

Door grond horizontaal belaste palen

Overzicht literatuur en metingen

Ons kenmerk
410822-0002

Versie
02 Definitief

Datum
oktober 2006

Opgesteld in opdracht van
GeoDelft
Postbus 69
2600 AB DELFT

Rapportnummer
410822-0002 v02

Datum
oktober 2006

Versie
02 Definitief

Aantal pagina's
19

Titel / subtitel

Door grond horizontaal belaste palen /
Overzicht literatuur en metingen

Projectleider(s)

ing. A. Feddema

Projectbegeleider(s)

ir. H.R. Havinga

Opgesteld in opdracht van

GeoDelft
Postbus 69
2600 AB DELFT

Verspreiding

GD en CUR-commissie H408

Samenvatting rapport

Gezien de vele projecten waarbinnen horizontaal belaste palen voorkomen en de onzekerheid die bestaat in de modellering is een onderzoek naar deze problematiek wenselijk. De combinatie van Fugro en GeoDelft gaat als onderdeel van het Delft Clusterprogramma voor droge infrastructuur dit onderwerp onderzoeken.

Het onderzoek bestaat onder andere uit een literatuurstudie voor het achterhalen van bestaand onderzoek en reeds bestaande geotechnische modellen op het gebied van horizontaal belaste palen. De relevante metingen worden gebruikt voor een simulatie van de situatie in het EEM programma PLAXIS. Vervolgens wordt een modelproef in de geocentrifuge opgezet om metingen te verrichten aan horizontale grondverplaatsingen. Daarnaast is een veldproef gepland waarbij metingen langs horizontaal belaste palen in situ worden verricht.

Dit onderzoek moet meer inzicht geven in de grootte van de horizontale grondverplaatsing bij een maagdelijke ophoging (zonder geïnstalleerde palen), de interactie met de palen en het effect van een paalgroep ten opzichte van een enkele paal. Deze gegevens zouden moeten leiden tot betere ontwerpen van horizontaal belaste palen.

In dit rapport wordt de eerste fase van het project, de literatuurstudie, gerapporteerd. De literatuurstudie heeft zich toegespitst op artikelen met betrekking tot berekeningsmethoden van door grond horizontaal belaste palen ("passive piles") en rapportages met meetdata van veld- en centrifugeproeven.

<u>Versie</u>	<u>Datum</u>	<u>Opgesteld door</u>	<u>Paraaf</u>	<u>Gecontroleerd door</u>	<u>Paraaf</u>
01	27/09/2005	ing. A. Feddema		ir. H.R. Havinga	
02	18/10/2006	ing. A. Feddema		ir. H.R. Havinga	

Inhoudsopgave

1. Inleiding	1
2. Literatuuroverzicht	3
2.1. Nederlands onderzoek	3
2.2. Buitenlands onderzoek	4
3. Veld- en centrifugeproeven	9
3.1. Buitenlands onderzoek	9
3.2. Nederlands onderzoek	10
4. Conclusies en aanbevelingen	13
4.1. Literatuur	13
4.2. Veld- en centrifugeproeven	13

1. Inleiding

Door grond horizontaal belaste palen komen voornamelijk voor als in een talud van een ophoging op slappe grond palen worden geplaatst, of wanneer een ophoging wordt aangebracht naast reeds geïnstalleerde palen in een fundering. Als gevolg van de ophoging zal de slappe grond verticaal zetten en ook horizontaal verplaatsen. Deze horizontale grondverplaatsing is te verdelen in drie componenten:

1. initiële horizontale verplaatsing
2. horizontale verplaatsing als gevolg van consolidatie
3. horizontale grondverplaatsing als gevolg van kruip.

De paal krijgt hierdoor een horizontale belasting, waardoor de paal op dwarskracht en buiging wordt belast.

Op dit moment wordt in de praktijk de horizontale grondvervorming, als gevolg van kruip, bepaald uit de verticale kruip. Over de grootte van de horizontale kruip is weinig tot niets bekend, omdat veldmetingen van horizontale vervormingen over een langere periode nauwelijks beschikbaar zijn.

Vanwege gebrek aan kennis en metingen wordt nu bij de bepaling van afmetingen en voorspanning/wapening van betonnen palen de volledige horizontale grondverplaatsing tijdens de ontwerplevensduur in rekening gebracht. Dit is mogelijk conservatief.

Gezien de vele projecten waarbinnen horizontaal belaste palen voorkomen en de onzekerheid die bestaat in de modellering is een onderzoek naar deze problematiek wenselijk. De combinatie van Fugro en GeoDelft gaat als onderdeel van het Delft Clusterprogramma voor droge infrastructuur dit onderwerp onderzoeken.

Het onderzoek bestaat onder andere uit een literatuurstudie voor het achterhalen van bestaand onderzoek en reeds bestaande geotechnische modellen op het gebied van horizontaal belaste palen. De relevante metingen worden gebruikt voor een simulatie van de situatie in het EEM programma PLAXIS. Vervolgens wordt een modelproef in de geocentrifuge opgezet om metingen te verrichten aan horizontale grondverplaatsingen. Daarnaast is een veldproef gepland waarbij metingen aan horizontaal belaste palen in situ worden verricht.

Dit onderzoek moet meer inzicht geven in de grootte van de horizontale grondverplaatsing bij een maagdelijke ophoging (zonder geïnstalleerde palen), de interactie met de palen en het effect van een paalgroep ten opzichte van een enkele paal. Dit kan leiden tot een optimaler ontwerp van horizontaal belaste palen in tijd en in geld.

In dit rapport wordt de eerste fase van het project, de literatuurstudie, gerapporteerd. Deze literatuurstudie is vooruit lopend op de start van Delft Cluster 2 reeds in 2003 uitgevoerd. Een aanvulling heeft plaatsgevonden in 2006. De literatuurstudie heeft zich toegespitst op artikelen met betrekking tot berekeningsmethoden van door grond horizontaal belaste palen ("passive piles") en rapportages met meetdata van veld- en centrifugeproeven.

2. Literatuuroverzicht

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven met een samenvatting van de inhoud van beschouwde literatuur op het gebied van door grond horizontaal belaste palen en horizontale gronddeformaties.

Onderscheid wordt gemaakt tussen actieve palen en passieve palen. Onder actieve palen worden palen verstaan die aan de kop horizontaal belast worden en dus tegen de grond in bewegen. Passieve palen worden door de grond horizontaal belast, waarbij de grond dus beweegt om de paal.

2.1. Nederlands onderzoek

- [1] **BAUDUIN, C.M. – Overzicht van enkele berekeningsmethoden voor palen horizontaal belast door grond, SE-701056, GeoDelft, december 1986.**

In dit rapport wordt een overzicht gegeven van de meer en minder gangbare methoden ter bepaling van de momenten van de door grond horizontaal belaste palen. Het gaat hierbij alleen om palen waar de buigende momenten zijn veroorzaakt door horizontale grondverplaatsingen als gevolg van ophoging- of ontgravingswerkzaamheden.

- [2] **HJORTNAES-PEDERSEN, A.G.I., BROERS, H. – *The behaviour of soft subsoil during construction of an embankment and its widening*, Centrifuge 94, Balkema, Rotterdam, 1994, pp. 567-574.**

Het hierin beschreven centrifugeonderzoek richt zich voornamelijk op de stabiliteit tijdens de gefaseerde aanleg van een ophoging en de verbreding daarvan, maar er is ook aandacht besteed aan verticale en horizontale gronddeformaties. Er is gebruik gemaakt van een natuurlijke Nederlandse kleisoort (geroerd) in plaats van Speswhite. De klei is eerst voorbelast.

- [3] **HAVINGA, H.R., – *Achtergronden bij de ontwikkeling van MHorpile, methode Betuweroute*, CO-346870/98, GeoDelft, april 1994.**

Omschrijft de aanzet voor de methode gebruikt bij de aanleg van de Betuweroute (onderdeel van rekenvoorbeeld KW40 CO-360760/39). Deze methodiek is ingebouwd in de huidige versie van Mhorpile en beschrijft de wijze waarop op dit moment binnen GeoDelft door grond horizontaal belaste palen worden gedimensioneerd.

- [4] **HAVINGA, H.R. – *Grondmechanisch onderzoek Betuweroute, berekening landhoofdconstructie kunstwerk 40*, GeoDelft, CO-360760/39, oktober 1995.**

Beschrijving met voorbeeld van "methode Betuweroute". Zie tevens [3].

- [5] **HAVINGA, H.R. – *2D EEM berekeningen door grond zijdelings belaste palen*, CO-360760/139, GeoDelft, juli 1996.**

Dit rapport is een onderdeel van een onderzoek naar groepsfactoren (o.a. met betrekking tot de verhouding breedte ophoging en dikte slappe lagen) voor palen in een landhoofd ten behoeve van de Betuweroute. In deze fase van het onderzoek zijn oriënterende berekeningen uitgevoerd om vast te stellen of de voorgestelde modelleringen werkbaar resultaten opleveren. Het betreft hier EEM-berekeningen van axiaal-symmetrische en horizontale doorsnedes.

- [6] **HAVINGA, H.R.** – *Door grond zijdelings belaste palen, fase B+C, CO-360760/185, GeoDelft, november 1996.*
 Vervolgrapportage van [5]. Er zijn correctiefactoren bepaald om met een analytische methode de paalmomenten te kunnen bepalen. Deze correctiefactoren betreffen:
- het verschil tussen de 2D analytische methode en een 2D EEM plain strain oplossing
 - het effect van de eindige breedte van een ophoging voor een rand- en een middenpaal.
- [7] **PETSCHL, R.O.**, – *Zijdelingse grondbelasting tegen palen van landhoofden, DF-511280, december 2001*
 Omvat een vergelijking van de berekeningen conform MHorpile (methode Betuweroute) en Mpile. De resultaten bevestigen bevindingen van de CIAD-proef (grondweerstand voor actieve en passieve palen is anders; zie ook [29]).
- [8] **BRINKGREVE, R.B.J.** – *Time-dependent behaviour of soft soils during embankment construction – a numerical study, NUMOG IX, 2005, pp.631-637*
 De auteur heeft een vergelijking gemaakt van de horizontale en verticale deformaties en wateroverspanningen voor verschillende materiaalmodellen (Plaxis) voor een 5 meter hoge zandophoging op 10 m slappe klei. Het betreft hier het Mohr-Coulombmodel, het Soft Soil-model en het Soft Soil Creep-model. Daarnaast is voor het SoftSoilCreepmodel gekeken naar de invloed van de OCR en de M op de berekeningsresultaten. Een bruikbaar artikel voor het narekenen van praktijkproeven. Nadeel is dat de gemaakte keuzes voor de parameters niet worden onderbouwd.

2.2. Buitenlands onderzoek

- [9] **DE BEER, E.** – *Piles subjected to static lateral loads, IX ICSMFE, specialty session 10, Tokyo, 14 juli 1977, pp.1-13.*
 De auteur geeft een overzicht van bestaande methoden om alleenstaande palen en paalgroepen te ontwerpen op horizontale belasting. Zowel verticale als schoorpalen komen aan de orde. Passieve paalbelasting wordt buiten beschouwing gelaten. Mits de horizontale grondverplaatsing goed voorspeld kan worden, is het arsenaal aan methoden voldoende uitgebreid om tot een goede ontwerpberekening te komen. Handig als achtergrondinformatie.
- [10] **FEDDERS, H.** – *Seitendruck auf Pfähle durch Bewegungen von weichen, bindigen Böden, Empfehlung für Entwurf und Bemessung, Geotechnik 1, 1978, pp. 100-104 (inclusief Zuschrift, 1980).*
 Dit artikel en de bijlage gaan over horizontaal belaste palen in slappe grond. De belasting op de palen wordt bepaald door de kleinste van de twee mogelijke horizontale drukken (gronddrukverschil tussen beide zijden van de paal en de vloedruk (= druk waarbij de grond plastisch wordt)). Bij een veiligheidsfactor tegen afschuiven van 1,5 is geen vloedruk te verwachten (1,8 voor organisch materiaal). De maximale vloedruk wordt bepaald volgens Wenz voor enkele palen, paalrijen en paalgroepen. De begrenzing van de maximale gronddruk op palen wordt niet onderbouwd.
- [11] **Leroueil, S., Mognan, J-P, Tavenas, F.** – *Embankments on Soft Clays, Ellis Horwood Ltd., 1990*
 In de hoofdstukken 4 en 5 wordt ingegaan op het effect van het aanbrengen van ophogingen op horizontale en verticale deformaties. Hierbij wordt gebruik gemaakt van resultaten van diverse (proef)ophogingen. Daarnaast worden een aantal empirische relaties genoemd voor het bepalen van de horizontale deformatie op basis van de verticale deformatie. Interessant naslagwerk en basis voor verder onderzoek.

- [12] LADD, C.C., WHITTLE, A.J., LEGASPI, D.E. – *Stress-deformant behaviour of an embankment on Boston Blue Clay*, Geotechnical special publication no. 40, volume 1, proceedings of settlement, ASCE, 1994.

Horizontale grondverplaatsingen zijn met de huidige modellen slecht te voorspellen. Vooral de combinatie verticaal/horizontaal is niet goed te krijgen. De berekende horizontale deformaties zijn altijd te groot. Dit heeft alles te maken met anisotropie. Remedie zou zijn de v te verlagen, maar dat hoort niet in de op het Cam-Claymodel gebaseerde modellen. MIT heeft een materiaalmodel gemaakt (MIT-E3), waarbij de cap een andere vorm heeft. De maximale p -waarde in dit model ligt niet op de p -as, maar hoger. In dit artikel worden de resultaten van dit model gepresenteerd aan de hand van een case.

- [13] STEWART, D.P., JEWELL, R.J., RANDOLPH, M.F. – *Design of piled bridge abutments on soft clay for loading from lateral soil movements*, Géotechnique 44, no.2, juni 1994, pp. 277-296.

Het artikel behandelt de analyse van centrifugeproeven uitgevoerd door Stewart (Stewart, 1992) en Springmann (Springmann, 1989). Er wordt een vergelijking gemaakt tussen ontwerpmethoden gebaseerd op centrifuge proeven en velddata. Hieruit zijn empirische ontwerpgrafieken afgeleid.

Tevens wordt een nieuwe ontwerpmethode voorgesteld gebaseerd op het proefschrift van Springmann waarbij de laterale druk, die werkt op een paal, wordt gecorreleerd met de relatieve grond-paal verplaatsing (Springmann, 1989). Met de empirische ontwerpgrafieken en de nieuwe ontwerpmethode is het mogelijk een snelle controle van belastingen en uitbuigingen van palen uit te voeren.

Eén van de conclusies uit het artikel is (gebaseerd op het werk van Stewart) dat als de bovenbelasting kleiner is dan 3 maal de ongedraineerde schuifsterkte van de klei er nauwelijks plastische deformaties optreden.

- [14] POULOS, H.G., CHEN, L.T., HULL, T.S. – *Model test on single piles subjected to lateral soil movement*, Soils and Foundations, vol. 35, no. 4, december 1995, pp. 85-92.

Dit artikel behandelt een aantal laboratoriumproeven op enkele modelpalen die in kalkhoudend zand zijn geïnstalleerd terwijl er laterale grondbeweging plaatsvond van een deel van de aanwezige grond. De grondverplaatsingen hebben een driehoekig verloop. Dit is gebaseerd op een analyse van praktijkgevallen. De momenten in de modelpalen zijn gemeten op verschillende dieptes. Er zijn proeven gedaan waarbij gevarieerd is met de grondverplaatsing, inbeddingsdiepte en dikte deformerende grondlaag, paaldiameter en de randvoorwaarde van de paalkop (vrij of volledig ingeklemd). De proeven zijn nagerekend met een lineair-elastisch model.

De resultaten zijn waarschijnlijk niet projecteerbaar op de praktijksituatie vanwege schaaleffecten.

- [15] BRANSBY, M.F. - *Difference between load-transfer relationships for laterally loaded pile groups: active p - y - or passive p - d* . Journal of Geotechnical Engineering, December 1996.

In dit artikel worden belastingoverdracht relaties behandeld voor ongedraineerde passieve en actieve laterale paalbelasting voor paalontwerpen in klei. De relaties zijn afgeleid uit 2D EEM-berekeningen in het horizontale vlak. De paalbelastingcurves voor actieve paalbelasting zijn anders dan de paalbelastingcurves voor passieve paalbelasting. De p - δ curves worden bepaald door het locale plane-strain gedrag (alleen afhankelijk van het locale grondgedrag, de paaldiameter en de onderlinge afstand van de palen). De p - y curves worden bovendien bepaald door 3D grondgedrag (afhankelijk van paalgeometrie en paaldruk verdeling).

[16]POULOS, H.G., CHEN, L.T., HULL, T.S. – *Model test on pile groups subjected to lateral soil movement*, Soils and Foundations, vol. 37, no. 1, maart 1997, pp. 1-12.

Dit artikel behandelt een aantal laboratoriumproeven op modelpalen in kalkhoudend zand, die rijen vormden van 2, 3 of 4 palen. Er vond laterale grondbeweging plaats van een deel van de aanwezige grond. De grondverplaatsingen hebben derhalve een driehoekig verloop. De palen stonden in een rij, in een lijn met de grondverplaatsing of in een vierkante (2x2 en 4x4) configuratie. Er zijn proeven uitgevoerd op de palen met een vrije kop en palen met een kop voorzien van een cap. Door het toepassen van de cap wordt een forse momentenreductie in het veld gerealiseerd ten opzichte van de palen met een vrije kop, waarbij in beide gevallen het buigend moment afnam bij afnemende hart-op-hart afstand. Het aantal palen in een rij loodrecht op de deformatierichting lijkt geen effect te hebben op het buigend moment in de paal. Voor palen in een lijn langs de deformatierichting gedraagt elke paal zich weer anders afhankelijk van de hart-op-hart afstand, de positie van de paal in de rij, het aantal palen en de aanwezigheid van een rigide cap. De effecten van beide lijnconfiguraties zijn terug te vinden in de vierkante configuratie. De gevonden resultaten zijn waarschijnlijk niet projecteerbaar op de praktijk vanwege schaaleardeffecten.

[17]GOH, A.T.C., TEH, C.I., WONG, K.S. – *Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil movements*, Journal of Geotechnical Engineering and Geoenvironmental Engineering, no. 9, vol 123, september 1997, pp. 792-801.

Het artikel beschrijft een vereenvoudigde numerieke methode gebaseerd op EEM voor het analyseren van het gedrag van een enkele paal bij laterale grondverplaatsing. Het gaat hierbij om de onmiddellijke korte-termijn respons van de paal op de opgelegde totale spanning veroorzaakt door de ophogingsbelasting. Uit het onderzoek zijn eenvoudige empirische vergelijkingen opgesteld om schattingen te kunnen maken van de optredende buigende momenten in een paal.

Er wordt een analyse gegeven van diverse praktijkgevallen en de centrifugeproeven van Stewart. Hierbij wordt een verend-ondersteunde ligger-model gebruikt, waarbij de grondveren worden gemodelleerd door hyperbolische veren. De nieuwe voorgestelde procedure voor de bepaling van de veerstijfheid en maximale grondbelasting wordt vergeleken met de praktijkgevallen. Overeenkomst tussen berekening en praktijk varieert sterk per case, terwijl de auteurs zelf claimen dat de methode goede schattingen maakt van de laterale paalverplaatsingen en de buigende momenten, vooral bij hoge ophogingen (grote drukken).

Gedurende het aanleggen van de ophoging en de verbreding zijn horizontale en verticale deformaties onder de hellingen gemeten met behulp van image analysis. Op een aantal locaties zijn ook inclinometers geplaatst.

Uit de resultaten bleek dat de grootste verticale vervormingen zijn gemeten onder het centrum van de helling van de verbreding, juist naast de teen van de eerste ophoging. De grootste horizontale deformatie is gemeten vlakbij de teen van de verbreding.

De centrifugeproef is gesimuleerd met behulp van het EEM programma PLAXIS, waarbij de berekeningen zijn gebaseerd op elasto-plastisch Mohr-Coulomb grondmodel en op elastische consolidatie. De gemeten wateroverspanningen zijn groter dan de voorspelde waarden. De verticale deformatie die gemeten wordt is lager dan de berekende waarde totdat een consolidatiegraad van circa 80% wordt gehaald, dan komen de gemeten en berekende waarde aardig overeen. De gemeten horizontale deformatie is kleiner dan de voorspelde waarde bij een veiligheid groter dan 1,08.

[18]CHEN, L.T., POULOS, H.G. - *Piles subjected to lateral soil movements*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol 123, no. 9, september 1997, pp. 802-811.

Het beschreven onderzoek biedt een theoretische procedure voor het analyseren van de laterale respons van verticale palen die blootgesteld worden aan laterale grondbewegingen.

Het effect van paalgroepen is ook bekeken. Het is noodzakelijk dat veel aandacht wordt besteed aan het achterhalen van de laterale grondverplaatsing, de elasticiteitsmodulus van de grond en de paal-grond contactdruk om een goede voorspelling te kunnen maken van de laterale paalrespons. De verkregen ontwerpgrafieken voor het elastische gedrag zijn minder goed bruikbaar als de ratio van de grondbeweging en de paaldiameter groter is dan 10 %.

Voor het DC-project is dit artikel minder relevant omdat de methode alleen bruikbaar is bij elastisch grondgedrag en kleine grondverplaatsingen. Het effect van de paalkop kan worden meegenomen op basis van NEN 3880 deel K.

[19]BRANSBY, M.F., SPRINGMANN, S. – *Selection of load-transfer functions for passive lateral loading of pile groups*, Computers and Geotechnics, no. 24, 1999, pp. 155-184.

Het artikel behandelt de resultaten van een 2D EEM onderzoek naar de paal-grond-paal interactie bij passief belaste palen in dicht bij elkaar staande paalrijen en paalgroepen. Er zijn twee grondmodellen gebruikt zogenaamde power-law model en een elasto-plastische model.

Het hoofddoel was om de interactie-effecten op de paal belastingoverdracht curves en de gronddeformatiemechanismen te onderzoeken.

Bij elasto-plastisch grondgedrag bij paalrijen verandert het gronddeformatie mechanisme zodat de initiële paal belastingoverdracht stijfheid toeneemt als de onderlinge afstand tussen de palen kleiner wordt (het wordt moeilijker voor de grond om tussen de palen door gedrukt te worden). Bij de power-law grond in paalrijen bleek hetzelfde mechanisme steeds op te treden voor een bepaalde geometrie en power-law exponent terwijl ook de paal belastingoverdracht stijfheid toeneemt als de onderlinge paalafstand kleiner wordt.

In paalgroepen werd feitelijk hetzelfde waargenomen, waarbij moet worden opgemerkt dat er geen verschil was in paaldruk in de rijen tijdens een paalgroepverplaatsing. Dit heeft te maken met de manier van modelleren. De totaaldrukken zijn bij de voorste palenrij groter dan bij de palenrij hier achter.

[20]CHEN, L.T., POULOS, H.G. – *Approximation of lateral soil movements for analyzing lateral pile response*, bron onbekend, 2001.

Feitelijk een vervolg op het onderzoek uit [18]. Hier vindt toetsing plaats aan een aantal praktijkgevallen door middel van een aantal voorbeelden: grondverplaatsing door ontgraving, grondbeweging door ophoging en grondbeweging door hellinginstabiliteit. Het gaat hier voornamelijk over de wijze waarop de vorm van de grondbeweging kan worden gemodelleerd en het effect daarvan op verticale palen.

[21]PAN, J.L., GOH, A.T.C., WONG, K.S., SELBY, A.R. – *Three-dimensional analysis of single pile response to lateral soil movements*, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, no. 26, John Wiley and Sons Ltd., 2002, pp. 747-758.

In dit artikel wordt een onderzoek beschreven waarin een 3D EEM analyse (ABAQUS) uit is gevoerd om het gedrag van enkele palen, die worden blootgesteld aan laterale grondverplaatsing, te achterhalen. Het gaat hierbij om een stijve en een flexibele paal die passief worden belast. Uit de proefresultaten zijn paalbelastingcurves voor de paalbelasting

en absolute en relatieve paalverplaatsing (p - y , p - δ) opgesteld. Deze bleken aardig overeen te komen met bevindingen van andere onderzoekers.

Het Von Mises grondmodel is gebruikt om de niet-lineairiteit in het spanningsvervormingsgedrag te modelleren. De paal is gemodelleerd als lineair elastisch. De paal was vierkant 1m.

[22]LIANG, R., ZENG, S. – Numerical study of soil arching mechanism in drilled shafts for slope stabilisation, Soils and Foundations, vol. 42, no. 2, 83-92, Japanese Geotechnical Society, april 2002.

Dit artikel behandelt een EEM analyse techniek om kwalitatief de boogvorming in de grond te onderzoeken, die worden geassocieerd met geboorde palen die hellingstabiliteit moeten garanderen van hellingen gemaakt van grond. De grond is gemodelleerd als Mohr-Coulomb elastisch, perfectplastisch materiaal. Er is gebruik gemaakt van niet-geassocieerde plasticiteit om de dilatante eigenschappen in de plastische potentiaal vergelijking mee te nemen. In het onderzoek is gevarieerd met paalafstand, paaldiameter, paalvorm en grondsterkteparameters. Onderzocht is in welke mate krachten worden overgedragen op de palen, maar met name wordt aandacht besteed aan het mechanisme van boogvorming. Het grote bezwaar is dat in het model is uitgegaan van een opgelegde vervorming tussen de palen.

[23]Poulos, Harry G. – Ground movements – A hidden source of loading on deep foundations, 10th International Conference on Piling and Deep Foundations, Amsterdam, June 2006.

In deze lezing wordt een overzicht gegeven van situaties waarin horizontale gronddeformaties een rol spelen. Verder worden een aantal empirische relaties behandeld voor het voorspellen van horizontale gronddeformaties en worden een aantal praktijkcases uitgewerkt. Poulos maakt hierbij gebruik van publicaties uit het verleden. De lezing is dus een samenvattend literatuuroverzicht.

3. Veld- en centrifugeproeven

In dit hoofdstuk wordt een opsomming gegeven van veldproeven en centrifugeproeven die in de literatuur te vinden zijn. Er is naar gestreefd om alleen die artikelen en rapporten op te nemen waarvan de proefopzet en meetresultaat goed gedocumenteerd zijn.

3.1. Buitenlands onderzoek

[24] STEWART, D.P – *Lateral loading of piled bridge abutments due to embankment construction*, PhD thesis, University of Western Australia, 1992

Deze PhD thesis begint met een goed overzicht van verschillende berekeningsmethoden voor de bepaling van de gronddrukken op de palen.

Stewart heeft 12 centrifugeproeven uitgevoerd waarvan 7 geschikt waren om te analyseren. De overige proeven waren om te testen of waren mislukt.

Stewart meet alleen momenten in de palen en geen horizontale grondverplaatsingen en gronddrukken. Hij bouwt voort op het werk van Springman. In een geocentrifuge zijn voor twee verschillende grondprofielen, verschillende paalgroepen en landhoofden (talud en keerwand) paalmomenten en paalkopdeformaties bepaald. De ophoging wordt tijdens de vlucht opgebouwd uit zand. Verder zijn water overspanningen gemeten. De cap is los van de grond en de palen staan met de punt op de bodem van de modelcontainer.

Stewart heeft de resultaten van een aantal centrifugeproeven vergeleken met de resultaten van de hierboven genoemde verschillende berekeningsmethoden en EEM-berekeningen.

Stewart doet een aantal aanbevelingen voor verder onderzoek waaronder het tijdstip van paalinstallatie en de snelheid van ophogen. Belangrijkste conclusies zijn:

- 70% van het moment wordt ontwikkeld door ongedraineerd gedrag
- bij hoge veiligheidsfactoren van de ophoging zijn de paalmomenten beperkt.

[25] SPRINGMAN, S.M., NG, C.W.W., ELLIS, E.A. – *Centrifuge and analytical studies of full height bridge abutment on piled foundation subjected to lateral loading*, CUED/D-SOILS/TR278, 1994.

Het artikel behandelt centrifugeproeven die zijn gedaan om te bepalen wat de effecten waren van snelle ongedraineerde ophoging op een onderheid landhoofd. Tevens is de invloed van drainage van het slappe kleipakket onderzocht. Het artikel geeft een beschrijving van de achterliggende theorie, de wijze waarop de proeven zijn uitgevoerd en de resultaten.

[26] BRANSBY, M.F. – *Piled foundations adjacent to surcharge loads*, Phd thesis, University of Cambridge, 1995

In dit proefschrift wordt aandacht besteedt aan 2D en 3D EEM-berekeningen en wordt een vergelijking gemaakt tussen deze twee methoden. De berekeningen zijn onder andere gerelateerd aan centrifugeproeven die voor deze studie zijn uitgevoerd. De centrifugeproeven zijn uitgevoerd voor 16 m en 19 m lange palen in een 6 m dik kleipakket en een 14 m dikke zandlaag. De ophoging is gesimuleerd met een verticale bovenbelasting die wordt aangebracht met een latex zak. Dit is naar analogie van de proeven die Springmann heeft gedaan voor haar PhD-onderzoek.

Bransby heeft in dit onderzoek de "buttonhole" techniek. Deze techniek houdt in dat een paal wordt omgeven door bentoniet in de slappe lagen om de belasting op de paal te reduceren. Deze methode is in de centrifuge beproefd en heeft het gewenste effect. Mogelijk is deze techniek interessant voor de praktijk.

[27]BRANSBY, M.F., SPRINGMAN, S.M. – 3-D Finite Element of pile groups adjacent to surcharge loads, Computers and Geotechnics, vol. 19, no. 4, Elsevier, 1996, pp. 301-324.

Het korte termijn gedrag van paalgroepen die worden blootgesteld aan laterale gronddruk als gevolg van deformaties van een kleilaag door nabijgelegen bovenbelasting, is bestudeerd met behulp van een EEM analyse waarin een aantal centrifugeproeven worden nagerekend.

Het hoofddoel was om duidelijkheid te krijgen over de klei-paal interactie. Er is gebruik gemaakt van twee oneindig (?) lange rijen palen. Het artikel beschrijft de opzet van de berekeningen en de gebruikte parameters. Hoe de proef is opgebouwd wordt niet duidelijk in het artikel.

[28]BRANSBY, M.F., SPRINGMAN, S.M. – Centrifuge modelling of pile groups adjacent to surcharge loads, Soils and Foundations, vol. 37, no. 2, Japanese Geotechnical Society, juni 1997, pp. 39-49.

In dit artikel wordt beschreven hoe een centrifuge-onderzoek is uitgevoerd naar het gedrag van paalgroepen, geïnstalleerd in een kleilaag, nabij een ophoging. De opzet, eigenschappen van de grondlagen en de resultaten uit de centrifugeproeven staan beschreven.

3.2. Nederlands onderzoek

[29]CIAD-proef Europaboulevard Amsterdam, 1978

De CIAD-projectgroep "Door grond horizontaal belaste palen" heeft door Publieke Werken Amsterdam in 1978 een proef uit laten voeren aan de Europaboulevard te Amsterdam. Onder een keermuur werden 4 geïnstrumenteerde palen aangebracht. Voor en na ophogingen bij de keermuur zijn metingen uitgevoerd. In deel I van het rapport worden de proef, het grondonderzoek en de resultaten beschreven en besproken. Deel II bevat de resultaten van een door het LGM (voorloper van GeoDelft) uitgevoerde pressiometerproef en een serie berekeningen. De vergelijking tussen berekeningen en meetresultaten heeft geleid tot enkele conclusies.

De proef betreft 3 prefab betonpalen en één stalen paal, alleen geïnstrumenteerd, en is goed gedocumenteerd. Voor de parameterbepaling zijn horizontale en verticale samendrukkingsproeven en pressiometerproeven uitgevoerd.

Voor de horizontale deformatiemetingen van de grond moet met enige voorzichtigheid in acht worden genomen, omdat de meetdata en de uitwerking hiervan suggereert dat de hellingmeetbuizen hooguit 1 m in het pleistocene zand hebben gestaan en dus niet volledig ingeklemd zijn geweest. Dit maakt deze proef echter niet ongeschikt voor verder onderzoek

[30]ROL, A.H. – Lering uit het meetproject Barendrecht, samenvatting ca de lezing voor de sectie Grondmechanica en Funderingstechniek van het KIVI, 15 december 1982, pp.12-16.

Het artikel geeft een beschrijving van het proefveld Barendrecht (Zuidelijke randweg Rotterdam) en metingen (zetting, horizontale grondverplaatsing, momenten, paalverplaatsingen, normaalkrachten). Het gebruikte type inclinometing bleek achteraf onbetrouwbaar door onvoldoende torsiestijfheid van de buis, dus deze proef is niet bruikbaar als case voor verder onderzoek.

[31]Analyse van dijksversterkingsprojecten, 1993

In 1993 zijn door Grondmechanica Delft 3 binnendijkse dijkversterkingsprojecten (Streefkerk, Bolnes en Slikkeveer) geanalyseerd. Deze projecten zijn oorspronkelijke geadviseerd met een lineair elastisch model (VLAVO). Bij de uitvoering van deze projecten

zijn de horizontale en verticale gronddeformaties gemeten. Om tot richtlijnen te komen om horizontale gronddeformaties te voorspellen (ontwerprichtlijnen) zijn deze drie projecten nagerekend met een elastisch en een elasto-plastisch model met het EEM-pakket PLUTO. Dit blijkt redelijk goed te lukken, waarbij tevens de verticale deformaties redelijk overeenkomen met de metingen.

Deze meetsets en berekening zijn zeer geschikt om nogmaals te beschouwen in het kader van verder onderzoek.

[32]BRICOR-proef, 1986-1995

Tijdens de verbreding van de A16 ter hoogte van de Brienoordbrug zijn in het zogenaamde BRICOR-proefvak een prefab betonpaal en een stalen buispaal in de teen van de toekomstige wegverbreding geplaatst. Deze palen zijn gedurende de ophoging (1986-1987) en enige jaren daarna (tot en met 1995) gemonitord door Grondmechanica Delft. De palen zijn daarna getrokken en onderzocht op duurzaamheid (o.a. scheurvorming).

In de analyse van de proef is vooral gekeken naar het narekenen van de paalmomenten op basis van de gemeten deformaties. Een postdictie van de gronddeformaties is niet gemaakt.

Deze meetsets zijn zeer geschikt om nogmaals te beschouwen in het kader van verder onderzoek.

[33]Betuweroute – km 16.7, 2000-2002

Tijdens de bouw van de Betuweroute zijn op deze locatie deformatiemetingen in de ondergrond en waterspanningsmetingen uitgevoerd. Daarnaast is deze locatie in Delft Cluster 1 al geanalyseerd met betrekking tot de zettingen met het abc-isotachenmodel. Gezien de beschikbare meetdata is deze case zeer geschikt om verder te beschouwen in het kader van verder onderzoek.

[34]WOUTERS, T.G. – *Door grond horizontaal belaste palen, deel 1 en 2, 25 februari 2002*

In dit afstudeerverslag wordt een vergelijking gemaakt tussen verschillende rekenmethoden (IJsseldijk-Loof, Mohr-Coulomb, Soft Soil Creep, 2D- en 3D-berekeningen) om horizontale gronddeformaties en paalmomenten te bepalen. De berekeningen zijn getoetst aan diverse praktijkmetingen (NO-RECESS = New Options for Rapid and Easy Construction of Embankments on Soft Soil). Eén van de conclusies is dat k_n volgens Menard tot te hoge momenten leidt.

[35]Cherqaoui, I., *Door grond horizontaal belaste palen, TU Delft, 2006*

In dit afstudeerwerk wordt in de eerste plaats verschillende methoden bekeken voor het bepalen van grondverplaatsingen (IJsseldijk/Loof, Plaxis 2D) en de paal-grond interactie (Begemann-De Leeuw, Msheet, Plaxis 2D). Voor de bepaling van de gronddrukcoëfficiënten en beddingsconstanten benodigd voor de paal-grond interactie zijn een aantal methoden vergeleken.

Daarnaast zijn voor de No-Recess terp HW1 de horizontale grondverplaatsingen nagerekend met Plaxis 2D. Hierbij is gebruik gemaakt van het Soft-Soil model en het Hardening Soil model. Het betreft hier axiaal-symmetrische en gedraineerde berekeningen. gezien de kwaliteit van de beschikbare metingen en het voorwerk dat is verricht in dit afstudeerwerk is de No-Recess case interessant om verder uit te werken.

[36]Door grond horizontaal belaste palen, Centrifugeproeven, CO-410822-0003, v02, GeoDelft, september 2006

In 2004 zijn door GeoDelft centrifugeproeven uitgevoerd op door grond horizontaal belaste palen. Tijdens de vlucht is een 5 m hoge zandophoging gemaakt op een 10 m dik

kleipakket. In de teen van het talud zijn twee palen geplaatst; één paal is aangebracht voordat werd opgehoogd en één paal is aangebracht nadat de ophoging voltooid was. Het tijdstip waarop de tweede paal werd geïnstalleerd verschilt tussen de proeven. In totaal zijn 4 proeven uitgevoerd, waarbij bij twee proeven een afschuiving heeft plaatsgevonden nadat de ophoging op hoogte was. De resultaten van de afschuiving zijn interessant om het effect van de stabiliteit op de grondverplaatsingen te analyseren en het effect van een afschuiving op de paalmomenten te bepalen.

De volgende zaken zijn gemeten:

- horizontale en verticale deformaties (op basis van videobeelden)
- waterspanningen
- gronddrukken (niet bij de palen)
- rekken in de paal (levert paalmomenten).

Gezien de eenvoudige bodemopbouw is de proef zeer geschikt voor verder onderzoek.

4. Conclusies en aanbevelingen

4.1. Literatuur

Uit het overzicht van de literatuur blijkt dat het voorspellen van horizontale gronddeformaties en paalmomenten als gevolg hiervan al tientallen jaren onderwerp van studie is. In de loop der jaren zijn er wereldwijd een groot aantal verschillende voorspellingsmethoden opgesteld. Voor een overzicht van deze verschillende methoden wordt onder andere het werk van Stewart [24] aanbevolen.

In de jaren 1990 is aan de universiteiten van Cambridge en Western Australia veel onderzoek verricht naar door grond horizontaal belaste palen. Al deze proeven zijn uitgevoerd op stijve overgeconsolideerde klei. Op basis van de PhD-studie van Stewart zijn door GeoDelft in 2004 centrifugeproeven uitgevoerd op slappe klei.

4.2. Veld- en centrifugeproeven

Uit het onderzoek is gebleken dat het aantal geschikte veld- en centrifugeproeven beperkt is. De veld- en centrifugeproeven die wel in aanmerking komen voor verdere analyse zijn:

- Centrifugeproeven van Stewart [24]
- CIAD-proef Europaboulevard Amsterdam [29]
- Centrifugeproeven GeoDelft 2004 [36]
- Analyse dijkversterkingsprojecten [31]
- BRICOR-proef [32]
- Betuweroute – km 16.7 [33].
- No-Recess proefterp HW1 [34], [35].

De door Bransby beschreven "buttonhole techniek" (zie [26]) is mogelijk interessant voor de praktijk.

