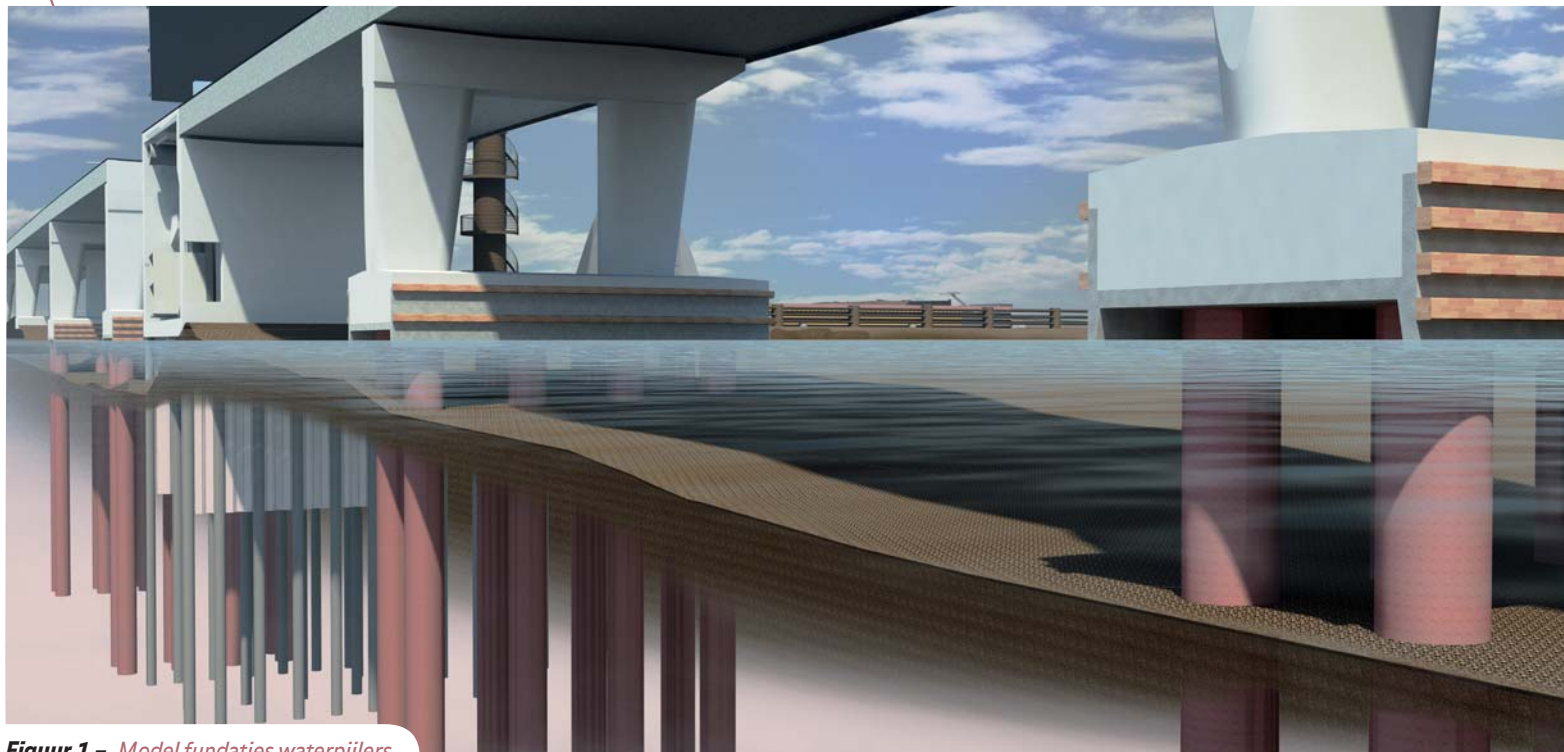


De nieuwe Ramspolbrug op open stalen buispalen

Ir. Rogier O. Schippers
VWS Geotechniek /
Volker InfraDesign BV



Ir. Roel W.R. Brouwer
t.t.v. project Volker
InfraDesign BV /
VWS Geotechniek
per 1 mei 2013
Geobest BV



Figuur 1 – Model fundaties waterpijlers.

Op 29 november 2012 is de eerste energieneutrale brug van Nederland geopend door minister Schultz van Haegen. Voor de nieuwe Ramspolbrug heeft Volker InfraDesign binnen het Infrateam N50 Ramspol onder meer het ontwerp van de brugfundatie verzorgd. Maar liefst 8 van de 12 tussensteunpunten zijn uitgevoerd met open stalen buispalen. Bij dit project is er volop discussie gevoerd over heien dan wel intrillen van de stalen buispalen in relatie tot de kans op plugvorming en

het draagvermogen. Bij de pijlers met nummer 5 en 11 zijn controlesonderingen uitgevoerd, aan zowel de buitenzijde als binnenin de buizen, om de mate van opspanning te kunnen kwantificeren. Dit artikel beschrijft de resultaten en de conclusies die hieruit zijn getrokken. Het vormt een interessante aanvulling op het recent verschenen artikel “Effect installatiemethode van open stalen buispalen op de conusweerstand” door Jacobse en Van Dalen [1] in Geotechniek 2012-4.

Spedproject Cluster B

De nieuwe Ramspolbrug maakt onderdeel uit van de Reconstructie N50 tussen Ramspol en Ens. Het traject Ramspol - Ens is ongeveer 250 meter verlegd en verbreed van 2x1 naar 2x2 rijstroken. De nieuwe brug is 550 m lang, 34 m breed en ca. 13m hoog. Dit is hoger dan de oude brug zodat regulier scheepsverkeer er onder door kan en de brug minder vaak open hoeft. De brug ligt parallel aan de Balgstuw en overbrugt het Ramsdiep en de Ramsgeul middels 12 steunpunten, inclusief 7 waterpijlers. De energie die vrijkomt bij het sluiten van de brug wordt opgeslagen. Samen met zonnecellen levert dat genoeg energie om

de brug weer te openen en dit maakt het een innovatieve, energieneutrale brug.

Het project is gerealiseerd in opdracht van Rijkswaterstaat en valt onder de Spoedaanpak. Om de aanpassing mogelijk te maken is het Infrateam N50 Ramspol opgericht: een samenwerkingsverband tussen VolkerInfra (KWS Infra, Van Hattum en Blankevoort en Vialis), Boskalis en Hollandia.

Ontwerp open stalen buispalen, pijlers 5 en 11

Gezien de aangetroffen bodemgesteldheid en aard van de bovenbouw kwamen voor de steunpunten enkel funderingen op palen in aanmerking waarbij het vervormingsgedrag een maatgevende factor was. In tabel 1 wordt de globale grondopbouw weergegeven ter plaatse van pijler 11. De grondopbouw bij de andere pijlers is vergelijkbaar.

Het ontwerp van de fundaties heeft plaats gevonden in nauwe samenwerking met de betrokken constructeurs. Dit resulteerde in een palenplan per waterpijler van 2 rijen van 7 open stalen buispalen, zie figuur 1. De palen zijn gedimensioneerd

Tabel 1 - Grondopbouw Steunpunt 11 – Waterpijler Ramsgeul

Grondlaag	Van [m+NAP]	Tot [m+NAP]
Slib	-1,0 à -1,5	-3,5 à -4,0
Veen	-3,5 à -4,0	-6,0 à -7,0
Zand, matig tot vaste pakking	-6,0 à -7,0	-17,5 à -20,0
Klei, zandig	-17,5 à -20,0	-18,5 à -20,0
Zand, zeer vaste pakking	-18,5 à -20,0	-35,0 (max.)

Samenvatting

Bij het ontwerp en de uitvoering van de open stalen buispalen voor de nieuwe Ramspolbrug heeft een intensieve discussie plaatsgevonden over het heien dan wel intrillen van de stalen buispalen, in relatie tot de kans op plugvorming. Het hanteren van CUR 2001-8 roept in praktijk de nodige vragen op, bijvoorbeeld

over de keuze van heidend of trillend inbrengen van buispalen. Derhalve zijn in en nabij de stalen buizen controlesonderingen na paalinstallatie gemaakt. Deze laten onder meer een significante verbetering in de conusweerstand zien, over trajecten waar getrild is.

op basis van een aanvaarbelasting en de verticale belastingen vanuit de brug.

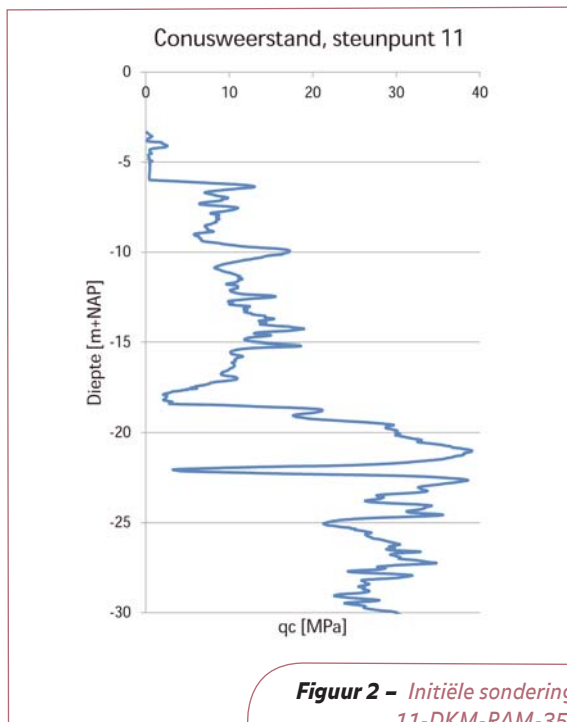
Het gedrag van de brug bij diverse variabele belastingen, zoals verkeersbelastingen en aanvaarbelastingen, is met behulp van Scia Engineer en Plaxis geanalyseerd. Met name de bepaling van de paal draagvermogens en de verticale veerconstanten verdiende de nodige aandacht.

Bij het engineeren van een fundering op open stalen buispalen worden in Nederland veelal twee methoden toegepast. De methode conform CUR rapport 2001-8 *Bearing capacity of steel pipe piles* of de methode conform NEN-EN 9997-1 (en voorheen NEN6743). De bovengenoemde richtlijn maakt geen deel uit van NEN-EN 9997-1 [IV], waarmee het al dan niet toepassen van de rekenregels geheel aan de geotechnisch adviseur wordt overgelaten, voor zover niet voorgeschreven in bestek of klant specificatie.

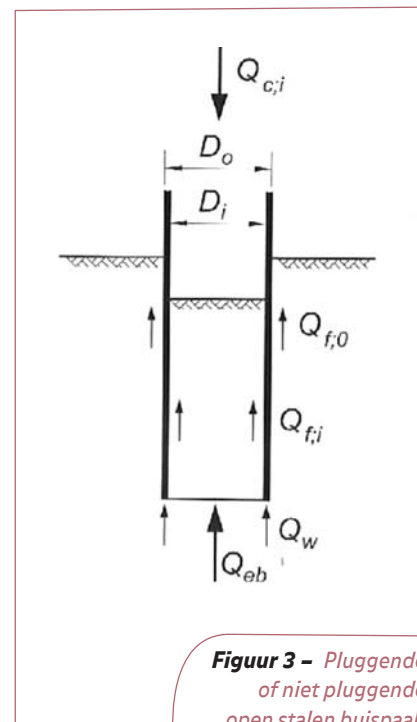
In dit geval is de aanpak conform het CUR 2001-8 [V] rapport gekozen. Het ontwerpproces heeft geleid tot toepassing van open stalen buispalen $\varnothing 1620-22$ mm met plaatsing tot ruim in het diepe draagkrachtige zandpakket met initieel hoge conusweerstand (>30 MPa), zie de typische sondering in figuur 2.

In tabel 2 zijn de rekenwaarden van de paalbelastingen weergegeven en de daarbij behorende paalpuntniveaus voor de steunpunten 5 en 11. Bij deze steunpunten zijn de controlesonderingen uitgevoerd en dus voor de lezer van dit artikel het meest interessant. De overige waterpijlers met de nummers 4 en 7 t/m 10 vertonen veel gelijkenis.

Daar de palen in de poer behoorlijke kopmomenten zullen moeten kunnen opnemen bij aanvaring, zijn stalen ringen en kopwapening in de paalkop opgenomen. Om de kwaliteit van het beton in de kop te waarborgen is er voor gekozen de palen binnenin te ontdoen van organisch materiaal tot op de pleistocene zandlaag op ca. NAP -7m. Bijkomend voordeel is dat, met het verwijderen van de cohesieve samendrukbare toplagen, het beton het onderliggende zand in de palen opsluit en daarmee plugwerking gegarandeerd is. Het zakkingsgedrag van de palen kan daarbij overigens wel nadelig worden beïnvloed door de nog aanwezige dieper gelegen kleilaag in de paal.



Figuur 2 - Initiële sondering 11-DKM-RAM-35.



Figuur 3 - Pluggende of niet pluggende open stalen buispaal.

Tabel 2 - Belasting en paalpuntniveaus steunpunt 5 en 11 (Waterpijlers) met open stalen buispalen

Palen	Paalkopniveau [m tov NAP]	Paalpuntniveau [m tov NAP]	$F_{s,rep}$ [kN]	$F_{s,d}$ [kN]
5 (Ramsdiep) osb $\varnothing 1620-22$ mm	+0,2	-23,5	6500	8500
11 (Ramsgeul) osb $\varnothing 1620-22$ mm	+0,2	-22,5	6500	8500

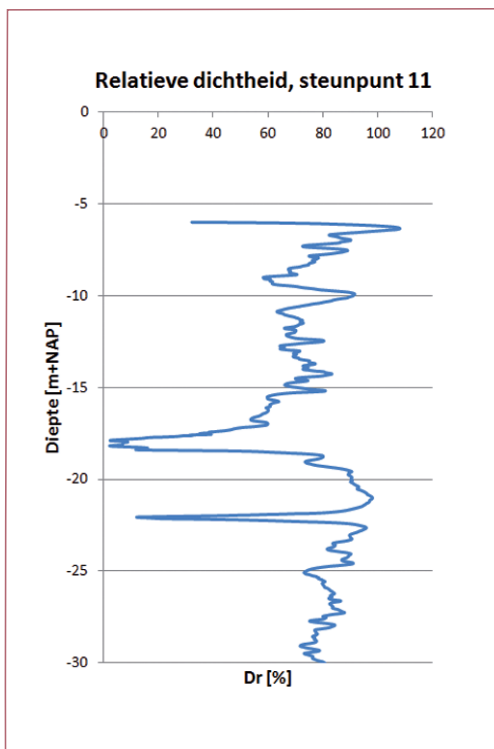
CUR 2001-8

CUR 2001-8 geeft een ontwerpmethodologie voor de bepaling van het draagvermogen van open stalen buispalen. Voor een efficiënt ontwerp is plugwerking in de palen noodzakelijk en over het al dan niet optreden daarvan geeft de richtlijn helaas geen uitsluitsel. Men stelt: "The mechanism of plugging is not yet well known". In theorie dient voor plugwerking de inwendig wrijving groter te zijn dan de puntweerstand van de plug, oftewel $Q_{f,i} \geq Q_{eb}$, zie figuur 3. Dit is in feite ook de benadering zoals gesteld in NEN-EN 9997-1 en de internationale (offshore) norm API RP2A: een fysieke grondplug kan alleen ontstaan als de binnenwrijving zo groot is dat er nagenoeg geen verschil in vervorming is tussen de paal en de grond binnen

de paal. Het enige verschil tussen de normen c.q. richtlijnen is de methode waarop de puntweerstand en de buiten- c.q. binnenwrijving wordt berekend.

De ontwerpformules in CUR 2001-8 zijn gebaseerd op een aantal proeven, met name het Euripides project (1995), en derhalve zijn de ontwerpregels geldig binnen de bandbreedte van deze proeven, te weten:

- paal diameter tussen 0,25 m en 3,00 m
- verhouding tussen de lengte en diameter (L/D) van 5 tot 80
- verhouding tussen de wanddikte en de diameter van $(t/D) > 1/60$
- zandige omstandigheden: silica zand met relatieve dichtheden van 10% tot 100%.



Figuur 4 – Verloop relatieve dichtheid met de diepte voor inbrengen palen (11-DKM-RAM-35).

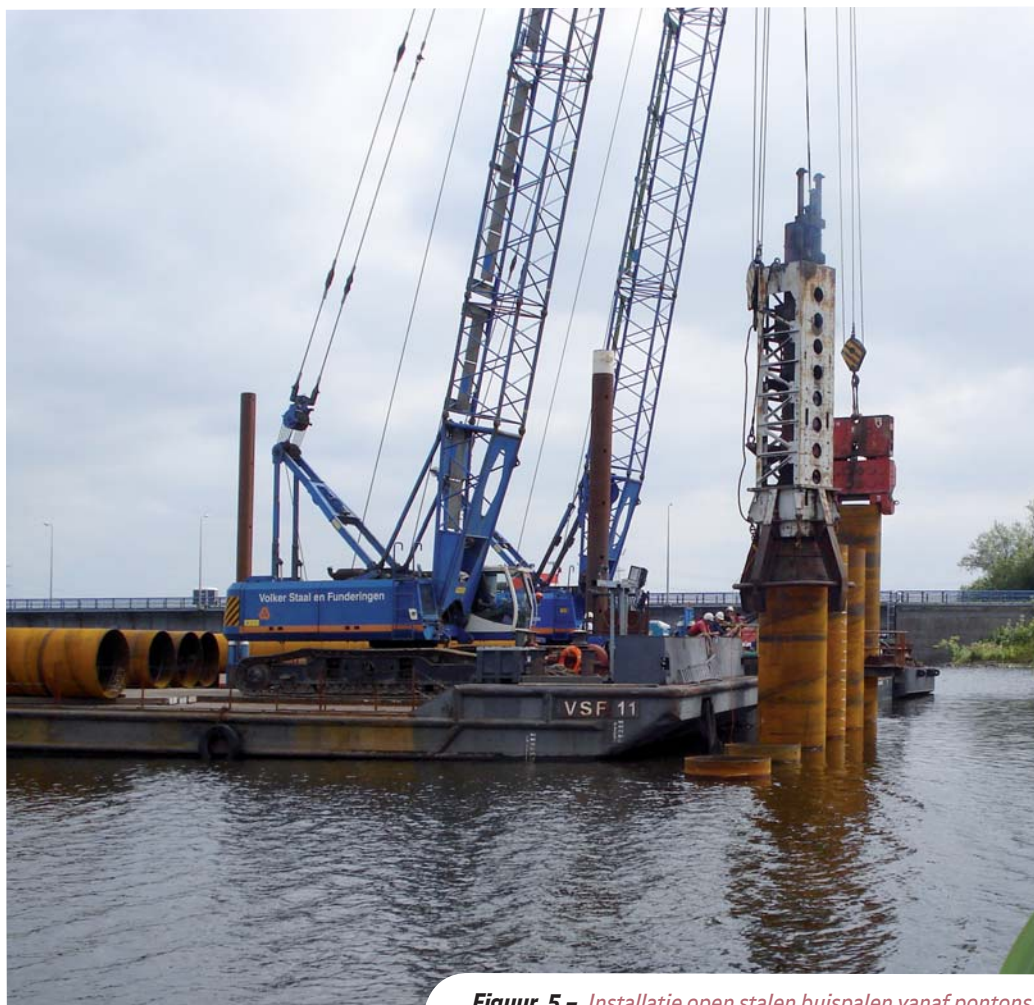
Strikt genomen zou bij de hier gekozen t/D verhouding de CUR 2008-1 niet toegepast kunnen worden. In de praktijk, zoals ervaren bij een aantal projecten, wordt deze grens vaak ‘opgerekt’ tot een waarde van 1/90, zo ook in dit geval.

Een vaste regel voor plugwerking is niet voorhanden, maar het CUR rapport stelt dat een open stalen buispaal zal pluggen wanneer de indringing in een zandpakket, door middel van heien, groter is dan 4 à 8D. Daarnaast heeft de installatiemethode uiteraard een grote invloed. Het CUR rapport stelt “For this report only piles that are installed by soil displacement techniques (mainly driven piles) are taken into consideration”. Aangezien de proefbelastingen zijn uitgevoerd voor geheide palen worden andere methoden, waarbij wellicht ook opspanning optreedt (dus mogelijk intrillen) buiten beschouwing gelaten. En daar zit ook gelijk het probleem, de richtlijn geeft een aantal randvoorwaarden die te maken hebben met de omstandigheden ten tijde van de proef, maar deze behoeven in werkelijkheid geen harde rand-

voorwaarden te zijn. Zie daar de uitdaging voor de geotechnisch adviseur.

Aanleiding tot controlesonderingen: “Heien of trillen?”

Binnen het Infrateam N50 Ramspol heeft, mede op aangeven van de uitvoerende aannemer Volker Staal en Funderingen (VSF), een discussie plaatsgevonden over het trillend dan wel heidend inbrengen van de buispalen. Binnen de ontwerpfdeling bestond in eerste instantie de gedachte dat het draagvermogen slechts kon worden gewaarborgd bij volledig inheien, ten minste in het gebied waarbij positieve kleef wordt ontwikkeld. Vanuit de API-RP2A [III] kan die gedachte worden onderstreept. Los van de niet geheel vergelijkbare grondopbouw wijst ook het artikel van Jacobse en Van Dalen [I] op die zienswijze: de opspanning bij open stalen buispalen in Nederlandse zanden lijkt over het algemeen groter bij inheien dan bij intrillen. Duits onderzoek [VI] toont echter aan dat er weinig verschil is te ontdekken in draagkracht tussen geheide dan wel getrilde open stalen buispalen. Dit laatste onderzoek is gedaan op dicht tot zeer dicht gepakte, matig fijn tot grove zanden. Ook VSF beschikte over positieve ervaringen hierin.



Figuur 5 – Installatie open stalen buispalen vanaf pontons.

Zeker bij reeds goed verdichte zanden ($D_r > 60$ à 70%) was binnen het ontwerpteam op basis van eerdere ervaringen de verwachting dat de conusweerstand zouden kunnen worden gereduceerd door het intrillen en dat beter geheid zou kunnen worden. Onder deze grens zou juist trillen voor verdichting en daarmee opspanning binnen de buis kunnen zorgen.

Genoeg reden om de relatieve dichtheid van de hier aanwezige zanden in acht te nemen. Deze kan worden afgeschat op basis van de conusweerstand met behulp van een aantal methoden. In dit geval is gekozen voor de methode Jamiolkowski, conform:

$$D_r = \frac{1}{c_2} \ln \left(\frac{q_c}{c_0 \cdot \sigma_m^{c_1}} \right)$$

Met:

q_c = conusweerstand

σ'_m = gemiddelde korrelspanning, $(\sigma'_v + 2 \cdot \sigma'_h) / 3$

c_0, c_1, c_2 = empirisch bepaalde constanten

Deze methode geeft over het algemeen gemiddelde waarden in vergelijking met de methodes van Baldi (ondergrens) en Lunne (bovengrens). Figuur 4 geeft bijvoorbeeld op basis van sondering 11-DKM-RAM-35 het verloop van de initiële relatieve dichtheid als functie van de diepte.

De relatieve dichtheid van de bovenste zandlaag (tussen NAP – 5 en – 17m) en de diepere zandlaag

is hoog en over het algemeen boven de hieronder genoemde grenswaarde van 60 à 70%. Op basis van bovenstaande beschouwing zou het intrillen van open stalen buispalen tot een mogelijke reductie van de conusweerstand (en dus de draagkracht) kunnen leiden.

Aangezien er uitvoeringstechnisch een zware voorkeur was (met name gedreven door productiesnelheid) voor het grotendeels intrillen van de palen, is gekozen voor intrillen tot een niveau van NAP - 17 m en vervolgens doorheien tot de einddiepte (laatste 4 à 6 m). In aansluiting op CUR 2001-8 is er dus geheid over de laatste meters waar de plug zich dient te vormen.

De uitvoeringsmethode is gekozen op voorwaarde dat er bij de palen voor de waterpijlers 5 en 11 respectievelijk 4 en 5 stuks controlesonderingen zouden worden uitgevoerd, en dat er een fall back scenario aanwezig was (palen langer uitvoeren) bij tegenvallende resultaten. Met name bij waterpijler 5 is de plugwerking kritisch omdat het kunnen openen en sluiten van een klep van de basculebrug een hoge mate van plaatsvastheid vereist. Het budget en de uitvoeringsplanning liet helaas geen proefbelastingen toe.

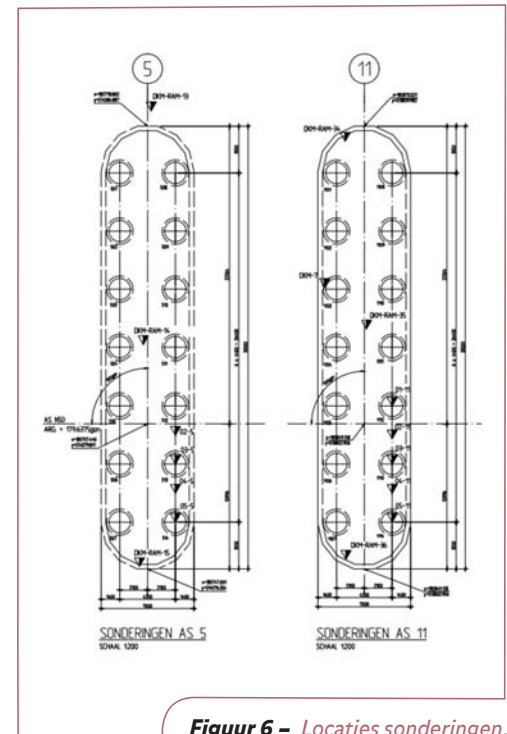
Uitvoering en monitoring

VSF heeft in opdracht van het Infrateam N50 Ramspol de open stalen buispalen geïnstalleerd vanaf haar heipontons op het water. De bovenste delen van palen zijn zoals reeds vermeld ingetrild.

Dit "voorpoten" met een hoogfrequent trilblok is met zo'n 30 minuten per paal voortvarend verlopen. Ten behoeve van het bevorderen van de plugwerking is bij de laatste meters overgegaan op heien, vanaf NAP -17m en NAP -18m bij de pijlers 5 en 11 respectievelijk. Doorgaans is direct of in de dagen na het trillen aangevangen met heien. Hierbij is gebruik gemaakt van een dieselheiblok in een opsteekmakelaar van het type Delmag D-62/22 met een maximale slagenergie van 224.000 Nm.

Voor de beoordeling van de opspanning van het zand in de palen en om een voorspelling te kunnen doen over het al dan niet optreden van plugwerking zijn bij de palen voor de waterpijlers 5 en 11 respectievelijk 4 en 5 stuks controlesonderingen uitgevoerd door Geo-Supporting. De controlesonderingen zijn zowel in als tussen de buispalen uitgevoerd, zie figuur 6, enige tijd na uitvoering van het heiwerk. Tussen de heiwerkzaamheden en uitvoering van de controlesonderingen zijn bij waterpijler 5 zo'n 6 weken verstreken en bij waterpijler 11 slechts 1 week.

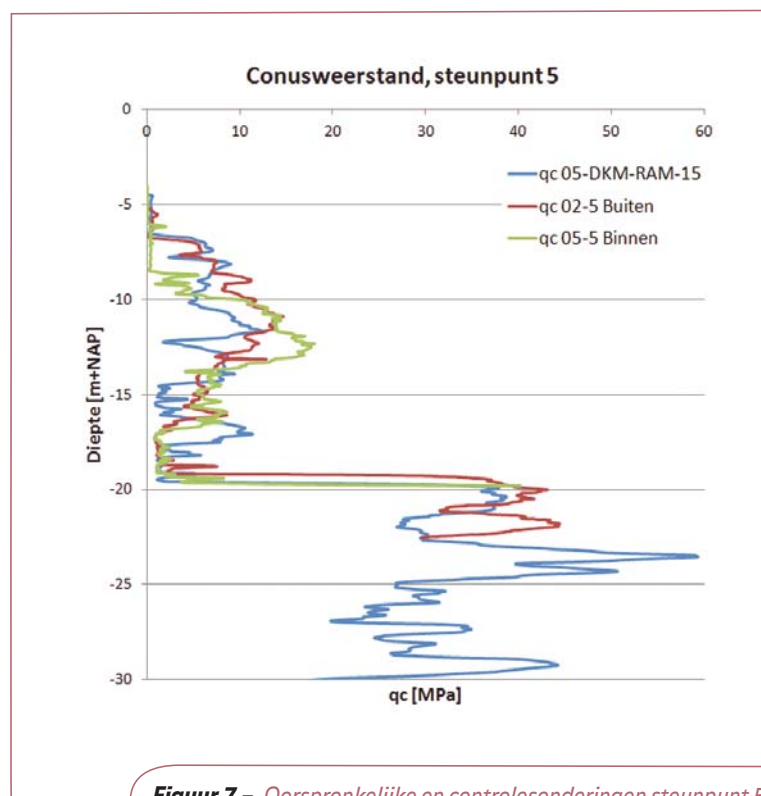
In vergelijking met de oorspronkelijke sonderingen voor aanvang van de paalinstallaties zijn bij de controlesonderingen over het algemeen hogere conusweerstand gemeten. Zie figuur 7 en 8 voor vergelijkingen bij pijler 5 en 11 van initiële sonderingen met controlesonderingen, binnenin een paal en buiten de palen gemaakt. Goed zicht-



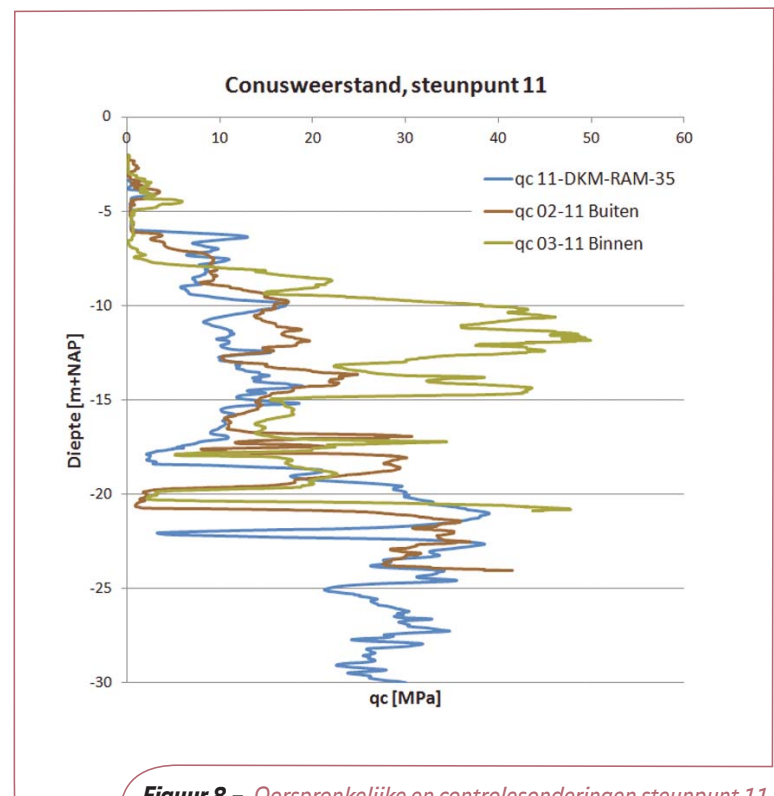
Figuur 6 – Locaties sonderingen.

baar is daarin ook dat de bovenkant van het eerste zandpakket ruim een meter in de palen is verlaagd ten gevolge van de paalinstallatie.

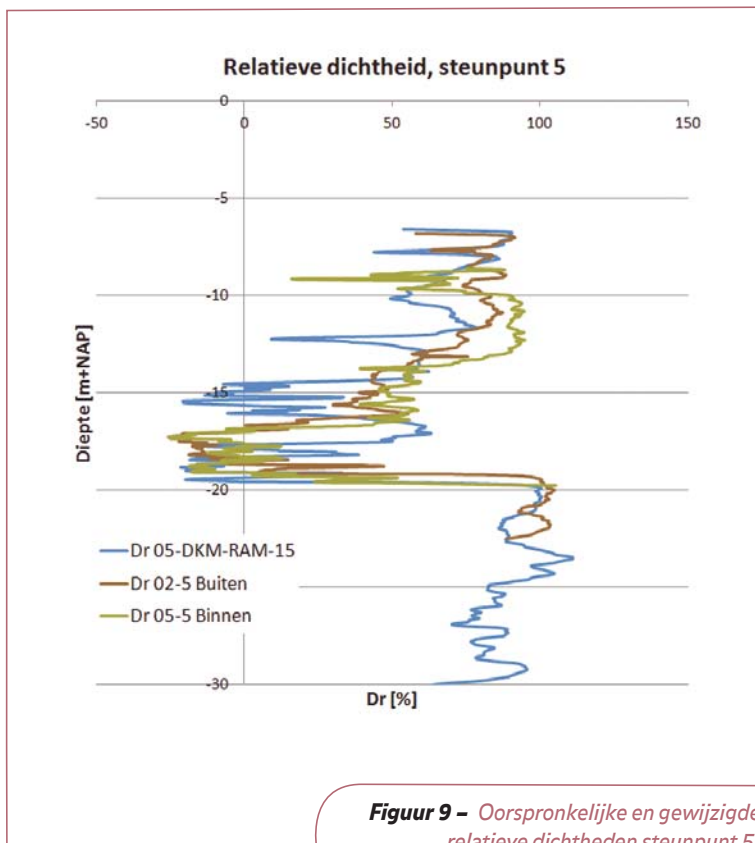
Bij pijler 5 zijn in het ondiepe zandpakket in én buiten de buispalen de conusweerstand gemid-



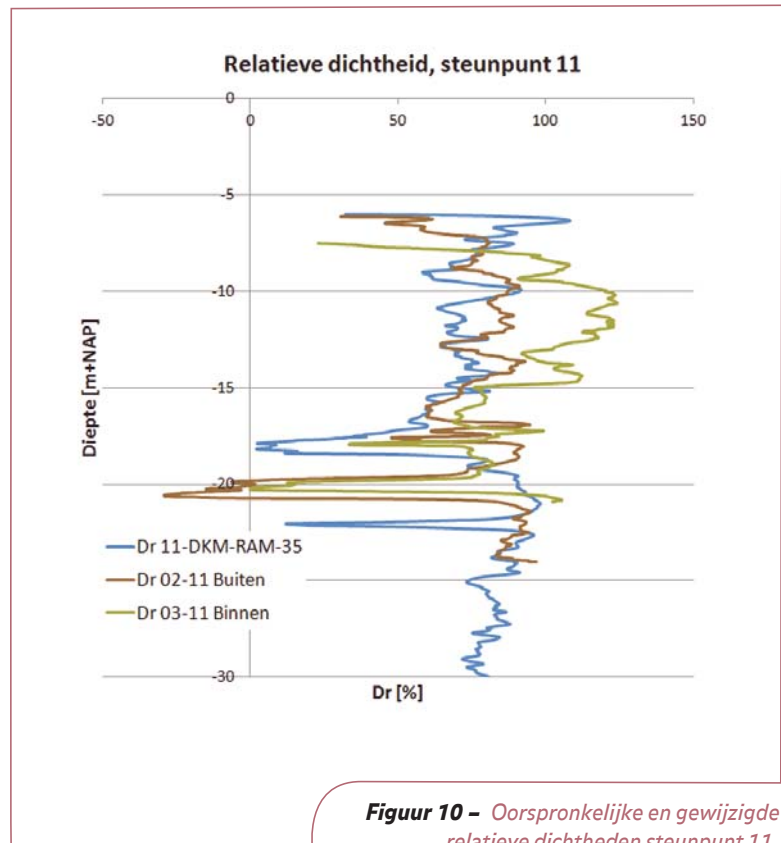
Figuur 7 – Oorspronkelijke en controlesonderingen steunpunt 5.



Figuur 8 – Oorspronkelijke en controlesonderingen steunpunt 11.



Figuur 9 – Oorspronkelijke en gewijzigde relatieve dichtheden steunpunt 5.



Figuur 10 – Oorspronkelijke en gewijzigde relatieve dichtheden steunpunt 11.

deld met ca. 5 MPa (ca. +50%) toegenomen. In het zandige klei pakket rond NAP-17,5 m zijn de verschillen niet aanwezig of minder duidelijk. In het dieper gelegen zandpakket vanaf ca. NAP -19 m zijn de conusweerstand buiten de buizen ca. 3 MPa hoger.

Bij de sonderingen in de buizen, te weten 03-5 en 05-5, zijn hoge conusweerstand gemeten van 40 MPa en 55 MPa respectievelijk bij aanvang in het diepe zandpakket. Helaas zijn de sonderingen vrijwel direct gestaakt vanwege de te grote totaalweerstand. De waarden duiden op mogelijke toenames van de conusweerstand ten opzichte van de oorspronkelijke sonderingen met conusweerstand van ca. 40 MPa in het diepe zandpakket.

Ook bij de controlesonderingen voor pijler 11 zijn hogere conusweerstand gemeten in vergelijking met de initieel gemaakte sonderingen, zie figuur 8. Met name de toenames in het ondiepe zandpakket, gemeten in de buispalen, zijn spectaculair. De metingen laten toename zien van ca. 12 MPa tot 40 MPa (ca. +300%). Hierbij zijn twee van drie sonderingen in de buizen gestaakt. In de diepe kleilaag zijn ook hier de verschillen beperkt. Afgezien van de teruggang die op een ander niveau wordt aangetroffen, zijn buiten de palen vanaf ca. NAP-20 m in het diepe vaste zandpakket de verschillen klein. In de palen heeft men enkel

sondering 03-11 weten te drukken tot NAP-21 m en hierbij liep de conusweerstand op tot 48 MPa; minimaal 10 MPa hoger (ca. +20%) dan bij de oorspronkelijke sonderingen rond dat niveau.

In aanvullingen op de vergelijkingen van de conusweerstand worden in figuur 9 en figuur 10 vergelijkingen gegeven van de relatieve dichtheden voor de twee steunpunten. Dit op basis van de initiële sonderingen en de controlesonderingen binnenin en buiten de palen. Met name opvallend en goed zichtbaar is de toename van de relatieve dichtheid in het ondiepe zandpakket, waarbij de grootste toenames zich in de palen voordoen. Door dit zandpakket is de paal getrild.

Gedurende de uitvoering van de brug zijn ook verplaatsingen van de pijlers nauwkeurig gemeten. Dit is gedaan na belangrijke fasen zoals het storten van de poeren en kolommen, het plaatsen van liggers en het afwerken van schampkanten. De verticale verplaatsingen die aan het einde van de bouw fase zijn gemeten zijn niet groter dan 10 mm. De bijbehorende representatieve belasting ten gevolge van het eigen gewicht van de brug bedraagt ca. 4500 kN per paal ($F_{s;v;rep;2}$).

Conclusie metingen

De controlesonderingen hebben aanzienlijke toenames van de conusweerstand en relatieve

dichtheden in de buispalen laten zien, met name over de getrilde delen en in zekere mate over de geheide trajecten. Helaas is men er niet in geslaagd alle sonderingen tot de paalpuntniveau door te zetten, maar de gemeten waarden zijn met name in de ondiepe zandlagen hoog. Er is duidelijke sprake van opspanning in deze lagen in de buispalen.

De gemeten verticale verplaatsingen van $w_{gemeten} < 10$ mm zijn kleiner dan de bij het project conservatief berekende vervormingen van $w_d = 25$ mm. De paalfunderingen voordoen daarmee ruimschoots aan de verwachtingen.

De verschillende meetresultaten geven vertrouwen in het ontwerp van de steunpunten op open stalen buispalen. Verwacht wordt dat plugwerking optreedt tijdens de gebruiksfase en dat de nieuwe Ramspolbrug derhalve van een solide fundatie is voorzien.

Het vertrouwen wordt vergroot door het zwaardere heiwerk dat nodig is geweest bij pijler 8. Tussen het intrillen en het heiwerk nadien is er, in tegenstelling tot de overige pijlers, een rustperiode van 1 à 2 weken geweest. Mogelijk verbetert het draagvermogen met de tijd, hetgeen vermoedelijk te wijten is aan een terugloop van wateroverspanningen tijdens het inbrengen.

Discussie

In dit artikel is ingegaan op de effecten van het heidend dan wel trillend inbrengen van open stalen buispaalen. De effecten zijn gemeten door het nasonderen in palen en direct naast palen.

Bij de proef zoals beschreven in [I] is ervaren dat trillen in alle gevallen tot ongunstigere conusweerstanden leidt dan heien. Vooraf was dit ook de inschatting van het ontwerpteam van de Ramspolbrug. Dit resultaat is bij de Ramspolbrug echter duidelijk niet gevonden, waarbij wel gezegd dient te worden dat alle beproefde palen over enige meters zijn nageheid. Er is geen vergelijking gemaakt tussen een volledig geheide paal met een volledig getrilde paal. Niettemin is een duidelijk resultaat hier dat trillen ook juist gunstige resultaten kan bewerkstelligen; er is sprake van hogere conusweerstanden en opspanning en derhalve van hogere draagvermogens. Over de opspanning bij de punt onder invloed van trillen is helaas weinig uitspraak te doen.

De oorspronkelijke hypothese dat trillen alleen gunstig zou zijn bij lage relatieve dichtheden ($D_r < 60$ à 70%), is gezien de verdichting die met name

in de tussenzandlaag is opgetreden, klaarblijkelijk niet in alle omstandigheden geldig.

Tevens kan nog een kanttekening geplaatst worden bij het gebruik van CUR 2001-8: de daar aangegeven randvoorwaarden, zoals het heidend inbrengen van open stalen buispaalen, zijn meer ingegeven door de omstandigheden bij de proeven die ten grondslag liggen aan de publicatie dan dat het harde eisen zijn. Enige nuance bij het gebruik van de richtlijn lijkt daarmee op zijn plaats.

Tenslotte wordt door de auteurs opgemerkt dat zij een selectie van de beschikbare sonderingen hebben gemaakt. Daarbij is getracht een eenvoudig en helder beeld te schetsen. Bij deze doen de auteurs een oproep om, bijvoorbeeld op de website www.vakbladgeotechniek.nl ervaringen te delen en een discussie te starten over dit zeer interessante en in Nederland nog tamelijk onderbelichte onderwerp.

Referenties

[I] "Effect installatiemethode van open stalen buispaalen op de conusweerstand", Ir. J.A. Jacobse en Ir. J.H. van Dalen, van de Geotechniek,

januari 2013

[II] "EURIPIDES, Load Tests on Large Driven Piles in Dense Silica Sands", H.M. Zuidberg, Fugro Engineers B.V. and P. Vergobbi, Geodia S.A., Offshore Technology Conference, 1996, Houston, Texas

[III] API RP2A: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms", American Petroleum Institute, 21st edition, 2000

[IV] NEN-EN 9997-1: Eurocode 7-1, geotechnische ontwerp deel 1: algemene regels (NEN-EN 1997-1), incl. nationale bijlage (NEN-EN 1997-1/NB) en aanvullende bepalingen (NEN 9097-1);

[V] "Bearing capacity of open piles", CUR rapport 2001-8, CURNET, 2001

[VI] "Über die Tragfähigkeit von eingerüttelten Pfählen"; Prof. Dr.-Ing. Werner Richwien, Dipl.-Ing. Patrick Lammertz, Universität Duisburg – Essen. ●

Volker InfraDesign



een **VolkerWessels** onderneming

Ontwerp jij mee aan de mobiliteit van morgen?



++ SAA A1-A6 ++ A9 Badhoevedorp ++ OV-Saal West ++ Julianasluis Gouda ++ A4 Delft-Schiedam ++ N31 Leeuwarden ++

Wij zoeken een:

Specialist geotechniek

Minimaal 5 à 7 jaar ervaring

Interesse?

www.volkerinfra.com
gvanbommel@vhbinfra.nl

- Integraal ontwerpbureau binnen een dynamische aannemer
- Ambitieuze projecten
- Nationaal en internationaal
- Ruimte voor groei en ontwikkeling