakt worden over de garantie die geldt voor de onderdelen en voor het hele park.

Gezien de fabrikant de meeste expertise heeft van de windturbine is het een verstandig idee om met haar afspraken te maken over het onderhoud van deze turbines. In samenspraak met Vestas kan de meest geschikte partner gezocht worden voor onderhoud. Daarnaast kan samen met een onafhankelijke partij [21] worden gekeken of dit goede richtlijnen betreffen.

3.2.6. Afschrijving windpark

Afschrijving: levensduur van de windturbines (en afzonderlijke componenten). Dit wordt onderverdeeld in fysieke en economische veroudering. Daarnaast wordt de afbraak van het park besproken

Fysieke veroudering

Met de fysieke veroudering wordt bedoeld: de slijtage van de windturbine en de interne componenten. De fabrikant [13] garandeert hier een levensduur van 25 jaar, mits onderhoud correct en tijdig wordt uitgevoerd. Dit houdt in dat de vereiste levensduur welke Rijkswaterstaat eist wordt behaald. Met het geplande onderhoud zoals is omschreven in paragraaf 3.2.3 wordt de veroudering nauwlettend gemonitord en is het risico op eerdere veroudering afgedekt.

Economische veroudering

De economische veroudering heeft betrekking op wanneer de technische ontwikkeling ervoor zorgt dat de waarde van het aangelegde windturbinepark aanzienlijk is gedaald. Hierbij zijn de exploitatiekosten gelijk aan de kosten die het afbreken van het windturbinepark teweeg brengen. Door technische ontwikkelingen is de aanleg van een nieuw windturbinepark goedkoper. Dit doordat hiermee een hoger financieel rendement zal worden behaald [22].

Afbraak windturbinepark

Nadat de levensduur van het park, welke naar verwachting 25 jaar zal bedragen, is verstreken, zal het windturbinepark worden afgebroken. Hiervoor zullen vooraf financiële middelen worden gereserveerd. In het kader van de inflatie wordt dit bij nadering van de afbraak datum bepaald. Daarnaast kan na de levensduur van het park worden gekeken of de windturbines geschikt zijn voor verkoop op de tweedehands markt. Dit is geheel afhankelijk van de staat van de turbines. Hiervoor zal een expert worden geraadpleegd om deze mogelijkheden te beoordelen.

3.3. Conclusie

Om te zorgen dat het windturbinepark 25 jaar operationeel blijft, is met meerdere risico's en aspecten rekening gehouden. Vanuit deze punten zijn de volgende richtlijnen vastgesteld:

- Jaarlijkse uitwendige inspecties door middel van personeel en drones.
- Twee-jaarlijkse uitgebreide inwendige inspecties.
- Twee-jaarlijkse kabelinspecties om te controleren of deze nog ingegraven zijn.

Verder zal de conditie van de windturbines constant worden gemonitord door middel van sensoren welke in staat zijn vroegtijdig te alarmeren wanneer er (aankomende) mankementen zijn.

Om eventuele uitval te voorkomen zullen componenten vroegtijdig vervangen en, wanneer mogelijk, gereviseerd worden. De regelmaat hiervan zal worden vastgesteld in samenspraak met de fabrikant.

Wanneer er onderhoud uitgevoerd moet worden, zal dit zo veel mogelijk worden gegroepeerd. Dit om de kosten van het onderhoud te verlagen. Om dit benodigde onderhoud zo snel mogelijk uit te kunnen voeren zullen er meerdere componenten aan land paraat zijn.

De risico's die bij dit onderhoud voorkomen zullen van tevoren geïnvetariseerd worden. Daarnaast zal het personeel getraind worden om met deze risico's om te gaan.

Samen met de fabrikant zal worden gekeken naar aansprakelijkheid bij het falen van componenten en het onderhoud wat hieruit voortvloeit.

Het park zal onderhevig zijn aan fysieke en economische veroudering. Door uitvoering van dit beheersplan kan een levensduur van 25 jaar worden behaald, waarna het park wordt afgebroken. De windturbines zullen al dan niet worden verkocht afhankelijk van de staat.

4. Eindconclusie / Aanbevelingen

Tot besluit volgt er een eindconclusie over het gehele ontwerp- en beheersplan. Deze bestaat uit de aanbevelingen afkomstig uit dit plan.

Op basis van de analyse in het ontwerpplan zijn de volgende keuzes gemaakt:

- De gekozen windturbine betreft de Vestas V164 - 8.0 MW.
- De toegepaste fundering betreft voor alle windturbines een monopile.
- De windturbine strings zijn geplaatst in een octagon opstelling.
- De kabels worden in een octagon aangelegd, met een onderverdeling van 500A ($240mm^2$) en 1000A ($630mm^2$) kabels.
- Redundantie van het windturbinepark is zo uitgerust dat in het ergste geval de betreffende octagon, waarmee ook het gehele windturbinepark, op 58,9% van zijn totale vermogen kan functioneren.
- De hubhoogte van de windturbine bedraagt 100m.

Het beheersplan dekt de risico's welke voortkomen uit dit ontwerp en verzorgt een garantie dat het park een levensduur van 25 jaar heeft. De gemaakte keuzes omvatten:

- Jaarlijkse uitwendige inspecties door middel van personeel en drones.
- Twee-jaarlijkse uitgebreide inwendige inspecties.
- Twee-jaarlijkse kabelinspecties om te controleren of deze nog ingegraven zijn.
- De conditie wordt continu gemonitord door middel van sensoren.
- De (preventieve) vervangingstermijn van componenten zal in samenspraak met de fabrikant worden vastgesteld.
- Onderhoud zal gegroepeerd worden uitgevoerd om kosten te besparen. Hiervoor zullen meerdere componenten aan land paraat zijn.
- De risico's zullen worden geïnventariseerd bij oplevering van het windpark. Het personeel zal worden getraind om om te gaan met deze risico's.
- In samenspraak met de fabrikant zal worden gekeken naar aansprakelijkheid bij het falen van componenten en het hieruit voorkomende onderhoud.
- Het park zal onderhevig zijn aan fysieke en economische veroudering. Door uitvoering van dit beheersplan kan een levensduur van 25 jaar worden behaald, waarna het park wordt afgebroken. De windturbines zullen al dan niet worden verkocht afhankelijk van de staat.

Door middel van dit plan kan een functionerend windpark worden opgesteld wat vervolgens aan de hand van het beheersplan op een rendabele manier geëxploiteerd kan worden.

Referenties

- [1] Sociaal-Economische Raad. (2013). Energieakkoord SER, adres: <http://www.energieakkoordser.nl/> (bezocht op 24-11-2016).
- [2] Wind Energy The Facts. (2017). Wake effect, adres: <https://www.wind-energy-the-facts.org/wake-effect.html> (bezocht op 06-01-2017).
- [3] Weibull. (2017). Mttf, mtbf, mean time between replacements and mtbf with scheduled replacements, adres: <http://www.weibull.com/hotwire/issue94/relbasics94.htm> (bezocht op 05-01-2017).
- [4] Anthony Crockford, Erik Hotslag. (2015). Borssele wind resource assessment additional tables as supplement to main report, adres: <http://offshorewind.rvo.nl/file/download/41337812> (bezocht op 30-11-2016).
- [5] Ecofys. (2015). Site studies wind farm zone borssele wind resource assessment, adres: <http://offshorewind.rvo.nl/file/download/34403532> (bezocht op 28-12-2016).
- [6] G. Hoogendorp, *Technische Apecten*. Delft, Zuid-Holland: De Haagse Hogeschool, 2016.
- [7] J.K. Haasnoot, E. Diepstraten, C. Kleiboer. (2014). Site studies wind farm zone borssele geological desk study, adres: <http://www.energieakkoordser.nl/> (bezocht op 05-01-2017).
- [8] Ministerie van Economische Zaken, Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2015). Ontwerpkavelbesluit II windenergiegebied borssele, adres: https://www.rvo.nl/sites/default/files/2015/08/DOMUS-%5C%2315108163-v1-Eindversie_Ontwerpkavelbesluit_II_windenergiegebied_Borssele__opgemaakte_pdf.pdf (bezocht op 22-11-2016).
- [9] Netherlands Enterprise Agency. (2016). Borssele wind farm zone wind farm sites i and ii, adres: <http://offshorewind.rvo.nl/file/download/43061512> (bezocht op 05-01-2017).
- [10] Prysmian. (2016). High voltage cables, adres: http://nl.prysmiangroup.com/nl/business_markets/markets/hv-and-submarine/downloads/datasheets/Prysmian-Delft-HVac.pdf (bezocht op 05-01-2017).
- [11] Supergen Wind. (2010). Sustainable power generation and supply - phase 1, adres: <https://community.dur.ac.uk/supergen.wind/Phase1/achievements.html> (bezocht op 05-01-2017).
- [12] Power Engineering International. (2016). Mhi vestas in wind turbine contract win for uks walney, adres: <http://www.powerengineeringint.com/articles/2015/02/mhi-vestas-in-wind-turbine-contract-win-for-uk-s-walney.html>.
- [13] Vestas. (2011). Vestas v164 8.0 mw, adres: http://www.homepages.ucl.ac.uk/~uceseug/Fluids2/Wind_Turbines/Turbines/V164-8MW.pdf (bezocht op 15-12-2016).
- [14] Power Engineering International. (2016). Monopiles support structures - 4c offshore, adres: <http://www.4coffshore.com/windfarms/monopiles-support-structures-aid4.html>.
- [15] Netherlands Enterprise Agency. (2016). Borssele wind farm zone wind farm sites i and ii project and site description, adres: <http://offshorewind.rvo.nl/file/download/43061512>.
- [16] T. ten Brinck. (2015). Zuinige kabellegger voor offshore windparken, adres: <http://www.duurzaambedrijfsleven.nl/logistiek/8979/zuinige-kabellegger-voor-offshore-windparken> (bezocht op 08-01-2017).
- [17] Jannie Jessen Nielsen, John Dalsgaard Srensen. (2011). On risk-based operation and maintenance of offshore wind turbine components, adres: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832010001705>.
- [18] C. Hilario; DEWI France. (2011). Wind turbine inspection, a strategic service?, adres: http://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Magazin_39/08.pdf (bezocht op 11-01-2017).

- [19] Oceaneering. (2016). Millennium plus rov - oceaneering international, inc., adres: <http://www.oceaneering.com/rovs/rov-systems/millennium-plus-rov/>.
- [20] TE connectivity. (2017). Wind turbine sensors, adres: <http://www.te.com/usa-en/industries/sensor-solutions/applications/wind-turbine-sensors.html?tab=pgp-story> (bezocht op 08-01-2017).
- [21] DEWI. (2016). Dewi: Dewi, adres: http://www.dewi.de/dewi_res/index.php.
- [22] In Ho Lee, Jonghwa Lee. (1998). A theory of economic obsolescence, adres: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1467-6451.00077/full>.

Bijlagen

Bijlage A: Onderzoek geschiktheid windturbines

Windturbine overzicht										
Type	Vermogen[MW]	Rotordiameter[m]	Minimum aantal turbines	Maximum aantal turbines	Tandwielkast	Prestatiefactor - Cp[%]	Cut-in windspeed [m/s]	Rated windspeed[m/s]	Cut-out windspeed[m/s]	Beschikbaarheid
Britannia	10	150	35	38		-	-	-	-	Cancelled
ST10	10	164	35	38		-	-	-	-	Prototype
SeaTitan 10MW	10	190	35	38	Nee	-	-	-	-	Prototype
Siemens SWT-8.0-154	8	154	43	47	Nee	-	-	-	-	Prototype
Vestas V164 8.0MW	8	164	43	47	Ja	20.53	4	11	25	Beschikbaar
AD 8-180	8	180	43	47		-	3	12	30	Beschikbaar
Siemens SWT-7.0-154	7	154	49	54	Nee	-	3	13	25	Beschikbaar
S7.0-171	7	171.2	49	54		-	-	-	-	Prototype
Bard 6.5	6.5	122	53	58		-	-	-	-	Discontinued
6.2M126	6.15	126	56	61	Ja	14.10	3.5	14	30	Beschikbaar
6.2M152	6.15	152	56	61		16.56	3.5	11.5	30	Beschikbaar
SWT-6.0-120	6	120	57	63		-	-	-	-	Discontinued
UP6000-136	6	136	57	63		-	3.5	12	25	Beschikbaar
SCD 6.0MW	6	140	57	63		-	3	-	22	Beschikbaar
Haliade 150-6MW	6	150	57	63		-	3	-	25	Beschikbaar
Siemens SWT-6.0-154	6	154	57	63		-	4	13	25	Beschikbaar
SL6000/155	6	155	57	63	Ja	13.71	3.5	12	25	Beschikbaar
SeaTitan 5.5MW	5.5	140	63	69	Nee	-	-	-	-	Prototype
HQ5500/140	5.5	140	63	69		-	3.5	13	25	Beschikbaar
HTW5.2-127	5.2	127	66	73		-	-	-	-	Beschikbaar
Senvion 5M	5.075	126	68	74		-	-	-	-	Discontinued
AD 5-116(Voorheen: M5000-116)	5	116	69	76	Ja	11.39	3.5	12	25	Beschikbaar
M5000-116	5	116	69	76	Ja	-	3.5	12	25	Discontinued
HTW5.0-126	5	126	69	76		-	-	-	-	Beschikbaar
SL5000/126	5	126	69	76		12.61	3.5	12	25	Beschikbaar
HZ 127-5MW	5	127	69	76		-	-	-	-	Beschikbaar
AD 5-132	5	132	69	76		-	2.5	13.5	27	Beschikbaar
AD 5-135	5	135	69	76		-	3.5	11.4	30	Beschikbaar
H 151-5MW	5	151	69	76		-	-	-	-	Beschikbaar
E112/4500	4.5	114	76	84		-	-	-	-	Discontinued
GE 4.1-113	4.1	113	84	92		-	-	-	-	Beschikbaar
SWT-4.0-120	4	120	86	95		-	-	-	-	Beschikbaar
Siemens SWT-4.0-130	4	130	86	95	Ja	-	-	-	-	Beschikbaar
EN-4.0-136	4	136	86	95		-	-	-	-	Beschikbaar



Windturbine: AD 5-116

Windsnelheid[m/s]	Vermogen[kW]	Tijd per jaar[h]	Opgewekte energie[kWh]
0	0	0.00	0
1	0	103.99	0
2	0	231.11	0
3	0	359.99	0
4	85.6	479.70	41062.51503
5	276.2	581.74	160677.6936
6	513.3	659.79	338668.6945
7	879.8	709.90	624569.612
8	1,319.70	730.71	964313.1011
9	1,867.90	723.31	1351076.017
10	2,643.40	690.97	1826514.802
11	3,552.20	638.54	2268214.905
12	4,702.40	571.80	2688824.071
13	5,000.00	496.78	2483883.574
14	5000	419.11	2095573.697
15	5000	343.60	1717977.766
16	5000	273.85	1369274.938
17	5000	212.28	1061409.16
18	5000	160.08	800410.6887
19	5000	117.46	587310.2792
20	5000	83.88	419381.1465
21	5000	58.29	291460.1142
22	5000	39.43	197153.7924
23	5000	25.96	129807.9774
24	5000	16.64	83190.2412
25	5000	10.38	51893.69494
26	0	6.30	0
27	0	3.72	0
28	0	2.14	0
29	0	1.20	0
30	0	0.65	0
Totale energie:			21552648.48
Prestatiefactor(Cp)			11.39



Windturbine: Senvion 6.2M 126

Windsnelheid[m/s]	Vermogen[kW]	Tijd per jaar[h]	Opgewekte energie[kWh]
0	0	0.00	0.00
1	0	103.99	0.00
2	0	231.11	0.00
3	0	359.99	0.00
4	109	479.70	52287.55
5	313	581.74	182085.87
6	625	659.79	412366.91
7	1085	709.90	770241.00
8	1700	730.71	1242200.71
9	2450	723.31	1772116.41
10	3360	690.97	2321665.18
11	4405	638.54	2812760.16
12	5390	571.80	3081992.55
13	6100	496.78	3030337.96
14	6200	419.11	2598511.38
15	6200	343.60	2130292.43
16	6200	273.85	1697900.92
17	6200	212.28	1316147.36
18	6200	160.08	992509.25
19	6200	117.46	728264.75
20	6200	83.88	520032.62
21	6200	58.29	361410.54
22	6200	39.43	244470.70
23	6200	25.96	160961.89
24	6200	16.64	103155.90
25	6200	10.38	64348.18
26	6200	6.30	39069.66
27	6200	3.72	23088.13
28	6200	2.14	13278.95
29	6200	1.20	7432.61
30	6200	0.65	4048.51
Totale energie:			26682978.08
Prestatiefactor(Cp)			14.10



Windturbine: Vestas V164

Windsnelheid[m/s]	Vermogen[kW]	Tijd per jaar[h]	Opgewekte energie[kWh]
0	0	0.00	0.00
1	0	103.99	0.00
2	0	231.11	0.00
3	0	359.99	0.00
4	113	479.70	54206.36
5	584	581.74	339738.50
6	1158	659.79	764033.41
7	1904	709.90	1351648.72
8	2958	730.71	2161429.23
9	4200	723.31	3037913.84
10	5686	690.97	3928865.54
11	7217	638.54	4608329.20
12	7915	571.80	4525783.12
13	7999	496.78	3973716.94
14	8000	419.11	3352917.92
15	8000	343.60	2748764.43
16	8000	273.85	2190839.90
17	8000	212.28	1698254.66
18	8000	160.08	1280657.10
19	8000	117.46	939696.45
20	8000	83.88	671009.83
21	8000	58.29	466336.18
22	8000	39.43	315446.07
23	8000	25.96	207692.76
24	8000	16.64	133104.39
25	8000	10.38	83029.91
26	0	6.30	0.00
27	0	3.72	0.00
28	0	2.14	0.00
29	0	1.20	0.00
30	0	0.65	0.00
Totale energie:			38833414.44
Prestatiefactor(Cp)			20.53



Senvion 6.2M 152

Windsnelheid[m/s]	Vermogen[kW]	Tijd per jaar[h]	Opgewekte energie[kWh]
0	0	0.00	0.00
1	0	103.99	0.00
2	0	231.11	0.00
3	0	359.99	0.00
4	128	479.70	61401.89
5	450	581.74	261784.80
6	931	659.79	614261.75
7	1620	709.90	1150037.25
8	2548	730.71	1861839.65
9	3645	723.31	2636475.23
10	4957	690.97	3425147.11
11	5990	638.54	3824842.99
12	6150	571.80	3516559.21
13	6150	496.78	3055176.80
14	6150	419.11	2577555.65
15	6150	343.60	2113112.65
16	6150	273.85	1684208.17
17	6150	212.28	1305533.27
18	6150	160.08	984505.15
19	6150	117.46	722391.64
20	6150	83.88	515838.81
21	6150	58.29	358495.94
22	6150	39.43	242499.16
23	6150	25.96	159663.81
24	6150	16.64	102324.00
25	6150	10.38	63829.24
26	6150	6.30	38754.58
27	6150	3.72	22901.93
28	6150	2.14	13171.86
29	6150	1.20	7372.67
30	6150	0.65	4015.86
Totale energie:			31323701.08
Prestatiefactor(Cp)			16.56



Windtubrine: Sinovel SL6000

Windsnelheid[m/s]	Vermogen[kW]	Tijd per jaar[h]	Opgewekte energie[kWh]
0	0	0.00	0.00
1	0	103.99	0.00
2	0	231.11	0.00
3	0	359.99	0.00
4	88.736	479.70	42566.86
5	311.095	581.74	180977.65
6	637.535	659.79	420637.34
7	1,088.80	709.90	772937.91
8	1,685.24	730.71	1231416.94
9	2,397.50	723.31	1734145.38
10	3,289.38	690.97	2272868.75
11	4,271.93	638.54	2727786.71
12	5,195.61	571.80	2970838.97
13	5,902.96	496.78	2932455.06
14	6,000.00	419.11	2514688.44
15	6,000.00	343.60	2061573.32
16	6,000.00	273.85	1643129.93
17	6,000.00	212.28	1273690.99
18	6,000.00	160.08	960492.83
19	6,000.00	117.46	704772.34
20	6,000.00	83.88	503257.38
21	6,000.00	58.29	349752.14
22	6,000.00	39.43	236584.55
23	6,000.00	25.96	155769.57
24	6,000.00	16.64	99828.29
25	6,000.00	10.38	62272.43
26	6,000.00	6.30	37809.35
27	6,000.00	3.72	22343.35
28	6,000.00	2.14	12850.59
29	6,000.00	1.20	7192.85
30	6,000.00	0.65	3917.91
Totale energie:			25936557.82
Prestatiefactor(Cp)			13.71



Windturbine: Sinovel SL5000

Windsnelheid[m/s]	Vermogen[kW]	Tijd per jaar[h]	Opgewekte energie[kWh]
0	0	0.00	0.00
1	0	103.99	0.00
2	0	231.11	0.00
3	0	359.99	0.00
4	123.9	479.70	59435.11
5	329.3	581.74	191568.30
6	658.5	659.79	434469.77
7	1,109.30	709.90	787491.56
8	1,723.70	730.71	1259518.45
9	2,506.30	723.31	1812838.92
10	3,400.90	690.97	2349925.92
11	4,400.70	638.54	2810014.45
12	4,994.20	571.80	2855674.80
13	5,000.00	496.78	2483883.57
14	5,000.00	419.11	2095573.70
15	5,000.00	343.60	1717977.77
16	5,000.00	273.85	1369274.94
17	5,000.00	212.28	1061409.16
18	5,000.00	160.08	800410.69
19	5,000.00	117.46	587310.28
20	5,000.00	83.88	419381.15
21	5,000.00	58.29	291460.11
22	5,000.00	39.43	197153.79
23	5,000.00	25.96	129807.98
24	5,000.00	16.64	83190.24
25	5,000.00	10.38	51893.69
26	0.00	6.30	0.00
27	0.00	3.72	0.00
28	0.00	2.14	0.00
29	0.00	1.20	0.00
30	0.00	0.65	0.00
Totale energie:			23849664.35
Prestatiefactor(Cp)			12.61

Bijlage B: Totale energie in de wind Borselle II

Windsnelheid[m/s]	Weibull	Aantal uren windsnelheid	Vermogen [kW]	Energie [kWh]
0	0	0	0,00	0,00
1	1,187104149	103,9903234	13,66	1420,17
2	2,638192983	231,1057053	109,25	25249,15
3	4,109501378	359,9923207	368,73	132740,40
4	5,476053406	479,7022783	874,03	419273,93
5	6,640913275	581,7440029	1707,09	993088,69
6	7,531815678	659,7870534	2949,85	1946272,50
7	8,103875985	709,8995363	4684,25	3325348,14
8	8,341396093	730,7062977	6992,24	5109270,76
9	8,256995664	723,3128201	9955,74	7201115,85
10	7,887805701	690,9717794	13656,71	9436401,63
11	7,289247286	638,5380623	18177,08	11606758,60
12	6,527377236	571,7982459	23598,80	13493750,12
13	5,670967064	496,7767148	30003,79	14905185,82
14	4,784414834	419,1147394	37474,01	15705911,58
15	3,922323667	343,5955532	46091,40	15836799,50
16	3,126198488	273,8549876	55937,89	15318869,26
17	2,423308585	212,281832	67095,42	14243138,51
18	1,827421664	160,0821377	79645,94	12749891,74
19	1,340891048	117,4620558	93671,38	11002832,64
20	0,957491202	83,8762293	109253,68	9163787,13
21	0,665434051	58,29202285	126474,80	7372471,75
22	0,450122814	39,43075848	145416,65	5733888,99
23	0,296365245	25,96159549	166161,20	4313809,81
24	0,189932058	16,63804824	188790,37	3141103,24
25	0,118478756	10,37873899	213386,10	2214678,67
26	0,071935592	6,301557882	240030,35	1512565,12
27	0,042510174	3,723891205	268805,03	1001000,71
28	0,024449381	2,141765814	299792,11	642084,50
29	0,013685021	1,198807865	333073,52	399291,15
30	0,007454172	0,65298548	368731,19	240776,11
Totaal:			2952922,25	189188776,15