

# Van Mini- tot Giga-palen



**Ir. P. Middendorp**  
Allnamics Pile Testing  
Experts BV



**Ir. R. van Dorp**  
Allnamics Geotechnical  
Experts BV



**Figuur 1** – Intrillen buispaal (22 m diameter) met Octakong.



**Figuur 2** – Intrillen monopile voor windmolen met Super Quad Kong.

## Inleiding

Het thema 'Funderingen in Beweging' is voor Allnamics in de korte periode van haar bestaan sinds 2010, zowel letterlijk als figuurlijk de praktijk geweest voor meerdere nationale en internationale projecten op het gebied van Mini- tot Giga-palen.

Hierbij kan zeker niet gesproken worden van een schisma tussen adviseur, toeleverancier en bouwer. Integendeel: in alle gevallen was er juist sprake van een intensieve samenwerking, waarbij de combinatie van specifieke kennis en kunde, ervaring en durf, ondernemerschap en, op de vraag van de praktijk gerichte, ontwikkelingen, hebben geleid tot succesvolle projecten en producten. Een aantal van deze projecten en ontwikkelingen zullen in dit artikel worden behandeld.

## Hong Kong-Zhuhai-Macau Brug, China

De bouw van de Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge bestaat uit een serie bruggen en tunnels die deze drie belangrijke steden gelegen in de Pearl River Delta zullen gaan verbinden. Gezien het bereik van het project zal het zeker een van de meest prestigieuze objecten en bezienswaardigheden van Zuid China worden.

De langste brugsectie heeft een lengte van

22,8 km en bevat drie kabelbruggen met overspanningen van 280 m tot 460 m. De bouw is 2009 begonnen en het project zal in 2016 worden voltooid.

Om containerschepen van en naar de Zuid Chinese Zee ongehinderd te kunnen laten passeren, wordt er tussen de bruggedeelten een tunnel sectie van 6,75 km ingebouwd. De overgangen van brug naar tunnel en van tunnel naar brug zullen worden gerealiseerd op kunstmatig aangelegde eilanden. Ieder eiland bestaat uit een ovaalvormige, met zand gevulde kofferdam, ieder met 60 cellen, bestaande uit buispalen (caissons) met een diameter van 22 m. De buispalen zijn onderling verbonden door stalen vleugels met een diameter van 11 m. De wanddikte van de stalen beplating van de buizen was 12 tot 14 mm en aan de binnenkant is voor de vormvastheid een raamwerk van stalen versterkingsribben aangebracht. Deze technologie is van Japanse oorsprong.

November 2010 trokken de bedrijven APE (USA), Ape-Holland, Ape-China en Allnamics gezamenlijk op om de Chinese aannemer First Harbor Marine Group ervan te overtuigen, dat een constructie bestaande uit aaneengeschakelde trilblokken in staat zou zijn om de 49 m lange buispalen, met een

diameter van 22 m en een massa van 600 ton ieder, 25 m in de bodem van de Zuid Chinese Zee te trillen. De bodem bestond uit klei- en zandlagen met SPT-waarden tussen de 8 en 40.

Ape-USA en Ape-China waren in staat deze trilblokken te vervaardigen en de logistiek te verzorgen, Ape-Holland had specifieke uitvoeringstechnische kennis en ervaring met intrillen en de haalbaarheid werd verzorgd door Allnamics met intrilstudies, gebaseerd op met partners ontwikkelde software (Allnamics-PDP). Deze software is gebaseerd op de methode van karakteristieken voor de voorplanting van spanningsgolven in palen, een van oorsprong Nederlandse vinding van omstreeks 1970, komende van de HBG [1]. Voor het modeleren van de reductie in sterkte van de grond tijdens het intrillen is gebruik gemaakt van een aangepaste Beta-Methode [2],[3].

Op 5 mei, 2011 werd de eerste buispaal (figuur 1) geheel in overeenstemming met de predicties in 7,5 minuten met de APE "Octakong" 25 m de zeebodem ingetrild. Op sommige dagen was men in staat 3 van dergelijke buizen in één dag in te trillen. Op 8 december 2011, minder dan 7 maanden na de start, werd de laatste van de 120 palen tot eindpenetratie ingetrild. Daarmee lag het project, met dank aan deze grensverleggende werkwijze, meer dan 5 maanden voor op de overall-planning. In het begin van zijn carrière was één van de auteurs betrokken bij de aanleg van het eiland de Roggeplaat van de Oosterscheldekering. De vraag rijst wat de consequenties in tijd en geld hadden kunnen zijn, indien de hierboven besproken technieken voor het intrillen van zeer grote buispalen destijds beschikbaar zouden zijn geweest. Beantwoording van die vraag is echter alleen maar interessant indien Nederlandse ontwerpers, toeleveranciers en bouwers over dezelfde durf beschikken als de Chinezen voor dit project hebben getoond.

## Riff-Gat Wind Park Project, Duitsland

Geïnspireerd door het hierboven besproken succes met het intrillen van grote buispalen bij het Hong Kong-Zhuhai-Macau brug project, koos

## Samenvatting

De combinatie van specifieke kennis en kunde, ervaring en durf, ondernemerschap en, op de vraag van de praktijk gerichte ontwikkelingen, leiden tot succesvolle projecten en producten. Het artikel beschrijft een aantal van deze nationale en internationale projecten en producten voor het installeren en testen van palen - van Mini - tot Giga - waar de auteurs de afgelopen 2 jaar als adviseur bij betrokken zijn geweest. Bij de mini-palen wordt ingegaan op het beoordelen van bestaande funderingen en funderingsherstel. De Giga-palen zijn gerelateerd aan

het uitvoeren van intrilpredictees voor stalen buispalen met een diameter van 22 m voor een project in China, het intrillen van zeer grote monopiles voor offshore windmolens in Duitsland en het testen van een offshore boorpaal met een snelle proefbelasting tot 65 MN in Maleisië. Voor de tussenliggende paalafmetingen wordt ingegaan op de ontwikkeling van een nieuw apparaat voor het uitvoeren van snelle proefbelastingen, en van nieuw ontwikkelde meetapparatuur voor het testen van palen met gebruikmaking van Wi-Fi signaaloverdracht.

aannemer Seaway Heavy Lifting voor de optie om de enorme buispalen voor windmolens voor het Riffgat Wind Park project te gaan intrillen. Het Riffgat Wind Park project ligt op de Noordzee nabij het Duitse eiland Borkum en omvat de installatie van 30 stalen buispalen (monopiles) waarop 30 windmolens zullen worden geplaatst.

De palen hebben een massa tussen de 480 en 720 ton, een lengte tussen 53 m en 70 m en een diameter die verloopt van 4,7 m aan de paalkop naar 5,7 à 6,5 m aan de paalvoet. Het contract voor de vervaardiging en levering van het modulair opgebouwde trilblok is toegekend aan Ape-Holland. Op basis van door Allnamics uitgevoerde intrilpredictees en het daarbij naar voren komend benodigd vermogen is een gekoppeld trilblok systeem ontwikkeld, de Super Quad Kong (SQK).

Met de keuze voor een trilbloksysteem door Seaway Heavy Lifting kon aan strikte Duitse normen voor geluidshinder en trillingen worden voldaan. Het gebruik maken van traditionele technieken gebaseerd op standaard heihammers zou resulteren in geluidsniveaus, die niet acceptabel worden geacht voor het mariene leven. Andere belangrijke voordelen waren het eenvoudiger plaatsen van de palen en het beter kunnen beheersen en corrigeren van plaats- en hellingsafwijkingen, eventueel door desnoods een paal te herpositioneren.

Na het intrillen van de eerste monopile (figuur 2) op een locatie met vooral een zandige ondergrond was het direct duidelijk dat het beschikbare vermogen ruim voldoende was om de paal in te trillen. Slechts 50% van het beschikbare vermogen was nodig om de paal tot 31 m in te trillen. Op een aantal locaties waren echter ook potklei lagen aanwezig en daar was het volle vermogen nodig om de palen tot een stabiele positie te kunnen intrillen. Op de mogelijke kritieke locaties is voorafgaande aan de installatie van de monopalen een testpaal van geringere afmetingen (diameter 1220 mm, wanddikte 34 mm, lengte 49 m) ingetrild. Deze testpaal was aan de paalkop geïnstrumenteerd met rek- en versnellingsopnemers, waarmee belangrijke intrilparameters konden worden afgeleid

(Vibratory Driving Analysis, VDA). Deze resultaten konden weer worden gebruikt voor het verbeteren van de nauwkeurigheid van de intrilpredictees voor de productiepalen.

Omdat de eigenaar van het Windpark een indicatie wilde van het draagvermogen gebaseerd op eerdere hei-ervaringen en zich zorgen maakte over mogelijk verminderd draagvermogen door het intrillen, moest de laatste 10 m penetratie met een IHCS1800 hydrohammer worden geheid. De door Allnamics uitgevoerde intril- en heipredictees toonden al aan dat dit een conservatieve benadering was, wat werd bevestigd door een aanvangskalender van 100 klappen/25 cm bij een energieafgifte van 1200 kJ hetgeen wees op een goed draagvermogen na trillen. Verder is voor de monopiles vooral het laterale draagvermogen van belang en men kan zich afvragen wat een heikalender in axiale richting daarover zegt. Het is in ieder geval bepaald niet gebruikelijk om stalen damwanden voor een bouwkuip om die reden over het laatste deel te heien.

Trillen wordt ook gebruikt voor verdichten van grond (o.a. diepte verdichting). Het is de mening van de auteurs, dat mocht intrillen het lateraal draagvermogen aantasten, er met een juist intril protocol, een periode van trillen onder de 1 g met een paal op eindpenetratie, zou kunnen leiden tot een herstel/verbetering van het axiaal en lateraal draagvermogen.



Figuur 3 – Installatie van 'mini'-palen voor het toevoegen van draagvermogen.

## Beoordelen Bestaande funderingen en advisering herstel

Het behoeft geen toelichting, dat de hierboven besproken megapalen zich niet in een krappe binnenstad laten toepassen, laat staan aanbrengen onder een bestaande constructie.

Hoewel op eerste gezicht minder spectaculair, zijn ook voor het beoordelen van bestaande funderingen en funderingsherstel (met mini-palen) interessante, innovatieve en economische methodes beschikbaar.

In de eerste plaats door nut en noodzaak van het aanbrengen van nieuw of vervangend draagvermogen zorgvuldig te beoordelen; liefst aan de hand van het enige tijd geleden daarvoor landelijk vastgestelde protocol: uitvoering van lintvoeg- en vloerwaterpassingen, archiefonderzoek naar relevante bouw- en funderingstekeningen, analyse van het zettingsgedrag aan de hand van nauwkeurige herhalingswaterpassingen van meetboutjes (indien beschikbaar), onderzoek naar bodemopbouw en waterhuishouding aan de hand van beschikbare sonderingen en peilbuisregistraties en -voor zover nog nodig – het graven van een inspectieput om de bestaande fundering bloot te leggen voor onderzoek. Dit zal in de eerste plaats bestaan uit inspectie en monsternamen voor laboratoriumonderzoek, maar kan ook uitvoering van proefbelastingen behelzen.



**Figuur 4** – StatRapid apparaat voor snelle proefbelastingen.



**Figuur 5** – PDR – ‘multi-purpose’ meetapparaat met Wi-Fi signaal overdracht.

In gevallen, waarin het op basis van dit onderzoek noodzakelijk wordt geacht om nieuw of aanvullend draagvermogen aan te brengen, worden traditioneel inwendig geheide stalen buispalen aangebracht. Toenemende beperkingen ten aanzien van trillingshinder en de wens om ook op slecht bereikbare locaties draagvermogen te kunnen plaatsen, hebben in dit werkveld de laatste jaren een kenmerkende ontwikkeling op gang gebracht naar trillingsvrije technieken, waarmee men er in slaagt om steeds grotere draagvermogens te realiseren met steeds kleiner materieel, dat via de voordeur een woning binnen kan. Voorbeelden hiervan zijn o.a. de schroefinjectiepaal en de Waal-

compactpaal, welke zijn gebaseerd op boortech- niken in combinatie met groutinjectie. Andere voorbeelden zijn palen die worden ingebracht met vijzeltechnieken waarbij veelal het pand wordt ge- bruikt als reactiemassa, zoals de Sobu-paal, de VDM-vijzelpaal en De Waal Perspaal (figuur 3). Dit laatste paalttype leent zich echter beter voor het aanbrengen van aanvullend draagvermogen, dan voor het realiseren van volledig vervangend draag- vermogen.

### Snelle proefbelastingen

Dynamisch proefbelasten (Dynamic Load testing, DLT) is gebaseerd op een kort durende belasting- puls (stoot), die wordt aangebracht met een val- blok of heihamer. De methode wordt vooral in het buitenland toegepast en is een snelle en economi- sche methode voor het testen van funderingspa- len. De resultaten van meerdere onderzoeks- programma’s tonen echter aan, dat er een grote mate van spreiding in de resultaten bestaat bij het testen van in de grond gevormde palen. De resul- taten blijken ook nog eens sterk afhankelijk blijken te zijn van de persoon die de metingen uitwerkt en rapporteert [4],[6]. Het is daarom eigenlijk niet mogelijk om bij in de grond gevormde palen de resultaten van dynamische proefbelastingen te kalibreren met statische proefbelasten, omdat daarvoor consistente resultaten van beide metho- des vereist zijn.

Bij snelle proefbelastingen (Rapid Load Testing, RLT) [7] is dit kalibreren wel mogelijk. In plaats van een korte puls (heiklap) wordt een langer durende puls (duw) aangebracht, zodanig dat de paal zich quasi statisch gedraagt en relatief eenvoudig als één-massa veersysteem kan worden gemodel- leerd. Dit levert eenduidige resultaten bij het uit- werken van de testen, niet in de laatste plaats omdat de belangrijkste grootheden (kracht en ver- plaatsing) bij RLT rechtstreeks worden gemeten, terwijl deze bij DLT op indirecte wijze uit de meet- resultaten worden berekend. Deze eenduidigheid in interpretatie methodiek en onafhankelijkheid van de rapporterende persoon was een belang- rijke eis bij het opstellen van de aanbevelingen in de CUR 230 richtlijn [8].

In antwoord op de te verwachten toenemende vraag naar snelle proefbelastingen, is het bedrijf Cape-Holland begonnen met het ontwerpen en produceren van apparaten voor uitvoering van snelle proefbelastingen, StatRapid (STR) geheten (figuur 4). Allnamics droeg bij met theoretische kennis en ervaring met de toepassing van snelle proefbelastingen, evenals met de ontwikkeling van meetapparatuur en software voor de uitvoe- ring en uitwerking van de metingen. Bij StatRapid wordt met drukdozen de kracht op de paalkop

gemeten, de versnelling met een versnellingsop- nemer en de verplaatsing met een optisch meet- systeem (Reyca). De signalen worden geregis- treerd met een door Allnamics ontwikkeld meet- systeem (PDR) (figuur 5) dat ook kan worden ge- bruikt voor andere toepassingen zoals heianalyse (Pile Driving Analysis, PDA), dynamisch proefbe- lasten (DLT) en intril analyse (Vibratory Driving Analysis, VDA) en waarmee de meetsignalen draadloos met Wi-Fi kunnen worden overgedragen.

StatRapid is gebaseerd op het laten vallen een valgewicht op een pakket van relatief zachte rub- beren veren, waardoor een gelijkmatig oplopende en afnemende belasting op de paal wordt uit- geoefend, welke ook qua tijdsduur voldoet aan de criteria die in CUR-230 worden gesteld.

Het als eerste gebouwde STR-8MN apparaat is vooral gericht op de Nederlandse, Belgische en Duitse markt en kan palen testen vanaf 0,2 MN tot 8 MN. In de zomer van 2012 zijn in Duitsland de eerste testen tot 5 MN succesvol uitgevoerd. De belangstelling uit het buitenland is groot en een STR-16MN apparaat gaat aan een bedrijf uit Sin- gapore worden geleverd. De STR-8MN bestaat uit een geleideframe, een modulair valgewicht (tot maximaal 40 ton), een modulair verenpakket, en een volledig hydraulisch systeem voor het verti- caal en stabiel opstellen van het apparaat en voor het heffen, loslaten en vangen van het valgewicht. Het vangmechanisme is ingebouwd om herhaald stuiten van het valgewicht te voorkomen.

Door te variëren in valhoogte kan met het STR-ap- paraat palen in meerdere (opbouwende) belas- tingstappen worden getest. Door het modulaire ontwerp kunnen de benodigde hoeveelheid massa en de samenstelling van het verenpakket per test locatie worden afgestemd op de maximaal aan te brengen paalbelasting, waarmee o.a. transport- en kraankosten tot een minimum kunnen worden beperkt.

### De Penang bridge, Maleisië

De 2de Penang Bridge is de nieuwe brug in aanleg tussen schiereiland Maleisië en het eiland Penang. De brug wordt aangelegd door de Chinese aanne- mer CHEC (China Harbour).

Om de in het ontwerp benodigde draagvermogens aan te tonen, zijn op verschillende paaltypes (sta- len buispalen, gecentrifugeerde betonnen buispalen (spun piles) en boorpalen) zowel statische proefbelastingen, als snelle proefbelastingen uit- gevoerd (Statnamic (STN)). De supervisie en rap- portage van deze testen is door Allnamics verzorgd. De resultaten van Statnamic zijn uitge- werkt volgens de CUR 230 richtlijn [8]. Bij een

snelle proefbelasting worden aan de paalkop de belasting, verplaatsing en versnelling gemeten. Volgens de richtlijn is een test een snelle proefbelasting als wordt voldaan aan de voorwaarde

$$10 < T_f / (L/c_p) \leq 1000$$

Waarin  $T_f$  de duur van de belasting,  $L$  de paallengte en  $c_p$  voortplantingssnelheid van de spanningsgolf in het paalmateriaal. Bij een aantal palen kon aan deze voorwaarde niet worden voldaan en kon niet worden volstaan met alleen maar meten aan de paalkop. Om dit te ondervangen, zijn in deze palen op een aantal niveaus herwinbare extensometers (Glostrext) [5] geplaatst om de rekken te meten, welke zijn omgerekend naar doorsnedekrachten. Op deze wijze kan de paal worden ingedeeld in segmenten, die ieder wel voldoen aan het criterium van snelle proefbelastingen.

De grootste geteste paal was een (offshore) boorpaal met een diameter van 2,3 m en een lengte van 125 m waarop een statnamische proefbelasting van 65 MN is uitgevoerd (figuur 6). De resultaten van het paaltestprogramma toonden aan dat aan de ontwerp criteria werd voldaan en dat de palen in staat waren de belastingen naar de draagkrachtige grondlagen over te dragen.

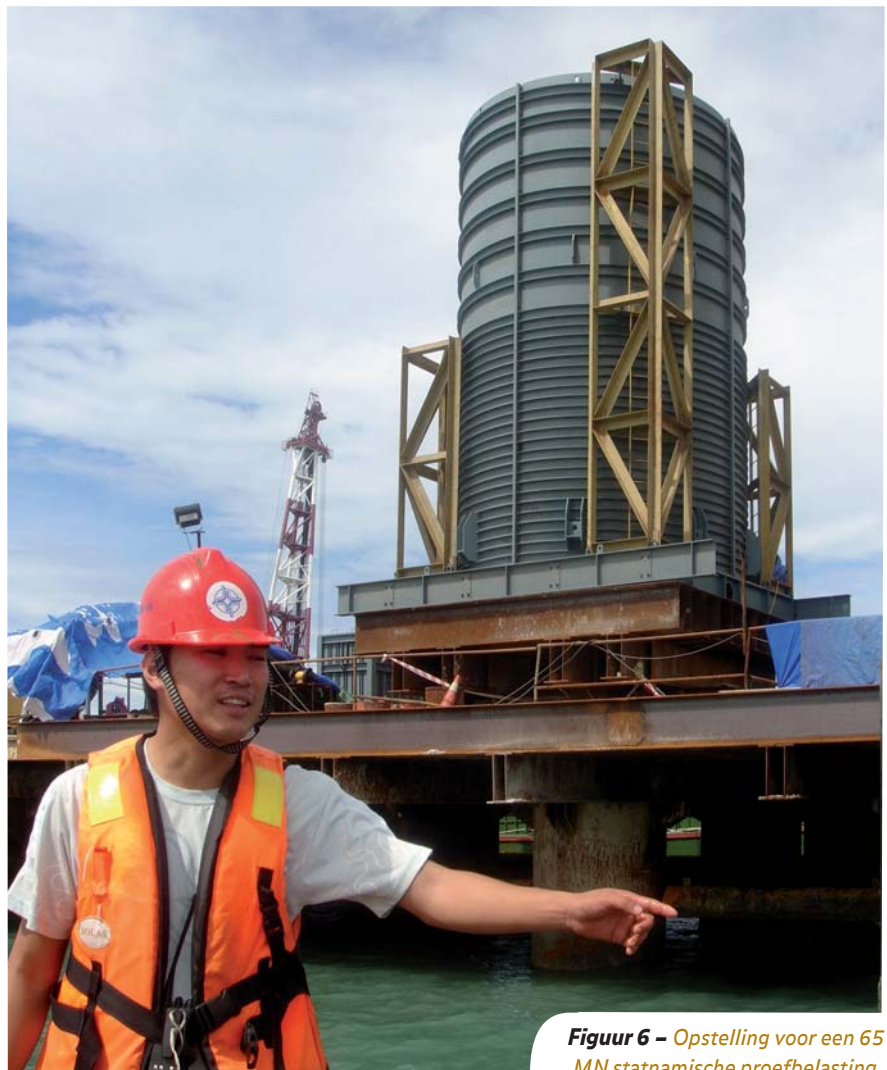
### Conclusies

1) De hierboven besproken projecten tonen aan dat een intensieve samenwerking tussen adviseur, toeleverancier en bouwer, waarbij specifieke kennis en kunde, ervaring en ontwikkelingen, ondernemerschap en durf worden gecombineerd en zich richt op de vragen uit de praktijk, leiden tot succesvolle projecten en producten.

2) De combinatie van Chinese durf, Amerikaans logistiek en productie talent op het gebied van trilblokken en de Nederlandse ervaring, theoretische kennis en kunde op het gebied van het intrillen van palen hebben geleid tot het succesvol installeren van de Megapalen van het Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge project.

3) Voor het beoordelen en met name het herstellen van (oude) paalfunderingen met o.a. minipalen zijn innovatieve, effectieve en economische technieken en methodes beschikbaar. Kenmerkend daarbij is de ontwikkeling, dat met steeds kleiner materieel in steeds kleinere ruimtes steeds grotere draagvermogens kunnen worden gerealiseerd.

4) In geëigende grondomstandigheden gaat de installatie van offshore palen met trilblokken sneller en met minder belasting van het milieu dan bij



**Figuur 6** – Opstelling voor een 65 MN statnamische proefbelasting.

geheide palen. Bij voldoende vermogen is het intrillen van palen tot zeer grote eindpenetratie in zand en klei mogelijk.

5) Nieuwe geavanceerde apparaten voor snelle proefbelastingen, meetsystemen met Wi-Fi signaal overdracht, predictie software en analyse methodes zijn beschikbaar om consistente en betrouwbare resultaten te leveren bij het testen en installeren van funderingspalen.

### Referenties

- [1] Voitus van Hamme, G.E.J.S.L., Jansz J.W. Bomer H., and Arentsen, D., 1974, *Hydroblok and Improved Pile Driving Analysis*. De Ingenieur, Vol 86, no 8. pp 344-352, The Netherlands.
- [2] Jonker, G. (1987). *Vibratory Pile Driving Hammers for Oil Installation and Soil Improvement Projects.*, Proc. of Nineteenth Annual Offshore Technology Conf., Dallas, Texas, OTC 5422,
- [3] Jonker, G., Middendorp, P. (1988). *Subsea installations using vibratory piling hammers*, 20th OTC, Houston, Texas.
- [4] Holeyman, A., Couvreur, J.M., et al (2001).

*Results of dynamic and kinetic pile load tests and outcome of an International prediction event; Screw piles, Technology, installation and design in stiff clay; Holeyman, A. (ed), Balkema, Lisse, NL.*

[5] Hanifah, A.A.; Kai, L.S. (2006), *Application of Global Strain Extensometer (Glostrext) Method for Instrumented Bored Piles in Malaysia*, Proceedings-DFI/EFFC 10th International Conference on Piling and Deep Foundations, Amsterdam.

[6] Viana da Fonseca, Santos, A. (2008). *J.A. International Prediction Event Behaviour of Cfa, Driven and Bored Piles in Residual Soil Experimental Site - ISC'2*, September 2008 / 240x170 / 688 pages ISBN: 978-972-752-104-3 ISBN: 978-989-95625-1.

[7] ASTM D7383-10 – *Standard Test methods for Axial Compressive Force Pulses (Rapid) Testing of Deep Foundations*.

[8] *Rapid Load Testing on Piles*, Interpretation Guideline (2010). Cur publication 230, Cur Commission H410, CRC Press/Balkema, ISBN: 978-0-415-69520-6, the Netherlands. ●