

NEUENTWICKLUNGEN BEI DEN PFAHLPRÜFMETHODEN IN DEN NIEDERLANDEN

Gijs van Ginneken, Peter Middendorp, Profound

R. van Foeken, TNO Bauforschung

D. Pluimgraaf, Geomet

AUSZUG

Eine Einführung in die geläufigen Methoden der Qualitätsprüfung von Pfählen in den Niederlanden. Nachstehend wird die Anwendung in der Praxis und die rezenten technischen Entwicklungen bei den gängigsten Testmethoden behandelt. Es wird eine Übersicht über die zukünftigen Möglichkeiten zur Verbesserung der Qualitätsbewertung von Pfählen mittels Prüfstrategie aufgezeigt, womit eine wirtschaftlich günstige Kombination aus "Low Strain"-Prüfungen, wie Integritätstests (Sonic Integrity Testing) und "High Strain"-Prüfungslösungen, wie Statnamic-Tests möglich wird. Ferner werden verschiedene Fallstudien angeführt.

1. EINFÜHRUNG

Nach dem Aufstellen der Gründungspfähle müssen die Pfähle auf ausreichende Tragfähigkeit und Pfahlsteifigkeit geprüft werden. In den Niederlanden bestimmen wir die Pfahlqualität gewöhnlich anhand der Bodenuntersuchungsergebnisse, der Entwurfsnormen und der Integritätsprüfungen zur Ermittlung der Pfahlgeometrie. In anderen Ländern ist die Ermittlung der Tragfähigkeit von Gründungspfählen integraler Teil des Pfahlgenehmigungsverfahrens.

Bei Ramppfählen muss das empfindliche Gleichgewicht zwischen der für das Eintreiben der Pfähle benötigten Energie und dem Bodenwiderstand berücksichtigt werden. Beim Eintreiben des Pfahls müssen die Druckwellen schwach genug sein und der Widerstand der Erdmatrix sollte nicht durch eine zu hohe Hammerschlagfrequenz beeinflusst werden. Die technischen Aspekte im Hinblick auf die Aufstellungsverfahren werden von Weele und Lencioni (4) behandelt.

Die Qualität von Ortbetonpfählen hängt maßgeblich von der Sorgfalt beim Pfahlgießen und der Erfahrung des Maschinisten ab. Die meisten Anlagen erfassen die Pfahltiefe und den Betondruck, es ist jedoch wünschenswert, dass eine mehr automatisierte Überwachung des Pfahlgründungsprozesses zu einer zuverlässigen Verbesserung der Gesamtqualität der Gründungspfähle führt.

Die in den Niederlanden eingesetzten Prüfmethode sind die anerkannte Standardroutine für eine Integritätsprüfung aller Gründungspfähle. Die Methode hat an Beliebtheit gewonnen, weil sie schnell und einfach durchzuführen und außerdem kostengünstig ist. Rezente technische Innovationen von TNO haben die Signalqualität der Integritätsprüfung verbessert, wodurch folglich die Prädikativtauglichkeit der Methode verbessert worden ist.

Zur Prüfung der Tragfähigkeit von Rammpfählen ist die Probelastungsmethode (SLT) am verbreitetsten, seitdem sie in den Richtlinien vorgeschrieben wird. Diese Methode ermöglicht eine möglichst praxisgetreue Prüfung, die Anwendung ist jedoch auf Grund verschiedener maßgeblicher Abhängigkeitsfaktoren recht begrenzt. Hauptgründe sind u.a. die Faktoren Zeit und Geld. Die statische Probelastung ist zeitaufwendig und kostbar, wodurch sie im allgemeinen eine Überziehung des Zeitschemas zur Folge hat. Eine andere Beschränkung sind die vielen unterschiedlichen Methoden in den jeweiligen Ländern, wodurch ein Vergleich der Prüfungsergebnisse bei ähnlichen Pfahl-Bodenkombinationen sehr erschwert und die Anwendungsmöglichkeit der Prüfungsergebnisse für neue Fälle beschränkt wird.

Obige Einschränkungen sind leicht zu überbrücken und nicht nur über Prüfungen. Eine alternative Lösung ist die dynamische Probelastung (DLT), bei der man ein Gewicht auf den Pfahl fallen lässt und die Belastungs- und Akzelerationssignale über Transducern am Pfahlschaft erfasst. Das ist eine schnelle, jedoch indirekte Methode zur Ermittlung der Tragfähigkeit. Für Ortbetonpfähle mit wechselnder Geometrie hat diese Methode verschiedene Nachteile.

Statnamic bietet seit Anfang der 90er Jahre eine Antwort auf den Bedarf der Industrie an preisgünstigen und akkuraten Prüfungsmethoden für hochwertige Gründungen. Birminghamer Foundation Equipment aus Kanada entwickelte zusammen mit TNO Building und Construction Research in den Niederlanden das Statnamic-Verfahren. Inzwischen ist Statnamic seit mehreren Jahren in Großbritannien anerkannt und in den Niederlanden als eine preisgünstige Prüfmethode

eingeführt worden. Das weltweite Interesse an Statnamic nimmt rasch zu. In den USA hat sich die Statnamic-Prüfung in den vergangenen drei Jahren von 1 Test/Monat auf einen 1 Test/Tag erhöht. Die verschiedenen Prüfmethode werden unten kurz zusammengefasst:

	Vorteile	Nachteile
SIT	Schnell und kostengünstig Auslegung ist Erfahrung nötig	Gute Signale erforderlich, für die
SLT	Wirklichkeitsnah	Zeitaufwendige und teure Methode
DLT	Relativ einfach, für für Rammpfähle ideal	Indirekte Methode, weniger geeignet für Ortbetonpfähle
STN	Akkurat, schnell und relativ einfach erfordert Zeit	Sonderausrüstung Die Akzeptanz in den Richtlinien

2. "LOW STRAIN"-PRÜFUNG (SIT)

In den frühen 70er Jahren hat TNO die Integritätsprüfung für die Ermittlung des Pfahlkopfes und von Mängeln wie Rissen, Einschlüssen und Einschnürungen entwickelt. Das Prinzip der Integritätsprüfung ist, dass mit einem Hammerschlag auf den Pfahlkopf eine Druckwelle durch den Pfahl geschickt wird. Der Respons wird mit einem Beschleunigungs-Transducer gemessen, der am Pfahlkopf befestigt ist. Das gemessene Signal gibt die Schallreflektion von Pfahlkopf, Pfahlschaft,

Pfahlgeometrie, Rissen, Verdickungen und Einschnürungen wieder. Das Prinzip der Integrität ist im Standard ASTM D 5882-96 beschrieben worden(5).



Die Zuverlässigkeit und Zweckmäßigkeit der Integritätsprüfung wurde in früheren Entwicklungsphasen in Frage gestellt. Wie mit jeder Prüfmethode sollte man sich der Beschränkungen auch dieser Testmethode bewusst sein. Die Methode eignet sich besonders zur Ersterfassung der Pfahlqualität. Für die Interpretation der Signale sind Instrumente und Erfahrung nötig und muss Einsicht ins jeweilige geo-technische Erdprofil und die Pfahlgründung vorhanden sein. "Distant"-Interpretation, die für neue Benutzer als leicht propagiert wird, impliziert das Risiko von Interpretationsfehlern.

Die Qualität und der Benutzerkomfort der Integritätsprüfung als sachgerechtes Erfassungs-Tool wird von folgenden Elementen beeinflusst:

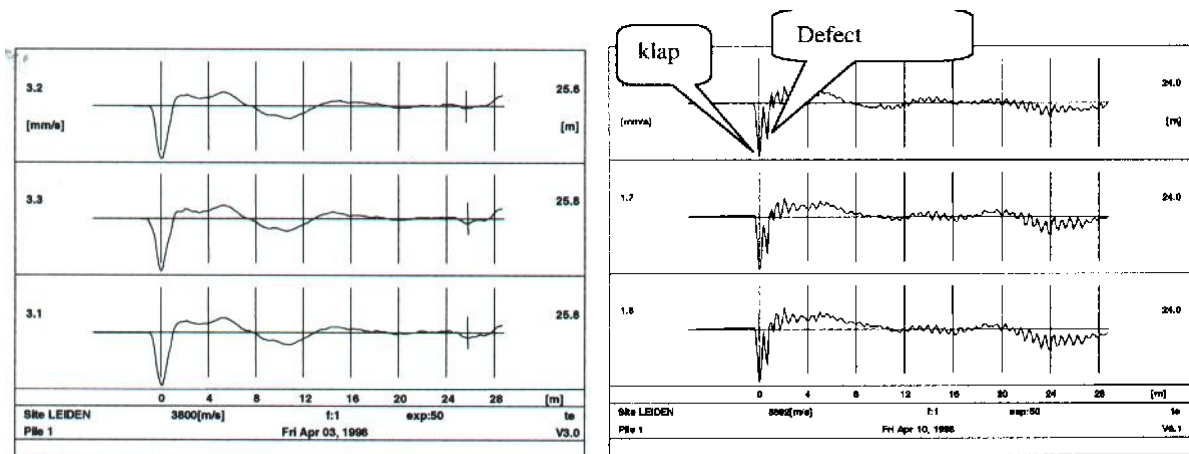
1. Signalqualität
2. Professionelle Interpretation der Signale
3. Einfache und schnelle Protokoll-Tools

Signalqualität

Die Signalqualität wird primär von der Genauigkeit der Messung bestimmt, der Hammerschlaglänge, dem Elektroschallpegel des Signals und dem Einfluss des Energieverlusts beim Abwärtsfließen der Schallwelle.

Um "verkehrte" Schläge mit dem Hammer zu vermeiden, schreibt die TNO-Methode ein Minimum von drei Schlägen pro Pfahl vor. Wenn die Ergebnisse sich gleichen, kann davon ausgegangen werden, dass die Messung korrekt durchgeführt worden ist. Die zeitliche Dauer eines Hammerschlags entspricht ungefähr 1-1,5 m Pfahllänge; damit sind die Reflektionsabweichungen in der Pfahlgeometrie im Pfahlkopf von 1,5 Meter und der Respons der

Hammerschlagsüberschneidung gemeint. Gemeinsam mit TNO-Bauforschung und Geomet wurde die Signalverarbeitung verbessert, um diese Beeinträchtigung zu überwinden (6). Die größte Verbesserung ist das andere Material für den Hammer, der kürzere Impuls im Pfahl und eine schwächere Signalverstärkung. Das heißt, dass härtere "Schläge" mit dem Hammer stärkere Signale aussenden.



Ergebnis mit "konventionellem" SIT-System

Ergebnis mit "verbessertem" SIT-System

Energieniveau und Signalgeräusche

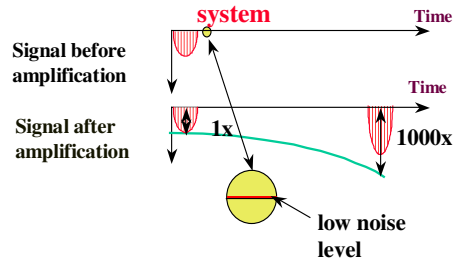
Wenn die Schallwellen nach unten fließen, verlieren sie durch die Bodenreibung Energie – Interaktion des Pfahlschaftes. Bei festen Bodensorten ist die Reibung am stärksten. Die Signale müssen stärker verstärkt werden. Sind die Schallpegel hoch, wird die gleichzeitige Verstärkung des "Elektroschalls" mit dem Originalsignal interferieren. In der "BabySIT" Signalkonditionierungs-Unit ist die Verringerung des Elektroschalls extra berücksichtigt worden.

Einfluss von Elektroschall

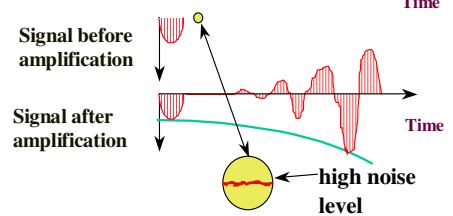
Die besseren Signale mit kürzeren Wellenlängen und niedrigerem Schallpegel sorgen dafür, dass der professionelle Benutzer Unregelmäßigkeiten im Pfahlkopf (80% der Pfahlmängel treten in den ersten 2 Metern unterhalb des Pfahlkopfes auf) rascher erkennt und er eine deutliche Pfahlkopfreaktion bei längeren Pfählen in schwerem Boden erhält.

For high shaft friction an amplifications of 100 to 1000x might be required

High quality integrity testing

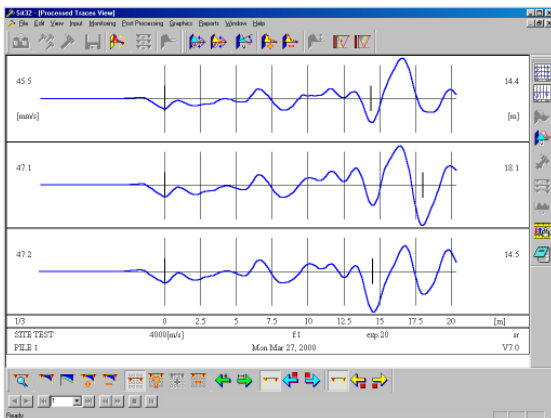


Low quality integrity testing system



Signalinterpretation und Protokoll

Die Kunden heutzutage achten im Rahmen von IS 9001-Anforderungen mehr auf die Qualität der Pfeiler. Die ISO-Zertifizierung beinhaltet, dass die Baufirmen in den Niederlanden ihren Kunden nachzuweisen haben, dass ihre Pfahlgründungsarbeiten kontrolliert und dokumentiert worden sind. Das bedeutet, dass es für die Baufirmen und beratenden Ingenieure ein deutlicher Vorteil ist, wenn die schnelle und problemlose Protokollierung ihrer Prüfergebnisse in einem für sie zur Weiterbearbeitung geeigneten Format vorliegt. SIT unter Windows hat die Flexibilität in der Protokollierung und bietet außerdem zusätzliche Tools für “Standortdurchschnitt” und den “Referenzpfahl”, die in unterschiedlichster Weise verwendet werden können.



Software-Maske SIT Windows



Pfähle mit starken Einschnürungen

3. AUTOMATISCHE STATISCHE PRÜFUNG (ASLT)

3000 Tonnen SLT (Jamnagar, India)

Für eine statische Probelastung wird die aktuelle Belastung unmittelbar auf den Pfahl übertragen, sobald eine Verschiebung wahrgenommen wird. In der Praxis dauert ein Belastungstest keine 24 Stunden. Dies ist ein Bruchteil der Lebensdauer der Gesamtkonstruktion.

Wenn man auf den Pfahl für die Prüfung eine tote Last legt, wird sich der Boden von der toten Last ablösen und nach oben kriechen. Die Bezugsstellen zur Messung der Pfahlverschiebung müssen gut befestigt sein.



Wenn Reaktionspfähle verwendet werden, muss die Pfahlsteifigkeit im allgemeinen über den angenommenen liegen und muss der Abstand zwischen dem Pfahl und den Reaktionspfählen groß genug sein, um Interferenzen zu vermeiden. Bei ASTM D1143 (10) sollte dieser Abstand 5x der Pfahldurchmesser mit einem Minimum von 2,1 m sein. ATSM schreibt eine schrittweise Erhöhung der Last vor. Der nächste Schritt wird durchgeführt, wenn die Verschiebung kleiner ist als 0,25 mm/Stunde bei einer Dauerbelastung von bis zu 2 Stunden.

In den Niederlanden ist es üblich, erst 5 Änderungen vorzunehmen, bevor man zum nächsten Lastzyklus übergeht, siehe Weele-Methode (12).

Der Sinn dieser Methode liegt in der Abweichung zwischen der Schaft- und Pfahldefriktion, wenn die Last freigesetzt wird. In diesem Fall wird die Schaftfriktion rascher freigesetzt als die Friktion im Pfahlende. In der Gleichgewichtssituation gleicht die Schaftfriktion den verbleibenden Widerstand im Pfahlkopf aus. Die Prüfungen wurden in der Maasvlakte (13) mit fünf Änderungen und ohne Änderungen vor dem nächsten Zyklus durchgeführt. Das ergab, dass mit Änderungen der Schaftwiderstand bis zu 20% höher war.



Die neueste Entwicklung in der statische Probelastung ist die vollautomatische Prüfung. TNO Profound hat ein automatisches Probelastungssystem (ASLT) entwickelt, das die Beobachtung der statischen Probelastungen aus Entfernung ermöglicht. Das erübrigt den manuellen Tonmitschnitt und spart die Kosten für den Techniker, der die Prüfung während der Nacht kontrollieren muss.

Automatische statische Probelastung (ASLT)

4. DYNAMISCHE PROBEBELASTUNG (DLT)

Die dynamische Probebelastung wird weltweit angewandt, um die Beschränkung der statischen Probebelastung zu überwinden. Für eine dynamische Probebelastung werden zwei Sensoren mit dem Pfahl in der Nähe des Pfahlkopfes verbunden. Die Sensoren haben eine Mehrfachfunktion: sie messen die Spannung und die Beschleunigung. Über Fertigbetonpfähle werden die Sensoren mit Ankerbolzen mit dem Pfahl verbunden. Das Pfahlgewicht ist in der Mitte der Stahlplatte mit einem Führungsbalken befestigt worden. Ein Schlaghammer oder ein schwerer Block wird auf den speziell dafür vorbereiteten Pfahlkopf niedergelassen. Die so entstandene Druckwelle fließt durch den Pfahl hinunter und wird vom Pfahlende zurückgeworfen. Die gemessenen Druckwellen werden verarbeitet und automatisch gespeichert.

Durchführung einer DLT-Prüfung



harte Bodenschichten.

Das Lastverschiebungsdiagramm ist von einem Simulationsprogramm für Druckwellen berechnet worden (TNOWAVE oder CAPWAP). Ausgehend von der am Kopf gemessenen Kraft werden die Bodenparameter angepasst, um eine gute "Übereinstimmung" zwischen den aufgezeichneten und berechneten Geschwindigkeit zu erreichen. Das Erdbodenmodell gibt die Bodenmerkmale wieder und wird zur Berechnung des Lastverschiebungsdiagramms verwendet. Weil die verschiedenen Erdbodenparameter eine "Übereinstimmungsähnlichkeit" aufweisen können, ist die Erfahrung und Expertise des Ingenieurs von ausschlaggebender Bedeutung für eine richtige Auslegung der Daten. Der größte Störfaktor ist die Tatsache, dass örtliche Verdickungen ähnliche Reflexionen geben wie

Die berechnete Kraft $F=E\varepsilon A$ (E = Elastizitätsmodul, A = Querschnittsbereich, ε = Dehnung) abhängig von den Materialkonditionen des Pfahls und dem Querschnitt des Pfahls. Der Elastizitätsmodul wurde berechnet ausgehend von $E = c^2 \rho$ mit $c = 2L/T$. (c = Wellengeschwindigkeit, ρ = Materialdichte, L = Pfahlänge, T = Fließzeit der Schallwelle durch den Pfahl). Einen Fehler von 5% bei c führt zu einem Fehler von 10% bei F .

E schwankt abhängig von Zeit, Betonqualität (16), Schlaggeschwindigkeit (17) und Temperatur (18).

Die dynamische Probelastung ist eine indirekte Prüfmethode. Man sollte auf die oben angegebenen Beschränkungen achten. Weil die Methode auf einer Druckwellenanalyse basiert, sollten die Signale deutlich genug sein.

Querschnitts-Verdickungen



Bei Ortbetonpfählen kann die gelieferte Schlagenergie zu gering sein, um die volle Kapazität zu mobilisieren bzw. kann der Druck zu hoch werden, wodurch das Risiko besteht, dass der Pfahl während der Prüfung beschädigt wird.

Im Hinblick auf Obiges eignet sich die dynamische Probelastung vor allem für Rammpfähle. DLT kann bei Ortbetonpfählen zu schweren Fehlern in der Feststellung der Tragfähigkeit führen und wird abgeraten. In einem Markt, in dem Ortbetonpfähle und überdimensionierte Pfähle stets öfter vorkommen, wird empfohlen, nach Alternativen für die dynamische Probelastung zu suchen.

5. STATNAMIC-PROBEBELASTUNG

Bis heute wurden mehr als eintausend Statnamische Probelastungen in Kanada, den USA, Japan und vielen anderen Ländern in der Welt durchgeführt. Die derzeit verfügbaren Anlagen können Statnamic-Probelastungen bis 30 MN durchführen. In den nächsten Jahren ist mit dem Bau einer sehr viel größeren Anlage zu rechnen (60 MN oder höher).

Das statnamic Prinzip basiert auf der Übertragung der Reaktionsmasse vom Pfahlkopf. Die Übertragung findet unter Generierung von Hochdruck in einem Zylinder statt, durch die Verbrennung einer speziellen Flüssigkeit. Als Reaktion auf die Übertragung wird der Pfahl vorsichtig in den Boden gedrückt. Die Last, die auf den Pfahlkopf kommt wird von einer Art von Lastzelle gemessen.

Eine 4MN Statnamic-Probelastung in den Niederlanden



Die Verschiebung des Pfahlkopfes wird mit einem speziell dafür entwickelten Laser-Sensor gemessen. Die Lastzelle und der Lasersensor sind integrierte Komponenten der Statnamic-Probelastungsanlage. Am Pfahlschaft werden keine Instrumente befestigt. Die benötigte Reaktionsmasse beträgt 5% der generierten Kraft. Die Statnamic-Hochpräzisionsanlagen können für mehr als nur Pfahlprüfungen verwendet werden, sie können auch für die Prüfung von Pfahlgruppen und strukturellen Elementen wie Brückenpfeiler und Flachgründungen verwendet werden. Weil das Statnamic-Prinzip auf der Beschleunigung der Masse beruht, können Pfähle in jeder Richtung geprüft werden, auch horizontal und unter

Schrägungen.

Die Dauer und die Lastrate einer Statnamic-Prüfung kann mit dem Volumen der Brennkammer und der Form der Zylinder und des Pistons gesteuert werden, mit dem die Menge und die Art des Treibstoffs und der Umfang der Reaktionsmasse geregelt werden. Folglich kann die Last in kleineren Schritten erhöht werden und für eine sehr viel längere Zeitspanne als es mit einer dynamischen Probelastung möglich ist. Diese Statnamic-Dauerprobelastung eignet sich für alle Pfahlniveaus und ähnliche Verschiebeverhalten, die auch mit der statischen Probelastung erfasst werden können. Das rechtfertigt eine einfache Formgebung von Pfahl und Boden, in die das Druckwellenphänomen nicht einbezogen werden muss. Der Pfahl wird als Masse erfasst, auf den die statnamiche Kraft, die Trägheitskraft und der Bodenwiderstand einwirken (Abb. 1).

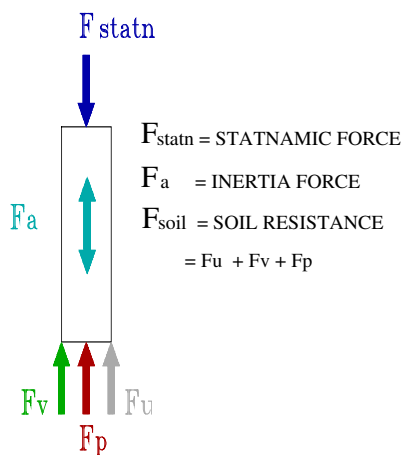


Abb. 1. Auf den Pfahl einwirkende Statnamic-Lastkräfte

Die Entwicklung von STATNAGIC

Weltweit wurden im letzten Jahrzehnt über tausend Statnamic-Prüfungen durchgeführt. Die ersten Entwicklungsschritte von Statnamic fanden in Kanada, USA, Fernost statt, wo die sich stark entwickelnden Wirtschaften einen lebhaften Bedarf an Pfahlprüfungen hatten. Dort konnte viel verdient werden, insbesondere bei größeren Bauvorhaben, bei denen sich die Pfahlprüfung als umständlich und teuer erwies. Zahlreiche Vergleiche zwischen den statischen und statisch-dynamischen (Statnamic) Prüfungen an Ramm- und Ortbetonpfählen haben die Behörden zufrieden gestellt und den Nachweis erbracht, dass Statnamic-Tests eine gute Alternative für statische Probelastungen sind. Die Anerkennung war da, nachdem die Behörden gesehen hatten, dass die

Ergebnisse den Statnamic-Prüfungen tatsächlich den statischen Tests entsprachen bzw. gleich waren.

Bereits im ersten Jahr zeichnete sich der Wunsch ab, Statnamic auch für höhere Belastungen zu verwenden. Es wurden Statnamic-Anlagen für bis zu 30 MN entwickelt, die noch immer in größeren Offshore-Projekten eingesetzt werden. Von Anfang an standen die wirtschaftlichen Vorteile bei den Großprojekten im Vordergrund.

Nachdem Statnamic die ersten Schritte in Asien setzen konnte, entwickelt sich schnell eine allgemeine Akzeptanz dieses Verfahrens, auch in den USA. Der Prüfungsbedarf wächst ständig und bis heute sind ungefähr 300 Statnamic-Prüfungen allein schon in den USA durchgeführt worden. Die Art und Weise, wie Statnamic in den USA eingeführt worden ist, war dieselbe wie für seine Anerkennung in Fernost. Erst wurden Vergleichsstudien zwischen der statischen und Statnamic-Probebelastungsprüfungen durchgeführt, um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit von Statnamic zu überprüfen, bevor die zuständigen Behörden bereit waren, diese Methode zu akzeptieren.



Querbelastungsprobe mit Statnamic in den USA

Verschiedene Fallhistorien in den Niederlanden und Deutschland in den frühen 90er Jahren beweisen die Zufriedenheit und gute Übereinstimmung zwischen dem statischen Lastverhalten den Statnamic- und den statistischen Probebelastungsergebnissen. Fazit:

- Bei der Statnamic-Probebelastung kann das Pfahlverhalten als Masse genommen werden, auf die Trägheitskräfte und Bodenwiderstand einwirken. Damit ist eine einfache Berechnung des statistischen Belastungsverhaltens möglich.
- Die Statnamic-Probebelastung kann für Pfähle in Böden mit stark dynamischem Response durchgeführt werden.

- Der Entladepunkt (maximale Verschiebung) im Statnamic-Lastverschiebungsdiagramm erlaubt eine direkte Berechnung des maximalen statischen Bodenwiderstands während der Prüfung.

Europa war ziemlich zurückhaltend in der Anerkennung von Statnamic als alternative Prüfungsmethode. Der Grund dafür ist eine traditionell bedingte Vorliebe für die statische Probelastung bei klar umrissenen und sicheren Fällen. Im Laufe der Jahre hat sich jedoch bei den Rammpfählen ein Markt für die dynamische Probelastung entwickelt und inzwischen stabilisiert.

Das Bedürfnis andere Methoden anzunehmen war nicht groß, weil die bestehenden Vorschriften die Statnamic-Prüfung nur selten oder nicht als anerkannte Methode für eine Pfahlprobelastung erwähnen und der Markt davon ausgeht, dass die Statnamic-Prüfung sehr teuer sei. Die Frage, ob eine Pfahlprüfung durchgeführt werden soll oder nicht hängt vor allem von den zur Verfügung stehenden Finanzen und dem Urteil des Experten vor Ort ab. Geld entscheidet offensichtlich über die Qualitätssicherheit und folglich werden viele Bauwerke ohne reguläre Prüfung der Grundpfähle errichtet. Der Grund, weswegen man statische Probelastungen als zu teuer ansieht, ist der hohe Zeitaufwand. Dynamische Probelastungen sind auf Grund ihrer Begrenzungen nur selten anzuraten.

Um Statnamic-Tests interessant zu machen, richtete man sich auf niedrigere Pfahlprobelastungen bis zu 250 – 350 Tonnen insbesondere dort, wo Zeitdruck herrschte und eine Bauverzögerung vermieden werden musste. Für größere Lasten (ab 1000 Tonnen aufwärts) ist Statnamic eine ausgezeichnete Lösung zusammen mit einem Referenzwert einer statistischen Probelastung in größeren Projekten, bei denen eine Prüfung ein integraler Teil der Gründungsgenehmigung ist, mit der viel Zeit und Geld eingespart werden kann. Ein Nachteil ist, dass Statnamic ein Spezialgerät erfordert und die Investition sich durch genügend Prüfaufträge zurückverdienen müssen. Der Wettbewerb mit den gängigen kostengünstigen statischen und dynamischen Prüfmethode ist hart. Außerdem sind die Vorschriften in den meisten europäischen Ländern im Hinblick auf Statnamic als akzeptable Alternative für Pfahlprobelastungen als Ersatz oder zusätzlich zu den statistischen Probelastungen noch lange nicht angepasst.

Einführung von Statnamic in den Niederlanden und Europa

Als Antwort auf das wachsende Interesse für Statnamic in Europa hat TNO sich dazu entschieden, TNO Profound (Professional Foundation Diagnostics) zu errichten, damit Statnamic in Europa weiter introduziert wird. Angesichts der umfassenden Expertise in der Gründungstechnologie bei TNO Bauforschung ist eine solide Grundlage für den Erfolg von Statnamic wie in Fernost und den USA gelegt.

Seit der Gründung im März 1999, hat TNO Profound 4 MN Statnamic-Anlagen an zentraler Stelle in den Niederlanden für Prüfungen in Europa. Das hat den Markt für Statnamic in Europa eröffnet. *Vergleichsstudie statische Probelastung, dynamische Probelastung und Statnamic mit WTCB (Belgien), August 1999.*



Es wurden Schritte unternommen, um ein zweites 16 MN-Gerät im mitteleuropäischen Markt zu positionieren mit dem Ziel, eine Statnamic-Prüfanlage für den lokalen Markt verfügbar zu haben, um die Prüfungsservices zu wettbewerbsfähigen Preisen zu liefern.

In 1999 war TNO Profound an verschiedenen Forschungsprojekten in Europa beteiligt, bei denen die statischen und dynamischen Probelastungen mit den Testergebnissen der Statnamic-Prüfungen an den selben bzw. ähnlichen Pfählen verglichen werden. Die Projekte wurden gemeinsam mit Jacobo (Niederlande), WTCB (Belgien), der TU von Budapest (Ungarn) durchgeführt. Die Schlussfolgerung war, dass Statnamic technisch eine gute Alternative für die statische Pfahlprobelastung ist. Es sind Vorbereitungen getroffen worden, um ähnliche Projekte in Deutschland zu initiieren, obgleich in Deutschland eine starke Tradition in dynamischer Probelastung herrscht. Die Bereitschaft für die Verwendung von

Statnamic in Deutschland nimmt zu, in dem Umfang, in dem die Statnamic-Prüfungen wirtschaftlich interessanter werden.

Diese Pilotprojekte sind Trendsetter in der Anerkennung der neuen Technologie im Markt. Die Methode von TNO Profound zur Einführung des neuen Konzeptes ist Seminare und Schulungskurse zu organisieren, um potentielle Benutzer mit dieser neuen Technologie vertraut zu machen. Diese Einführung umfasst einen theoretischen Teil, worin der geo-technische Hintergrund von Statnamic erläutert wird und ein weiterer Teil, in dem das Prüfverfahren vorgeführt wird.

Es bestehen Kooperationen mit führenden Universitäten und Forschungsinstituten in diesen Ländern, damit eine adäquate technische Unterstützung gesichert und eine Akzeptanz erteilt wird, um den Weg zur Einbindung von Statnamic in die nationalen Vorschriften zu erreichen. Das bedeutet Training, Ausbildung und eine permanente Einführung der Technikern in die Welt von Statnamic.

Neue Länder, die von TNO Profound abgedeckt werden sind Spanien und die Türkei, die lebhaft an der Einführung von Statnamic interessiert sind. TNO Profound bereitet derzeit ihre erste Statnamic-Vorführung in Spanien und Polen vor. TNO Profound arbeitet mit Schlüsselpartnern zusammen, um Statnamic in die Vorschriften zu bekommen und um 2001 und den folgenden Jahren mehr Static-Statnamic-Vorführungen geben zu können. Infrastrukturelle von der EU geförderte Investitionen für die bereits aktiven Länder können sich als treibende Kraft für die Einführung von Statnamic in Europa erweisen.

Hauptgründe für die Einführung von Statnamic auf dem europäischen Kontinent

Vorschriften

Traditionsgemäß werden in den meisten europäischen Ländern statische Probelastungen mit speziell dafür gefertigten Testpfählen durchgeführt. Die Last umfasst ungefähr das 1,5 – 2,0-fache der vorgeschriebenen Last. Diese statischen Probelastungen erfordern viel Vorarbeit und die Testpfähle müssen sorgfältig ausgewählt und für die Prüfung vorbereitet werden. Ein kostbarer und zeitraubender Aufwand. Aus diesem Grunde sind statische Probelastungen in den Niederlanden nahezu verschwunden und verlieren auch in anderen Ländern wie Belgien an Popularität. Zeit und

Baukosten stehen unter Druck und aufwendige Prüfverfahren müssen auf ein absolutes Minimum beschränkt werden.

In Europa setzt man in den meisten Ländern alternative Belastungsprüfmethoden ein, die nicht in den Vorschriften enthalten sind. Das verhindert die umfassendere Einführung und Akzeptanz anderer innovativer und einfacherer Methoden.

Insbesondere in Deutschland hat man wachsendes Interesse an der dynamischen Probelastung, weil sie benutzerfreundlicher sind. Das Fallgewicht des Hammers oder dynamischen Belastungsprüfgerätes (DLT) ist sehr viel kleiner (1%).

Bauingenieure oder lokale Organisationen können sich für DLT oder Statnamic entscheiden, wenn sie für den jeweiligen Zweck als geeignet angesehen. Die Anwendung hängt von der Verfügbarkeit einer Prüfungskapazität ab und wird fallweise dort eingesetzt, wo Bedienungskomfort, Zeitdruck und wirtschaftliche Aspekte wichtig sind. Für Ortbetonpfähle ist Statnamic die bevorzugte Methode. TNO Profound setzt sich dafür ein, dass alternative Prüfmethoden wie Statnamic in die nationalen Vorschriften der EU-Länder integriert werden. Das ist die entscheidende Voraussetzung für die breite Akzeptanz von Statnamic in Europa. Es müssen Statnamic-Vorführungen abgehalten werden, bei denen akademische und staatliche Vertreter anwesend sind, um Entscheidungsträger mit dieser Methode vertraut zu machen.

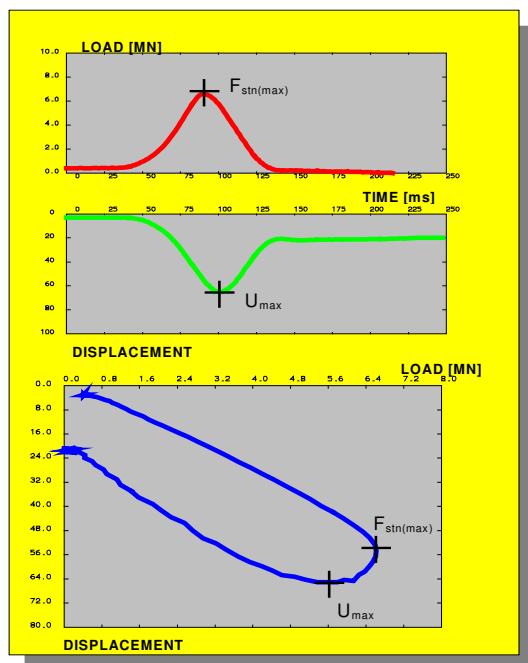
Statnamic als geeignete Prüfungsalternative

Statnamic wurde in den Niederlanden vor allem dort eingesetzt, wo alternative Prüfmethoden auf Grund ihrer technischen Beschränkungen (DLT bei Ortbetonpfähle führt leicht zu unzulänglichen Ergebnissen) nicht wirklich in Betracht kommen, wo Zeitdruck herrscht oder unvorhergesehene Mehrkosten anfallen. Statnamic erfordert nicht, dass die Routine der statistischen Probelastung weggelassen wird, vielmehr wurde Statnamic entwickelt, um die Tragfähigkeit bestehender Pfähle für eine Wiederverwendung zu testen bzw. Zweifel über die Leistungsfähigkeit bei zerstörten Bodenprofilen zu klären, dort, wo konventionelle Berechnungs- und Prüfmethoden nicht genügen. Versickerung von Grundwasser ist einer der Hauptgründe. Statnamic ist auch dort ideal, wo viele Pfähle in kurzer Zeit geprüft werden müssen. Bei solchen Großprojekten fehlen Statnamic im EU-Rahmen noch immer genügend Referenzprojekte.

Wenn in den Niederlanden neue Pfahlsysteme introduziert werden, müssen auch die geeigneten Berechnungsfaktoren für die Pfahltauglichkeitskriterien festgelegt werden. Routine ist, eine statische Probelastung durchzuführen. In immer mehr Fällen entscheiden sich die Experten die Verwendung von Statnamic als Alternative.

Wirtschaftliche Aspekte

Der Preis pro Pfahl für eine statische Prüfung hängt von der erforderlichen Last und den jeweiligen Vor-Ort-Bedingungen ab, unter denen die Prüfung vorgenommen werden muss. Für Pfähle, bei denen Belastungen von ca. 300 – 500 Tonnen geprüft werden müssen, liegt der Preis pro Pfahl im allgemeinen zwischen EUR 10.000 – 20.000.



Signale einer Statnamic-Prüfung

Wenn mehr Pfähle getestet werden müssen, können keine Mengenvorteile erzielt werden, weil jeder Pfahl einzeln vorbereitet werden muss. Wenn eine statische Probelastung mit dem Statnamic-Verfahren verglichen wird, wird im allgemeinen eine Kosteneinsparung von 30-60% erzielt. Der wirkliche wirtschaftliche Mehrwert liegt nicht sosehr in den Prüfkosten selbst, sondern

vielmehr in dem Zeitgewinn den Statnamic ermöglicht. Für Statnamic ist keine Vorbereitungszeit nötig, es sind keine Reaktionspfähle notwendig, die Pfähle für die Prüfung können frei gewählt werden und die Prüfungsergebnisse sind sofort auf dem Bildschirm abzulesen. Damit eine sofortige Entscheidung im Hinblick auf weitere Prüfnotwendigkeiten möglich. Für die Kalibrierung von Statnamic ist es immer zu empfehlen, eine Vergleichsprüfung anhand einer statischen Probelastung vorzunehmen.

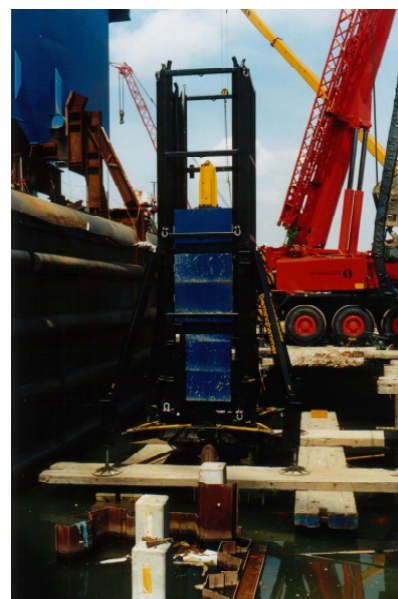
Der Preis für Statnamic und dynamische Probelastung wird weitgehend von den Kosten der benötigten Prüfanlage beeinflusst. Wenn die Prüfausrüstung für die Prüfung eines Pfahls benötigt wird, ist der Preis verhältnismäßig höher. Wenn mehrere Pfähle auf einer Baustelle geprüft werden müssen, liegt der Preis pro Pfahl entsprechend niedriger. Bei einem Vergleich von Statnamic mit einer DLT-Pfahlvorbereitung ist Statnamic einfacher, wohl wird für den Aufbau der Prüfanlage mehr Zeit benötigt. Wenn ein beweglicher Kran und Fallgewichte verfügbar sind, können mit DLT 4-6 Pfähle an einem Tag getestet werden. In Europa können mit DLT Preise von EUR 2.000 – 3.500 pro Pfahl erzielt werden, beim Statnamic-Verfahren liegen die Preise pro Pfahl in der Größenordnung von EUR 2.500 – 4.000 pro Pfahl. Die Differenz von 15 – 20% ist vor allem auf die Wertverminderung, den Treibstoff und die Frachtkosten der Statnamic-Prüfanlage zurückzuführen.

MARKANTE FALLSTUDIEN ÜBER STATNAMIC IN DEN NIEDERLANDEN

1. Statnamic-Pfahlprüfung in Rotterdam

Projektdaten

Standort	: Rotterdamer Hafen : Wilton-Feijenoord
Datum	: Juni 1999
Kunde	: Van Hattum & Blankevoort
Prüfung	: Vorgefertigte Pfähle 420x420 4 Pfähle, 23 m Länge (neu) 2 Pfähle, 24 m Länge (bestehend)
Auflast	: 2 – 4 MN



Projektangaben

Auf einem der Piere im Rotterdamer Hafen sollte ein neuer Container-Kran zur Beladung großer Schiffe gebaut werden. Man wollte den Bewegungsradius des neuen Krans bis auf einen Teil des vorhandenen Piers erweitern. Es stellte sich damit die Frage, ob die Pfähle unter dem bestehenden Pier stark genug sind, um die zusätzliche Last aufnehmen zu können. TNO Profound wurde gebeten, mit einer Höchstbelastung von 3,5 MN die Tragfähigkeit der Pfähle zu prüfen.

Projektmerkmale

Die Pfähle mussten über Wasser unter schwierigen Standortbedingungen und mit einer beschränkt verfügbaren Krankapazität sowie unter ständigem Zeitdruck (Seeschiffe müssen beladen werden) geprüft werden. Eine statische Probelastung und DLT waren auf Grund der Uferlinie nicht geeignet. Die 4 MN Statnamic-Anlage wurde als Ganzes von Pfahl zu Pfahl befördert. Die sorgfältige und genaue Installation der Statnamic-Anlage oberhalb der Wasseroberfläche ist eine zeitraubende Aufgabe. Zwei Pfähle wurden pro Tag mit einem bis zwei Testzyklen pro Pfahl geprüft.

Ergebnisse

Die Pfähle wurden mit folgenden Auflasten versehen:

	Max. Belastung (statisch) in kN	Verschiebung (in mm) (gesamt) (permanent)	
Pfahl 1:	4190	20,8	3,5
Pfahl 2:	3980	19,5	3,7
Pfahl 3:	3960	18,8	5,0
Pfahl 4 (Schritt 1):	2750	12,1	2,0
Pfahl 4 (Schritt 2):	4340	17,6	1,5

Ergebnis

Das Ergebnis war, dass die bestehenden Pfähle die errechnete Auflast ohne weiteres tragen können und für den Ausbau des Piers verwendet werden konnten. Nach dem ersten Test wollte der Kunde, dass das Prüfverfahren auf die Ermittlung der Höchstbelastung bzw. dem Grenzwert erweitert würde. Die Tests ergaben, dass die Aufnahmefähigkeit der bestehenden Pfähle die Tauglichkeitsanforderungen bei weitem erfüllt.

2. Statnamic-Pfahlprüfung in Eindhoven

Projektdaten

Standort	: Eindhoven Bahnhof : Großes Einkaufszentrum
Datum	: Oktober 1999
Kunde	: Inpijn-Blokpoel Consultants
Prüfung	: Jacbo Avegaar Palen (Ortbeton) 15 Pfähle, 21 m Länge (neu)
Auflast	: 2,5 – 4 MN



Projektangaben

Hinter dem Bahnhof wurde ein großes Einkaufszentrum errichtet. Die Bauarbeiten hatten mit Verzögerungen zu kämpfen und die Schwierigkeiten mit der Gründung beeinträchtigten den termingerechten Projektfortschritt. Die Pfähle standen in einer 6-7 Meter tiefen Baugrube und die Prüfung hatte ergeben, dass verschiedene Pfähle im Versickerungsbereich schlecht waren. In der Mitte des höchsten Baus waren die Pfähle dicht nebeneinander im Abstand von 1,8 m eingerammt worden. Nachdem die Rammpfähle eingeschlagen worden waren, sickerte Grundwasser ein und stieg während der Arbeiten immer höher. Das Sickerwasser wurde durch Aufschüttung gestoppt, jedoch war die Bodenstabilität bei den Pfählen dadurch gestört. Man zweifelte, ob die Pfähle unter dem Hauptbau, deren Tragfähigkeit anhand durchschnittlicher Bodenbedingungen errechnet worden waren, ausreichen würden.

Projektmerkmale

Es wurde erst an einem Pfahl, der nicht in den Sickerwasserbereich viel, ein Referenztest vorgenommen. Die Ergebnisse der Statnamic-Prüfung wurden mit den Prüfergebnissen der vom Sickerwasser betroffenen Pfähle verglichen. Es war auch angegeben worden, dass abhängig von den Prüfergebnissen die Anzahl Pfähle bestimmt werden sollten, die geprüft werden mussten. Bei den für die Prüfung auszuwählenden Pfählen ging man von den am schwersten getroffenen in konzentrischen Kreisen bis zu den weniger vom Sickerwasser betroffenen Pfählen.

Ergebnisse

Das Ziel war die Minimierung des Zeitaufwandes für die Prüfung. Bei den ersten Prüfungen trat zu Tage, dass die zyklische Prüfung sich positiv auf die Tauglichkeit der Pfähle auswirken würde. Es wurde beschlossen, 2-3 zyklische Belastungsproben für die am schwersten betroffenen Pfähle durchzuführen. Die Pfähle wurden mit folgenden Auflasten versehen:

	Max. Belastung (statisch) in kN	Verschiebung (in mm)	
		(gesamt)	(permanent)
Pfahl 1:	2220	11,1	7,0
Pfahl 2:	2130	8,1	4,1
Pfahl 3:	3460	27,9	21,5
Pfahl 4 (Schritt 1):	2450	9,1	2,4
Pfahl 4 (Schritt 2):	3110	18,5	3,5

Ergebnis

Es konnte festgestellt werden, dass die Pfahlstärke noch gerade innerhalb der zulässigen Grenzen lag. Die Signalübereinstimmung mit TNOSTN wies aus, dass die Bodenoberschichtfraktion in den oberen 4 m sich auf 35% der von der Versickerungserscheinung betroffenen Pfähle betrug. Die gesamte Tragfähigkeit war davon ernsthaft betroffen, die unteren Bodenschichten kompensierten diesen Verlust und boten noch immer genügend Kapazität für die notwendige Unterstützung dieser Pfahlgründungen.

3. Statnamic Pfahlprüfung in Utrecht

Projektdaten

Standort	: Utrecht Jaarbeurs Messekomplex
Datum	: Dezember 1999
Kunde	: Jacbo/HBG
Prüfung	: Jacbo Omega Pfähle (Ortbeton) 2 Pfähle, 18 m Länge (neu)
Auflast	: 2,5 – 3,5 MN



Projektangaben

Auf dem Messegelände der Jaarbeurs will die Stadt Utrecht eine neue Halle errichten. Mit der Routineprozedur werden die Ergebnisse aus den CPT-Prüfungen vor und nach den Pfahlbauarbeiten verglichen. Diese Werte ihrerseits werden mit den zulässigen Belastungswerten verglichen, wie sie in den niederländischen Standard-Vorschriften für Omega-Pfähle niedergelegt sind. In einer der Ecken des Gebäudes wiesen die CPT-Ergebnisse nach der Verpfählung Werte auf, die unter den Grenzwerten lagen. Es wurden Statnamic-Prüfungen vorgenommen, um zu verifizieren, ob die Pfahlwerte innerhalb der zulässigen Grenzen lägen.

Projektmerkmale

Dieses Projekt ist für die allgemeine Situation in den Niederlanden typisch, bei der die Standardprozedur nicht die statische Probelastungen ist, sondern man sich auf die Ergebnisse der CPT-Prüfungen bei Verpfählungsarbeiten verlässt. Lassen die CPT-Ergebnisse zu wünschen, nur dann sind die Bauingenieure dazu geneigt, die Gründung kontrollieren zu lassen, wenn der Pfahlbaufirma nachwiesen kann, dass die Werte der Pfähle binnen den Grenzwerten liegen. TNO Profound wurde gebeten die Prüfung vorzunehmen und die Tragfähigkeit der Omega-Pfähle zu beurteilen. Zyklischen Statnamic-Prüfungen an einem Referenzpfahl und dem fraglichen Pfahl wurden miteinander verglichen und anhand davon die Tragfähigkeit der getesteten Pfähle ermittelt. An beiden Pfählen wurden 4 zyklische Probelastungen zur Ermittlung des Ausfallrisikos durchgeführt. Die Ergebnisse waren zur vollen Zufriedenheit der Bauingenieure.

Ergebnisse

Das Ziel war die Kostenminimierung und damit die Zeit, die für die Prüfungen benötigt wurde. Die Ergebnisse waren befriedigend und die Grundpfähle wurden von den Bauingenieuren genehmigt.

Die Pfähle wurden mit folgenden Auflasten versehen:

	Max. Belastung		Verschiebung (in mm)			
	(statisch) in kN		(gesamt)		(permanent)	
	Pfahl 1	Pfahl 2	Pfahl 1	Pfahl 2	Pfahl 1	Pfahl 2
Schritt 1	1690	1850	16,3	19,2	12,0	10,0
Schritt 2	2170	2570	16,0	15,5	13,0	12,0
Schritt 3	2190	2730	9,9	36,1	6,0	28,0
Schritt 4	3110	3140	18,5	38,5	9,0	31,0

Ergebnis

Man stellte fest, dass sich Statnamic wiederum auch dort als einfache und wirksame Methode zur Prüfung der Tauglichkeit von Ortbeton-Rammpfähle erwiesen hat, wo CPT-Tests ein zweifelhaftes Ergebnis gebracht hätte. Die Statnamic-Prüfung bestätigte, dass in manchen Fällen die Auslegung der CPT-Tests allein schon zu fragwürdigen Ergebnissen führen kann. Mit Statnamic hat man ein wirksames Tool zur unabhängigen Verifizierung der tatsächlichen Tauglichkeit der geprüften Pfähle in der Hand.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die Pfahlprüfungsstrategie in den Niederlanden beruht auf dem Prinzip des maximalen Outputs zu möglichst niedrigen Kosten. Damit ist gemeint, dass die Genehmigung von Pfahlgründungen aus folgenden Schritten besteht.

Anhand eines CPT-Tests und einem bestimmten (bekannten) Pfahltyp erhält man eine Angabe über die Tragfähigkeit des Pfahls. Dann können als Standardroutine alle Pfähle mit der Integritätsprüfung getestet werden. In den Niederlanden testen erfahrene Prüfbetriebe bis zu 400-500 Pfähle am Tag. Die Kosten der Prüfung hängen mehr von den Mobilisationskosten als der für die Prüfung benötigten Zeit ab. Die Kosten für die zusätzliche Prüfung aller Pfähle sind ein Bruchteil und sind zu vernachlässigen. Wenn die SIT-Ergebnisse positiv ausfallen, werden die Pfähle im allgemeinen akzeptiert.

Sind die SIT-Ergebnisse fraglich, kann der Ingenieur vor Ort eine Probelastung anordnen. Als Alternative zur Probelastung ist bei eingetriebenen vorgefertigten Pfählen eine dynamische Probelastung zu empfehlen und bei Ortbetonpfählen empfiehlt sich eine Statnamic-Prüfung. Mit diesen zwei Vorgehensschritten werden die zusätzlichen Kosten für Probelastungen ausgespart, sofern die Pfähle keine anderen Mängel aufweisen. Falls Pfähle mit Mängeln erkannt werden müssen, kann der Bauingenieur vor Ort eine Probelastung für die fraglichsten Pfähle anordnen und daraus seine Schlussfolgerungen ziehen.

Wenn die schlechtesten Pfähle nach der Prüfung noch immer ein vertretbares Verhalten aufweisen, kann mit Sicherheit angenommen werden, dass alle Pfähle die erforderliche Tauglichkeit haben. Es lässt keinen Zweifel, dass die erläuterte Prüfungsstrategie auch für die anderen europäischen Länder ein umfassendes Potential aufweist. Europa ist eine Region, in der Statnamic ebenfalls ein großes Entwicklungspotential hat. TNO Profound hat aktiv die Promotion von Statnamic in Europa zur Hand genommen und strebt danach, Expertisecenter in europäischen Ländern anzuregen, um Statnamic-Aktivitäten zu initiieren. TNO Profound kann ihre 4MN-Anlage für Prüfungen zur Verfügung stellen und die Partner bei der Einführung unterstützen. Statnamic kann die Probelastung ersetzen, wenn durch abgeleitete Designmaßstäbe statische Probelastungen weiterhin die bevorzugte Prüfmethode bleiben werden.

REFERENZEN

(1) Bermingham P., Janes M., 1989, An innovative approach to load testing of high capacity piles, Proceedings of the International Conference on Piling and Deep Foundations, London, S. 409-413.

(2) Middendorp, P, Bermingham P., Kuiper B., 1992, Statnamic load testing of foundation piles. 4. Internationale Konferenz über Druckwellen, Den Haag, Balkema

(3) Middendorp, P, 1993, First Experiences with Statnamic Load Testing of Foundation piles in Europe, Proceedings 2nd International geotechnical seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Gent, S. 265-272, Balkema

(4) Weele, A.F. B.M.L.G. Lencioni

Het mislukken van een paalfundering is duur, maar leerzaam. Geotechniek, 3. Jahrgang Nr. 1 (Jan 1999).

(5) ASTM D5882-96 : Standard Test Method for Low Strain Integrity Testing of pile,
American Society for Testing and Materials

- (6) R. J. van Foeken, D.J.M.H. Pluimgraaff, J. de Vos
Kwaliteitscontrole van Paalfunderingen, Jan 2000
- (7) Brown, D.A., 1994, Evaluation of Static Capacity of Deep Foundations from Statnamic Testing.
Geotechnical Testing Journal, Band 17, Nr.4, American Society for Testing and Materials
- (8) Matsumoto, T., Tsuzuki, M., 1994, Statnamic Tests on Steel Pipe Piles Driven in a Soft Rock.
International Conference on Design and Construction of Deep Foundations, Orlando, U.S. Federal
Highway Administration
- (9) Middendorp, P, Bielefeld, M.W., 1995, Statnamic Load Testing and the Influence of Stress
Wave Phenomena, First International Statnamic Seminar, Vancouver, 1995.
- (10) ASTM D1143 : Standard Test Method for Piles under axial compressive load, American Soci-
ety for Testing and Materials
- (11) Middendorp, P., Foeken van, R.J., 1998, When to Apply Dynamic Load Testing and Statnamic
Testing, 2. Statnamic-Seminar, Tokyo, 1998
- (12) Weele, ir. A.F. van
Een methode om het evenwichtsdraagvermogen van een proefpaal te splitsen in ngesommeerde
wrijving en puntbelasting
De ingenieur No. 14, 15/04/1957
- (13) Proefbelastingen op de Maasvlakte
Funderingstechnologie, 4. Jahrgang Nr.2
Dezember 1995
- (14) Proceedings First international Statnamic Seminar
27-30 September 1995, Vancouver

(14) Proceedings Second international Statnamic Seminar

01-03 November 1998, Tokyo, Japan

(15) Proceedings 6 th Stresswave Conference

11-13 September 2000, Sao Paulo, Brazil

(16) Franklin, R.E. King, T.M.J.

Relations between compressive and indirect tensile strength of concrete, Road Research Laboratory
RRL report LR 412, 1971

(17) Sparks, Pr, Menzies, J.B.

The effect of rate of loading upon the static and fatigue strength of plain concrete in compression.
Magazine of Concrete Research Laboratory , Band 25/1973, Nr. 83 S. 73-80

(18) Abassi, A.F., Al-Tayyib,

Effect of hot whether on pulse velocity and modulus of elasticity of concrete.
Materials and Structures, 1990, 23, pp. 334-340