**F. Hoefsloot**
*Fugro Ingenieurs-bureau*

**E. de Jong**
*VWS Geotechniek*

**K. J. Bakker**
*TU-Delft en Wad43*

## Deel 1: de palen, de grondslag en de proef

# Statnamic proeven op Casing boorpalen

**Samenvatting**

**In november 2008 zijn in de nabijheid van de spoorlijn Woerden - Utrecht een tweetal Statnamic proeven uitgevoerd met behulp van een 16 MN testapparaat. De proeven zijn uitgevoerd op zogenaamde Casing boorpalen die in 2005 door Volker Staal en Funderingen zijn aangebracht. Deze palen met een diameter van 1,65 m zijn nieuw voor de Nederlandse markt. Dit artikel, dat in 2 delen zal worden gepubliceerd, bespreekt de resultaten en de interpretatie van de proeven.**
**Deel 1 behandelt de resultaten en de interpretatie van het ter plaatse van de palen uitgevoerde grondonderzoek, de uitvoering van de Statnamic proeven en de eerste resultaten.**
**Deel 2 gaat in op de interpretatie van de proefresultaten.**

## Inleiding

Voor het project Spoorverdubbeling Vleuten - Amsterdam-Rijnkanaal is voor het eerst in Nederland gebruik gemaakt van Casing boorpalen. Een uitgebreide beschrijving van het paaltype is gegeven in het artikel dat is gepubliceerd in de Geotechniek special naar aanleiding van de Funderingsdag in 2008 [1]. In het betreffende artikel wordt tevens de keuze voor het paaltype, de controle op de uitvoering en de controle op het draagvermogen van de palen besproken. Onderdeel van dat artikel is ook het last-zakkingsgedrag, zoals dat op basis van statische paalbelastingsproeven is vastgesteld. Deze statische belastingsproeven zijn uitgevoerd tot de rekenwaarde van de paalbelasting (geschiktheidsproeven) en geven derhalve slechts een indicatie van de maximale paaldraagkracht (bezwijkbelasting). In [2] is het last-zakkingsgedrag van de palen verder verklaard en ook vertaald tot steunpuntzakkingen (inclusief groepswerking).

Tijdens het installeren van de eerste Casing boorpalen in 2005 met een gemiddeld paalpuntniveau van NAP -18 m, is besloten tot het installeren van een drietal extra proefpalen. Deze proefpalen zijn geïnstalleerd tot een diepte van NAP -13 m om enerzijds te kunnen spreken van een paal (lengte van de paal $\geq$ 8 x de diameter) en anderzijds het draagvermogen zover mogelijk te beperken in relatie tot een mogelijk later uit te voeren statische proefbelasting (bezwijkproeven). Voordat de palen ter plaatse werden geïnstalleerd is een grondonderzoek uitgevoerd bestaande uit 7 sonderingen met meting van de plaatselijke wrijvingsweerstand en dubbele hellingmeting. Gezien het uitstekende resultaat van de eerder op het werk uitgevoerde geschiktheidsproeven en de hoge kosten voor het uitvoeren van statische proefbelastingen tot de geschatte bezwijkbelasting, is in 2005 afgezien van het uitvoeren van bezwijkproeven.

In 2008 kreeg Fugro Ingenieursbureau in Nederland de beschikking over een 16 MN Statnamic apparaat en werd alsnog besloten om twee van de drie proefpalen te testen. De testen zijn uitgevoerd op 17 en 26 november 2008, de laatste onder grote belangstelling van pers en funderingsspecialisten uit Nederland, België en Frankrijk [3].

Kort voor de uitvoering van de Statnamic proeven zijn in de directe nabijheid van de palen een vijftal controlesonderingen uitgevoerd. Deze sonderingen zijn uitgevoerd met meting van de plaatselijke wrijvingsweerstand, met meting van de waterspanning en dubbele hellingmeting.

Het uitwerken van de resultaten van de Statnamic proeven loopt gelijk op met voortgang van de CUR-commissie H410 'Snelle paaltesten'. Deze onderzoekscommissie is belast met het opstellen van een uitvoeringsnorm en een beoordelingsrichtlijn voor de uitwerking en interpretatie van snelle paaltesten. Fugro en VWS Geotechniek nemen naast andere partijen deel aan commissie H410.

## Bepaling theoretisch bezwijkdraagvermogen

Op basis van artikel 5.4.2.2.2 mag voor grondverwijderende palen een $a_p$ van 1,0 worden aangehouden, mits de berekende maximum puntweerstand op basis van de sonderingen na installatie niet groter is dan de berekende maximum puntweerstand vóór installatie met toepassing van de ontwerpwaarde van $a_p$. De $a_p$ voor installatie van de palen is in het geval van de Casing boorpalen feitelijk een onbekende. Op basis van eerder uitgevoerde controlesonderingen bij de productiepalen en de eerder uitgevoerde geschiktheidsproeven op de Casing boorpalen is in eerste aanleg voor deze ontwerpparameter $a_p$ een waarde van 0,8 gehanteerd.

Op basis van hetzelfde artikel 5.4.2.2.2 mag voor palen gemaakt met grondverwijdering een $a_s$ van 0,01 worden aangehouden indien een sondering wordt beschouwd die na paalinstallatie is uitgevoerd. De $a_s$ voor installatie van de palen is ook in dit geval een onbekende. Op basis van eerdere controlesonderingen bij de productiepalen en de eerder uitgevoerde geschiktheidsproeven op de Casing boorpalen is in eerste aanleg voor deze ontwerpparameter $a_s$ een waarde van 0,008 gehanteerd.

In artikel 5.4.2.2.2 van NEN 6743-1 wordt ook een eis gesteld aan de nasonderingen, namelijk dat deze sonderingen binnen 1 m van de zijkant van de paal moet worden uitgevoerd. Vreemd genoeg is dit de enige eis die aan de sonderingen wordt gesteld. In de norm wordt geen eis gesteld aan de sondeerklasse (geeft een indicatie van de meetnauwkeurigheid) en wordt geen eis gesteld aan de mate waarin de sondeerstreng mag afwijken van de vertikaal (een sondering gaat immers nooit recht). De afstand van 1 m is daarnaast onafhankelijk van de paaldiameter, terwijl het voor het vaststellen van de installatie effecten van de paal wel degelijk van belang is om binnen een bepaalde afstand van de paal te meten, een afstand die direct gerelateerd is aan de paaldiameter.

Voor het beoordelen van de Casing boorpalen zijn zowel de sonderingen vóór als na paalinstallatie uitgevoerd met een dubbele hellingmeter.

De sonderingen zijn uitgevoerd conform klasse 2 van NEN 5140 en de sonderingen na installatie zijn aangevangen op minder dan 1 m uit de palen. Door de registratie van de hellingen van de sondeerstreng in 2 richtingen, *zie figuur 1*, was het mogelijk de exacte positie van de sondering ten opzichte van de paal te controleren.

Gezien de diameter van de Casing boorpalen van 1,65 m en de geconstateerde afwijkingen van de sondeerstreng, circa 0,5 m op paalpuntniveau, kan worden geconcludeerd dat de sonderingen representatief zijn voor de beoordeling van het installatiegedrag van de palen en geschikt zijn voor een theoretische benadering van het bezwijkdraagvermogen.

In *figuur 2* zijn de resultaten gepresenteerd van de sonderingen uitgevoerd vóór en na paalinstallatie ter plaatse van paal PP1.

## Berekeningsresultaten

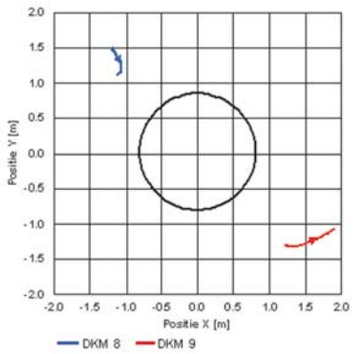
Bij het uitvoeren van de berekeningen zijn voor alle sonderingen een $\gamma$ van 1,0 en een $\gamma_{m;b;4}$ van 1,0 aangehouden. Op deze wijze is per sondering (uitgevoerd na paalinstallatie) een maximum draagkracht (bezwijkbelasting) voor de statnamisch beproefde palen PP1 en PP3 bepaald. De resultaten zijn weergegeven in *tabellen 1 en 2*.

Indien het rekenkundig gemiddelde wordt bepaald op basis van de 4 sonderingen uitgevoerd na paalinstallatie wordt een maximale paaldraagkracht van 18.735 kN verkregen.
De grote spreiding in draagkracht op basis van de individuele sonderingen is een bekend fenomeen op de onderzoekslocatie. Op basis van alle voor het project Spoorverdubbeling Vleuten - Amsterdam-Rijnkanaal uitgevoerde sonderingen is in 2005 reeds door Geodelft geconcludeerd dat de conusweerstanden op de locatie een grotere spreiding vertonen dan gebruikelijk is in de Nederlandse pleistocene zandlagen. Bij de uitgevoerde geschiktheidsproeven op de Casing boorpalen is gebleken dat de individuele sondeerresultaten per paal geen indicatie geven van een hogere of lagere draagkracht. De gemiddelde draagkracht op basis van de beschikbare sonderingen kon daarentegen goed met de geïnterpreteerde resultaten van de statische proefbelastingen worden vergeleken.

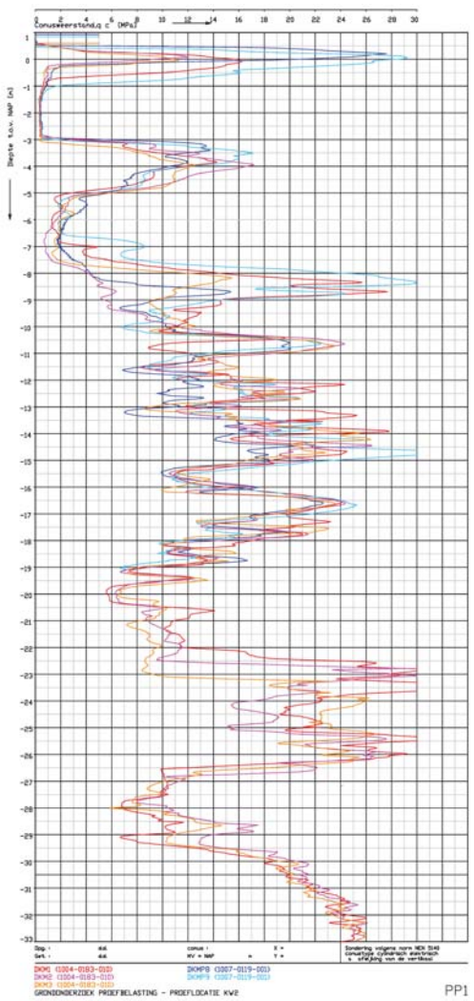
De maximale paaldraagkracht is tevens berekend op basis van de vooraf uitgevoerde sonderingen. Deze berekeningen zijn uitgevoerd met de factoren zoals deze na paalinstallatie op basis van de norm mogen worden toegepast ($a_p$ = 1,0 en $a_s$ = 0,01) en op basis van de factoren zoals deze bij het ontwerp van de palen zijn gehanteerd ($a_p$ = 0,8 en $a_s$ = 0,008) . Opgemerkt wordt dat voor deze laatst genoemde factoren geen andere basis bestaat dan een beoordeling van de invloed van de paalinstallatie op de conusweerstand en een vergelijking met paalsystemen die zijn opgenomen in tabel 2 van NEN 6743-1.
Indien het rekenkundig gemiddelde wordt bepaald op basis van de 6 sonderingen uitgevoerd vóór paalinstallatie wordt een maximale paaldraagkracht van 19.020 kN, respectievelijk 15.216 kN verkregen.

## Conclusie theoretisch bezwijkdraagvermogen

Op basis van de sonderingen uitgevoerd na paalinstallatie kan conform NEN 6743-1 een maximale paaldraagkracht voor de palen van gemiddeld




*Figuur 1 Resultaat dubbel hellingmeting sondeerstreng sondering DKMP8*




*Figuur 2 Resultaten sonderingen vóór (DKM1 t/m DKM3 rood) en ná paalinstallatie (DKMP8 en DKMP9 blauw).*

| Sondering na paalinstallatie | $F_{r;max;punt}$ [kN] | $F_{r;max;schacht}$ [kN] | $F_{r;max}$ [kN] | $F_{r;max;gem}$[1] [kN] |
|---|---|---|---|---|
| DKMP8 | 10.434 | 3.628 | 14.062 | 17.744 |
| DKMP9 | 16.242 | 5.183 | 21.426 | |

[1] *Aangezien beide sonderingen in gelijke mate bepalend zijn voor het draagvermogen van paal PP1 is hier het rekenkundig gemiddelde gepresenteerd van beide sonderingen.*

*Tabel 1 Maximale draagkracht paal PP1 op basis van sonderingen na paalinstallatie*

| Sondering na paalinstallatie | $F_{r;max;punt}$ [kN] | $F_{r;max;schacht}$ [kN] | $F_{r;max}$ [kN] | $F_{r;max;gem}$[1] [kN] |
|---|---|---|---|---|
| DKMP11 | 18.105 | 4.665 | 22.770 | 19.726 |
| DKMP12 | 12.534 | 4.147 | 16.681 | |

[1] *Aangezien beide sonderingen in gelijke mate bepalend zijn voor het draagvermogen van paal PP3 is hier het rekenkundig gemiddelde gepresenteerd van beide sonderingen.*

*Tabel 2 Maximale draagkracht paal PP3 op basis van sonderingen na paalinstallatie*

**Figuur 3** *Geprepareerde paalkop met zuiger.*

**Figuur 4** *Aanbrengen ballast en grindcontainer geïnstalleerd.*

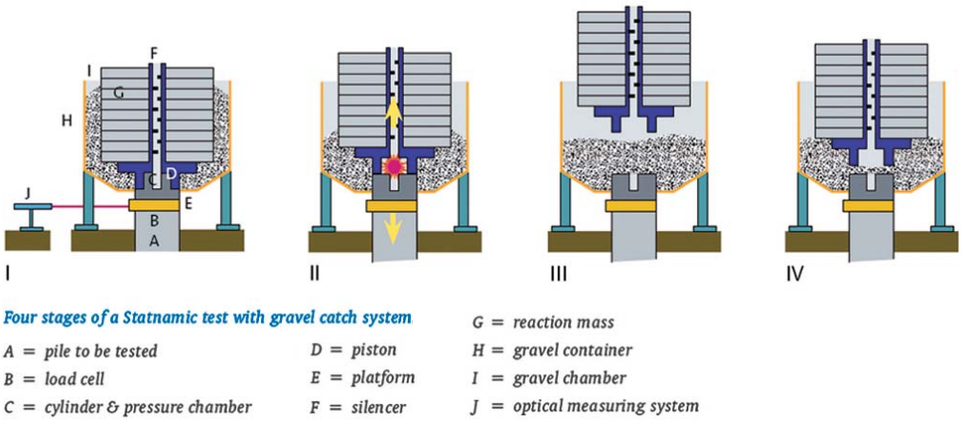
**Figuur 5** *Opgebouwde proefopstelling.*

**Figuur 6** *Opstelling direct na de proef.*

18.735 kN worden bepaald. Indien gelijke paalklassefactoren worden gehanteerd in combinatie met de vooraf uitgevoerde sonderingen wordt een gemiddelde maximale draagkracht van 19.020 kN verkregen. Bij toepassing van de ontwerpparameters bedraagt de gemiddelde maximale paaldraagkracht 15.216 kN. Op basis van dit vergelijk kan dus worden gesteld dat de ontwerpparameters $a_p$ = 0,8 en $a_s$ = 0,008 op basis van de sondeerresultaten een veilige ondergrens geven van de maximale paaldraagkracht. Op basis van alle sondeerresultaten wordt voor de beschouwde Casing boorpalen dan ook een bezwijkdraagvermogen tussen de 15.216 kN en 18.735 kN verwacht.

## Waarom Statnamic?

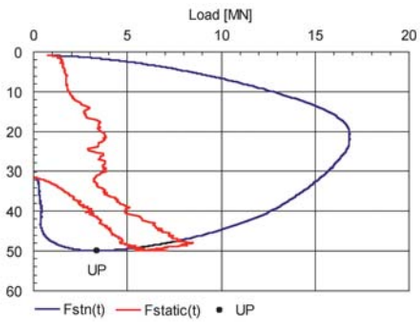
Voorheen werden palen getest met statische ballast die werd opgebouwd op een paal. Bij hogere belastingen zijn vaak reactiepalen nodig waarbij de reactiekracht via een constructieframe op de testpaal wordt overgebracht. Vaak kostbare, arbeidsintensieve en tijdrovende testen die lastig in een uitvoeringstraject zijn in te plannen. Statnamic paaltesten zijn circa 20 jaar geleden ontwikkeld en bieden de mogelijkheid om met slechts 5% van de statische belasting een snelle



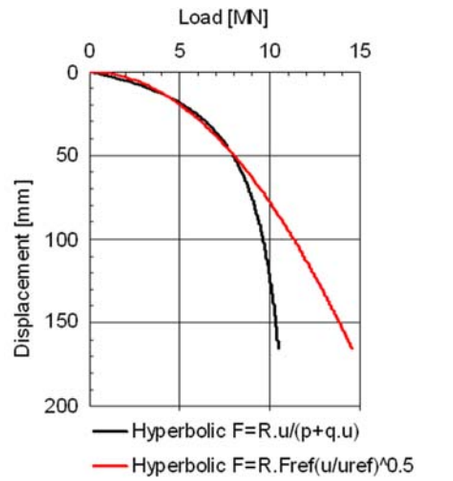

*Four stages of a Statnamic test with gravel catch system*

| | | |
|---|---|---|
| A = pile to be tested | D = piston | G = reaction mass |
| B = load cell | E = platform | H = gravel container |
| C = cylinder & pressure chamber | F = silencer | I = gravel chamber |
| | | J = optical measuring system |

***Figuur 7*** *Opgebouwde proefopstelling.*




***Figuur 8*** *Proefresultaat en afgeleide statische weerstand.*




***Figuur 9*** *Geëxtrapoleerd last-zakkingsgedrag.*

proef te doen. In Nederland hebben Profound en Fugro een samenwerkingsverband voor het uitvoeren van statnamic-testen. Profound beschikt over een 4 MN-apparaat en Fugro heeft een 16 MN-apparaat.

## Hoe werkt Statnamic?

Rondom de paal wordt een vlakke bodem gerealiseerd, waarop een basisframe wordt geplaatst. De paalkop wordt geprepareerd voor het nauwkeurig plaatsen van een loadcell en een verbrandingskamer *(figuur 3)*. Er worden stalen schalen rondom de paal opgebouwd. Vervolgens wordt ballast aangebracht (circa 800 kN) in de vorm van betonnen ringen *(figuur 4)*. Tussen de ringen en de schalen wordt grind aangebracht. Na ontsteking wordt in de verbrandingskamer in zeer korte tijd een hoge druk opgebouwd waardoor de cylinder met ballast met een versnelling van circa 20 g wordt gelanceerd. Hierbij wordt een reactiekracht van maximaal 16 MN (1600 ton) op de paal uitgeoefend. De kracht op de paal, de verplaatsing en de versnelling van de paalkop worden hierbij geregistreerd.
De opbouw en werking van het apparaat is schematisch weergegeven in *figuur 7.*

Bij de proef zijn tevens omgevingsfactoren gemeten zoals trillingsintensiteit op het maaiveld, nabij het spoor en aan bebouwing, geluidmetingen in de omgeving en waterspanningsmetingen in de bodem.

## Proefresultaten en uitwerking

Bij het uitvoeren van de proeven in november 2008 is een maximale paalzakking gemeten van circa 50 mm bij een geregistreerde kracht van ruim 16 MN. De 2 proefbelastingen zijn op identieke wijze uitgevoerd en gaven nagenoeg dezelfde meetresultaten.
De uitwerking heeft plaatsgevonden op basis van de conceptrichtlijn voor interpretatie van snelle paalproeven zoals deze op dat moment door de CUR-commissie was opgesteld. Voor deze interpretatie waren meerdere varianten beschikbaar; gekozen is voor de Unloading Point Methode (UPM) met correctie van de gemeten kracht voor traagheidskrachten en demping.
Bij deze methode wordt de paal beschouwd als een één-massaveersteem waarbij op elk tijdstip geldt:

$$F_{static}(t) = F_{stn}(t) - m \cdot a(t) - C \cdot v(t)$$

Met:

| | |
|---|---|
| $F_{static}$ | statische bodemweerstand |
| $F_{stn}$ | statnamic belasting |
| m | massa van de paal |
| a | versnelling van de paal |
| C | dempingsparameter |
| v | snelheid van de paal |

In bovengenoemde vergelijking wordt de gemeten waarde van de statnamic belasting op de paalkop en de gemeten waarde van de versnelling en snelheid van de paalkop ingevoerd. De massa van de paal wordt berekend op basis van de paaleigenschappen. De gemiddelde demping is afgeleid tussen het moment van maximale belasting en maximale verplaatsing.

In *figuur 8* is de gemeten statnamic belasting versus zakking en de afgeleide statische grondweerstand als functie van de zakking gegeven. Het feit dat er geen mooie vloeiende curve ontstaat wordt in belangrijke mate bepaald door de interpretatiemethodiek. In deel 2 van het artikel wordt hier nader op ingegaan.

Het bezwijkdraagvermogen van de paal wordt volgens NEN 6743 gedefinieerd als de belasting horend bij een paalpuntverplaatsing van 0,1 à 0,2 maal de paaldiameter. Dit betekent dat het meetresultaat geëxtrapoleerd moet worden naar grotere verticale vervorming. Dit heeft geleid tot last-zakkingsdiagrammen die in *figuur 9* zijn gegeven. Hierbij heeft tevens een correctie plaatsgevonden voor effecten in de grond als gevolg van de relatief korte duur van de belasting. In de figuur zijn de resultaten geven van 2 extrapolatiemethodieken die echter beide een lagere bezwijkwaarde geven bij 0,1 D (165 mm) dan de berekende waarde van 15,2 à 18,7 MN. Ook hierop wordt in deel 2 van het artikel ingegaan.

## Numerieke modellering

Van de proef is met Plaxis 2D V9, een axiaal symmetrisch numeriek model gemaakt. In eerste instantie is daarbij de in 2005 uitgevoerde

statische belasting proef geanalyseerd en zijn daarbij parameters bepaald die de beste overeenstemming gaven met het proefresultaat. Rechtvaardiging voor deze aanpak was de overeenkomstige geologie op beide locaties. Vervolgens is het resultaat van de eerste Statnamic proefbelasting van 17 november door middel van een dynamische berekening geanalyseerd, totdat redelijke overeenstemming was bereikt tussen model en proef. Nadat ook de tweede Statnamic proef was uitgevoerd en bleek dat de resultaten vrijwel gelijk waren aan deze welke bij de eerste proef waren gevonden, is voor de nader analyse verder gewerkt met de geoptimaliseerde dataset zoals bepaald bij de analyse van de eerste proef.

De dynamische berekeningen lenen zich uitstekend om op dezelfde wijze als de proefresultaten te worden verwerkt. Dit maakt een vergelijking mogelijk tussen het afgeleide statische last-zakkingsgedrag uit de statnamicproef en een berekend statisch last-zakkingsgedrag. Beide resultaten kunnen worden vergeleken met de berekende waarde van het bezwijkdraagvermogen volgens NEN 6743. Tevens geeft deze vergelijking aan dat de interpretatiemethodiek van de statnamicproef in positieve richting bijgesteld zou moeten worden. In het volgend artikel wordt uitgebreid ingegaan op de statische en dynamische modelberekeningen en op de interpretatiemethodiek.

## Eerste conclusies Statnamic proeven

Statnamicproeven kunnen worden toegepast op grote diameter (boor)palen en kunnen in relatief korte tijd worden gerealiseerd. De omgevingseffecten tijdens uitvoering van de proef zijn vergelijkbaar met die van een heiwerk. De afgeleide waarde voor het bezwijkdraagvermogen lijkt enigszins conservatief en wordt in belangrijke mate bepaald door de interpretatiemethodiek. Numerieke modellering van de proef heeft uiteindelijk geleid tot een groter inzicht in het gedrag van de paal onder de statnamicbelasting. In deel 2 van dit artikel zal nader op de verkregen resultaten worden ingegaan.

## Referenties


[1] E. de Jong, *Grote diameter casing palen*, Geotechniek dec.2008 (Funderingsdag special).

[2] J. Brinkman, J.G. van de Water en E. de Jong, *Large diameter casing piles, design, testing and monitoring*, Proceedings 17th ICSMGE Alexandria, Egypt, page 1201-1204, oktober 2009

[3] M. Pehlig en E. de Jong, *Snelle paaltest met belasting van meer dan 1.600 ton*, Land + Water nr 1/2 februari 2009.


## Literatuur


[-] P. Middendorp , *First experiences with Statnamic load testing of foundation piles in Europe*. 2nd Int. Geotechn. Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent University, Belgium 1993.

[-] P. Hölscher and A.F. van Tol, *Rapid Load Testing on Piles*, CRC Press, Taylor and Frances, London Uk 2009

[-] N.Q. Huy, Rapid load testing of piles in Sand; Effects of loading rate and excess pore pressure, Doctoral thesis Delft University of Technology, Delft, The Netherlands 2008 ■