

Heivermoeiing van paalfunderingen bij offshore windpark Egmond aan Zee

Samenvatting

Voor de kust van Egmond is een windmolenpark gebouwd van 36 turbines. De fundering van ieder van deze turbines bestaat uit een stalen paal die 30 meter de zeebodem is ingeheid. De belasting op deze palen is voornamelijk de dynamische belasting ten gevolge van wind, golven en stroom. Deze belasting is sterk variabel en daarom speelt een vermoeiingsanalyse een belangrijke rol in het ontwerp. Vermoeiing ten gevolge van het heiproces blijkt daarbij een niet onaanzienlijke rol te spelen. Deze vermoeiing is berekend aan de hand van een dynamische analyse gebaseerd op de drukgolfvoortplanting in de paal. De schade ten gevolge van het heien blijkt 13% van de totale vermoeiingsschade te bedragen.

In combinatie met Vestas heeft Ballast Nedam het eerste offshore windmolenpark van Nederland gebouwd. Elke turbine is gefundeerd op een open stalen buispaal met een diameter van 4,6 m welke ongeveer 30 m in de grond is geheid. De maatgevende belastingen zijn voornamelijk horizontale belastingen, veroorzaakt door wind, golven en stroming. Deze belastingen zijn zeer variabel, daarom maakte een vermoeiingsanalyse, inclusief heivermoeiing, een belangrijk onderdeel uit van het ontwerp. Ballast Nedam Infra Consult + Engineering, het ingenieurs-

bureau van Ballast Nedam, heeft het ontwerp voor de paalfunderingen uitgevoerd. Onderdeel van dit ontwerp is een analyse van de heivermoeiing gebaseerd op de 'stress wave' theorie. In dit artikel wordt beschreven hoe deze heivermoeiing in het ontwerp is bepaald. Tijdens installatie zijn de optredende spanningen in de paal gemeten, op basis hiervan is door middel van een back-analyse de werkelijke heivermoeiing bepaald. Deze wordt ook in dit artikel beschreven.

Offshore funderingen

Het offshore windmolenpark bestaat uit 36 turbines, 10 tot 18 km uit de kust bij Egmond aan Zee. Eerst is een filterlaag aangebracht om te voorkomen dat het zand op de bodem erodeert rond de palen als gevolg van stroming. Daarna zijn de palen geheid. Op deze palen zijn de overgangsstukken gemonteerd met behulp van een groutverbinding. Op deze overgangsstukken zijn de turbines geplaatst. De turbines en masten zijn op land geassembleerd en klaargemaakt voor transport en installatie offshore.



Figuur 1 Windturbine.



Vervolgens zijn de kabels gelegd en is een tweede erosiebestendige laag rond de palen aangebracht. Een voorbeeld van de offshore wind turbine is te zien in *figuur 1*.

Er is op locatie onderzoek gedaan naar wind-, golf- en stromingsomstandigheden en de waterdiepte ter plaatse van de windmolens is gemeten. Tevens is een uitgebreid grondonderzoek uitgevoerd bestaande uit een geofysisch onderzoek, boringen en een sondering op de plaats van iedere windmolen. Daarnaast is laboratoriumonderzoek uitgevoerd.

De waterdiepte ter plaatse van de windmolens varieert van 16 tot 22 m. De diameter van de palen is 4,6 m en de wanddikte varieert van 45 tot 60 mm. De gehele funderingspaal heeft een gewicht van maximaal 270 ton. De palen worden ongeveer 30 m de grond in gehaald met een hydraulische IHC S1200 hamer. De grond bestaat voornamelijk uit matig vast tot vastgepakt zand. Plaatselijk bestaat de toplaag uit losgepakt zand met silt- en kleilagen.

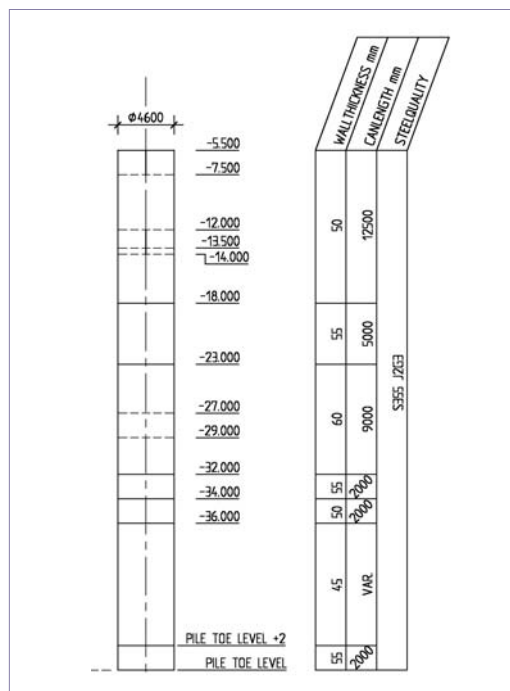
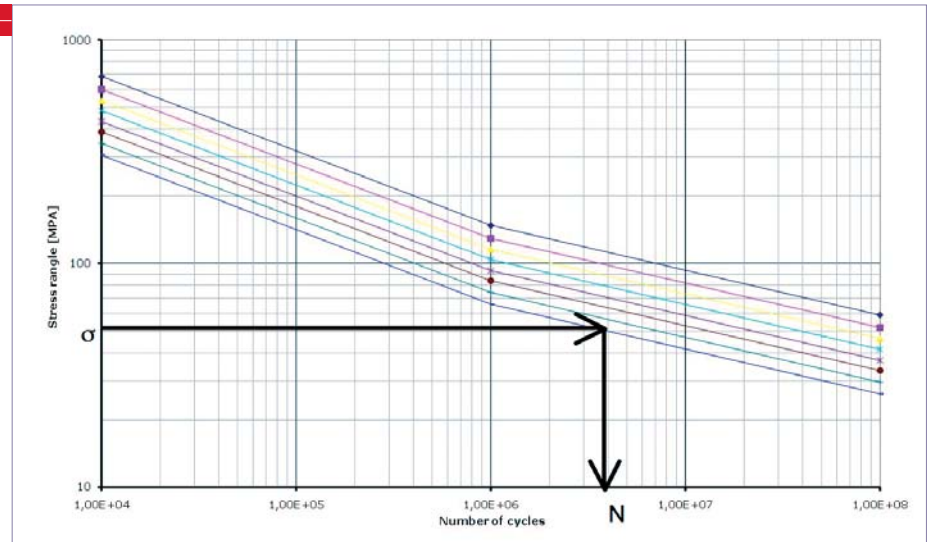
Vermoeiingsanalyse

De fundering van de windmolens moet de wind-, golf- en stromingsbelasting kunnen opnemen tijdens de geplande levensduur van 20 jaar. Van de gehele constructie is een model gemaakt met behulp van twee computerprogramma's; Flex5 en een paal-grond interactie model.

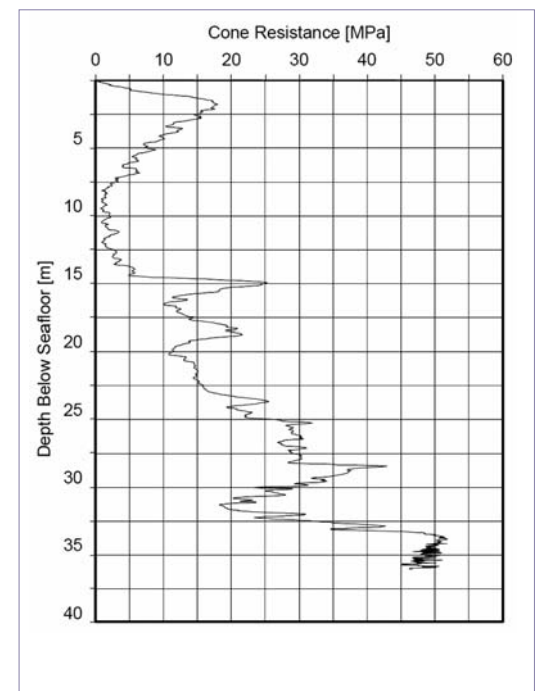
Flex5 is een tijddomein windmolen model waarin de turbinebewegingen en de volledige niet-lineaire belastingen en reacties worden gesimuleerd. In het paal-grond interactie model wordt de horizontale ondersteuning van de grond aan de paal gemodelleerd als een serie niet-lineaire, laterale veren. De laterale grondveren zijn bepaald met behulp van de API [2]. Hierbij is de degradatie van de grond onder cyclische belasting meegenomen.

Het Flex5 model wordt doorgerekend met de nominale, representatieve wind-, golf- en overige belasting. Hieruit volgen de reacties op verschillende hoogtes langs de paal. Deze reacties worden als input gebruikt voor het paal-grond interactiemodel. Met ontwerpregels worden verschillende combinaties en veiligheidsfactoren gebruikt om de uiterste grenstoestand, vermoeiingsgrenstoestand en bruikbaarheidsgrenstoestand te toetsen. Uit het paal-grond interactiemodel wordt de eerste eigenfrequentie bepaald. Noodzakelijke wijzigingen aan de funderingspaal om aan de capaciteitscriteria te voldoen worden geïdentificeerd, de gewijzigde paal en eigenfrequentie worden dan opnieuw ingevoerd in het Flex5 model. Dit proces convergeert na

Figuur 2
S-N curve.



Figuur 3 Representatieve paal.



Figuur 4 Representatieve sondering.

een aantal iteraties. De windmolens zijn ingedeeld in vier groepen van verschillende fundering als gevolg van plaatselijke bodemopbouw en waterdiepte. De vier groepen representeren funderingen met dezelfde eigenfrequentie en daarom dezelfde dynamische reactie. Op deze manier wordt het aantal benodigde simulaties in het tijddomein beperkt. De plaatselijke omstandigheden (wind, golven, stroming) zijn afgeleid van de metingen van de meetmast, welke voor dit doel in het gebied is gebouwd. Ook zijn meetgegevens gebruikt van de afgelopen 20 jaar van nabijgelegen weerstations.

Gebaseerd op de tijddomein simulaties zijn de

vermoeiingsbelastingen en frequenties bepaald. Vervolgens is met behulp van een ANSYS model de vermoeiingsspanning op iedere positie in de constructie bepaald.

Door het gebruik van S-N curves zoals voorgeschreven door DNV [1] wordt de vermoeiingsschade bepaald voor iedere sectie van de funderingspalen en overgangsstukken. In de S-N curve wordt de grootte van een cyclische belasting uitgezet t.o.v. het aantal cycli tot falen. De S-N curve heeft als basisvergelijking (zie *figuur 2*):

$$\log N = \log a - m \log \Delta \sigma$$

Waarin:

N = het aantal voorspelde spanningswisselingen tot falen voor een spanningsrimpel.

$\Delta\sigma$ = spanningsrimpel.

M = negatieve inverse helling van de SN-curve.

$\log a$ = snijpunt van de log N-as en de SN-curve.

Daarbij is de vermoeiingssterkte afhankelijk van een aantal (constructieve) aspecten, zoals:

- Detaillering van lassen (classificatie van lassen);
- Wanddikte en excentriciteiten van aansluitingen (spanningsconcentraties);
- Omgevingsfactoren (onder water/boven water).

De vermoeiingsschade die als gevolg van het heien optreedt kan worden afgeleid door het daadwerkelijk aantal klappen te delen door het toelaatbaar aantal klappen volgens de vermoeiingscurve. Voor de funderingspalen is de invloed van het heiproces meegenomen voor het bepalen van de totale vermoeiingsschade.

Heianalyse

De heivermoeiing is bepaald door middel van een heianalyse. De heianalyse bevat onder meer een dynamische analyse gebaseerd op propagatie van spanningsgolven in de paal. De spanningen tijdens het heien en het benodigde aantal klappen zijn bepaald met behulp van het programma GRL WEAP (Wave Equation Analysis of Piles). Het programma simuleert het gedrag van een paal tijdens het heien. Het programma gebruikt de 'stress wave' theorie om de bewegingen en krachten van de hamer, het heisysteem, de paal en de grond te bepalen

tijdens het heien.

Hoewel de 36 palen verschillende lengtes en wanddiktes hebben, wordt in dit artikel een representatieve paal beschreven. De paal is opgedeeld in 9 secties met een wanddikte variërend van 45 tot 60 mm. De bovenkant van de paal bevindt zich op MSL -5,5 m en de onderkant van de paal op MSL -48 m. De totale paallengte is 42,5 m. Een overzicht van de belangrijkste paalgegevens (voor de heibaarheid) wordt gegeven in *figuur 3*.

De IHC S1200 hamer is gemodelleerd volgens de aanbevelingen van de fabrikant. De aan te houden efficiëntie van de hamer wordt door de fabrikant op 95% geadviseerd. In onze berekeningen zijn we van een conservatieve efficiëntie van 90% boven water en 80% onder water uitgegaan.

Op de locatie van de windmolen die in dit artikel wordt beschreven bevond zich het meest vastgepakte zand. Deze locatie werd daarom verwacht maatgevend te zijn voor de heibaarheid. De sondering op deze locatie wordt gepresenteerd in *figuur 4*.

De weerstand van de grond tijdens het heien bestaat uit schachtwrijving en puntweerstand. De weerstand tijdens het heien werd bepaald volgens twee methoden: Stevens [3] en Alm & Hamre [4]. Bij de berekeningen is uitgegaan van een niet-pluggende paal. De schachtwrijving in de paal is volledig meegenomen.

Bepaling heiveerstand volgens Stevens [3]

De methode beschreven door Stevens [3] is

gebaseerd op de API methode voor het bepalen van statisch paaldragvermogen. De gelimiteerde waarden tijdens het heien zijn toegepast zowel voor de schachtwrijving als voor de puntweerstand. In deze methode wordt de puntweerstand berekend gebaseerd op de effectieve spanning ($N_q \cdot \sigma'_v \cdot A_{pile}$). Er wordt echter verwacht dat een puntweerstand gebaseerd op de conusweerstand realistischer is. Daarom zijn in de bepaling van de heiveerstand volgens de methode van Stevens een aantal conservatieve aanpassingen toegepast:

- Een gelimiteerde waarde voor de schachtwrijving van (2×115 kPa) is toegepast volgens API [2], in plaats van (2×96 kPa).
- Een puntweerstandswaarde (N_q) van maximaal 50 is toegepast volgens API [2], in plaats van 40.
- Een gelimiteerde puntweerstand van 12.000 kPa is toegepast volgens API [2], in plaats van 9600 kPa.

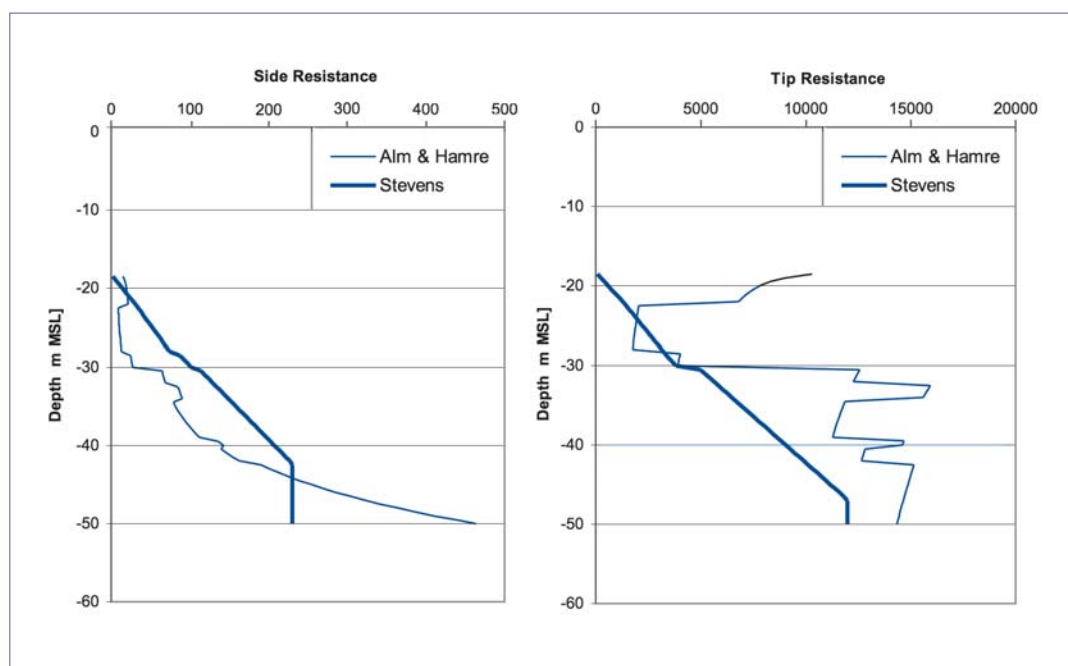
Bepaling heiveerstand volgens Alm&Hamre [4]

In de methode beschreven door Alm & Hamre [4] wordt de heiveerstand direct gecorreleerd aan de sondeerwaarde. Deze methode is toepasbaar voor grote open stalen buispalen die worden geheid in de Noordzee. Gronddegradatie, resulterend in een verminderde schachtwrijving wordt in deze methode meegenomen. Deze degradatie lijkt erg hard te gaan in deze methode, vooral in de bovenste (zand)lagen. In deze methode worden geen limietwaarden toegepast voor de schachtwrijving of puntweerstand.

Het blijkt dat in dit geval de methode volgens Alm & Hamre [4] resulteert in een ongeveer 15% lagere totale heiveerstand en een andere verdeling langs de paal. Daarom is een heianalyse uitgevoerd voor beide methoden. De resultaten van de bepaling van de heiveerstand wordt gepresenteerd in *figuur 5*.

Met de maximale hei-energie van de IHC S1200 hamer met een slaggewicht van 1200 kN is de maximale drukspanning berekend op 169 N/mm^2 en de maximale trekspanning op 139 N/mm^2 . De paal beschouwd in dit artikel kan volgens de analyse op diepte worden geheid met 1875 klappen.

Gebaseerd op het aantal klappen (aantal wisselingen) en de spanningsrimpel (de som van de drukspanning en de trekspanning), kan de vermoeiingsschade ten gevolge van de heien voor iedere sectie van de paal worden berekend. De maximale gevonden vermoeiingsschade was $D = 0,13$ voor de maatgevende paalsectie. Dit betekent dat 13% van de toelaatbare vermoeiingsschade optreedt ten gevolge van het heien van de paal.



Figuur 5 SRD.

WTG	Zeebodem <i>m MSL</i>	Paallengte <i>m</i>	Diepte t.g.v. eigen gewicht <i>m MSL</i>	Einddiepte <i>m MSL</i>	Meetdiepte <i>m MSL</i>
TP1	-16.5	41.5	- 27	- 48.14	-27 tot -40 en -42 tot -48
TP2	-16.5	39.5	- 26	- 44.92	-32 tot -45

Tabel 1 PDA testen.

Pile driving analysis

Tijdens installatie van de funderingspalen is een testprogramma uitgevoerd, bestaande uit dynamische paaltesten op twee van de palen. Alle palen zijn gekalenderd tijdens het heien. De dynamische testen zijn gebruikt om de drukspanningen en trekspanningen tijdens het heien te meten.

Pile Driving Analysis (PDA) is een hoge-rek dynamische testmethode voor palen. Dit is een relatief simpele en concurrerende manier om de palen tijdens het heiproces te controleren. Tijdens een PDA meting wordt waardevolle data geregistreerd, gemonitord en geanalyseerd:

- Krachts- en snelheidsreactie van de paal ten gevolge van de heikracht;
- Slagcijfer, slagfrequentie en zakking per slag;
- Hamer efficiëntie en overgebrachte energie;
- Drukspanning en trekspanning tijdens het heien;
- Grondweerstand tijdens het heien (schacht en puntweerstand).

De PDA testen zijn uitgevoerd tijdens het heien van twee palen. Bij deze palen werd het zwaarste heiwerk verwacht, enerzijds door de diepte van de paal en anderzijds door zeer vastgepakt zand. Het filterbed was al aangelegd op de zeebodem voordat de palen geheid zijn. Het PDA FPDS-7 systeem van Profound b.v. is gebruikt voor de metingen.

Tabel 1 laat de paalgegevens zien en de diepte waarover is geheid.

Het slagcijfer en de energie per slag werden gemeten voor alle palen.

Gemeten overgebrachte energie

De IHC hamer monitort de energie van de hamer tijdens het heien. Het grootste deel van de energie van de hamer wordt overgebracht naar de paal. Als gevolg van energieverlies is de overgebrachte energie iets minder dan de hamerenergie. Met de PDA metingen wordt de energie die is overgebracht in de paal gemeten tijdens het heien.

De efficiëntie van de hamer wordt gedefinieerd als de ratio van de gemeten overgebrachte

energie en de hamerenergie. Voor windmolen TP1 was de efficiëntie van de hamer ongeveer 80% tijdens de eerste meters van het heien. De efficiëntie tijdens de laatste meters was ongeveer 70%. De lagere efficiëntie kan veroorzaakt zijn doordat de hamer zich daar gedeeltelijk onder water bevindt. De efficiëntie van de hamer bij windmolen TP2 was 85%, over de laatste 5 m nam deze af tot 75%. In *figuur 6* is de overgebrachte energie in de paal van windmolen TP2 gepresenteerd samen met de energie zoals geregistreerd door IHC.

Tijdens het heien van de eerste meters (tot MSL -35 a -36 m) was de energie van de hamer erg laag, vanwege de lage grondweerstand. De registratie van de S1200 hamer is niet erg accuraat bij dit lage energieniveau. De overgebrachte energie en de hamer energie kunnen daarom op dit niveau niet vergeleken worden om de efficiëntie te bepalen. De volledige capaciteit van de S1200 hamer is niet gebruikt. De gebruikte energie is slechts 500 tot 800 kNm van de beschikbare 1200 kNm.

Gemeten spanningen

Uit de PDA metingen kan de maximale drukspanning en trekspanning worden afgeleid. De gemeten waarden zijn de spanningen op het niveau van de spanningsmeters (rekstrookjes), deze bevonden zich 10,3 m van de kop van de paal. De resultaten worden gepresenteerd in *figuur 7, 8 en 9*.

Voor beide palen geldt dat tijdens het heien van de eerste meters, waar de grondweerstand en de energie van de hamer nog laag is, de maximale drukspanning ligt tussen de 60 en 80 MPa en de maximale trekspanning tussen de 50 en 60 MPa. Vanaf ongeveer MSL -35 m neemt de drukspanning toe tot 95 a 110 MPa en de trekspanning af tot 20 a 40 MPa.

In de vermoeiingsanalyse waren een maximale drukspanning van ongeveer 170 MPa en een maximale trekspanning van ongeveer 140 MPa meegenomen. De gemeten spanningen voor zowel paal TP1 als TP2 zijn lager dan de berekende spanning. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de lagere overgebrachte energie.

Resultaat kalendering

Tijdens het heien is er voor alle palen gekalenderd. In tabel 2 wordt per paal het totaal aantal klappen weergegeven, alsmede de energie van de hamer.

Het totaal aantal klappen bij gebruik van de S1200 hamer met een energieniveau van 1200 kNm was van te voren berekend op 1875 voor de zwaarste heiomstandigheden.

Bij de meeste palen wordt dit aantal klappen overschreden vanwege de lagere gebruikte energie. De spanningen tijdens het heien waren echter lager dan verwacht, waarschijnlijk door de lagere energie en minder grondweerstand. Het overschrijden van het aantal klappen heeft

WTG	# Blows	Total Energy Energy/blow <i>kJ</i>	Average <i>kJ</i>
1	2.156	1287.694	597
2	2.512	989.996	394
3	2.380	1.449.854	609
4	1.975	1.249.383	633
5	2.559	1.547.677	605
6	1.782	1.025.597	576
7	2.125	1.294.076	609
8	2.115	1.112.830	526
9	2.711	1.547.551	571
10	3.409	1.111.005	326
11	2.630	1.079.395	410
12	2.144	1.371.251	640
13	2.070	1.029.832	498
14	2.847	1.019.880	358
15	2.234	989.723	443
16	1.947	883.706	454
17	1.826	862.548	472
18	3.571	1.472.157	412
19	2.431	1.224.396	504
20	2.670	1.083.862	406
21	2.654	1.054.811	397
22	2.040	1.202.957	590
23	1.724	938.809	545
24	1.482	775.004	523
25	1.922	955.743	497
26	1.968	1.344.585	683
27	2.941	1.682.205	572
28	2.566	892.980	348
29	2.702	1.263.637	468
30	2.148	1.116.904	520
31	1.674	791.383	473
32	1.747	904.282	518
33	2.488	1.347.654	542
34	2.608	1.130.624	434
35	2.986	1.338.221	448
36	2.333	1.148.657	492

Tabel 2 Aantal klappen per paal.

niet geleid tot een hogere vermoeiingsschade dan van te voren berekend.

Back-analysis

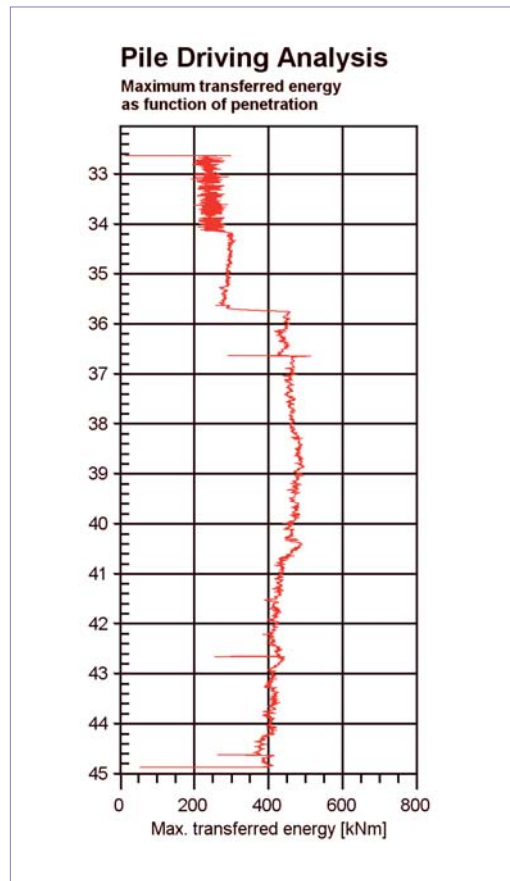
De resultaten van de PDA metingen zijn gebruikt om een back-analysis te doen met GRL WEAP. Deze analyse is uitgevoerd om net zoals van te voren de spanningen op iedere sectie te kunnen bepalen in de tijd. Met deze gegevens kan dan de vermoeiingsschade ten gevolge van het heien worden bepaald op ieder niveau in de paal. Omdat het heien in werkelijkheid makkelijker ging dan van te voren voorspeld, is in de heianalyse die van te voren was gemaakt de grondweerstand waarschijnlijk overschat. In de back-analysis van de palen waarop een PDA meting was uitgevoerd is de heianalyse gefit aan het aantal klappen (per 0,25 m en totaal), de gemeten spanningen, en de gebruikte hamerenergie.

Voor de back-analysis is derhalve de energie van de hamer omlaag gebracht, evenals de weerstand van de grond. Met deze aanpassingen werd een hoger aantal klappen, maar lagere spanningen gevonden. Het was mogelijk om de analyse redelijk te fitten aan de meetresultaten. Tussen MSL -35,5 en MSL -36 m werden wat hogere trekspanningen gemeten in de praktijk, in de back-analysis is het niet gelukt deze te simuleren. Gebaseerd op de back-analysis is een heivermoeiing van $D = 0,08$ gevonden. Dit is lager dan de heivermoeiing die van te voren was berekend.

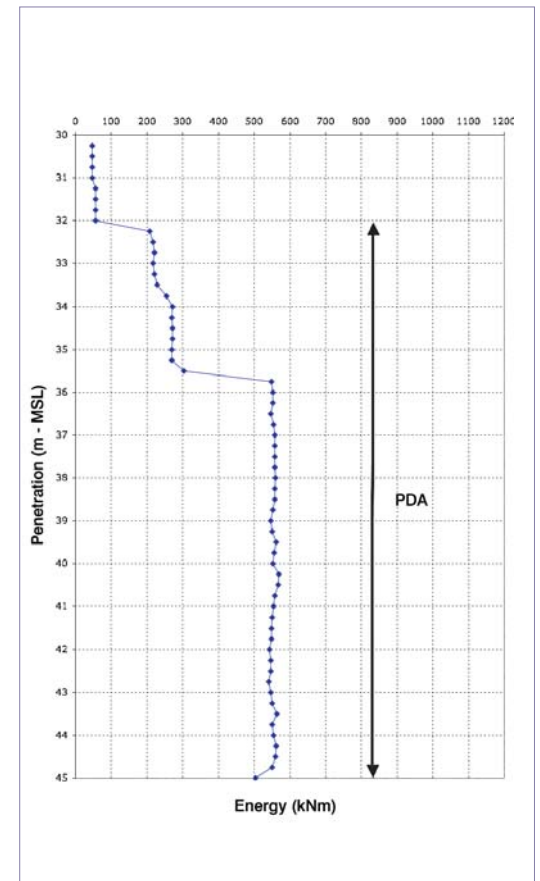
Conclusies

Gebaseerd op de heianalyse, de PDA metingen en de back-analysis kan het volgende geconcludeerd worden:

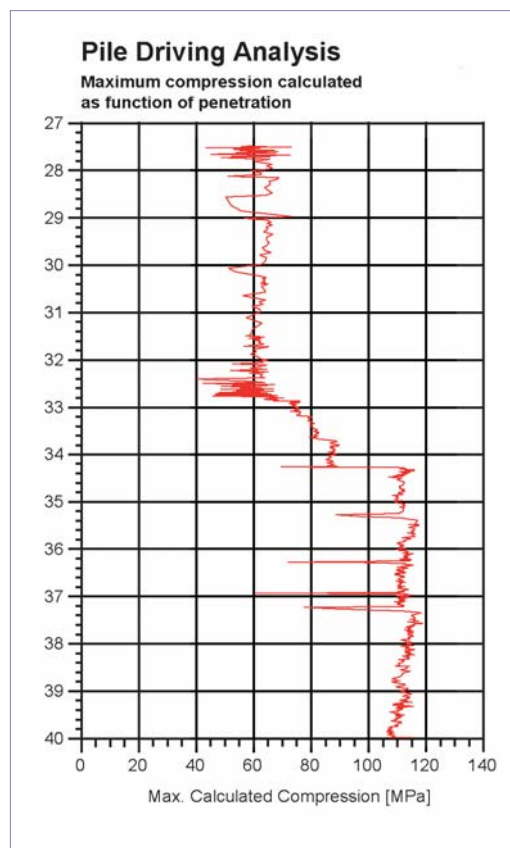
- Om de vermoeiing tijdens het heien te bepalen is zowel het aantal klappen als het spanningsniveau van belang.
- De efficiëntie van de hamer over de laatste meter is lager dan over de eerste meters. Dit kan veroorzaakt zijn doordat de hamer gedeeltelijk onder water zakt.
- Voor de eerste meters met lage grondweerstand en lage heien-energie is de gemeten drukspanning 60 tot 80 MPa en de gemeten trekspanning 50-60 MPa. In de dragende lagen stijgt de drukspanning tot 95-110 MPa en neemt de trekspanning af tot 20-40 MPa. De gemeten spanningen zijn lager dan de spanningen van te voren gebruikt voor het bepalen van de heivermoeiing. Dit komt



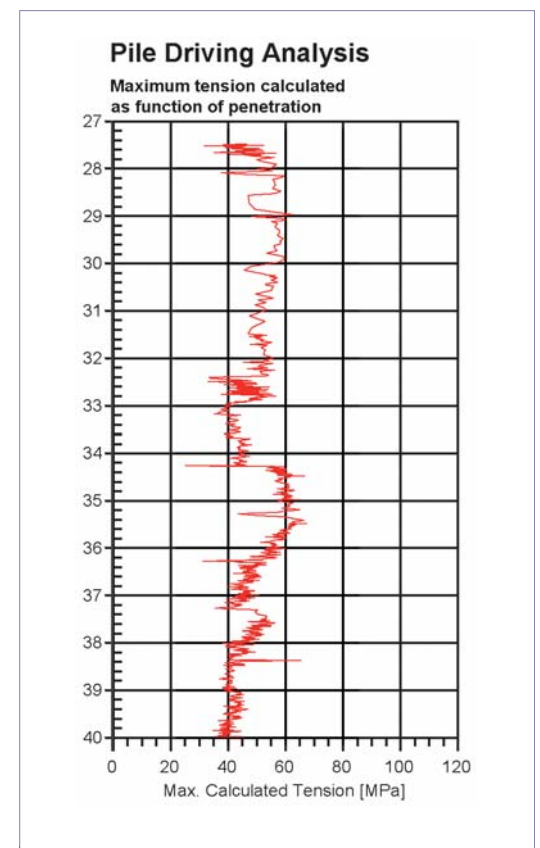
Figuur 6a Transferred energy TP2.



Figuur 6b Hammer energy TP2.



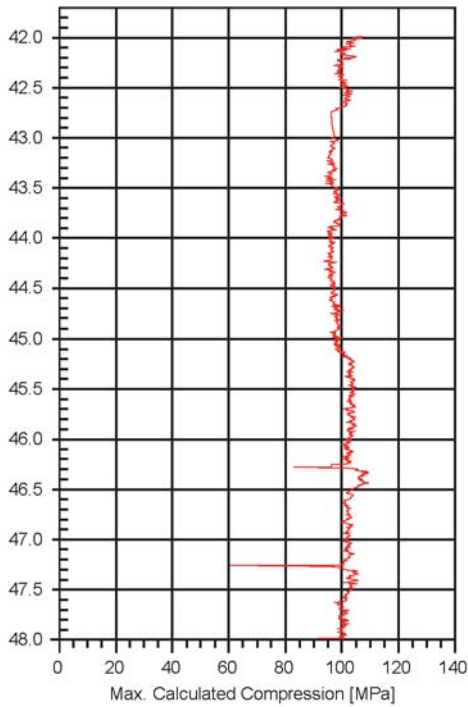
Figuur 7a Maximum compression for first meters TP1.



Figuur 7b Maximum tension for first meters TP1.

Pile Driving Analysis - MP5

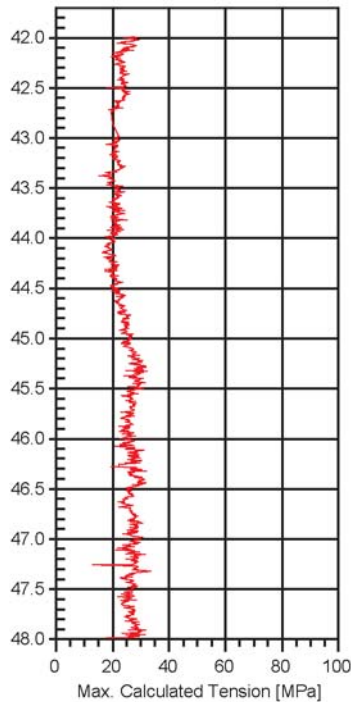
Maximum compression calculated as function of penetration



Figuur 8a Maximum compression for last meters TP1.

Pile Driving Analysis - MP5

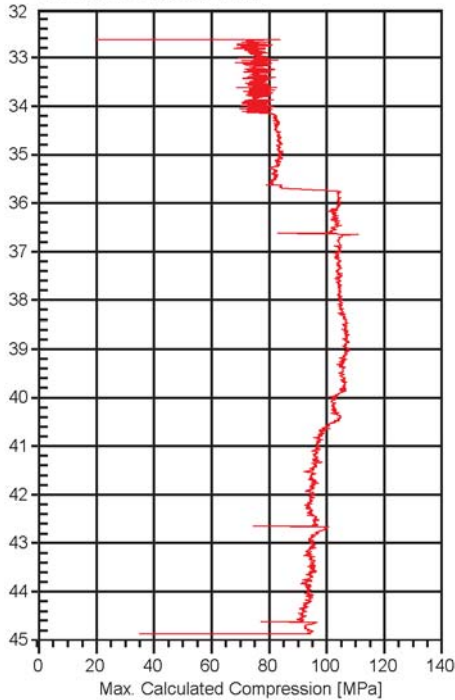
Maximum tension calculated as function of penetration



Figuur 8b Maximum tension for last meters TP1.

Pile Driving Analysis

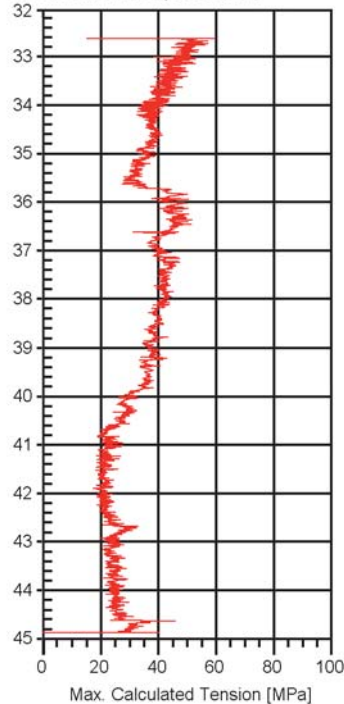
Maximum compression calculated as function of penetration



Figuur 9a Maximum compression TP2.

Pile Driving Analysis

Maximum tension calculated as function of penetration



Figuur 9b Maximum tension TP2.

vermoedelijk omdat een lagere heij-energie is toegepast.

- Bij de meeste palen wordt het totaal aantal klappen van 1875, zoals van te voren berekend, overschreden. Dit komt door de lagere toegepaste heij-energie.
- Met behulp van de PDA metingen is een back-analyse gedaan van het heiproces. De daarmee gevonden heivermoeiing ($D = 0,08$) is lager dan de heivermoeiing die van te voren was bepaald met behulp van een heianalyse ($D = 0,13$).
- Er kan worden geconcludeerd dat de aan-namen gemaakt voor de heianalyse conservatief waren met betrekking tot de heivermoeiing.
- Heivermoeiing kan niet worden verwaarloosd bij het bepalen van de totale vermoeiings-schade aan palen. ■

Literatuur

[1] Offshore Standard DNV-OS-J101, *Design of offshore wind turbine structures*, Det Norske Veritas (DNV), June 2004.

[2] API (2000), *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms*, API Recommended Practice 2A-WSD, 20th Edition.

[3] Stevens, R.S., OTC Publication 4205, *Evaluating Pile Drivability for Hard Clay, Very Dense Sand, and Rock*, 1982 Offshore Technology Conference.

[4] Alm, T. and Hamre, L., *Soil model for pile driveability based on CPT interpretations*, International Conference On Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2001.

[5] GRL *Weap Wave Equation Analysis of Pile Driving, Procedures and Models*, version 2003, PDI inc., 1998-2003.