

Statnamic, eine Alternative für statische Probelastungen

P. Middendorp
(middendorp@profound.nl)

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird eine Übersicht gegeben über die Entwicklung und Verwendung einer neuen Methode für Probelastungen auf Pfähle, Statnamic genannt. Die Belastungsdauer ist viele Male länger als bei den dynamischen Probelastungen. Das Verhalten eines Pfahles unter einer statnamicen Probelastung ist dadurch näher zu einer statischen Probelastung und erlaubt eine einfache Modellierung der dynamischen Wirkungen. Eine Beschreibung der verwendeten Pfahl- und Bodenmodellierung wird dargelegt. Statnamic Probelastungen werden heutzutage in Nordamerika, Japan, Korea und Singapur routinemäßig ausgeführt. Resultate von einer statnamicen Probelastung in Deutschland werden dargelegt

1 EINFÜHRUNG

Im Bauwesen gibt es einen zunehmenden Bedarf für die Verifikation von Ausführungsbedingungen. Das gilt auch für Pfahlgründungen. Ausführungsbedingungen, die kontrolliert werden sollen, sind Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit.

Eine zuverlässige Methode für die Verifikation ist die statische Probelastung. Diese Methode ist jedoch teuer und zeitverschlingend um routinemäßig verwendet zu werden. Bis vor kurzem war die dynamische Probelastung mit einem Fallgewicht oder einem Rammgerät die einzige Alternative für statische Probelastungen. Diese Methode ist ökonomisch und effizient bei der Ausführung, aber hat vergleichsweise auch mehrere Nachteile:

- Spannungswellen können Zugspannungen hervorrufen, so daß Betonpfähle möglicherweise abreißen
- Eine exzentrische Stoßbelastung kann Biegespannungen erregen und damit auch den Pfahl beschädigen.
- die Verarbeitung der Meßresultaten muß durch erfahrene und hoch ausgebildete Ingenieure ausgeführt werden
- Eine Kalibrierung mit einer statischen Probelastung wird in vielen Fällen gefordert.

Der Eurocode 7 fordert zum Beispiel:

Das Resultat einer dynamischen Probelastung darf verwendet werden wenn eine entsprechende Bodenuntersuchung stattgefunden hat und die Methode an einer statischen Probelastung auf einem gleichartigen Pfahl, mit gleicher Länge und Durchmesser und in vergleichbaren Bodenverhältnissen kalibriert worden ist.

Um die vorher genannten Nachteile zu überwinden ist eine neue Pfahlprobelastungsmethode entwickelt worden durch die Firma Berminghammer in Kanada und das Institut TNO Bauforschung in den Niederlanden. (BERMINGHAM, 1989). Der Name der Methode ist Statnamic, eine Zusammenfügung der englischen Wörter STATic und dyNAMIC. Wie der Name sagt, liegt eine statnamiche Probelastung zwischen einer statischen Probelastung und einer dynamischen Probelastung. Die Dauer der statnamiche Probelastung ist viele Male länger als die Dauer einer dynamischen Probelastung aber erheblich kürzer als bei einer statischen Probelastung.

2. DAS PRINZIP DER STATNAMISCHE PROBELASTUNG

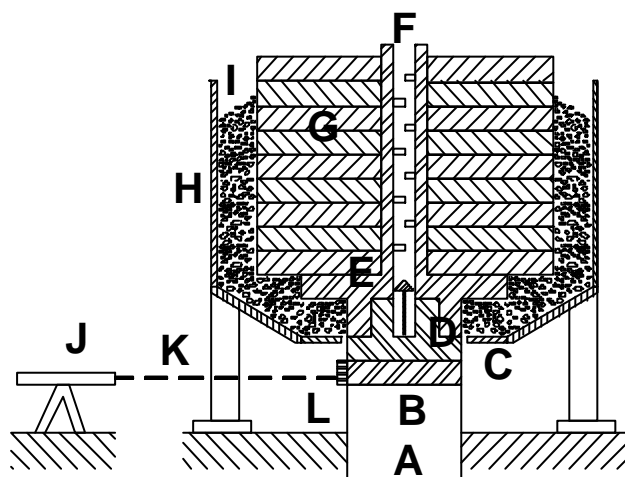


Bild. 1a Aufbau einer Statnamic Probelastung

Das Prinzip Statnamic basiert auf der Lancierung einer Reaktionsmasse vom Pfahlkopf (Bild 1). Die Lancierung findet statt durch die Erzeugung von hohen Drücken in einem Zylinder durch die Verbrennung eines speziellen Treibstoffes. Als Auswirkung auf der Lancierung wird der Pfahl gleichmäßig in den Boden gedrückt. Die auf dem Pfahlkopf erzeugte Belastung wird mit einer Kraftmeßdose gemessen. Die Setzung des Pfahlkopfes wird mit einem speziell entwickelten Lasersystem gemessen. Kraftmeßdose und

Lasersystem sind integrierte Teile des statnamiche Belastungsgerätes. Man braucht keine Aufnehmer am Pfahlmantel zu befestigen. Den Aufbau einer statnamiche Probelastung zeigt Bild 1a. Die Buchstaben kennzeichnen folgende Teile :

A = Pfahl	G = Reaktionsmasse
B = Kraftmeßdose	H = Kies container
C = Zylinder	I = Kies
D = Kolben	J = Laser
E = Plattform	K = Laserstrahl
F = Schalldämpfer	L = Lasersensor

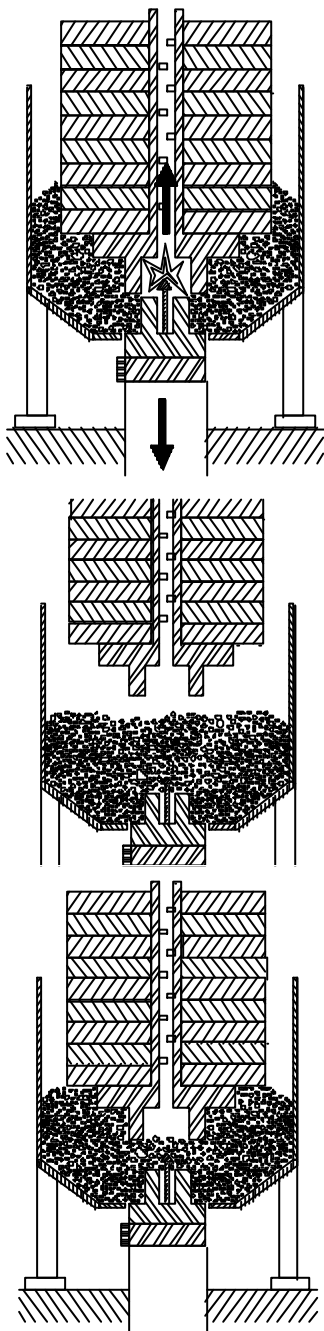


Bild 1d

Bild 1 Aufbau und Ablauf
einer
Statnamic
Probebelastung

Die Reaktionsmasse zurückfällt, wird sie durch das Kiespolster gedämpft aufgefangen und die Stoßkräfte über das Kiesreservoir in den Boden und nicht auf den Pfahlkopf übertragen (Bild 1d). Diese Abfangmethode ist sehr sicher, da die Wirksamkeit durch die permanent vorhandene Gravitation gegeben ist.

Die benötigte Reaktionsmasse kommt überein mit 5 bis 10% der zu erreichene Belastung. Zum Beispiel: für einen Pfahl der belastet werden muß bis zum 5 MN braucht mann einer Reaktions-masse von 0.25 bis 0,5 MN.

Zum Aufbau gehört eine Kraftmeß-dose, um die Kraft auf den Pfahlkopf zu messen, und ein Lasersensor, um die Pfahlkopfverschiebung zu messen. Auf der Kraftmeßdose steht ein Zylinder. Ein Kolben ist mit einer Plattform zusammen gebaut auf der die Reaktionsmasse positioniert wird. Zylinder und Kolben bilden einen Verbrennungsraum. Die Reaktionsmasse kann als Blöcke oder Scheiben geformt sein und kann aus Stahl, Beton, Blei, Wasser oder eine Kombination daraus bestehen.

Ein Schalldämpfer ist im Zentrum der Plattform positioniert, er ist verbunden mit dem Verbrennungsraum. Ein Kiesreservoir umgibt den Aufbau. Der Raum zwischen Kiesreservoir und Reaktionsmasse ist mit Kies gefüllt. Der Kies dient zum Auffangen der Reaktionsmasse beim Zurückfall nach der Lancierung und zum Schutz des Zylinders und Pfahlkopfes.

Die Bilder 1a bis 1d stellen die einzelnen Phasen des Ablaufs der statnamicen Probebelastung dar.

Bild 1a ist stellt die Situation gerade vor der Lancierung dar. Beim Bild 1b ist der Brennstoff gezündet. Die Verbrennung des Brennstoffs erregt hohe Gasdrücke und die Reaktions-masse wird nach oben beschleunigt. Gleichzeitig wird der Pfahl belastet. Die Reaktionskraft drückt den Pfahl gleichmäßig in den Boden.

Die Belastungs - und Setzungssignale werden mit dem FPDS Meßsystem von TNO registriert. Die Aufwärtsbewegung der Reaktionsmasse gibt Raum, der mit Kies gefüllt wird (Bild 1c). Infolge der Gravitation fließt der Kies über den Pfahlkopf und bildet dort eine Pufferschicht. Wenn die

Bild 2 zeigt ein Beispiel von gemessenen Statnamic Signalen

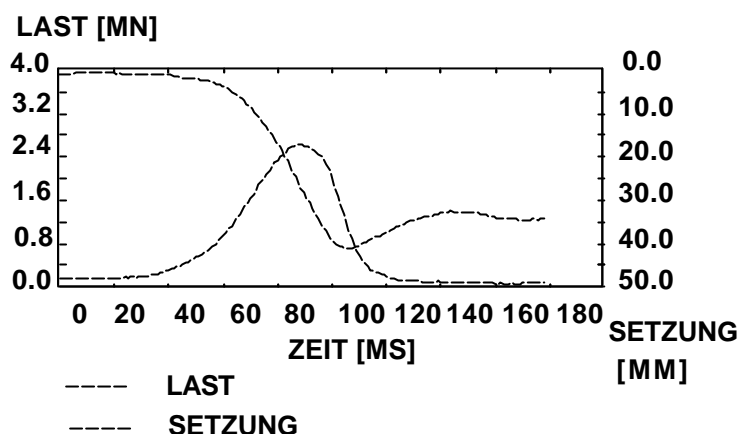


Bild 2 Beispiel Statnamic Signale

Der Abbau der Reaktionsmasse ist einfach und kann auf der Bau-stelle hergestellt werden, um die Transportkosten zu reduzieren. Durch die einfache und kompakte Konstruktion können auch Pfähle, die schwer zu-gänglich sind, getestet werden. Für eine stat-namische Probelastung braucht man ungefähr 1 bis 1,5 Tage und 1,5 bis 2 Tage für eine Belastung von 8 MN bis zu 30 MN.

Die Entwicklung von Statnamic hat in 1988

angefangen. Bisher (stand Ende1994) sind statnamische Probelastungen in Kanada, den Vereinigten Staaten, den Niederlanden, Japan, Deutschland, Israel, Korea und Singapore asgeführt worden.

Mit den heutigen Geräten können Pfähle bis zu 30 MN getestet werden. Geräte für Probelastungen mit höheren Tragfähigkeiten bis zu 100 MN, wie offshore Pfähle, können den nächsten Jahren erwartet werden. Die Geräte mit hoher Belastungskapazität sind nicht beschränkt für die Prüfung einzelner Pfähle, sie können auch für Pfahlgruppen und Bauelemente, wie Maschinenfundamenten und Brückenpfeiler verwendet werden. Das Prinzip von Statnamic basiert auf der Beschleunigung einer Masse, darum können Pfähle in jede Richtung, auch horizontal, getestet werden.

Die Dauer und Belastungsgeschwindigkeit bei der statnamischen Probelastung kann über das Volumen des Verbrennungsraumes, die Form der Zylinder und Kolben, die Quantität und der Typ des Brennstoffs und die Reaktionsmasse gesteuert werden. Diese Steuerung erlaubt, daß die Belastung auf den Pfahl langsamer aufgebracht wird und länger dauert als bei einer dynamischen Probelastung.

In Bild 3 sind Beispiele von Belastungszeitdiagrammen einer dynamischen und einer statnamischen Probelastung dargestellt. In beiden Fällen generieren die Kräfte auf den Pfahlkopf eine Spannungswelle.

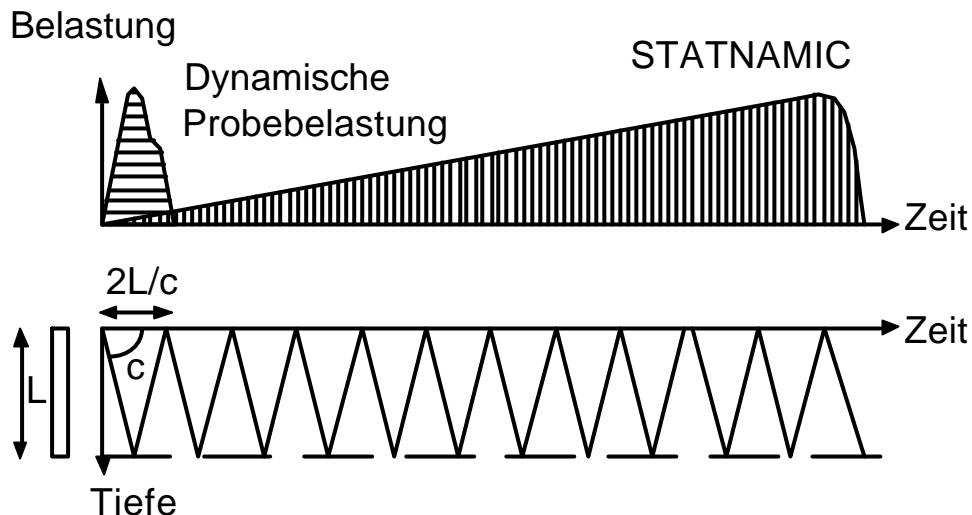


Bild 3 Belastungszeitdiagramme und Tiefezeitdiagramme

Die Zeitdauer einer Spannungswelle vom Pfahlkopf zum Pfahlfuß und zurück ist $2L/c$. Hierbei bedeuten L die Pfahllänge und c die Wellengeschwindigkeit. Es zeigt sich, daß bei der statnamischen Probebelastung die Spannungswellen bis zum Ende der Belastung sehr oft in dem Pfahl auf und ab laufen. Dadurch wird der Pfahl gleichmäßig in den Boden gedrückt. Es wirkt dauernd eine Druckspannung auf dem Pfahl und Zugspannungswellen können nicht auftreten.

In Bild 4 sind die Spannung, Geschwindigkeit und Verschiebung über die Pfahllänge für die verschiedenen Probebelastungsarten dargestellt.

Bei der dynamischen Probebelastung erregt der Stoß eine kurze Spannungswelle. Diese Spannungswelle läuft den Pfahl auf und ab. Die Spannungen entlang des Pfahles ändern sich dauernd und können von Pfahlquerschnitt zu Pfahlquerschnitt sehr verschieden sein. In manchen Querschnitten können Druckspannungen auftreten und in anderen Querschnitten Zugspannungen. Dasselbe gilt für die Geschwindigkeit über die Pfahllänge. Manche Querschnitte bewegen sich nach unten, andere nach oben. Auch die Verschiebungen entlang des Pfahles zeigen große Unterschiede.

Bei der statnamischen Probebelastung wird die Last gleichmäßig eingeleitet und die Druckspannungen sind im Pfahl gleichmäßig verteilt. Die Druckspannungen sind reduziert durch die Mantelreibung. Die Pfahlquerschnitte bewegen sich alle mit ungefähr derselben Geschwindigkeit. Die Verschiebungen entlang des Pfahles sind gleichmäßig.

Bei der statischen Probebelastung wird die Last statisch eingeleitet und die Druckspannungen sind im Pfahl gleichmäßig verteilt. Die Druckspannungen sind reduziert durch die Mantelreibung. Die Pfahlquerschnitte haben eine Geschwindigkeit der Nähe zu null ist. Die Verschiebung entlang des Pfahles ist gleichmäßig.

Hieraus folgt, daß die statnamische Probebelastung mehr näher bei einer statischen Probebelastung liegt als bei einer dynamischen Probebelastung. Der größte Unterschied zwischen der statischen und statnamischen Probebelastung ist die Geschwindigkeit entlang des Pfahles.

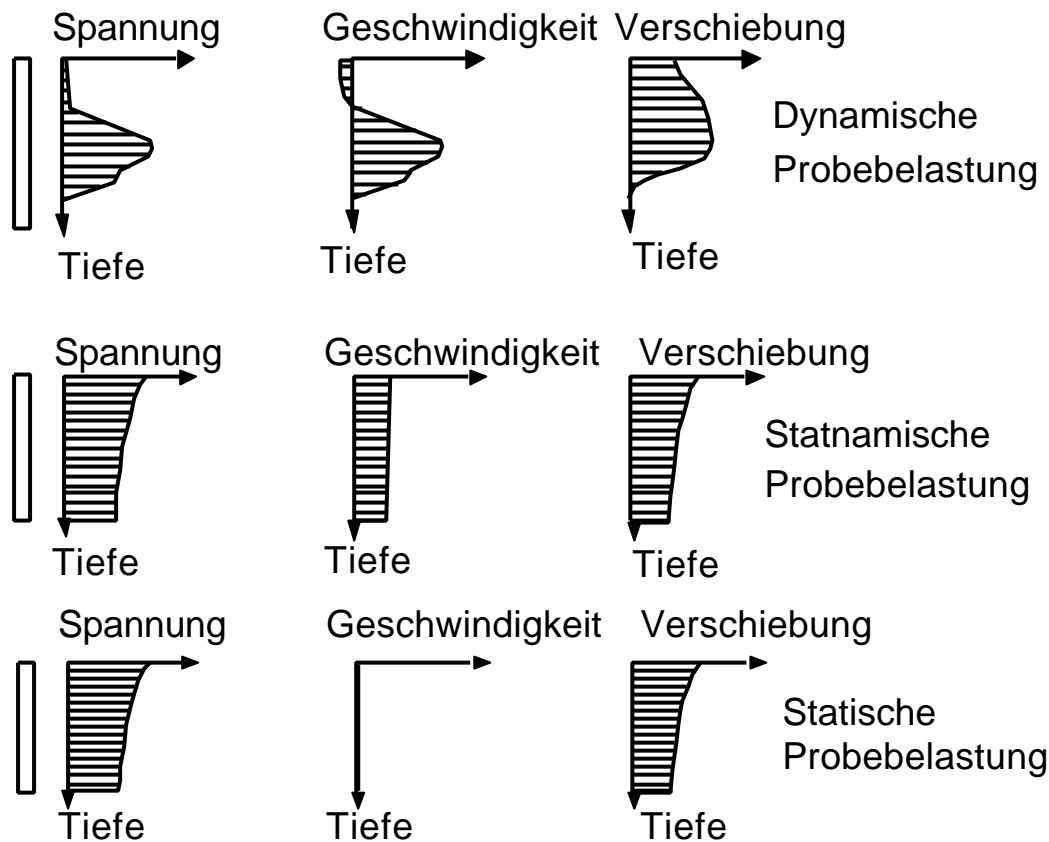
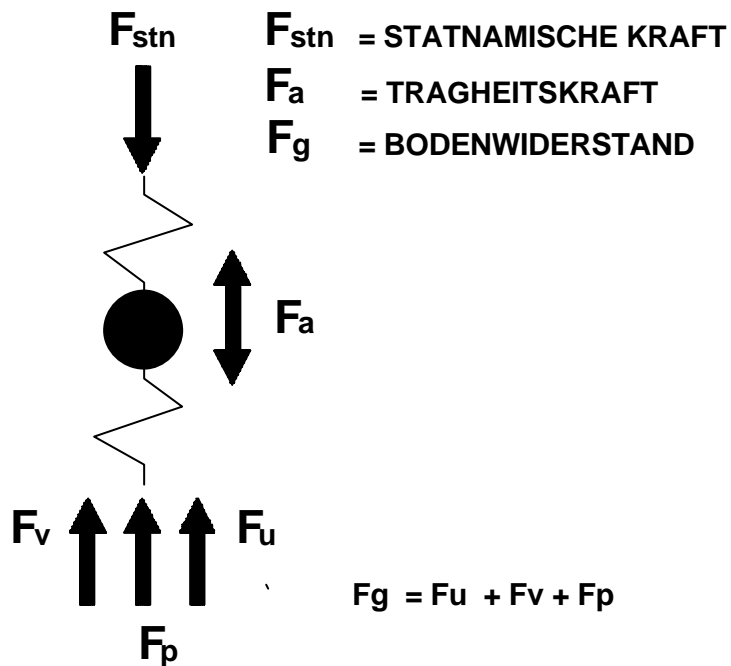


Bild 4 Spannung, Geschwindigkeit und Verschiebung über die Pfahllänge für die verschiedenen Probelastungsarten.

Die lange Dauer der statnämischen Belastung resultiert in ein Setzungenverhalten für jeder Pfahlteilen gleich wie bei einem statischen Probelastung (MIDDENDORP, 1992, MATSUMOTO, 1994). Die Tatsache, daß die Pfahldurchschnitten allen mit ungefähr dieselbe Geschwindigkeit bewegen, erlaubt daß der Pfahl modelliert werden kann wie eine Punktmasse mit Feder worauf die statnämische Kräfte, Tragkeitskräfte und Bodenwiderstand einwirken (Bild 5). Das ist einem einfachen Modellierung von Pfahl und Boden und Spannungswellen brauchen nicht berücksichtigt zu werden.

2.1. Dynamische Phänomene

Obwohl die Belastungsdauer viele Male größer ist als bei einer dynamischen Probelastung und der Pfahl- und Bodenverhalten ähnlicher dem bei einer statischen Probelastung sind, ist die statnämische Probelastung noch immer eine dynamische Belastung. Dynamische Phänomene müssen darum auch berücksichtigt werden.



Resultaten von statnämischen Probelastungen, die an Pfählen in steifem Boden oder die auf Fels stehen, stehen etwa im Verhältnis eins zu eins zu den Ergebnissen einer statischen Probelastung (JANES, 1991).

Aber Prüfungen in weichem Boden ergeben daß dynamische Phänomene einen großen Einfluß auf das Last-Setzungsverhalten des Pfahles haben können. Um die dynamischen Einflüsse zu berücksichtigen ist eine Methode entwickelt. Die Analyse ist einfach und direkt und ermöglicht die

Bild 4. Kräfte auf der Pfahl dauernd eine statnämische Probelastung

Bestimmung der statischen Lastsetzungskurve kurz nach der statnämischen Probelastung.

3. MODELLIERUNG VON PFAHL UND BODEN BEIM STATNAMIC

Wie bereits gesagt, ermöglicht die lange Belastungsdauer den Pfahl wie eine Punktmasse zu modellieren. Die Pfahlsteifigkeit kann mit Federn modelliert werden. Während einer statnämischen Probelastung wirken die folgenden Kräfte auf den Pfahl (Bild 3):

- 1 - die statnämische Kraft (F_{stn})
- 2 - die Trägheitskraft (F_a)
- 3 - der Bodenwiderstand (F_g)

Die statnämische Kraft (F_{stn}) und Setzung (u) werden wie Zeitsignale gemessen und sind damit bekannt.

Für das Gleichgewicht ist die folgende Gleichung gültig:

$$F_{\text{stn}}(t) = F_{\text{g}}(t) + F_{\text{a}}(t) \quad (1)$$

worin

t = die Zeit

$F_{\text{stn}}(t)$ = die statnämische Belastung (gemessen)

$$F_{\text{g}}(t) = \text{der Bodenwiderstand} \\ = F_{\text{u}}(t) + F_{\text{v}}(t) + F_{\text{p}}(t) \quad (2)$$

$$F_{\text{u}}(t) = \text{der statische Bodenwiderstand} \\ = k \cdot u(t) \quad (3)$$

$$F_{\text{p}}(t) = \text{der Porenwasserdruck} \\ F_{\text{v}}(t) = \text{der Bodenwiderstand bei Dämpfung} \\ = C \cdot v(t) \quad (4)$$

$$F_{\text{a}}(t) = \text{die Trägheitskraft} \\ = m \cdot a(t) \quad (5)$$

mit:

$$k = \text{die (nicht)lineare Steifigkeit von Boden und Pfahl} \quad [\text{N/m}] \\ C = \text{der Dämpfungskoeffizient} \quad [\text{Ns/m}] \\ m = \text{die Masse des Pfahles} \quad [\text{kg}]$$

$$u(t) = \text{die Setzung (gemessen)} \quad [\text{m}] \\ v(t) = \text{du/dt} = \text{die Geschwindigkeit} \quad [\text{m/s}] \\ a(t) = \text{d}^2u/\text{dt}^2 = \text{die Beschleunigung} \quad [\text{m/s}^2]$$

Ein einfacher linearer Dämpfer representiert die kombinierte Wirkung von geometrischer und hysteretischer Dämpfung.

Um die Analyse zu vereinfachen, wird angenommen, daß der Porenwasserdruck einen geringen Einfluß hat oder als Teil des statischen Widerstandes oder der Dämpfung in die Berechnung aufgenommen werden kann. Darum wird $F_{\text{p}}(t)$ nicht weiter in den Gleichungen berücksichtigt.

Als Resultat einer statnämischen Probelastung will man den statischen Bodenwiderstand (F_{u}) bekommen. In der oben genannten Gleichung sind $F_{\text{stn}}(t)$, $u(t)$, $v(t)$ und $a(t)$ bekannt. Zur Berechnung des statischen Bodenwiderstandes ist nur noch der Dämpfungskoeffizient (C) unbekannt.

$$F_{\text{u}}(t) = F_{\text{stn}}(t) - C \cdot v(t) - m \cdot a(t) \quad (6)$$

Dieser Dämpfungskoeffizient (C) kann aus Statnämischen Signalen bestimmt werden.

Bild 5 zeigt ein Beispiel einer statnamischen Lastsetzungskurve. Es zeigt einen extremen Fall mit sehr hohen dynamischen Komponenten in den Meßresultaten. Es können mehrere Bereiche unterschieden werden.

Im Bereich 1 wird die statnamische Reaktionsmasse auf den Pfahlkopf gesetzt. Die Belastung ist völlig statisch. Die gemessene Belastung und Setzung am Ende des Bereiches 1 werden F_{stat} und u_{stat} genannt. Die Federsteifigkeit in diesem Bereich kann berechnet werden zu:

$$k_1 = F_{\text{stat}}/u_{\text{stat}} \quad (7)$$

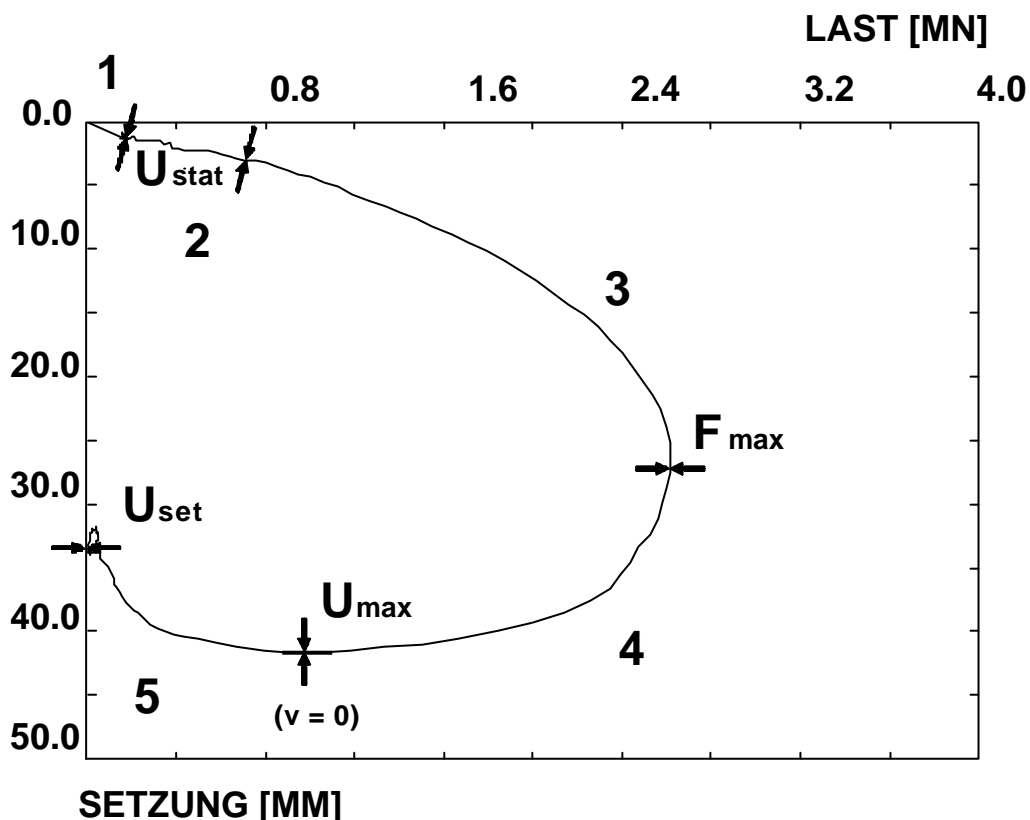


Bild 5 Wichtige Bereiche für die Analyse

Im Bereich 2 wird die Reaktionsmasse lanziert und die statnamische Belastung fängt an. Der statische Bodenwiderstand ist elastisch und Tragheitskräfte und Dämpfungs-kräfte wirken auf den Pfahl.

Im Bereich 3 erreicht der statische Bodenwiderstand seine maximale Stärke und versagt bei einem Wert F_{uy} . Die Geschwindigkeit und Tragheitskräfte nehmen progressiv zu. Am Ende dieses Bereiches wird die maximale statnamische Belastung erreicht.

In Bereich 4 nimmt die statnamische Belastung ab. Durch die Trägheit der Pfahl-masse nimmt die Setzung noch weiter zu. Der Boden befindet sich noch im Bruch-zustand mit dem Wert F_{uy} . Die Geschwindigkeit des Pfahles nimmt ab und wechselt von einer Bewegung nach unten in einer Bewegung nach oben. Am Ende dieses Bereiches, zum

Zeitpunkt $t_{u\max}$, erreicht die Setzung den maximalen Wert u_{\max} und die Geschwindigkeit (v) null ist, ist auch die Dämpfungskraft (F_v) null. Aus Gleichung (6) ergibt sich, daß auf diesem Punkt der Lastsetzungskurve der statische Bodenwiderstand (F_u) der statnamischen Belastung (F_{stn}) minus der Trägheitskraft (F_a) entspricht.

$$F_u(t_{u\max}) = F_{stn}(t_{u\max}) - m \cdot a(t_{u\max}) \quad (8)$$

Das bedeutet, daß der Punkt der maximalen Setzung ein statischer Punkt auf der statnamischen Lastsetzungslinie ist. Wenn die Tragheitskräfte klein sind entspricht die statnamische Belastung dem statischen Widerstand, so daß dieser Wert direkt aus dem statnamischen Lastsetzungsdiagramm abgelesen werden kann.

Wann der Pfahl bis zum Bruchzustand belastet worden ist, wird die Grenzlast F_{uy} und die Last $F_u(t_{u\max})$ gleichgestellt.

$$F_{uy} = F_u(t_{u\max}) \quad (9)$$

Im Bereich 5 wird der Bodenwiderstand $F_u(t)$ größer als die anderen entgegenarbeitenden Kräfte und drückt den Pfahl wieder aufwärts. Am Ende dieses Bereiches kann die bleibende Setzung abgelesen werden.

3.1 Konstruktion des statischen Lastsetzungsverhaltens.

Weil der Pfahl wie eine Punktmasse modelliert ist entspricht die Setzung des Bodens der gemessenen Setzung des Pfahles. Wie in Gleichung (6) angegeben soll für die Berechnung der statische Bodenwiderstand $F_u(t)$, der Dämpferwiderstand ($F_v(t)$) oder der Dämpfungskoeffizient (C) bekannt sein.

Der Dämpfungskoeffizient kann im Bereich 2 oder 4 berechnet werden (MIDDENDORP, 1992). Hier wird die meist verwendete Methode, die sich auf den Bereich 3 bezieht, erklärt.

Wir nehmen an, daß der maximale statische Bodenwiderstand F_{uy} im Bereich 4 erreicht ist und daß $F_u(t)$ und damit F_{uy} und $F_u(t_{u\max})$ gleich sind. Der Dämpfungswiderstand zum Zeitpunkt t_4 kann berechnet werden aus Gleichung (6) :

$$C(t_4) = (F_{stn}(t_4) - F_{uy} - m \cdot a_4(t_4)) / v(t_4) \quad (10)$$

Die Berechnung von C kann für mehrere Zeitpunkte berechnet werden und daraus ein mittlerer Wert C_m . Wenn C_m bekannt ist, kann der statische Widerstand aus Gleichung (6) berechnet werden:

$$F_u(t) = F_{stn}(t) - C_m \cdot v(t) - m \cdot a(t) \quad (11)$$

Mit dem statischen Widerstand $F_u(t)$ und der Setzung $u(t)$ kann eine statische Lastsetzungslinie gezeichnet werden. Eine auf diese Weise berechnete Kurve ist in Bild 7 und Bild 8 angegeben. Weil die berechnete statische Lastsetzungslinie einen etwas

unregelmäßigen Verlauf haben kann ist sie näherungsweise als hyperbolische Kurve dargestellt.

4 FALLSTUDIE IN DEUTSCHLAND

Auf einer Baustelle von Franki Grundbau in Emden, wurden im Jahre 1992 Versuche ausgeführt zur Bestimmung des Tragverhaltens von Franki-Pfählen mit verschiedenen Fußgrößen. Die statische Probelastung wurde an zwei Pfählen 5 und 6 vor der statischen Probelastung ausgeführt. Die Voraussage des Tragverhalten wurde vor der Ausführung der statischen Probelastung an den Kunde gegeben

4.1 Beschreibung Pfahl und Boden

Beide Pfähle (Bild 6) sind mit einer Länge von 15 m und einem Schaftdurchmesser von 0,51 m hergestellt worden. Auf einer Länge von 4 m im Pfahlfußbereich wurde den Baugrund durch eine zusätzliche Kiesverdichtung verbessert. Der erbreiterte Fuß von Pfahl 5 hatte ein Volumen von $0,5 \text{ m}^3$ und der Fuß von Pfahl 6 $0,2 \text{ m}^3$.

Mehrere Sondierungen wurden auf der Baustelle ausgeführt. Die Deckschicht war 10 m und ist gekennzeichnet durch Klei mit einem mittleren Sondierspitzenwiederstand von 1.5 MPa. Die folgende Schicht von 7.5 m besteht aus holozänem Sand mit ein Sondierspitzenwiederstand von 4 MPa zu 16 MPa

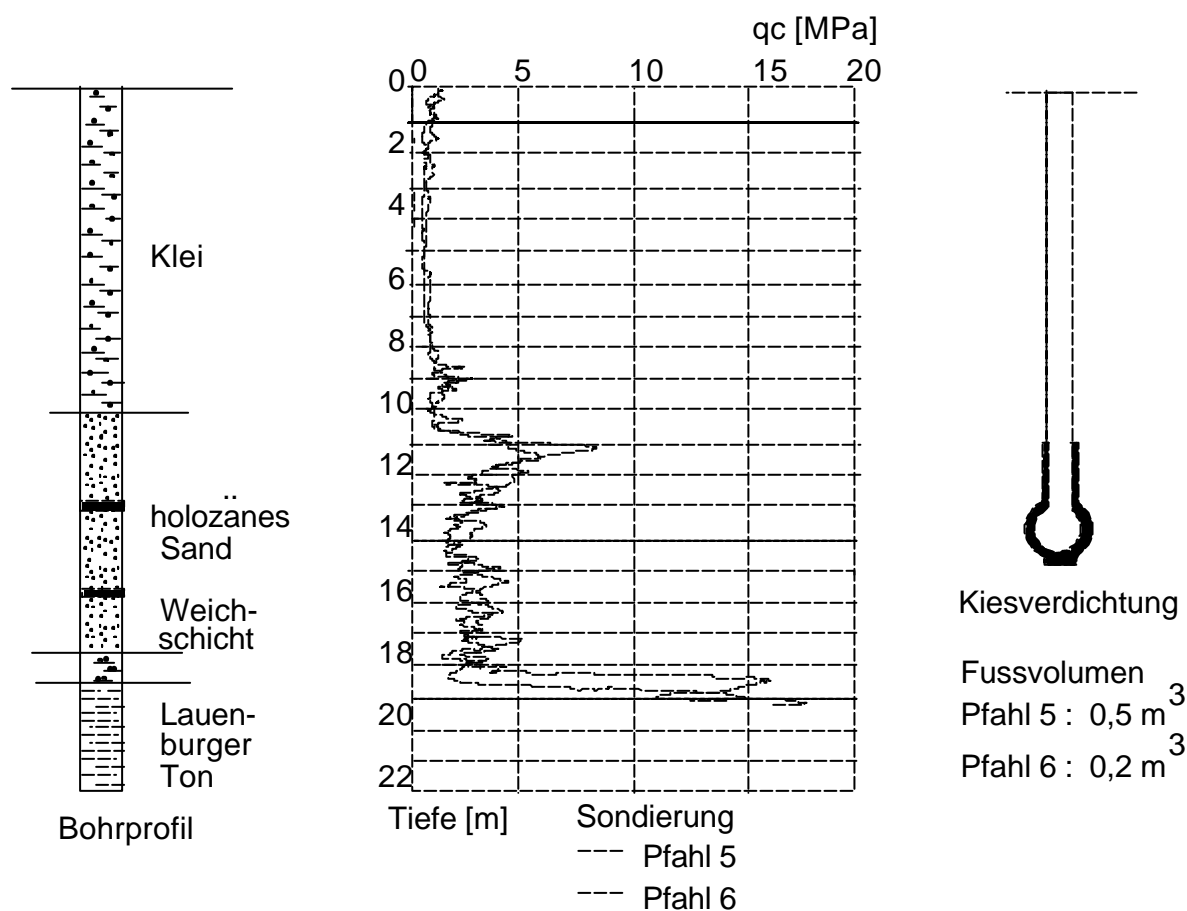


Bild 6 Baugrundsituation und Pfahlherstellung

4.2 Statnämische Meßergebnisse

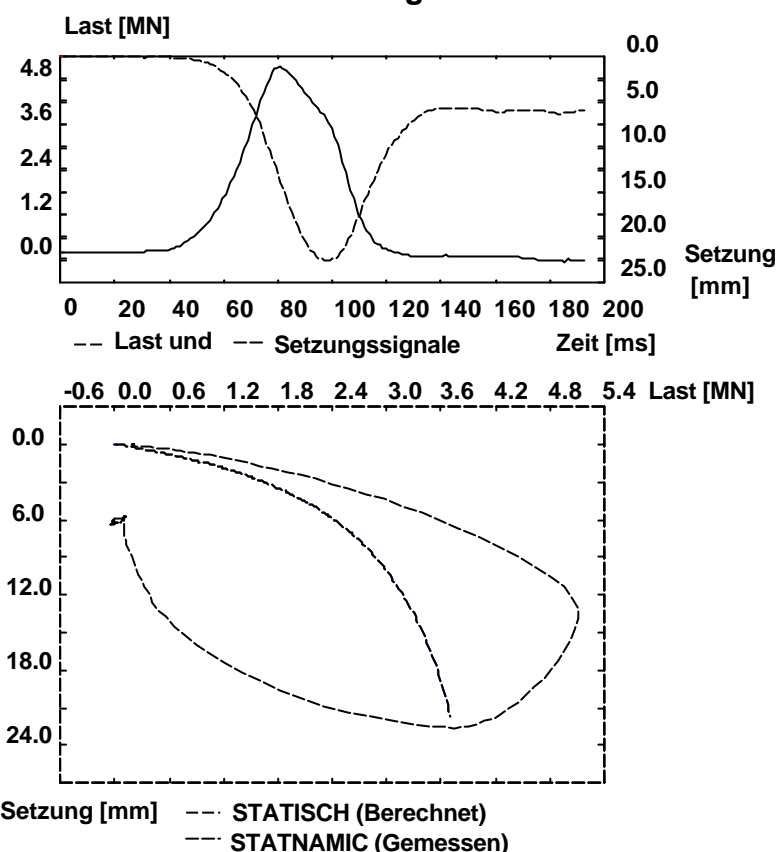


Bild 7. Meßergebnisse Pfahl 5

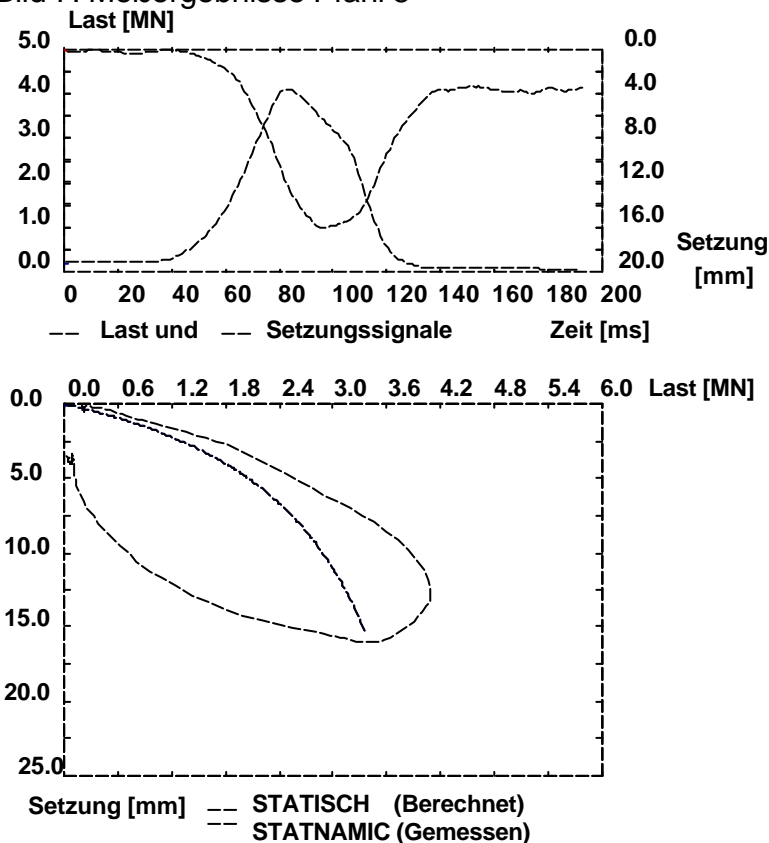


Bild 8. Meßergebnisse Pfahl 6

Die Probelastung wurde ausgeführt mit einem 8 MN Statnamicgerät. Das heißt daß mit diesem Gerät Pfähle von 2 MN bis zu 8 MN probebelastet werden können. In Bild 7 und Bild 8 sind die Meß-ergebnisse von den Pfählen 5 und 6 dargestellt. Der statische Widerstand und die statische Lastsetzungs-kurve sind wie oben beschrieben berechnet worden.

Die maximal erreichte statnämische Belastung für Pfahl 5 war 5,11 MN. Der maximal gemessene statische Widerstand war 4,02 MN bei der maximalen Setzung von 22,6 mm. Die bleibende Setzung nach der Probebelastung betrug 6,0 mm.

Die maximal erreichte statnämische Belastung für Pfahl 6 war 4,09 MN. Der maximal gemessene statische Widerstand war 3,39 MN bei der maximalen Setzung von 16,1 mm. Die bleibende Setzung nach der Probebelastung war 4,0 mm.

Die totale Belastungs-dauer betrug für beide Pfähle ungefähr 100 ms (0,1 Sekunde).

4.3 Statnamiche und statische Meßergebnisse

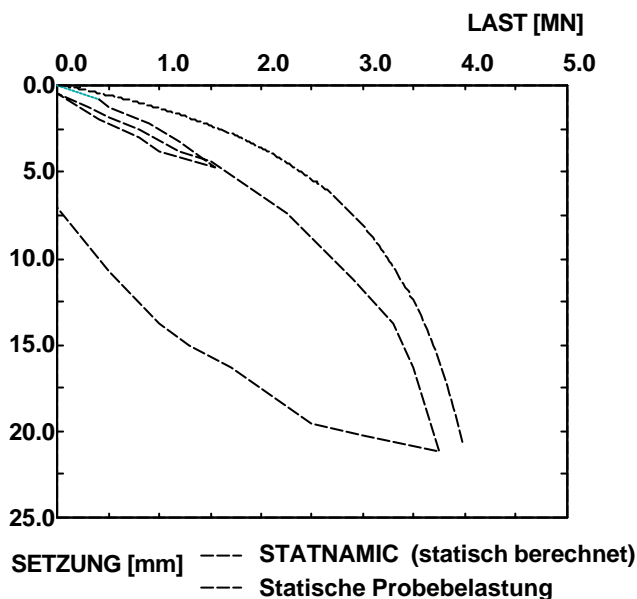


Bild 9 Vergleich zwischen der statischen Probelastung und der Vorhersage der statnamiche Probelastung von Pfahl 5. statischen Probelastung.

Bild 9 zeigt die statische Probelastung von Pfahl 5 und die Vorhersage der statischen Probelastung berechnet aus der statnamiche Probelastung. In diesem Fall zeigt Statnamic eine höheren Steifigkeit als die statische Probelastung. Die vorhergesagte Grenzlast liegt im Bereich der statischen Probelastung.

Bild 10 zeigt die statische Probelastung von Pfahl 6 und die Vorhersage der statnamiche Probelastung. In diesem Fall zeigt Statnamic dieselbe Steifigkeit wie die statische Probelastung. Die vorhergesagte Grenzlast liegt im Bereich der

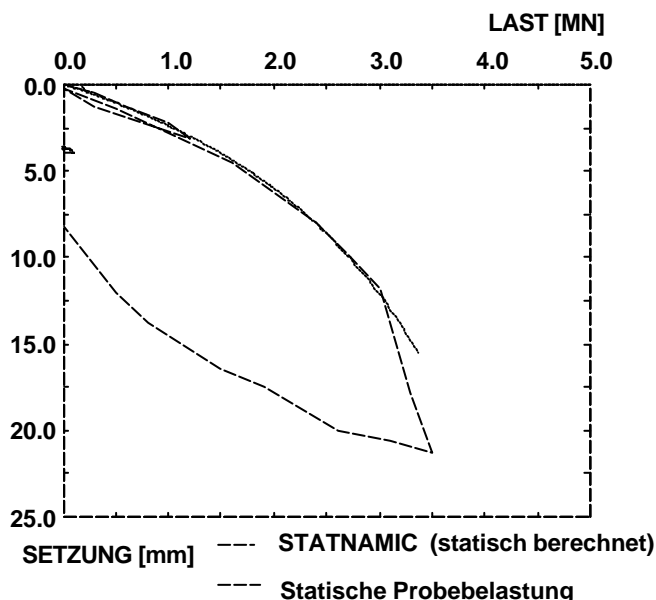


Bild 10 Vergleich zwischen der statischen Probelastung und der Vorhersage der statnamiche Probelastung von Pfahl 5. statischen Probelastung sehr gut.

Pfahl 5 zieht ein höhere Tragfähigkeit und Steifigkeit als Pfahl 6, was auch erwartet werden kann infolge der unterschiedlichen Fuß-abmessungen. Das kann beobachtet werden bei der statischen und der statnamiche Probelastung. Bei Pfahl 5 ist die Übereinstimmung zwischen statischem und statnamiche Widerstand am Ende der Lastsetzungskurve gut. Der Unterschied ist geringer als 10%. Die Steifigkeit bei der statnamiche Probelastung ist höher als bei der statischen Probelastung. Bei Pfahl 6 ist die Übereinstimmung zwischen der statnamiche und der

5 SCHLUßFOLGERUNGEN

- Bei einer statnamischen Probelastung kann das dynamische Verhalten eines Pfahles modelliert werden wie eine Punktmasse mit Federn, worauf Trägheitskräfte und Bodenwiderstände einwirken. Erscheinungen von Spannungswellen brauchen nicht berücksichtigt zu werden infolge der relativ langen Dauer der statnamischen Belastung.
- Statnamic kann auch auf Pfähle in Böden mit einem starken dynamischen Verhalten angewendet werden.
- Der Punkt der maximalen Setzung auf der statnamischen Lastsetzungskurve ermöglicht die direkte Bestimmung des aktivierte maximalen statischen Bodenwiderstandes und der zugehörigen Setzung.
- Ein Fallstudie in Deutschland zeigt befriedigende bis gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen von statischen und statnamischen Probelastungen.

VERDANKUNG

An dieser Stelle möchte der Autor die Firma Franki Grundbau sowie den Herrn Dipl.-Ing. Brieke für die Erlaubnis und Unterstützung zur Publikation dieses Artikels vielmals danken.

SCHRIFTTUM

BERMINGHAM P., JANES M.; An innovative approach to load testing of high capacity piles. Proceedings of the International Conference on Piling and Deep Foundations, London, 1989.

JANES, M., HORVATH, B.; Pile load test results using the Statnamic method. 4th International DFI Conference at Stresa, Piling and Deep Foundations, Balkema, 1991.

MATSUMOTO, T, TSUZUKI, M; Statnamic tests on steel pipe piles driven in a soft rock. International conference on design and construction of deep foundations. U.S. Federal Highway Administration (FHWA), Orlando, 1994.

MIDDENDORP, P, BERMINGHAM P. KUIPER B; Statnamic load testing of foundation piles. 4th International Conference on Stress Waves, The Hague, Balkema, 1992.

Middendorp, Peter, Dipl.-Ing.