

Effect installatiemethode van open stalen buispalen op de conusweerstand



Ir. J.A. Jacobse
GEO2 Engineering B.V.



Ir. J.H. van Dalen
Strukton Engineering B.V.

In opdracht van Rijkswaterstaat directie Zeeland is door de combinatie Strukton Civiel Projecten – Rasenberg Infra V.O.F. (KUN57) het wegtracé van de N57 gerealiseerd, tussen Serooskerke en de aansluiting op de A58, in de gemeente Middelburg.

Onderdeel van het wegtracé is het aquaduct bij Middelburg (KW31) dat het Kanaal door Walcheren kruist. Het door Strukton Engineering ontworpen aquaduct van ca. 800 m lengte is in een aantal onderdelen te onderscheiden (zie figuur 1):

- Open toerit Noord, uitgevoerd met een folieconstructie en groene bermen en taluds;
- Open toeritbak Noord, uitgevoerd als U-bakconstructie met beton- en onderwaterbetonvloer en toepassen van permanente dam-/combiwanden als grond- en waterkering, aan zichtzijde voorzien van voorzetwanden;
- Gesloten deel onder het kanaal en de omliggende dijken, uitgevoerd als zinkelement;
- Open toeritbak Zuid, evenals toerit Noord uitgevoerd als U-bak met beton- en onderwaterbetonvloer en permanente dam-/combiwan-

den; Over de open toeritbak Zuid kruisen het verkeersviaduct Kleverskerkseweg (KW32), Spoorviaduct spoorlijn Roosendaal-Vlissingen (KW33) en fietsviaduct Zuid (KW34). Ook deze nieuwe kunstwerken maken alle onderdeel uit van het te maken aquaduct;

- Open toerit Zuid, evenals open toerit Noord uitgevoerd met een folieconstructie en groene bermen en taluds.

Ten behoeve van de permanente combiwanden van de open toerit is een hei- en trilproef uitgevoerd waar in het vervolg van dit artikel op in wordt gegaan.

Aanleiding en doel proef

De combiwanden van de open toerit van het aquaduct zijn verankerd met groutankers, waarbij maximaal drie ankers per buispaal toegepast zijn. De verticale component van de ankerkrachten dient middels schacht- en puntweerstand van de buispalen opgenomen te worden.

Het verticaal draagvermogen van deze buispalen kan berekend worden conform twee Nederlandse

normen/richtlijnen. Beide methoden zijn voor wat betreft schachtwrijving gebaseerd op een relatie tussen maximale schuifkracht tussen grond en staal, op basis van de gemeten conusweerstand: 1) Eurocode 7 (voorheen NEN6743): Op druk belaste palen

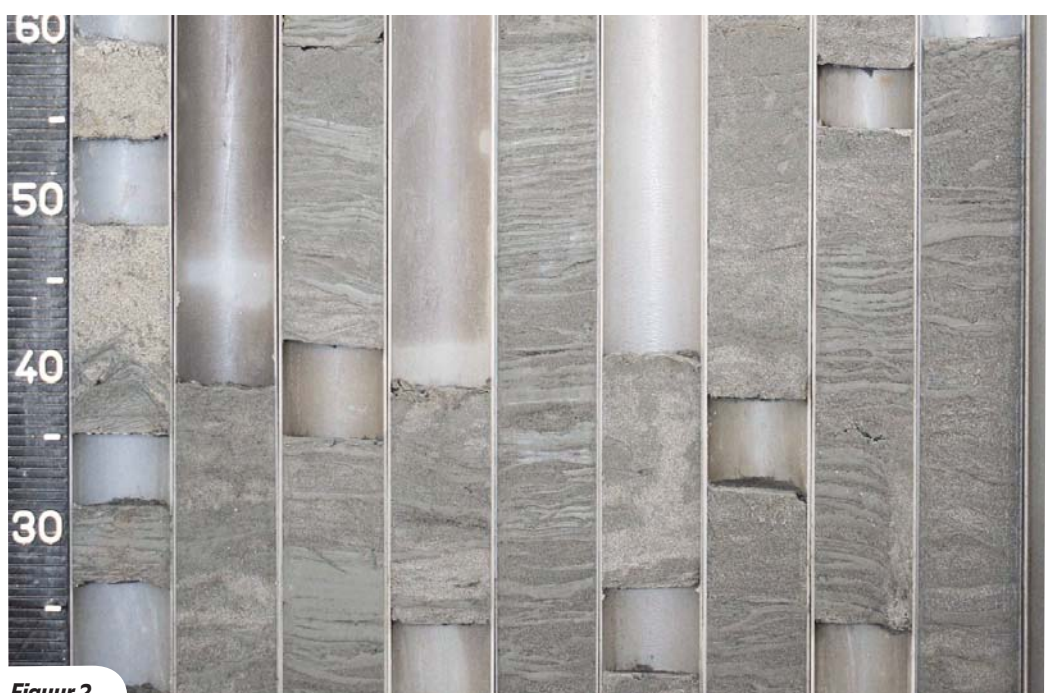
Deze methode is gebaseerd op de som van buitenschachtwrijving en het minimum van binnenschachtwrijving en de puntweerstand gebaseerd op de conusweerstand in een bepaald traject (4D-8D).

Gebruikelijk is hierbij om voor geheide palen zowel een pluggende als een niet-pluggende paal uit te rekenen en de maatgevende waarde mee te nemen in het ontwerp.

Binnen- en buitenschachtwrijving worden berekend op basis van de $\alpha_s - q_c$ methode. In de Eurocode (NEN6743) wordt voor paalschachtwrijving α_s een waarde van 0,006 voorgeschreven voor de buitenschacht. De binnenschacht is niet specifiek gedefinieerd. In de ontwerp praktijk wordt ofwel de binnenschachtwrijving gelijk gesteld aan de buitenschachtwrijving, ofwel



Figuur 1



Figuur 2

Samenvatting

Het verticaal draagvermogen van open stalen buispalen kan met behulp van twee verschillende ontwerpmethoden bepaald worden. Eén methode (CUR2001-8) gaat expliciet uit van het heien van buispalen, waarbij hogere draagvermogens verkregen worden dan de methode volgens de Eurocode (EC7).

Middels een praktijkproef is bepaald wat de effecten op de conusweerstand

zijn rondom én in een buispaal bij twee verschillende installatiemethoden; volledig intrillen of (deels) inheien. Beschreven is hoe de proef is uitgevoerd en tot welke resultaten dit geleid heeft.

De conclusie van deze proef is dat er aanzienlijke verschillen zijn in de conus weerstanden bij de twee verschillende installatiemethoden.

wordt een gereduceerd binnenschichtdraagvermogen in rekening gebracht, bijv. 50% van de buitenschichtwrijving. Dit is verschillend per ingenieursbureau.

Deze methode kan worden toegepast als de buizen trillend of heidend op diepte worden gebracht.

2) CUR2001-8: Bearing Capacity of Steel Pipe Piles
Deze methode is in grote lijnen geënt op internationaal (veld)onderzoek en aangepast aan de hand van Nederlandse proefbelastingen.

De methode kan onder een aantal voorwaarden gebruikt worden, zoals een bepaalde verhouding tussen wanddikte en buisdiameter (t/D) maar ook de voorwaarde dat buizen heidend op diepte worden gebracht.

Meestal geeft deze methode hogere verticale draagvermogens dan methode 1) bij eenzelfde paalpuntniveau. De reden hiervoor is dat een bepaalde opspanning van het zand binnen de buis in rekening gebracht die wordt veroorzaakt door het (deels) heidend op diepte brengen van de palen. Door deze opspanning wordt een hogere binnenschichtwrijving berekend dan in geval van methode 1).

In dit project is het verticale draagvermogen van de buispalen berekend met methode 2), conform richtlijn CUR2001-8. Dit betekent dat vanuit het ontwerp de eis voortvloeide dat de buispalen de laatste meters heidend op diepte gebracht dienen te worden.

Echter, vanuit de uitvoering was de wens dat de buispalen volledig trillend op diepte zouden worden gebracht, in verband met de productiesnelheid.

Omdat ontwerpmethode 2) in het geval van het trillend op diepte brengen, volgens het ontwerp-team, niet meer geldig zou zijn en ontwerpmethode 1) veel ongunstigere draagvermogens oplevert, zou met het verticaal draagvermogen van de buispalen onvoldoende zijn met het ontworpen paalpuntniveau.

Teneinde te onderzoeken of het trillend installeren van palen inderdaad ongunstiger is dan het heidend op diepte brengen, is besloten een proef uit te voeren, waarbij beide installatiemethoden toegepast worden. Gekozen is om invloed van de installatiewijze van de palen op de conusweerstand

te onderzoeken, en niet om de palen te proefbelasten.

Tevens is deze proef gebruikt om te bepalen met welk heiblok de palen op diepte gebracht konden worden en ook is geanalyseerd wat het effect van heien was op de verzwakte buisdoorsnede ter plaatse van vooraf gebrande gaten voor ankerdoorvoeringen. Op deze laatste beide punten wordt in dit artikel niet nader ingegaan.

Grondopbouw

In Tabel 1 is een overzicht gegeven van de grondopbouw ter plaatse van het aquaduct. Zie ook de sondeergrafieken.

De ondergrond bestaat over een groot deel (van de hoogte van de buispaal) uit een typische wadzandlaag, waarbij lagen losgepakt zand worden afgewisseld met kleilaagjes, (laag C). In figuur 2 is een foto van een deel van een boormonster van deze laag opgenomen, waarin de gelaagde opbouw duidelijk is te zien.

Gezien deze grondopbouw bestaat het risico dat, gedurende het trillend op diepte brengen, de grond in een dusdanig grote zone verweekt dat tijdens installatie van de dam/combiwanden te grote vervormingen ontstaan. Ervaringen bij een ander project in de regio gaven reden om dit risico bij deze bodemopbouw groot in te schatten. Dit risico was reden te meer om onderzoek te doen naar de installatiemethode en de effecten op het wadzand.

Uitvoering trilproef

De proef is gestart door een tweetal buispalen trillend te installeren.

Twee buispalen (B88 en B89) zijn geheel trillend ingebracht tot paalpuntniveau met behulp van een Müller MS – 200 H, een laagfrequent trilblok, maximale frequentie 30 Hz met een maximale slagkracht van 4000 kN (zie figuur 3 tijdens installatie). Gekozen is voor relatief lange palen uit het project, zodat de totale benodigde trillingsenergie hoog was.

Voor de trilproef zijn de volgende buizen toegepast: paal B88 en B89 Ø1067x14,0mm met een lengte van 21,7m een paalpuntniveau van NAP-19m.

De onderlinge afstand tussen de 2 buispalen per proef is 2,32 m. De afstand tussen de getrilde buis-

Tabel 1 – Grondopbouw t.p.v. aquaduct

Van ca. [m NAP]	Tot ca. [m NAP]	Laag	Grondsoort
+1,8 (mv)	0	I	Antropogeen zand, matig vast
0	-4	A	Klei, siltig met veenlagen
-4	-9	B	Zand, matig fijn, matig vast
-9	-19	C	Zand uiterst siltig, los met veel kleilaagjes (wadzand)
-19	-25	D	Zand, fijn/matig siltig, matig vast met enk. kleilaagjes
-25	-29	E	Zand, grof, vast



Figuur 3

palen en de geheide buispalen bedraagt ca. 100 m.

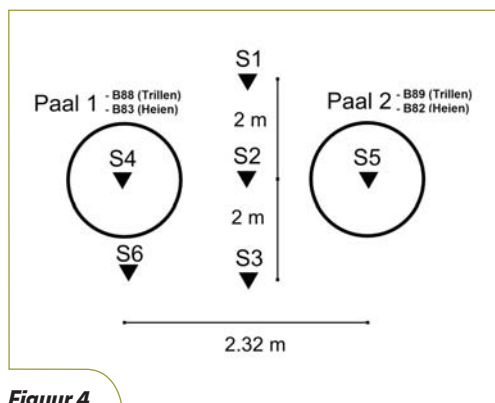
Om inzicht te krijgen in de effecten van het trillen op het grondgedrag/de conusweerstand zijn voor, tijdens en na installatie van de palen sonderingen met kleefmeting en waterspanningsmeting uitgevoerd. Omdat het verticaal draagvermogen sterk gerelateerd is aan conusweerstand (en dichtheid van de grond) in de genoemde methoden is de beoordeling gedaan op basis van sonderingen

Tabel 2 – Uitvoering trilproef

Tijd [dagen]	Activiteit	Opmerking / locatie
1	Sondering T-S1 uitvoeren Paal B88 volledig intrillen Sondering T-S2 uitvoeren Paal B89 volledig intrillen	Voorafgaand aan paalinstallatie Naast ingetrilde paal B88
6	Sondering T-S3 uitvoeren Sondering T-S4 uitvoeren Sondering T-S5 uitvoeren	Naast/tussen ingetrilde palen In paal B88 In paal B89
24	Sondering T-S6 uitvoeren	Naast ingetrilde palen

Tabel 3 – Uitvoering heiproef

Tijd [dagen]	Activiteit	Opmerking / locatie
1	Sondering H-S1 uitvoeren Paal B83 trillend installeren tot NAP-14m Paal B83 naheien tot NAP-20m	Voorafgaan aan paalinstallatie
2	Sondering H-S2 uitvoeren Paal B82 trillend installeren tot NAP-9m Paal B82 naheien tot NAP-20m	Naast ingebracht paal B83
9	Sondering H-S3 uitvoeren Sondering H-S4 uitvoeren Sondering H-S5 uitvoeren	Naast/tussen ingetrilde palen In paal B82 In paal B83



Figuur 4

vooraf, tijdens en na de proef. Enkele van de sonderingen na afloop zijn uitgevoerd binnen de buispaal.

De volgorde activiteiten van het proef van de getrilde palen is weergegeven in tabel 2. Zie figuur 4 voor het principe van de sondeerlocaties.

Resultaten trilproef

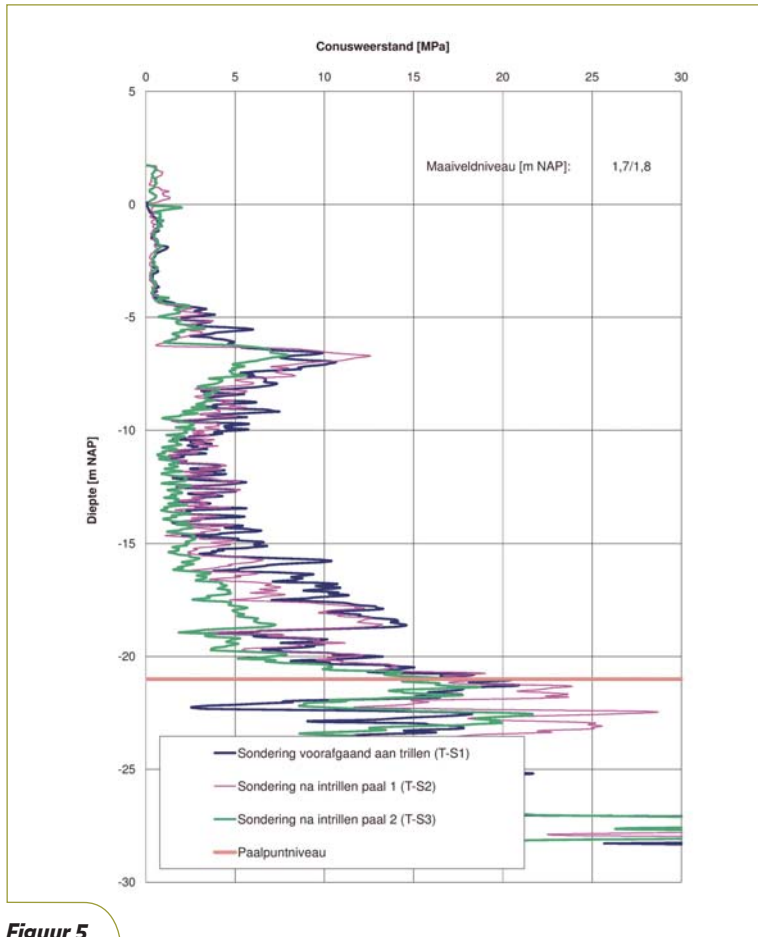
Het resultaat van de sonderingen die gemaakt zijn bij de ingetrilde palen volgens Tabel 2 is weergegeven in de figuren 5, 6 en 7.

In deze figuren zijn de gemeten conusweerstand

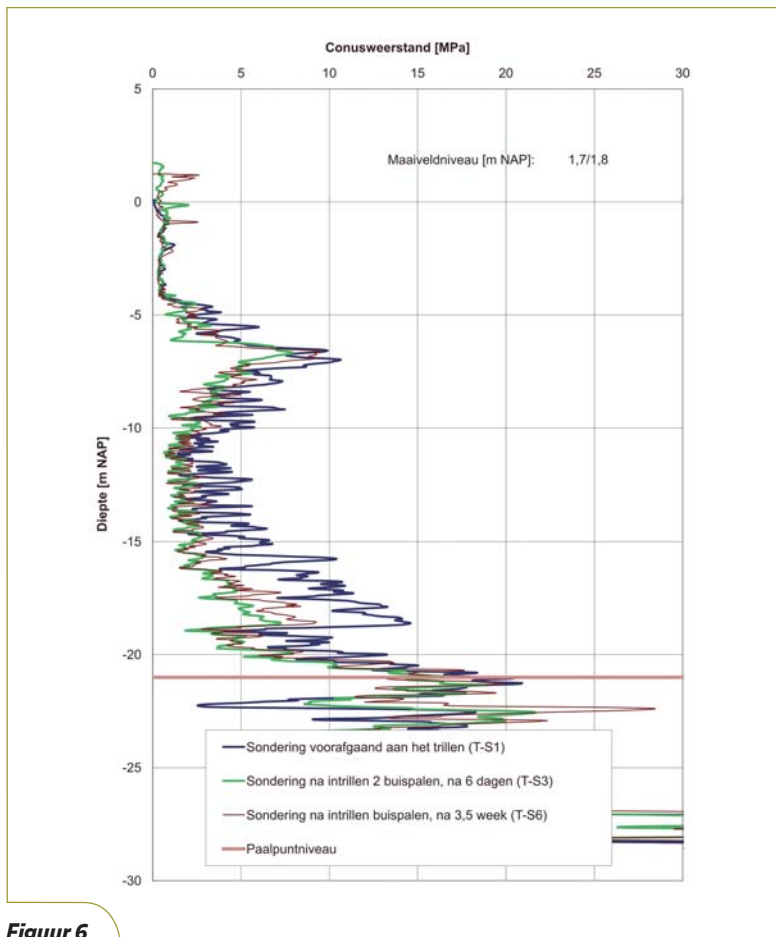
met elkaar vergeleken, elke keer ten opzichte van de initieel uitgevoerde sondering T-S1.

In figuur 8 is het resultaat van de kwantitatieve vergelijking van de sonderingen grafisch weergegeven voor de getrilde palen.

Hierbij zijn de conusweerstand van de betreffende sonderingen gedeeld door de conusweerstand van de initiële sondering voor inbrengen. Op de horizontale as is aangegeven welke sondering het betreft (in vergelijking met sondering T-S1) en op de verticale as is de verhouding van conusweerstand gegeven.



Figuur 5



Figuur 6

Onderscheid is gemaakt naar de significante lagen B, C en D waaraan volgens het ontwerp de draagkracht wordt ontleend (zie Tabel 1), gesommeerd over deze drie lagen en tevens voor de hele hoogte van de paal. Hierbij is voor elke sondering bepaald wat de reductie of toename van de conusweerstand is over een bepaald traject.

Uit de kwantitatieve vergelijking van de sonderingen van de trilproef (Figuur 8) is (onder andere) het volgende waar te nemen:

- de conusweerstand reduceren over de buitenzijde van de gehele paal voor alle lagen, maar het meest in laag C;
- één week na intrillen is de reductie van de conusweerstand aan de buitenzijde van de paal gemiddeld ca. 45% over de gehele paalhoogte;
- na een aantal weken is de conusweerstand weer iets toegenomen en is de reductie van de conusweerstand over de paalhoogte gemiddeld ca. 35% binnen de buispaal is er ook een reductie over alle lagen, en het meest over laag B en C waar een forse reductie optreedt van ca. 75%;
- de reductie over de gehele hoogte aan de binnenzijde van de paal is gemiddeld 45%-55%.

Niet te zien in de bovenstaande vergelijking, maar wel in de sondeergrafieken (Figuur 7) is dat over

de laatste meter in de buispaal de conusweerstand toeneemt ten opzichte van de oorspronkelijke sondering. De gemiddelde conusweerstand 1 m boven de punt en 1 m onder de punt zijn bepaald. De conusweerstand neemt toe met 120% en 220% over dit niveau.

Een verklaring hiervoor is dat juist onder de paalpunt tijdens het installeren een verdichting plaatsvindt maar dat na een doorgaande trillende passage van de paal de verdichting teniet wordt gedaan.

Uitvoering heiproef

Twee weken nadat de trilproef is uitgevoerd zijn een tweetal buizen ingebracht, middels naeien. De afstand tussen de locatie van de heiproef en de trilproef was ca. 100 m.

Twee buispaalen (B82 en B83) zijn vanaf NAP-9m (paal B82) en NAP-14m (paal B83) heidend ingebracht tot paalpuntniveau met behulp van een hydraulische hamer IHC S70 (maximale energie 70 kNm). Tot de genoemde niveaus zijn deze paalen trillend ingebracht, waarna direct (per buis) naigheid is.

De gebruikte buispaalen zijn: paal B82 en B83, $\varnothing 1067 \times 13,6$ mm, met een lengte van 19,7+3,5 m (overlengte i.v.m. PDA-metingen) met een paal-

puntniveau van NAP-19m (B82) en NAP-20m (B83). Ook hier zijn sonderingen uitgevoerd volgens hetzelfde principe als bij de trilproef.

De volgorde van activiteiten van de proef van de geheide paalen is weergegeven in Tabel 3. Zie figuur 4 voor het principe van de sondeerlocaties.

Alle sonderingen zijn uitgevoerd tot een penetratiediepte van NAP - 30 m uitgevoerd. Aan de sonderingen in de buispaal is als voorwaarde meegegeven dat gestart dient te worden vanuit het middelpunt van de buis met een maximale afwijking van de hartlijn van de buis van 0,50.

Resultaten heiproef

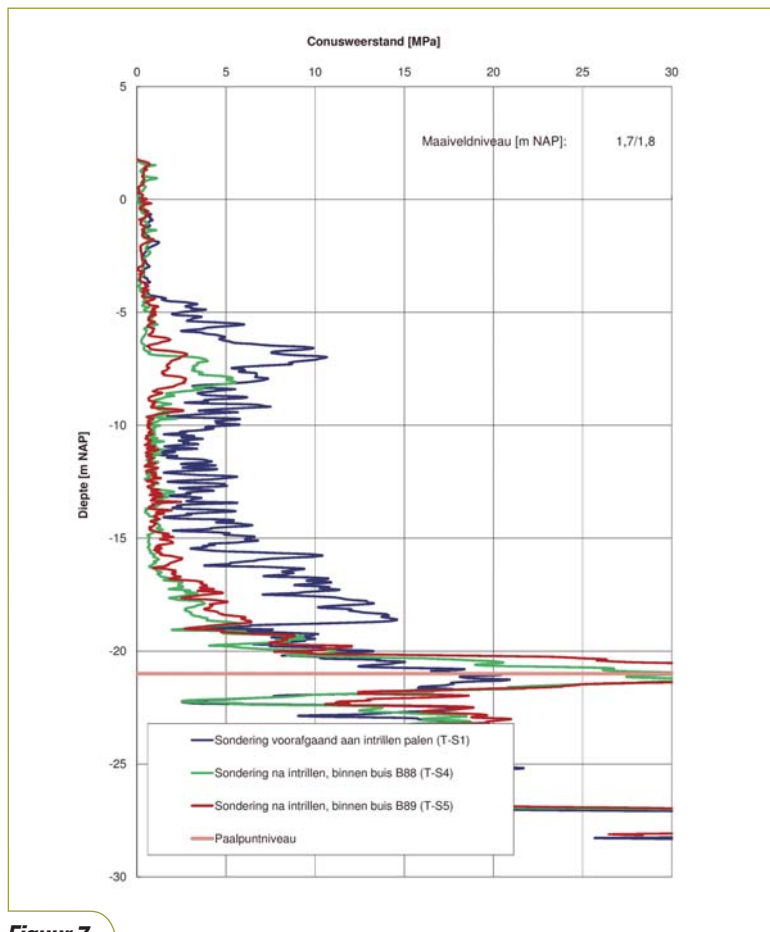
Het resultaat van de sonderingen die gemaakt zijn bij de ingeheide paalen volgens Tabel 3 is weergegeven in de figuren 9 en 10.

In figuur 11 is het resultaat van de kwantitatieve vergelijking van de sonderingen grafisch weergegeven voor de geheide paalen.

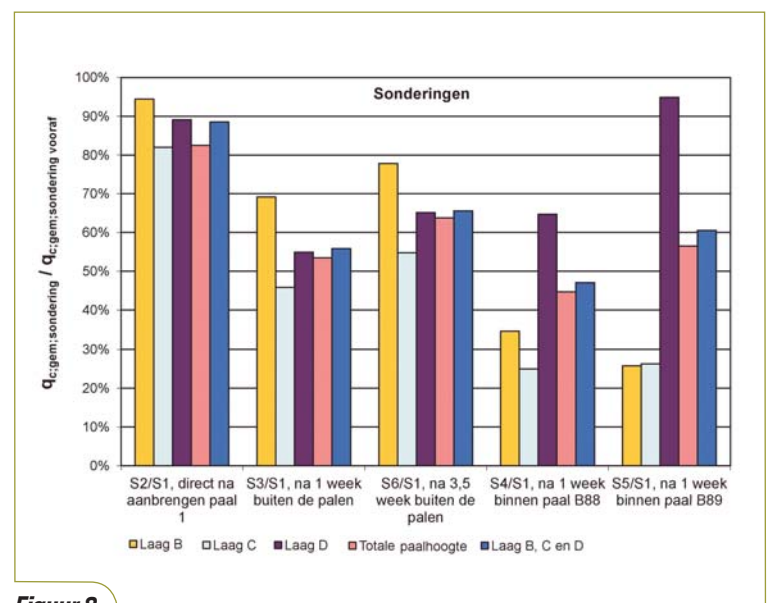
Voor de sondeergrafieken als voor de kwantitatieve vergelijking is hierbij hetzelfde principe gehanteerd zoals beschreven bij de resultaten van de trilproef, waarbij nu alles is vergeleken met de initieel uitgevoerde sondering H-S1.

Uit de kwantitatieve vergelijkingen van de sonderingen van de heiproef (figuur 11) is (onder andere) het volgende waar te nemen:

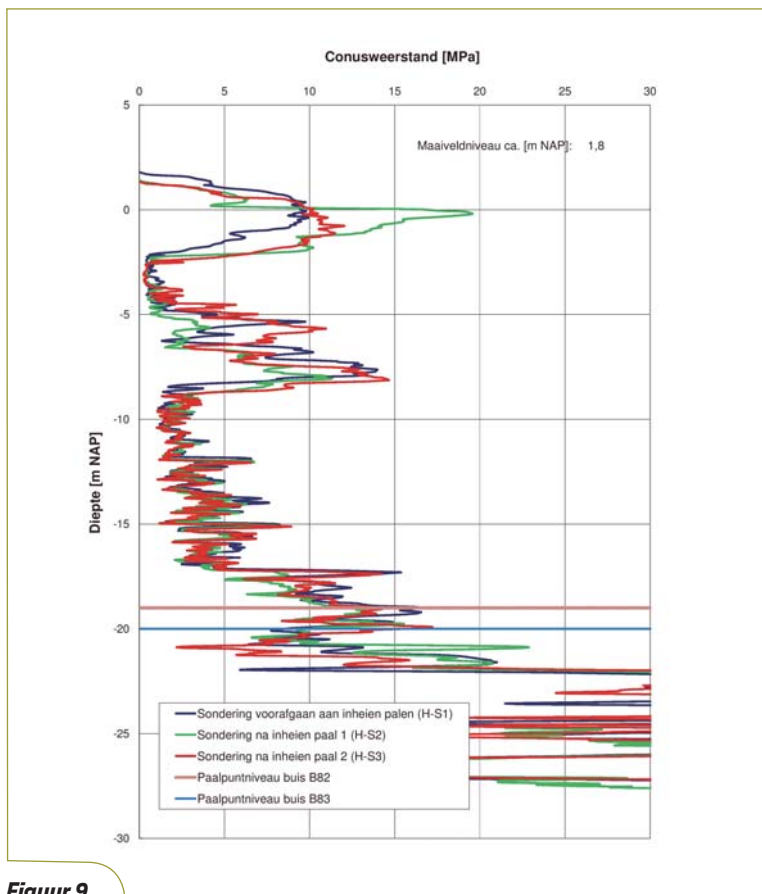
- aan de buitenzijde van de paal is geen duidelijke reductie of toename van de conusweerstand te zien. Over de gehele lengte van de paal blijft de gemiddelde conusweerstand gelijk na inbrengen paal.
- binnen de buispaal treedt over laag B en C een reductie op van 45% resp. 60%. Een geringere reductie dan bij de geheel ingetrilde paal, daar is het 75%



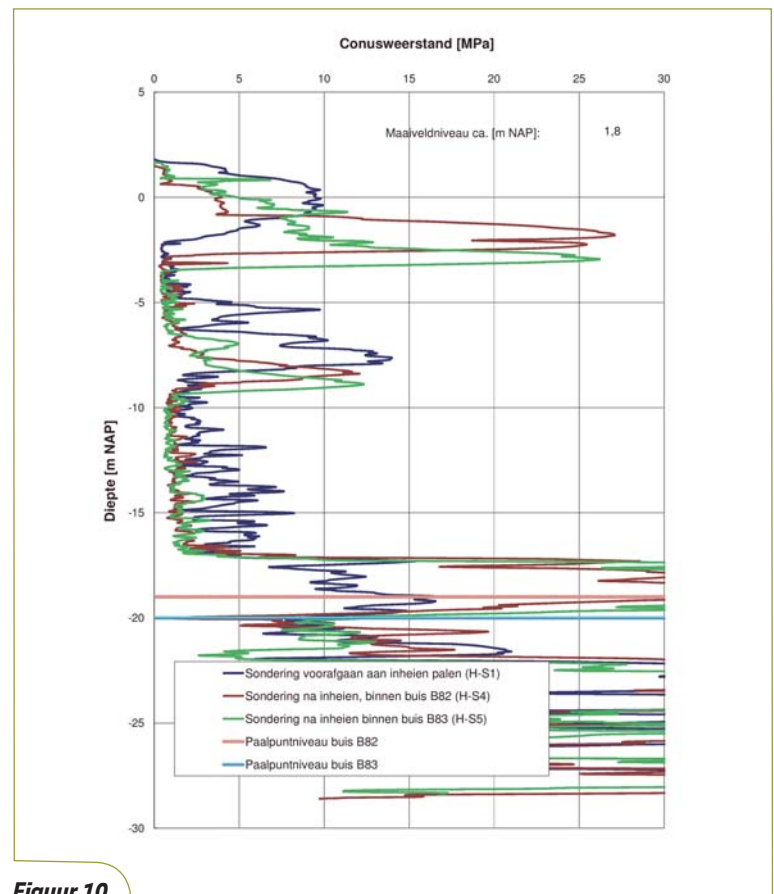
Figuur 7



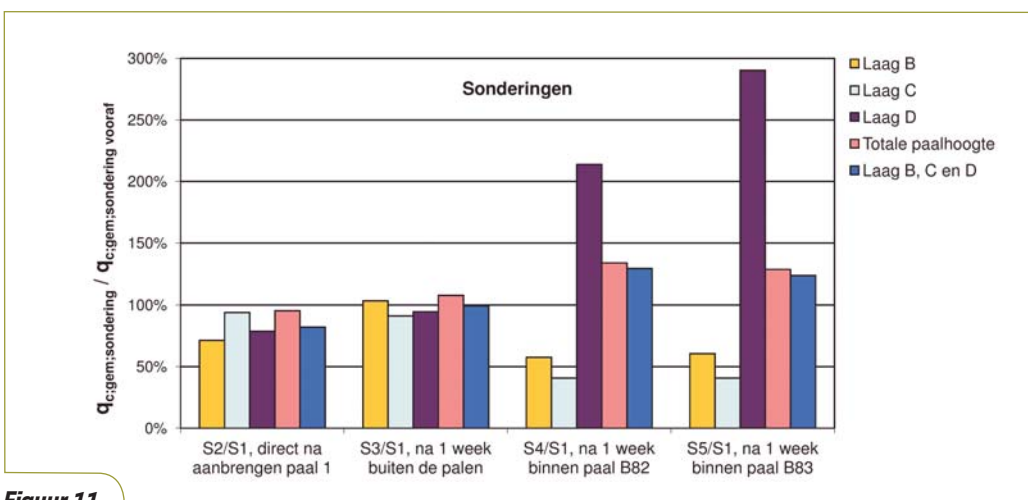
Figuur 8



Figuur 9



Figuur 10



Figuur 11

- in laag D vindt een grote toename van de conusweerstand plaats binnen de paal; de conusweerstand na installatie palen is 214%-290% van de oorspronkelijke waarde
- vanwege de grote toename van de conusweerstand in laag D is de gemiddelde conusweerstand binnen de paal groter dan initieel.

Met een deel van de sonderingen zijn ook de waterspanningen gemeten. Hieruit blijkt dat binnen de buispaal in de wadzandlaag een grote wateroverspanning gemeten wordt. Niet alle metingen zijn echter even betrouwbaar.

Conclusies

Op basis van vergelijking van de uitgevoerde sonderingen in relatie tot de inbrengmethode zijn de volgende conclusies getrokken:

- In de wadzandlaag is in alle gevallen, zowel bij heien als trillen, een significante afname van de conusweerstand waargenomen. Binnen de buispaal het meest (tot 75% reductie) maar ook buiten de buispaal. Dit effect is het meest waarneembaar bij de getrilde palen.
- Het vooraf gesignaleerde risico ten aanzien van het gedrag van de wadzandlaag was terecht;
- Direct na aanbrengen is de conusweerstand het

sterkst afgenomen, na een wachttijd van 1 week neemt de conusweerstand weer enigszins toe. Een plausibele verklaring hiervoor is dat een deel van de reductie door wateroverspanning is veroorzaakt;

- Voor het beschouwde project leidt trillen in alle gevallen tot een ongunstigere conusweerstand dan heien, ook na een wachperiode van 3,5 weken;
- Na het heien is een forse opspanning in de buis waargenomen nabij de paalvoet. In het geval van trillen is een dergelijk effect ook waargenomen, echter in aanmerkelijk mindere mate en over een veel kleinere hoogte.

Op basis van de conclusie uit de sondeergrafiek zijn de volgende afgeleide conclusies getrokken ten aanzien van het verticaal draagvermogen van de palen:

- De in CUR2001-8 veronderstelde opspanning tijdens heien installeren van buispalen is in dit geval inderdaad opgetreden. Toepassing van de rekenregel van CUR2001-8 blijkt in dit geval niet gerechtvaardigd bij het (volledig) trillend installeren van open stalen buispalen
- Bij toepassing van de Eurocode (NEN6743) is in rekening brengen van een binnenschachtwrijving die gelijk is aan de buitenschachtwrijving in sommige gevallen te optimistisch. Zoals in dit

project blijkt, reduceert de conusweerstand van de wadzandlaag binnen de buispaal enorm; Gezien bovenstaande conclusies is de ontwerpeis dat de palen (over de laatste zone) geheid moesten worden gehandhaafd.

Discussie

In de proef is het doel bereikt om middels het uitvoeren van sonderingen het verschil tussen de twee ontwerpmethoden te laten zien.

Een vraag die open blijft staan is of er mogelijk bij ingetilde palen ook sprake is van (enige) plugvorming en opspanning aan de punt (eventueel na enige vervorming); wat leidt tot een hoger draagvermogen. De sonderingen in dit project zijn gemaakt bij een niet belaste paal. Mogelijk treedt bij het belasten van de paal alsnog een zekere opspanning op. Echter verwacht wordt dat hiervoor een relatief grote paalvervorming noodzakelijk is, hetgeen niet wenselijk is bij een verankerde buispaal uit een combiwand.

Wat ook opmerkelijk is dat in de Eurocode 7 (NEN6743) geen rekening wordt gehouden met het verschil tussen trillend installeren van palen

en het heid installeren van palen voor fijne zanden.

Voor grof zand en grind wordt hier wel een onderscheid in gemaakt door voor open stalen buispalen en kokerprofielen, door voor het trillend installeren van palen een reductie van de conusweerstand van ca. 10% in rekening te brengen.

Een ontwerpvoorschrift van Prorail ten aanzien van hulpwerken in de baan (RNL00614) brengt hier wel een verschil in aan, door voor trillend ingebrachte stalen profielen een $\alpha_s = 0,004$ toe te passen en bij het heid ingebrachte stalen profielen een $\alpha_s = 0,006$ toe te passen.

Als laatste is het ook opvallend dat de CUR2001-8 niet opgenomen is in de Eurocode en dat hier ook geen verwijzing naar is opgenomen. De Eurocode geeft het volgende aan betreffende het verticaal draagvermogen van open stalen buispalen: 'De draagkracht van een open buispaal moet zijn bepaald door sommatie van de maximumschachtwrijvingskracht op de buiten- en de binnenwand en de maximumdraagkracht van de onderrand van de buis. De in rekening gebrachte waarde van de maximumschachtwrijvingskracht op de binnen-

wand mag de maximale grondmechanische draagkracht van de paalpunt waarbij de grond in de paal een vaste plug vormt, niet overschrijden.'

Tevens zijn specifiek factoren gegeven voor open stalen buispalen.

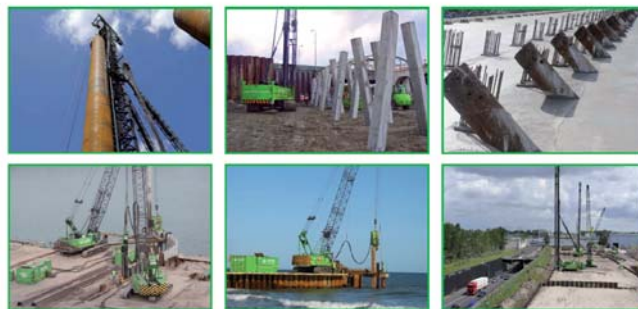
De vraag is hiermee of de Eurocode 7 ruimte laat voor het ontwerpen van het verticale draagvermogen met de CUR2001-8. In geval van toepassing van de ROK (de opvolger van de ROBK) is dit wel duidelijk aangezien hier de CUR2001-8 voorgeschreven wordt voor de bepaling van het verticaal draagvermogen van open stalen buispalen.

Referenties

- NEN 9997-1:2011 + C1: *Geotechnisch ontwerp van constructies, Deel 1: Algemene regels (Eurocode 7)*.
- Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, *CUR 2001-8: Bearing Capacity of Steel Pipe Piles*, Juli 2001
- ProRail, RNL00614, Richtlijn, *Eisen m.b.t. de uitvoering en berekening van hulpwerken in de baan versie 02*, 16 Augustus 2005,
- Rijkswaterstaat, ROK, versie 1.0, RTD 1001:2011, 16 december 2011. ●



EEN WERELD AAN DRAAGVERMOGEN



voorbij funderingstechniek
Denkkracht. Daadkracht. Draagkracht.

www.voorbijfunderingstechniek.nl