

CUR Publicatie 228, Ontwerprichtlijn 'Door grond horizontaal belaste palen'

Inleiding

De CUR ontwerprichtlijn 228 'Door grond horizontaal belaste palen' [1] is in het voorjaar van 2010 beschikbaar gekomen. De eerste indrukken zijn dat de ontwerprichtlijn voorziet in een behoefte. Dit is ook niet zo verwonderlijk aangezien er tot op heden geen goede ontwerprichtlijn beschikbaar was en dit bij ieder project waar deze problematiek speelt opnieuw tot discussie tussen opdrachtgever, ontwerper en aannemer leidde.

Al in 2003 is gestart met het Delft Cluster kennisprogramma 'Nieuw perspectief voor fundering en bouwputten' met als doel om de voorspelbaarheid van gronddeformaties te verbeteren. De aanleiding hiervoor was dat er tot heden nog relatief weinig kennis is van de horizontale vervormingen die gepaard gaan met de primaire en seculaire zettingen. Een veel voorkomend probleem hierbij is de voorspelling van de invloed van horizontale grondvervormingen op de paalfunderde constructies, zoals bijvoor-

beeld landhoofden en geluidsschermen, maar ook bebouwing naast een ophoging. Daar waar de voorspellingen niet juist zijn uitgevoerd of er te weinig rekening is gehouden met de onzekerheden zijn schadegevallen ontstaan (figuur 1). De schade varieert van het ontoelaatbaar deformeren van de palen tot bijvoorbeeld het dichtdrukken van de voegen. Doordat er veelal geen ruchtbaarheid aan wordt gegeven, kan de indruk ontstaan dat het aantal schadegevallen beperkt is.

In 2006 is het Delft Cluster onderzoek 'door grond horizontaal belaste palen' ondergebracht in de CUR-commissie H408 waarin aannemers, ingenieursbureaus, opdrachtgevers en onderzoeksinstanties hun krachten hebben gebundeld om dit onderwerp verder te onderzoeken. Het doel van de CUR-commissie was het verbeteren van de voorspelling van de vervormingen en krachten in de constructie als gevolg van horizontale vervormingen in de ondergrond door met name ophogingen. We kunnen concluderen dat

ir. R.S. Beurze

Volker InfraDesign

voorzitter van CUR commissie H408

ing. A. Feddema

Deltares

secretaris CUR commissie H408

met het beschikbaar komen van de ontwerprichtlijn aan de doelstelling is voldaan waarbij optimaal gebruik is gemaakt van de beschikbare informatie en metingen. In de toekomst zal met het beschikbaar komen van resultaten van nieuwe langeduurmetingen (bijv. vanuit het Geo-impuls programma) en de doorgaande ontwikkeling van de rekenmodellen een verdere verbetering van de ontwerprichtlijn mogelijk zijn.

In [2] is verslag gedaan van de tussenstand. In dit artikel wordt het eindresultaat van de CUR-commissie toegelicht.

Werkwijze CUR commissie

Als eerste stap is een (internationale) literatuurstudie uitgevoerd om de bestaande ontwerpmethoden in kaart te brengen. Naast dat dit een goed overzicht geeft van de beschikbare methoden heeft dit ook een nog relatief onbekende methode uit Frankrijk opgeleverd, de methode Bourgues & Mieussens [3]. Vervolgens is een aantal beschikbare veld- en centrifugeproeven geanalyseerd om de geschiktheid van bestaande rekenmethoden te toetsen. Hierbij moet worden opgemerkt dat er een beperkt aantal goed gedocumenteerde veld- en centrifugeproeven beschikbaar is. Een speciaal voor dit onderzoek uitgevoerd geocentrifugeonderzoek is een nuttige aanvulling op reeds bestaande veldmetingen gebleken.

Op basis van de analyses is de rekenmethodiek verbeterd om hiermee de nauwkeurigheid van de voorspellingen te vergroten. De verbeterde rekenmethoden zijn ingedeeld en vastgelegd in een aantal aanbevolen rekenmethoden waarbij de complexiteit is onderscheiden van 'eenvoudig' tot 'uitgebreid'.

Bestaande ontwerpmethoden

De ontwerpmethoden voor het analyseren van dit grond-constructie-interactie probleem kunnen grofweg in twee hoofdgroepen worden onderscheiden, zie figuur 2:

- Groep 1 waarbij de horizontale gronddeformatie in een apart model wordt bepaald dat dient



Figuur 1

als invoer voor een model waarin de paal is gemodelleerd als verend ondersteunde ligger.

- Groep 2 waarbij grond en paal in één systeem zitten.

Uit de bestaande ontwerpmethoden is een selectie gemaakt van methoden/modellen die binnen het onderzoek zijn getoetst aan een aantal beschikbare veldmetingen en de centrifugeproeven. Deze methoden/modellen zijn:

Groep 1: Grond en Palen gesplitst

Voor de bepaling van het horizontaal grond gedrag:

- methode Van IJsseldijk-Loof (analytisch methode op basis van de elasticiteitstheorie);
- methode Bourges & Mieussens (empirische methode uit Frankrijk);
- 2D eindige elementen modellen (Plaxis Soft Soil, Hardening Soil en Soft Soil Creep).

Voor het bepalen van het paalgedrag:

- Mpile (verend ondersteunde ligger);
- Msheet of Mhorpile (verend ondersteunde ligger).

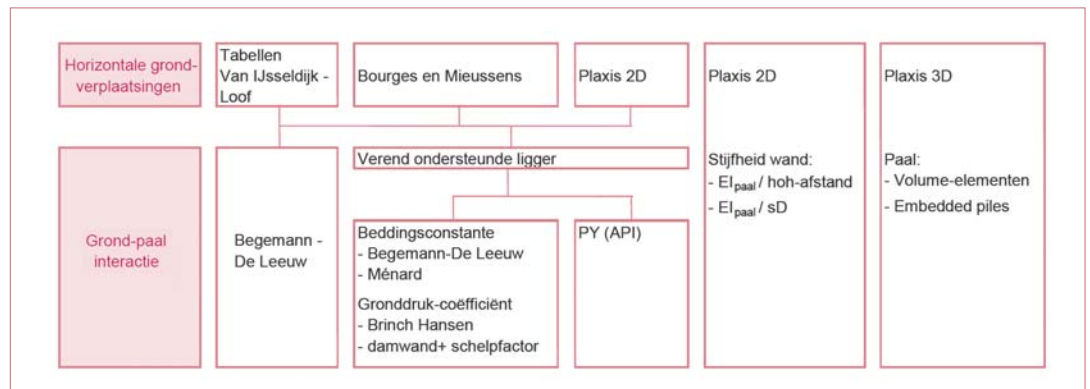
Groep 2: Grond en Palen in één model

- 2D eindige elementen model (Plaxis; paal geschematiseerd als doorgaande wand);
- 3D eindige elementen model (Plaxis).

In de CUR-commissie is ook aandacht besteed aan de invloed van kruip en scheurvorming op het paalgedrag van een (prefab) betonpaal. Er is geconcludeerd dat de methode voor het bepalen van de buigstijfheid van funderingspalen volgens VBC 1995 het beste kan worden toegepast. Verder blijkt dat vooral het modelleren van de verminderde stijfheid door scheurvorming van het beton tot optimalisaties kan leiden. Indien scheurvorming optreedt, speelt het effect van de kruip van het beton nog maar een ondergeschikte rol. Naast de stijfheid van de paal heeft de inklemming van de paalkop een grote invloed op het momentenverloop in een funderingspaal. Veelal wordt gerekend met een 100% inklemming van de door grond horizontaal belaste paal met grote inklemmingsmomenten als gevolg. In de praktijk zal de inklemming vrijwel nooit 100% zijn.

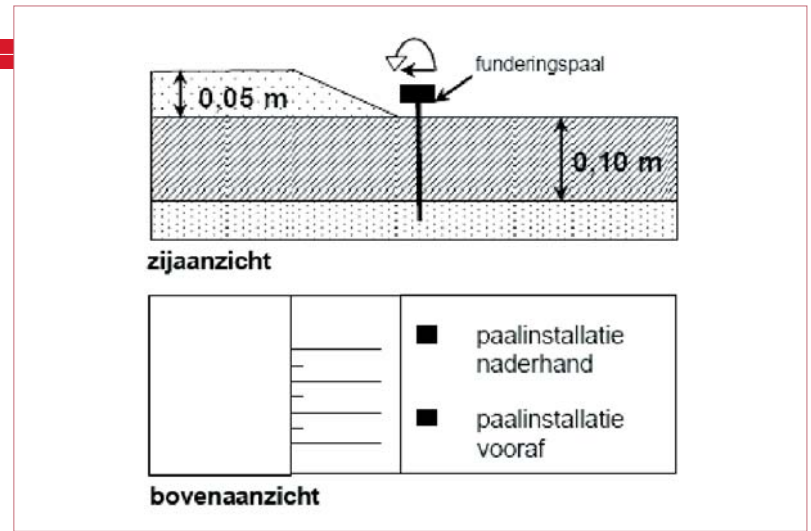
Selectie cases

Een aantal cases waarbij alleen de gronddeformaties zijn gemeten zijn ook zeer waardevol gebleken voor het onderzoek. Immers, als de horizontale gronddeformaties slecht kunnen worden voorspeld is de voorspelling van het gedrag van de paal ook slecht. Daarnaast is uit de literatuurstudie reeds gebleken dat het aantal bruikbare cases waarin zowel aan grond als aan



Figuur 2

Figuur 3



palen is gemeten zeer beperkt zijn.

De gebruikte veld- en centrifugeproeven zijn:

Cases met alleen gronddeformaties:

- No-Recess proefterp HW1
- Betuweroute km 16.7

Cases met zowel gronddeformaties als grond-constructie-interactie:

- Geocentrifugeproef GeoDelft; gronddeformaties en bepaling van de buigende momenten van een messing paal ingeklemd aan de kop waarbij palen op verschillende momenten in het ophoogproces zijn geïnstalleerd in de teen van een model van een 5 m hoge ophoging op een 10 m dik pakket slappe klei, zie figuur 3.
- CIAD-proef Europaboulevard; gronddeformaties en bepaling van de buigende momenten in de fundatiepalen in een keermuur. De momenten in de paal zijn op verschillende niveaus bepaald met rekstroken;
- De Brienoord Corridor (Bricorproef); De gronddeformatie en deformaties van een stalen en prefab betonpaal met vrije paalkop t.g.v. de wegverbreding bij de Brienoord. De vervorming van de palen is bepaald met in de palen opgenomen hellingmeetbuizen.

Analyse cases

HORizontALE DEFORMATIES

Uit de resultaten van de cases blijkt dat de methode Van IJsseldijk-Loof alleen tot redelijke voorspellingen van de horizontale deformaties leidt als de situatie goed aansluit bij de randvoorwaarden (uniforme grondopbouw, ongedraineerd en grotendeels elastisch, d.w.z. als de stabiliteit van het grondlichaam relatief groot is; bijvoorbeeld Bishop stabiliteit > 1,6)

Met de methode Bourges & Mieussens worden goede resultaten geboekt met de berekening van de horizontale grondvervorming. Deze methode is wat de grondvervormingen betreft completer dan de methode Van IJsseldijk en Loof, omdat naast de stijfheid van de grond ook de stabiliteit van de terp wordt meegenomen. Een nadeel ten opzichte van de methode Van IJsseldijk-Loof is dat geen gronddrukverhogingen kunnen worden bepaald waaruit de belasting op een paalfundering volgt. Verder moet er nog meer praktijkervaring worden opgedaan met deze methode.

Uit de analyse van de cases is gebleken dat het

Plaxis Soft Soil Creep-model het meest geschikt is als eindige elementenmodel voor de voorspelling van horizontale gronddeformaties in slappe grond. Bij het toepassen van het Soft Soil Creep-model is het – op de juiste manier – afleiden en toepassen van de materiaalparameters c' , ϕ' en M van groot belang.

De horizontale verplaatsing wordt gedomineerd door de stabiliteit van de terp en de waarde voor de neutrale gronddrukcoëfficiënt K_0^{nc} . Aan deze laatste is ook de parameter M gekoppeld die de vorm van de cap of kruipcontour bepaalt. Binnen het Soft Soil Creep-model wordt als default instelling K_0^{nc} en M bepaald uit de hoek van inwendige wrijving ϕ' van de grond, volgens [4]:

$$M = \frac{6 \times \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \approx 3 - 2,8 \times K_0^{nc}$$

Een te lage waarde voor ϕ' (bijvoorbeeld uit celproeven of de 2% of 5% rekgrens uit triaxiaalproeven) leidt tot een relatief hoge waarde voor K_0^{nc} . Hierdoor wordt M relatief laag, en de vervorming te groot. Beter is het om de K_0^{nc} en daarmee ook M rechtstreeks in te voeren. Uit de cases No-Recess en Betuweroute blijkt dat de bepaling van K_0^{nc} en M uit K_0 -CRS-proeven tot goede resultaten leidt. Als er geen laboratoriumgegevens beschikbaar zijn kunnen de volgende waarden worden gehanteerd:

- Veen $0,25 < K_0^{nc} < 0,35$
- Klei $0,35 < K_0^{nc} < 0,5$
- Zandige klei $0,45 < K_0^{nc} < 0,55$

Er is grote terughoudendheid geboden bij het toepassen van cohesie in het Soft Soil Creep-model, vooral bij lage spanningen. Dit in verband met ongewenste effecten van cohesie op het model. Het SSC-model kan daarom niet in de toplagen worden toegepast. Hiervoor wordt

aanbevolen om het Mohr-Coulomb model toe te passen.

VERENMODELLEN

Als verenmodellen worden gebruikt bij de bepaling van de vervormingen en krachten in de constructie, is de voorspellingskracht sterk afhankelijk van de beddingconstanten. De beddingconstanten op basis van de tabellen van Van IJsseldijk-Loof en op basis van Ménard scoren vrij slecht. De beste resultaten worden verkregen door de beddingconstante af te leiden volgens de methode CIAD/Begemann-De Leeuw. Hiervoor is het nodig om de ongehinderde horizontale gronddeformatie te bepalen en tevens de (maximale) gronddruk bij volledige verhindering (oneindig stijve paal). Dit resulteert in een paalbelasting gelijk aan nul als de paal net zoveel beweegt als de grond en een maximale paalbelasting als de grond volledig wordt verhinderd door de paal.

EINDIGE ELEMENTEN METHODE

De voorspellingskracht van de 2D modellen, waarbij de palen als wand zijn gemodelleerd, valt of staat met de keuze van de modelfactor die wordt gebruikt om de stijfheid van een individuele paal te 'vertalen' naar een wandstijfheid in het 2D model. Uit de geanalyseerde cases blijkt dat bij paalgroepen (bijv. keermuren of landhoofden) de equivalente paalstijfheid in Plaxis 2D het beste kan worden bepaald door de paalstijfheid te delen door de hart-op-hart (h.o.h.) afstand van de palen, zie figuur 4. Oftewel:

$$EI_{paalenrij, Plaxis} [kNm^2/m] = \frac{EI_{paal, werkelijk} [kNm^2]}{h.o.h. afstand palen [m]}$$

Dit is een goede modellering tot h.o.h. afstanden van de palen van ongeveer $8 \times$ diameter paal.

Voor grotere h.o.h. afstanden wordt aanbevolen om $S \times$ diameter paal als maximum te hanteren, met modelfactor $S = 8$.

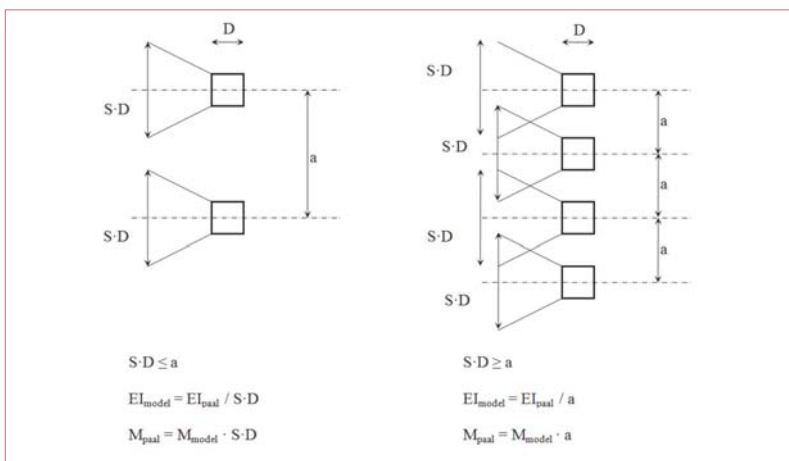
Deze modelfactor dient niet te worden verward met de schelpfactor die wordt gebruikt om de meewerkende breedte van een individuele paal te bepalen. Door het modelleren van een paal als wand in een 2D-model wordt het stromen van grond langs de paal verhinderd. Uit de analyse van de cases is gebleken dat het gebruik van een schelpfactor in een 2D-aanpak tot grote modelleringfouten leidt. Om het effect van deze modelleringfout te ondervangen is een modelfactor S geïntroduceerd voor de 2D-aanpak. In feite is de modelfactor S gelijk aan de schelpfactor maal een correctiefactor voor de fouten die worden geïntroduceerd door de 2D-aanpak. Een volledige 3D berekening leidt tot de beste voorspelling van paalverplaatsingen en krachten in de palen.

Opmerking

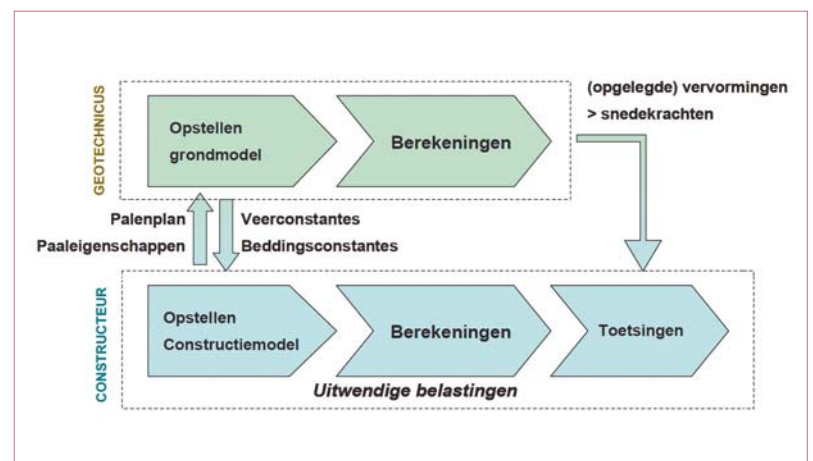
In het CUR-rapport 228 zijn de onderzochte cases uitgebreid beschreven en geven daarmee veel achtergrond informatie. De onderliggende onderzoeksrapporten zijn voor geïnteresseerden eveneens te raadplegen.

Aanbevolen ontwerpmethoden

Op basis van de onderzochte cases is een aantal ontwerpstrategieën opgesteld. In de ontwerpstrategie wordt onderscheid gemaakt tussen de belasting op de paal door horizontale gronddeformaties en door externe krachten. Deze laatste categorie werkt over het algemeen op de paalkop en bestaat onder andere uit remkrachten, temperatuurbelasting, enzovoort. Veelal wordt een gesplitste berekeningsaanpak gehanteerd: de geotechnisch adviseur analyseert met een



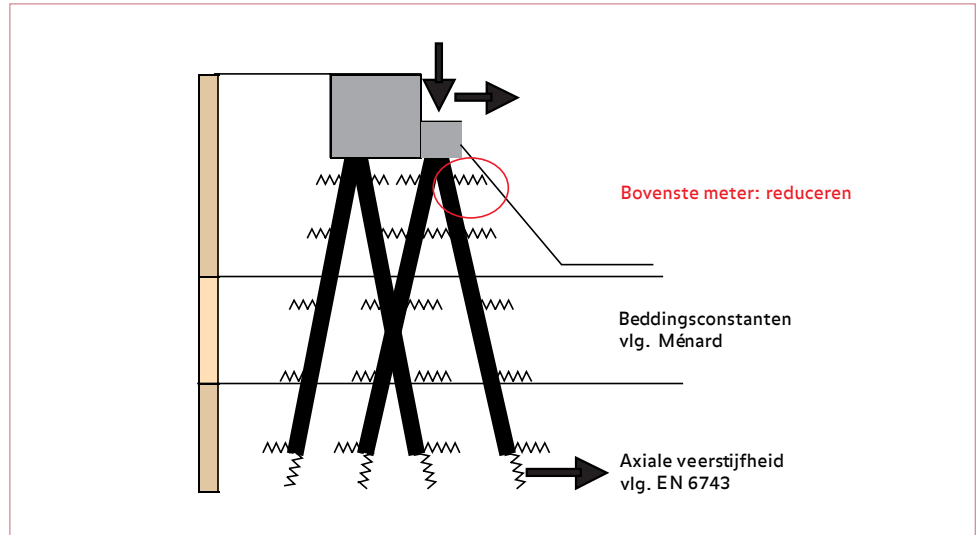
Figuur 4



Figuur 5



Figuur 6



Figuur 7

grondmodel de effecten van gronddeformaties. De constructeur berekent met behulp van een constructiemodel de invloed van de externe krachten. De interactie is weergegeven in *figuur 5*. De stappen in de ontwerpberekeningen zijn als volgt:

1. Bepalen van de ongehinderde grondvervorming.
2. Bepalen van de restvervorming na installatie van de funderingspalen.
3. Bepalen van de (paal)krachten en vervormingen
4. Analyseren van de op de constructie werkende externe krachten.
5. Samenstellen van de resultaten.
6. Toetsing van de resultaten.

De ontwerpstrategieën zijn in drie categorieën verdeeld:

- 'Eenvoudig', waarbij gebruik wordt gemaakt van ongehinderde grondvervormingen op basis van Van IJsseldijk-Loof of Bourges & Mieussens en vervolgens verenmodellen voor de grond-constructie-interactie.
- 'Tussenweg', waarbij de ongehinderde grondvervorming wordt bepaald met Plaxis 2D en er voor de grond-constructie-interactie gebruik wordt gemaakt van een verenmodel of Plaxis 2D.
- 'Uitgebreid', waarbij zoveel mogelijk een geïntegreerde 3D berekening wordt gemaakt (met Plaxis 3D).

Voorbeeld landhoofd - 'Tussenweg'

Ter illustratie van de ontwerpstrategie 'Tussenweg' worden de stappen doorgenomen die gevolgd kunnen worden bij het berekenen van een hooggelegen landhoofd (zie *figuur 6*) met aansluitend een aardebaan.

STAP 1: BEREKENING ONGEHINDERDE VERVORMING MET PLAXIS 2D

Als kruip van de grond een rol speelt, wordt gebruik gemaakt van het Soft Soil Creep-model. Hierbij wordt speciale aandacht gevraagd voor de juiste keuze van de modelparameters. Het wordt aanbevolen om de met Plaxis berekende restzetting te ijkken aan een zettingberekening (MSettle) en de orde van grootte van de horizontale deformaties te controleren met Bourges & Mieussens.

STAP 2: HET BEPALEN VAN HET MOMENT VAN INSTALLEREN VAN DE PALEN

Dit is een iteratief proces en afhankelijk van vele factoren; mogelijke wachttijd, het type funderingspaal, de duurzaamheidseisen, de sterkte, enzovoort

STAP 3: BEREKENING VAN DE GROND-CONSTRUCTIE-INTERACTIE MET PLAXIS 2D

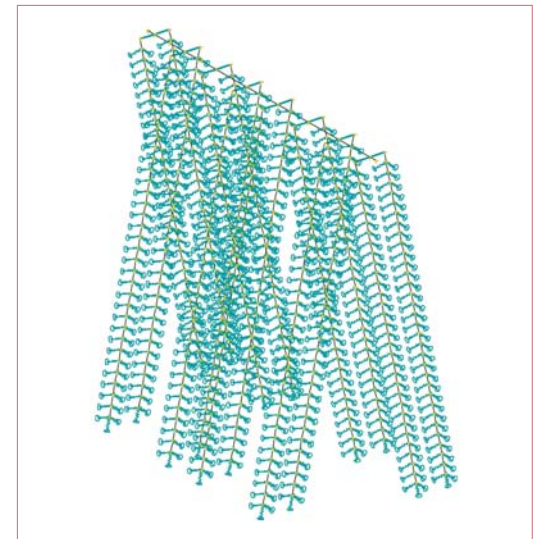
In het Plaxis 2D model worden de palen als wand gemodelleerd. De stijfheid van de palen wordt als volgt gemodelleerd:

$$EI_{\text{palenrij, Plaxis}} [\text{kNm}^2/\text{m}] = \frac{EI_{\text{paal, werkelijk}} [\text{kNm}^2]}{\text{h.o.h. afstand palen} [\text{m}]}$$

Als modelfactor * diameter paal ($S \cdot D$, zie hierboven) wordt hierbij dus de h.o.h.-afstand tussen de palen gehanteerd. Dit is een goede modellering tot h.o.h. afstanden van de palen van ongeveer $8 \cdot \text{Diameter paal}$ ($8 \cdot D$). Voor grotere h.o.h. afstanden wordt aanbevolen om $8 \cdot \text{diameter paal}$ als maximum te hanteren, dus in dat geval:

$$EI_{\text{palenrij, Plaxis}} [\text{kNm}^2/\text{m}] = \frac{EI_{\text{paal, werkelijk}} [\text{kNm}^2]}{8 \cdot D [\text{m}]}$$

De door Plaxis berekende paalmomenten zijn per



Figuur 8

streckende meter. De 'werkelijke' paalmomenten worden verkregen door ze te vermenigvuldigen met de h.o.h. afstand van de palen (of $8 \cdot D$ als dit als maximum is gehanteerd):

$$M_{\text{paal, werkelijk}} [\text{kNm}] = M_{\text{palenrij, Plaxis}} [\text{kNm/m}] \cdot \text{h.o.h. afstand palen} [\text{m}]$$

STAP 4: ANALYSE VAN EXTERNE KRACHTEN

In dit voorbeeld worden de op het landhoofd werkende externe krachten (oplegkrachten vanuit het dek) geanalyseerd met een verenmodel. Het wordt aanbevolen om de beddingconstanten volgens Ménard te gebruiken, zie *figuur 7*. Opgemerkt wordt dat het modelleren van de palen door middel van puntveren aan de onderkant van het landhoofd niet juist is. Het model geeft bij horizontale verplaatsingen geen momenten in de palen. Tevens geeft het ook

geen accuraat beeld van het horizontaal gedrag. Voor een juiste modellering met behulp van een verenmodel zullen de palen met veren langs de palen geschematiseerd moeten worden, zie figuur 8. Dit kan met modellen zoals MPile, Scia Engineer of gelijkwaardig.

STAP 5 EN 6: SAMENSTELLEN VAN DE RESULTATEN EN TOETSING

De krachten en vervormingen uit de analyses van stap 3 en 4 dienen samengesteld te worden. Veelal is het kopmoment en het inklemmingsmoment in de diepere zandlaag of het veldmoment in de slappe laag van belang. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de richting van de vervormingen en krachten en of het lange duur dan wel korte duur belastingen zijn. Voor de toetsing van de sterkte en duurzaamheid dienen de vigerende normen te worden toegepast.

Conclusie

Met het CUR-rapport 228 is een breed gedragen ontwerprichtlijn beschikbaar gekomen dat een

substantiële kwaliteitsverbetering geeft bij het voorspellen van de vervormingen en krachten in de constructies.

Het volgende is zoal bereikt:

- In het rapport is een aantal aanbevolen rekenmethoden vastgelegd, variërend van 'Eenvoudig' tot 'Uitgebreid'.
- De vrij onbekende methode 'Bourques & Mieussens' is geïntroduceerd voor de bepaling van de ongehinderde grondvervorming met goede resultaten.
- Helderheid is verschaft betreffende het omgaan met de beddingconstanten bij verenmodellen.
- Een modelfactor is bij Plaxis 2D berekeningen geïntroduceerd voor de schematisatie van de paalstijfheid. Er is helder gemaakt dat deze factor niet gelijk is aan de hiervoor veelvuldig gebruikte schelpfactor.
- Concrete aanbevelingen zijn opgenomen betreffende het gebruik van de grondmodellen in Plaxis, met name voor het Soft Soil Creepmodel.

De grond-constructie-interactie en de wijze van modelleren hiervan is uitgebreid beschreven.

Als commissie hopen wij dat het CUR rapport 228 zijn plek zal krijgen in de ontwerp praktijk van zowel de geotechnisch adviseur als de constructeur die met 'door grond horizontaal belaste palen' te maken krijgen.

Literatuur

- [1] CUR rapport 228, Ontwerprichtlijn 'Door grond horizontaal belaste palen', DC/CUR, Gouda, 2010.
- [2] Feddema, A., CUR-commissie H408 'Door grond horizontaal belaste palen' – de tussenstand, Geotechniek, 12e jaargang, nr. 5, december 2008.
- [3] Bourges, F. en Mieussens, C., *Déplacements latéraux à proximité des remblais sur sols compressibles, Méthode prévision*, Bulletin liaison Laboratoires des Ponts et Chaussées, no. 101, Mai-Juin 1979, ref. 2296, pp.73-100.
- [4] Plaxis version 8, Material Models Manual, June 30, 2006. ■



Met beide voeten op de grond



www.besix.com