

Cofferdam-constructie bleek beste oplossing

Landfundatie voor windmolens in IJsselmeer

Ing. P. Schraven / ir. T. Lankreijer / Ing. C. Meijer IWE

Voor het ontwerp van de 24 fundaties van windturbines in het water bij Lelystad is bewust afgeweken van een traditionele monopile. Na uitgebreid onderzoek is gekozen voor een Cofferdam-constructie. De stijfheidseisen van de turbineleverancier alsmede de aanvaringsbelasting zijn onder meer ontwerpbepalend geweest.

Langs de dijk bij Lelystad – Swifterbant is het uitzicht de afgelopen jaren opmerkelijk veranderd: het iconische windmolenpark Irene Vorrink is vervangen door 24 imposante windturbines op het IJsselmeer. Deze nearshore fundaties zijn onderdeel van het grotere Windplanblauw dat de vervanging van 74 oude windturbines omvat, 37 op het land en 24 op het water. Operationeel zal het gehele windpark een vermogen van ca. 340 MW hebben, genoeg opbrengst voor het elektriciteitsverbruik van 450.000 huishoudens (ongeveer 1 miljoen Nederlanders).

Dolphin of Cofferdam

Gezien de grootte van de turbine en het relatief ondiepe IJsselmeer, bleek het plaatsen van een landturbine in het IJsselmeer de beste oplossing. Hierbij waren twee kansrijke funderingsoplossingen: een Dolphin- en een Cofferdam-constructie. De Dolphin-oplossing heeft een stelsel van schoorstaande stalen buispalen waarop een betonnen sokkel is geplaatst. Op deze betonnen sokkel kan vervolgens de turbine worden afgespannen met voorspanankers, zoals ook bij landturbines gebruikelijk is. De Cofferdam is een ronde combiwand-constructie van buispalen met één dubbele Z-plank daartussen geplaatst. Hij is gevuld met zand voor extra stijfheid en sterkte om de verschillende belastingsscenario's beter te kunnen opnemen. Boven op de buispalen wordt de betonnen sokkel geplaatst waarop de turbine afgespannen kan worden.

Basis of design

Voor het kunnen toepassen van een landfundering op water is een fundamenteel

andere ontwerpsystematiek nodig; hierin moesten diverse zaken worden samengebracht die normaliter enkel op land of enkel op zee gelden. Denk hierbij aan: omgang met ijsbelasting, aanvaarbelasting, scour, hydraulische condities en het vertalen van typische landturbine gerelateerde eisen zoals 'no-gapping' en 'dynamic stiffness' naar nearshore condities. Om die verschillende effecten te vertalen naar randvoorwaarden voor het ontwerp is een Basis of Design (BoD) opgesteld waarin de verschillende aspecten zijn vertaald naar praktische ontwerpvoorwaarden. Enkele bepalende voorwaarden binnen deze BoD betroffen de praktische omgang met de ijs en -aanvaarbelasting.

Voor de ijsbelastingen zijn recente metingen en extrapolatie van de ijsdiktes uit het IJsselmeer gehanteerd door Deltares. Daarnaast is met TU Delft een eenvoudig rekenmodel opgesteld waarbij de maximale ijsbelasting door kruierend-ijs op verschillende constructieonderdelen, zoals een doorgaande wand en een slanke buispaal, kan worden vastgesteld. Hoewel een belastingscenario van kruierend-ijs een zeer

zeldzaam scenario is, zou deze calamiteit het gehele windpark kunnen treffen. Daarom is gekozen voor speciale belastinggevallen, te weten ULS & SLS ijs (uiterste grenstoestand & limiettoestand voor gebruik) waarbij het turbinepark na afloop nog volledig operationeel moet zijn.

Maritiem onderzoek

Omdat de nieuwe turbines aan weerszijden van de vaargeul zijn gepositioneerd, is ook een maritiem onderzoek uitgevoerd door Marin naar de trefkansen van de verschillende turbines door scheepvaart. Alhoewel de trefkansen op zichzelf per turbine locatie relatief klein zijn, was de cumulatieve kans (voor alle turbines opgeteld) op een willekeurige aanvaring met een CEMT-klasse Va binnenvaartschip (een groot Rijnschip) dusdanig dat hier rekening mee is gehouden in de BoD (Basis of Design).

In afstemming met de exploitateur van het windpark is in het geval van een frontale aanvaring gekozen voor een AL- benadering (accidental limit state) waarbij de constructie afgeschreven mag worden en naderhand de turbine veilig moet kunnen worden gedemonteerd.

Er is binnen de BoD gekozen voor een pushover analyse van de fundering. Hierbij is een energiebalans opgesteld waarbij de kinetische energie van het schip bij een botsing omgezet wordt in verkreukeling van de scheepshuid en plastische vervormingen van de funderingsconstructie. Hierbij is de verkreukeling van de scheepshuid met zowel de ROK (Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken) als de DNV-norm (Det Norske Veritas) berekend.



▲ Het betonstorten van de fundaties.

Proof of concept & Ontwerp

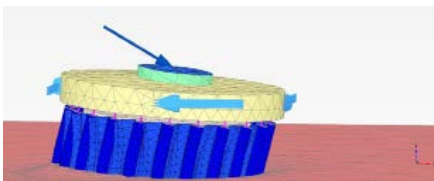
Na afronding van de BoD en voorafgaand aan de aanbesteding en totstandkoming van de overeenkomst op basis van UAV-gc zijn de twee kansrijke funderingsvarianten (Dolphin en Cofferdam) onderzocht en tot op VO-niveau uitgewerkt voor de mogelijke turbineopties om de haalbaarheid van de uitgangspunten te kunnen aantonen. De hoofdmaatvoering, zoals de diameter van het beton, de afmetingen en indicatieve lengtes/afmetingen van de buispalen zijn hier bepaald. Deze zijn in de navolgende DO van de aannemer ook niet meer significant veranderd.

Voor het ontwerp is gebruik gemaakt van geavanceerde PLAXIS 3D-analyses om de spanningen in de buispalen te berekenen. De damwanden en buispalen zijn hierbij als sshelllementen gemodelleerd waarbij de Z-profielen in de werkelijke vorm en met handmatig ingestelde connecties met vooraf gedefinieerde vrijheidsgraden aan de buispalen zijn vastgezet om de stijfheid van het systeem correct te modelleren.

Innovatieve bouwprincipes

De analyses toonden aan dat het ontwerp van beide principes haalbaar is. Vervolgens is er een trade-off gedaan waaruit bleek dat de Cofferdam de beste oplossing is; hiermee is het DO verder uitgewerkt.

Het DO, inclusief het wapeningsontwerp, is vervolgens door Ballast Nedam uitgewerkt, waarbij Windbase fungeerde als adviseur van Windplan Blauw in de toetsende rol in het SCB-contract (systeemgerichte contractbeheersing). Door de aannemer zijn vervolgens de innovatieve bouwprincipes zoals het heiframe en de prefab verloren bekisting en wapeningselementen verder uitgewerkt. Daarnaast zijn optimalisaties doorgevoerd in de in rekening te brengen aanvaarbelaasting. Een interessant doch zeer relevant detail was het doorvoeren van de kabels naar de turbine. Hiertoe heeft de aannemer gekozen voor J-tubes die aan de damwanden bevestigd zijn.



▲ Deformed mesh van het turbine fundament na een aanvaarbelaasting.



▲ Boven op de buispalen wordt de betonnen sokkel geplaatst waarop de turbine afgespannen kan worden. Afgebeeld is de gerealiseerde Cofferdam-constructie.

Uitvoering

De bouw van de fundamente is door het toepassen van pre-gefabriceerde elementen vereenvoudigd. Hierdoor kon de bouwfasering in meerdere werkstromen plaatsvinden. De bouw startte met het plaatsen van vier hulppalen met hierop een H-frame. Vanaf dit H-Frame zijn middels een heiframe de 22 palen in een cirkelvorm nauwkeurig op diepte geheid. Na het plaatsen van de buispalen, damwanden en ringgording zijn de J-tubes aangebracht. De fundamente zijn vervolgens gevuld met matig verdicht zand. Hierna zijn de geprefabriceerde L-wanden geplaatst welke een grote bekisting vormen waarbinnen de betonnen sokkel gemaakt kan worden. De buitenkant van de L-wanden zijn esthetisch en voorzien van een geel-zwarte coating, die als signalerende waarde functioneert voor de scheepvaart in de toekomstige vaarweg.

Na het plaatsen van de bekisting is de kernwapening met ankerkooi geplaatst waarna hierin zeven grote wapeningskorven zijn gehesen. Het sluitstuk is handmatig gevlochten. Middels een drijvende betoncentrale zijn de fundaties van circa 900 m³ per stuk beton gestort. Na uitharding van het beton is de tower base ring geplaatst. Dit is het beginstuk van de toren en vormde het raakvlak tussen het fundatiewerk en de bouw van de windturbine. Na het aanbrengen en uitharden van de grout-verbinding zijn de 152 ankers, die de tower base ring op de fundering houden, van voorspanning voorzien en zijn de

hekken, trappen en davitkraan geplaatst. Nadat de fundatie-aannemer het fundament heeft opgeleverd zijn de verschillende turbinecomponenten ingehesen. Hiertoe is een 1350 tonskraan op speciale barge (klein schip) op spudpalen (die door het schip lopen tot op de waterbodem) ontworpen door Mammoet. Voor de stabiliteit van de barge is door derden een dynamische interactieberekening uitgevoerd op basis van een aantal standaard grondprofielen en de golfhoogtes in het IJsselmeer. Bij elke turbinelocatie zijn vervolgens op basis van de posities van de kabels en leiding en de ondergrond tenminste 3 spud-posities gedefinieerd waarvandaan gehesen kon worden.

Afsluiting

Op 20 maart jl. was de installatie van de laatste windturbine gereed. We kunnen terugkijken op een leerzame periode, waarbij middels complexe berekeningen Plaxis 3D en DIANA aangetoond kon worden dat een landturbine op een fundament in het IJsselmeer voldoet aan de gestelde eisen, gecertificeerd en geplaatst kon worden. ■

Over de auteurs

Paul Schraven is ontwerpleider; Thomas Lankreijer is geotechnisch adviseur; Casper Meijer is senior kwaliteitsinspecteur (allen bij ABT en dochterbedrijf Windbase).