

Snelle proefbelastingen (Statnamic) in de internationale bouwpraktijk

ir. P Middendorp
Profound BV

SAMENVATTING

Bij snelle proefbelastingen wordt op de paalkop een kortdurende belasting aangebracht, waarbij ervoor wordt gezorgd dat de gehele paal onder druk komt te staan. De voor de proefbelasting benodigde massa kan bij deze methode beperkt blijven. Het statische gedrag van de paal kan worden bepaald met behulp van de 'Unloading Point Method', die goed voldoet in niet-cohesieve gronden. Voor een steiger in het Caribische gebied zijn met een 4 MN statnamic apparaat de juiste paallengte en paalpunt bepaald. Voor het 'Taiwan High Speed Rail Project' is met een 20 MN statnamic apparaat een draagkracht tot 21,55 MN aangetoond.

INLEIDING

Bij het snelle proefbelasten wordt een kortdurende belasting op de paalkop aangebracht, maar wel met een zodanige duur dat de gehele paal onder druk staat en alle paaldelen met ongeveer dezelfde snelheid de grond in bewegen. Een groot voordeel van het snelle proefbelasten is, dat voor eenzelfde maximale belasting slechts 5% van de massa nodig is, vergeleken met het ballastgewicht voor een statische proefbelasting. Bovendien kunnen één of meerdere palen per dag worden proefbelast.

Het snelle proefbelasten als alternatief voor het statisch proefbelasten vindt steeds meer toepassing in de internationale bouwpraktijk. Er worden zowel geheide als in de grond gevormde palen proefbelast met belastingen variërend van 0,25 MN tot 30 MN, zowel offshore als onshore. In de Verenigde Staten en Zuidoost Azië is de methode al redelijk ingeburgerd. In Europa wordt de methode toegepast in Duitsland en Engeland, maar ook in Nederland

zijn reeds meerdere projecten uitgevoerd (Ref. 2 en 3). Er bestaat in Nederland een toenemende belangstelling voor het toepassen van het snelle proefbelasten bij geschillen over draagkracht, het bepalen van de draagkracht van oude funderingen voor hergebruik en ter vervanging van statische proefbelastingen. Er is een Delft Cluster project gestart door de Technische Universiteit Delft, GeoDelft en TNO om de toepasbaarheid van het snelle proefbelasten te evalueren. Ook is er een CUR-commissie opgericht om de toepassing te reguleren. Voor het aanbrengen van de belasting bij snelle belasting zijn twee methodes beschikbaar:

- Het laten vallen van een massa op een verenpakket (PSPLT, *figuur 1*).
- Het lanceren van een reactiemassa van de paalkop (Statnamic, STN, *figuur 2*).

De eerste methode is in de jaren 1980-1990 ontwikkeld door Fundex, in samenwerking met IFCO, onder de naam Pseudo Static Pile Load Tester (PSPLT). De proefbelasting wordt uitgevoerd door een massa met een verenpakket van een vooraf ingestelde hoogte te laten vallen op de te testen paal. De paal wordt een aantal keren belast door de massa van steeds grotere hoogte op de paal te laten vallen. De beschikbare PSPLT-systemen zijn geschikt voor het proefbelasten van palen tot 3,5 MN. De instrumentatie voor het uitvoeren van een proef bestaat uit een drukdoos en een optisch meetsysteem.

De tweede methode is in dezelfde periode ontwikkeld door de Canadese firma Bermingham in samenwerking met TNO onder de naam Statnamic. Sinds 2002 is de ontwikkeling en de toepassing van Statnamic overgenomen door Profound. Bij Statnamic worden door het ontsteken van brandstof in een drukcilinder grote gasdrukken opgewekt, waarmee een reactiemassa met ongeveer 20 x de versnelling van de zwaartekracht vanaf de paalkop wordt gelanceerd.

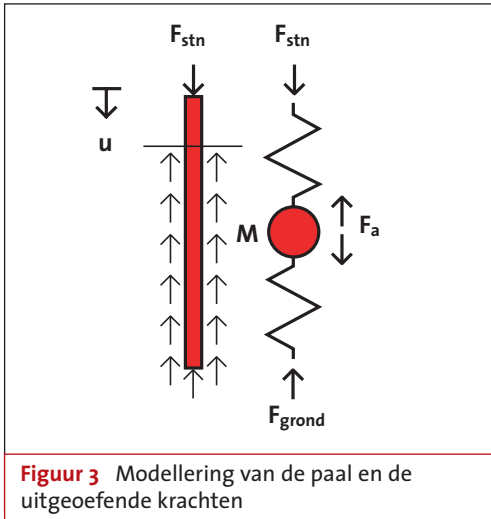
Gebaseerd op Newton's $F = M \times a$ en het principe Actie = Reactie wordt er een belasting van 20 x de reactiemassa (M) op de paalkop uitgeoefend. Als voorbeeld: voor een 4 MN statnamic proefbelasting is bij een versnelling van 20g dus een reactiemassa van 20.000 kg benodigd en bij een 30 MN statnamic proefbelasting een reactiemassa van "slechts" 150.000 kg. Van het Statnamic systeem zijn tientallen apparaten over de gehele wereld beschikbaar en deze kunnen al naar gelang hun



Figuur 1 Pseudo Static Pile Load Tester met een stalen verenpakket



Figuur 2 Statnamic proefbelasting met een grindcontainer als opvangmechanisme



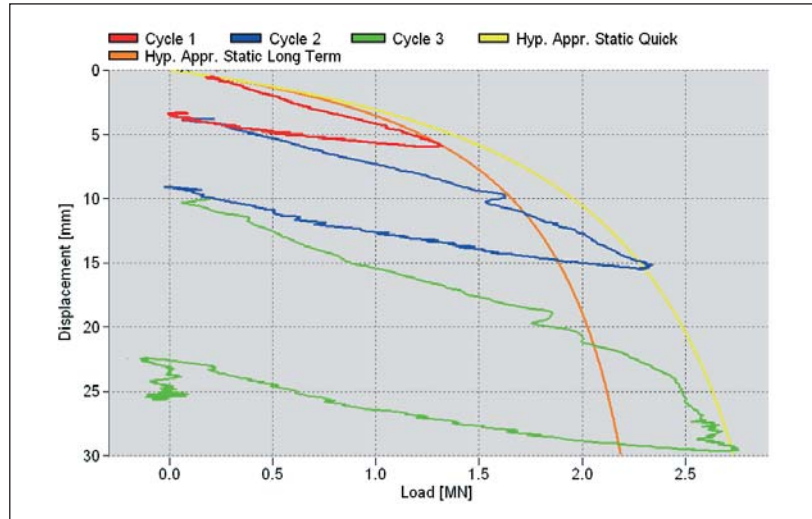
Figuur 3 Modellering van de paal en de uitgeoefende krachten

grootte worden ingezet voor het proefbelasten van palen met belastingen variërend van 0,25 MN tot 30 MN. Voor het testen van palen in Maleisië staat een 60 MN Statnamic apparaat op de tekenplank.

Omdat bij Statnamic een reactiemassa versneld wordt en men niet afhankelijk is van de zwaarte-kracht, kunnen palen in iedere gewenste richting worden belast. Dus ook het testen van schoorpalen en het uitvoeren van laterale proefbelastingen behoren tot de mogelijkheden. Het belasten van de paal vangt aan op het moment dat de brandstof wordt ontstoken en de reactiemassa wordt gelanceerd. De reactiemassa zal een bepaalde hoogte bereiken en terugvallen. Na het terugvallen kan de reactiemassa worden opgevangen in een met grind gevulde container of door een hydraulisch vangmechanisme. Het voordeel van een hydraulisch vangmechanisme is dat er eenvoudig cyclisch kan worden belast en dat meerdere palen per dag getest kunnen worden. In Nederland heeft Profound de beschikking over een 4 MN Statnamic apparaat met een hydraulisch vangmechanisme en bezit Fugro een 16 MN Statnamic apparaat met een grindcontainer als vangmechanisme.

MODELLERING EN INTERPRETATIE

Het aanbrengen van een klap op een paalkop met een heihamer kan worden vergeleken met een relatief korte stoot. Hierbij wordt een deel van de paal onder spanning gezet die zich als een spanningsgolf in de paal voortplant. Bij het snelle proefbelasten is de belastingsduur vele malen langer en kan er gesproken worden van een duw. Hierbij wordt de hele paal onder druk gezet en gelijkmatig in de grond gedrukt.



Figuur 4 Resultaat van een statnamic proefbelasting

Het induwen gebeurt wel met snelheid waardoor traagheidskrachten, dempingskrachten en belastingsnelheidsafhankelijke verschijnselen optreden. Tijdens het aanbrengen van de duwbelasting worden aan de paalkop de kracht, de verplaatsing en de versnelling gemeten.

Voor het bepalen van het statische gedrag van de paal uit de metingen, dienen dynamische verschijnselen in beschouwing te worden genomen. Omdat de snelheid van de paal over de hele lengte nagenoeg identiek is, kan de paal gemodelleerd worden als een puntmassa met veren, zie *figuur 3*.

Tijdens het belasten met een kracht F_{stn} treedt er een traagheidskracht F_a op, waarbij $F_a = -M \cdot a$, met M de paalmassa en a de versnelling van de paal. De kracht F_{stn} en de versnelling a worden gemeten en de massa van de paal is bekend. De respons van de grond kan worden beschreven met:

$$F_{grond} = -(F_{statisch} + F_{demping}) = -(F_{statisch} + C \cdot v) \quad (1)$$

met C de dempingsconstante, u de verplaatsing en v de paalsnelheid. De verplaatsing u wordt gemeten en de snelheid v wordt berekend door integratie van het versnellings signaal a . Voor het krachtenevenwicht geldt:

$$F_{stn} + F_a + F_{grond} = 0 \quad (2)$$

$$F_{stn} = M \cdot a + F_{statisch} + C \cdot v \quad (3)$$

$$F_{statisch} = F_{stn} - M \cdot a - C \cdot v \quad (4)$$

Bij de maximale verplaatsing u_{max} op tijdstip t_{umax} is de snelheid v nul en geldt voor de

statische kracht:

$$F_{statisch}(t_{umax}) = F_{stn}(t_{umax}) - M \cdot a(t_{umax}) \quad (5)$$

Hierbij is dus één punt van het statische last-zakkingsdiagram bekend. Deze manier van het berekenen van de statische belasting en bijbehorende verplaatsing wordt UPM-methode genoemd (Unloading Point Method). Het is ook mogelijk het gehele lastzakkingsdiagram te bepalen (Ref. 1). Deze methode leent zich goed voor palen gesitueerd in niet-cohesieve gronden, zoals zand. Voor cohesieve gronden als klei, dient een reductie op het met de UPM-methode bepaalde statisch draagvermogen te worden aangebracht. Reden is dat bij hogere belastingsnelheden de weerstand bij cohesieve gronden toeneemt. In *figuur 4* is als voorbeeld het resultaat van een statnamic proefbelasting gegeven, waarbij uit drie opeenvolgende belastingscycli het statische gedrag is berekend en benaderd met een omhullende hyperbool. De onderliggende hyperbool representeert de reductie voor belastingsnelheidseffecten.

HET TESTEN VAN EEN PAALFUNDING VAN EEN ORKAANBESTENDIGE CRUISETERMINAL

Als onderdeel van een ontwikkelingsproject van Züblin is door Ingenieursbureau Lievense (Ref. 5) een cruiseterminal ontworpen voor het Caribische eiland Grenada. Volker Stevin Construction Europe heeft het project in 2002 gerealiseerd. Naast het baggeren van een bassin, opspuiten van land (ca 60.000 m²) en aanbrengen van 500 m kustverdediging, omvatte het civiele werk de bouw van een steigerdek op palen voor mega cruiseschepen (330 m lang). Het betreft hier een orkaangevoelig gebied met als grondslag koraalzand en dood koraal. Er werd rekening mee gehouden dat bij



Figuur 5 Proefheien



Figuur 6 Gedeeltelijk open paalpunt



Figuur 7 Het uitvoeren van een statnamische proefbelasting met een 4 MN apparaat met een hydraulisch vangmechanisme

orkanen golven met hoogtes tot 9 m de steiger zullen treffen. Aan de fundering worden dus hoge eisen gesteld om de grote krachten uitgeoefend door golven en schepen te kunnen weerstaan. Bij een ondergrond bestaande uit koraalzand en koraalresten met soms meters grote holle ruimte is het niet eenvoudig om aan de gestelde eisen te voldoen. Uitgaande van geheide stalen buispalen, is bij een gesloten paal de kans groot dat de paal niet op diepte komt, terwijl bij de toepassing van een open paal de kans bestaat, dat deze niet voldoende puntweerstand ontwikkelt. Gezien de onzekerheden is besloten tot proefheien, zie *figuur 5*. Hierbij is onderzoek gedaan met halfopen palen om naast het behoud van de heikbaarheid toch voldoende puntweerstand te kunnen verkrijgen, zie *figuur 6*. Er zijn verscheidene configuraties van geheel of gedeeltelijk open paalpuntconstructies op verschillende locaties uitgetest.

Tijdens het heien van de palen is door Profound een heianalyse (Pile Driving Analysis) uitgevoerd, waarbij de grondweerstand bij iedere inheidiepte kon worden gemeten. Het heien is gestopt op die inheidiepte, waarbij de paal voldoende mantelwrijving kon leveren voor het opnemen van de vereiste trekkrachten en voldoende puntweerstand en mantelwrijving voor het opnemen van de bovenbelasting. Om het draagvermogen van de palen na het heien te verifiëren, zijn aanvullend statnamische proefbelastingen uitgevoerd, zie *figuur 7*. Met de verkregen testresultaten zijn voor de gehele steiger de juiste paallengte met paalpunt gekozen afhankelijk van de lokale bodemgesteldheid. Tevens is er een heiprotocol opgesteld. Een groot bijkomend voordeel van het proefheien was het feit dat zich tijdens de uitvoering van het project bij het inheien van palen geen onvoorziene problemen hebben voorgedaan. De palen met een diameter van 0,914 m, wanddikte 17,2 mm, en lengtes variërend van 36,6 m tot 61 m zijn geheid met een IHC S90 hydraulische heihamer.

Binnen een jaar na oplevering werd de steiger stevig aan de tand gevoeld door de passage van de orkaan Ivan met een zwaarte voor Grenada van een 1 op de 50 jaar voorkomende orkaan. Grote schade werd aangericht aan wel 90% van de bestaande gebouwen en de infrastructuur. De cruiseterminal met steiger hebben het geweld echter vlekkeloos doorstaan, zie *figuur 8*. Voor de betrokken ingenieursbureaus en aannemer was het passeren van de orkaan een intense ervaring, maar met achteraf wel de

voldoening dat het gekozen ontwerp en de kwaliteit van de uitvoering betrouwbaar bleken te zijn.

STATNAMISCHE PROEFBELASTINGEN OP BOORPALEN IN TAIWAN

Het statnamisch proefbelasten van palen wordt sinds 1999 in Taiwan toegepast op boorpalen met draagvermogens van 10 tot 50 MN. Het grootste Statnamic apparaat in Taiwan kan tot 20 MN testen. Ongeveer 50% van de testen wordt uitgevoerd op tijdelijke testpalen, waarvan de resultaten worden gebruikt om tot een definitief ontwerp van de fundering te komen. De andere 50% van de testen bestaat uit het controleren van het draagvermogen van constructiepalen. De redenen waarom Statnamic in Taiwan als vervangende methode van statisch proefbelasten wordt toegepast zijn o.a. :

- In het geval van een frame met reactiepalen mogen constructiepalen niet gebruikt worden als reactiepalen.
- De afstand tussen testpaal en reactiepaal moet groter zijn dan 5x de paaldiameter. Bij palen met een diameter van 2 m betekent dit een reactieframe met een overspanning van meer dan 20 m. Het grootste reactieframe in Taiwan heeft een overspanning van 15 m, zie *figuur 9*.
- Het is zeer gebruikelijk dat de testbelasting de 10 MN overschrijdt. De maximale draagvermogens van de palen in Taiwan zijn in de orde grootte van 50 MN. Het gebruik van ballast is hierbij kostbaar en tijdrovend. Tevens heeft men geconstateerd dat de voorbelasting van de grond door het ballastgewicht de testresultaten beïnvloedt.
- Indien er geen ruimte is voor reactiepalen, is Statnamic het beste alternatief.
- Bij Statnamic kan een random keuze gemaakt worden voor de te testen palen.
- Op tenminste vier projecten zijn vergelijkende testen uitgevoerd met statische en statnamische proefbelastingen, waarbij de resultaten redelijk overeenkwamen.
- Met geïnstrumenteerde palen kan ook bij Statnamic de verdeling tussen mantelwrijving en puntweerstand worden bepaald.

Een aansprekend project, waarbij Statnamic is toegepast, is het "Taiwan High Speed Rail Project" (Ref. 4). Het doel van het testprogramma was de verificatie van het draagvermogen van de fundering en de praktische bruikbaarheid van Statnamic als vervangende proefbelastingmethode. Op de testlocatie bevindt de vaste rotsbodem zich op 200 m diepte,

daarboven bevinden zich alluviale afzettingen van zanderige en kleiachtige gronden. De geboorde palen zijn geconstrueerd met een casing en met een diameter van 2,0 m en een lengte van 50 m. Op acht paalniveaus werden rekopnemers ingestort met als doel het bepalen van de onderverdeling tussen puntweerstand en mantelwrijving. Vijfenvoertig dagen na het vervaardigen van de palen is er een statische proefbelasting uitgevoerd met een 40 MN test frame en vier ankerpalen. Het grensdragvermogen van de paal bleek 28,4 MN te zijn. Het statnamisch proefbelasten werd 75 dagen na het gereedkomen van de palen op een andere paal uitgevoerd met een 20 MN apparaat, zie *figuur 10*. Door de beperkte capaciteit van het apparaat kon het draagvermogen tot 21,55 MN worden aangetoond. Een vergelijking tussen de statische en statnamische resultaten is gegeven in *figuur 11*.

CONCLUSIES

Snelle proefbelastingen op paalfunderingen zijn in opkomst als aanvulling op en vervanging van statische proefbelastingen, zowel nationaal als internationaal. Er is een relatief eenvoudige interpretatiemethode voor het bepalen van het statische draagvermogen. Bij cohesieve gronden, zoals klei, dient rekening te worden gehouden met hogere weerstanden ten gevolge van de belastingssnelheid. Bij de twee besproken casus is het snelle proefbelasten met succes toegepast.

REFERENTIES

1. Middendorp, P., 1993, *First experiences with Statnamic load testing of foundation piles in Europe*. 2nd International Geotechnical Seminar on Deep Foundations and Auger Piles, Ghent University, Belgium.
2. *Proefbelastingen op de Maasvlakte*, Funderingstechnologie, 4de jaargang, nr. 2, december 1995.
3. de Gijt, J.G., van Dalen J.H., Middendorp, P., 1995, *Comparison of Statnamic Load Test and Static Load Tests at the Rotterdam Harbour*, First International Statnamic Seminar, Vancouver.
4. Yu-herng Chang, H.W. Yang, Fu-jen Chang, Pin-jin Lee, *Statnamic Loading Test on Instrumented bored piles in Taiwan*, Seventh International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Kuala Lumpur, 2004.
5. Ingenieursbureau Lieveense, Inzending Prof. dr. ir. J.F. Agema Prijs 2005. ■



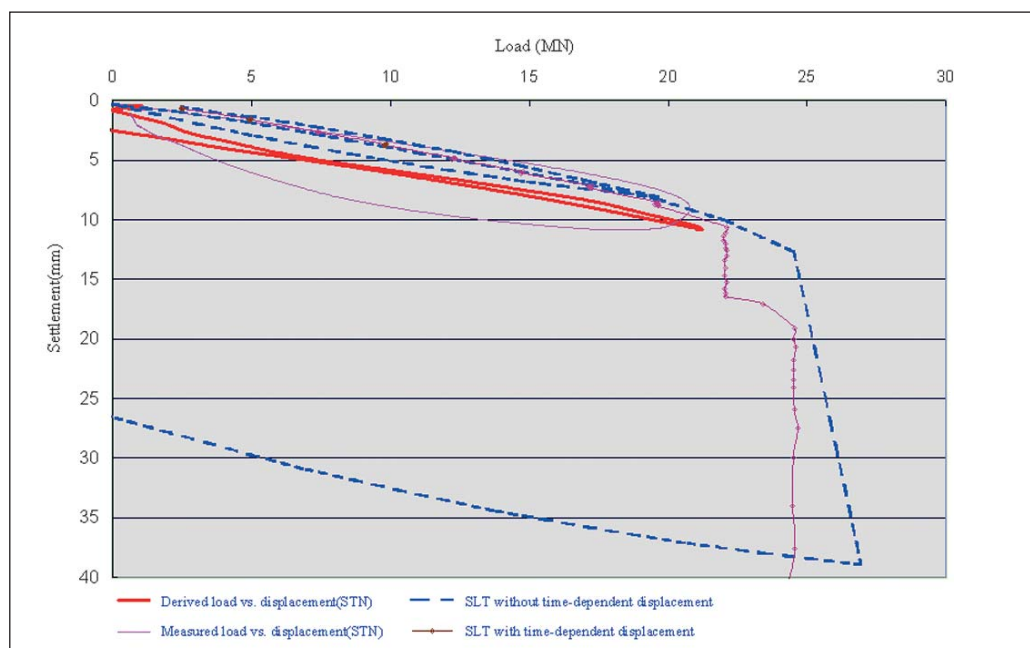
Figuur 8 Grenada Cruiseterminal na passage van de orkaan Ivan



Figuur 9 Een 50 MN reactieframe voor statisch proefbelasten



Figuur 10 Uitvoering van een 20 MN statnamische proefbelasting



Figuur 11 Vergelijking van de resultaten van een statnamische en een statische proefbelasting