

Innovatieve aardebaan: nog geen eenduidige ontwerpberekening voor de matras

ir. H.L. Jansen

Fugro Ingenieursbureau B.V.

ir. E.J. Huiden

BAM Grondtechniek

ir. M.J. Profittlich

Fugro Ingenieursbureau B.V.

SAMENVATTING

CUR-publicatie 2006-2 “Innovatieve aardebaan” beschrijft de toepassing van drie innovatieve technieken voor het snel aanleggen van blijvend vlakke wegen en terreinen. Dit zijn de gewapende matras op palen, de grondverbeteringstechniek Mixed in Place, en de kolommen met geotextiel omhulling. Voor het ontwerp is een belangrijke vraag of er sprake is van grondverbetering dan wel van een fundering op palen. In dat laatste geval is een tweede vraag of NEN 6743 van toepassing is. CUR-publicatie 2002-7 heeft hiervoor een ontwerpprocedure voorgesteld. Voor de ontwerpberekening van de matras zijn meerdere methoden bekend die tot uiteenlopende resultaten leiden. Het artikel geeft een overzicht van de aandachtspunten.

INLEIDING

De onlangs verschenen CUR-publicatie 2006-2 *Innovatieve aardebaan* doet verslag van de succesvolle toepassing van innovatieve technieken voor het snel aanleggen van blijvend vlakke wegen en terreinen. Deze technieken beperken de hinder bij bouwen en zorgen voor een vlotte doorstroming van het verkeer.

Snel bouwen van infrastructuur blijkt vaak nodig en is zeker daar wenselijk waar men grote (verkeers)hinder verwacht tijdens de bouw. De CUR-publicatie geeft een overzicht van drie hoofdgroepen van technieken, namelijk GSP (Gewapende Spreidingsmatras op Slanke Palen), MIP (Mixed In Place) en GEC (Geotextile Encased Columns), inclusief voorbeelden van toepassing.

Met name bij de slanke palen is een gewapende matras nodig om de bovenbelasting op de palen over te brengen. Ontwerpberekeningen van de gewapende matras volgens (buitenlandse) voorschriften en andere publicaties uit de technische literatuur kunnen nogal uiteenlopende resultaten geven. Meer eenduidigheid hieromtrent is dringend gewenst om de algemene acceptatie en verdere toepassing te bevorderen.

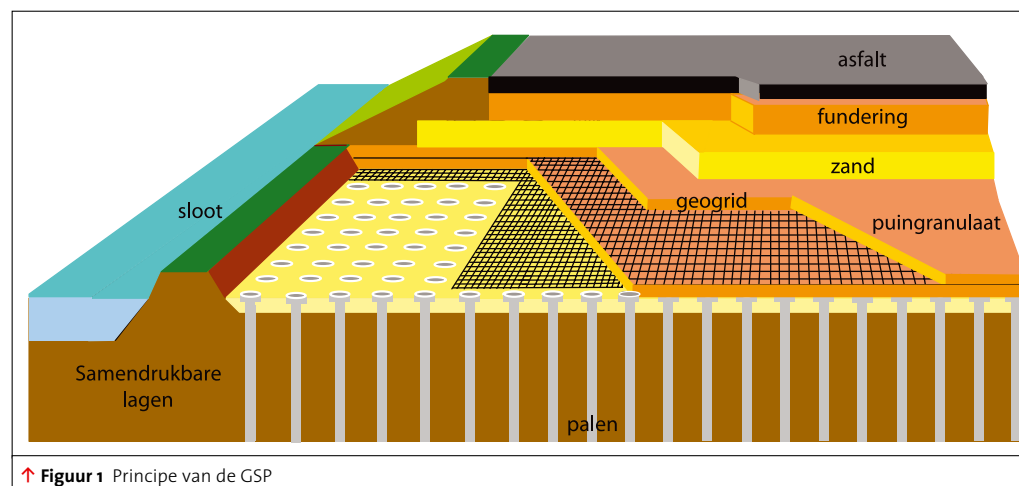
Dit artikel geeft, na een beschrijving van de technieken, een overzicht van enkele ontwerpaspecten.

GEWAPENDE MATRAS OP PALEN

De GSP draagt het baangewicht met veel lichtbelaste betonpalen, zie *figuur 1*. De belasting wordt naar de palen overgebracht via een matras van steenkorrelmateriaal met daarin één of enkele lagen geogrids. De palen $\varnothing 150$ à $\varnothing 273$ mm staan op 1,0 à 1,8 m afstand. Het zijn in-de-grond-gevormde palen waarvoor een ingedrukte of ingetrilde hulpbuis wordt gebruikt. De paal heeft een vergrote kop $\varnothing 300$ à $\varnothing 400$ mm om de contactdruk tegen de matras te beperken. Een vergelijkbare constructie kan worden gebouwd met prefab

palen. Deze techniek staat bekend onder de naam GMOP, Gewapende granulaatMatras Op Palen. De palen staan op iets grotere afstand dan bij GSP, namelijk 2,0 à 2,5 m. Een prefab plaat (afmeting circa 750 mm) op de paalkoppen zorgt voor een betere ondersteuning van de matras.

Nauwkeurige paaldimensionering, korte bouwtijd, vrijwel zettingsvrij en onderhoudsvrij zijn de belangrijkste voordelen. Dankzij GSP/GMOP kan de aardebaan met relatief steile taluds worden aangelegd, waardoor het



↑ **Figuur 1** Principe van de GSP



↑ **Figuur 2** Voorbeeld van een uitgevoerd project met GSP



↑ **Figuur 3** Uitvoering van MIP kolommen voor RandstadRail te Rotterdam

ruimtebeslag kleiner is dan bij de klassieke aanpak. Andersom geldt ook: bij weinig terreinoppervlak biedt GSP/GMOP wellicht toch de mogelijkheid om een aardebaan toe te passen en een betonnen viaduct te vermijden.

Recent uitgevoerde GSP/GMOP in Nederland zijn (zie *figuur 2*):

- reconstructie A15 Sliedrecht-West en Hardinxveld-Giessendam in 2004 - 2006 met AuGeo palen en prefab palen [Verweij et al. 2006]
- toerit A4 bij Hoogmade in 2005 met het AuGeo systeem
- aardebaan Carnisselandelijk Barendrecht in 2003 - 2004 met HogeSnelheidsPalen (HSP) [Van der Stoel et al. 2005]
- bastions geluidswal gebied 2J Almere in 2005 - 2006 met HSP [Broens et al. 2006], zie *figuur 2*
- verbreding van de N247 voor de aanleg van een busbaan met prefab palen [Habib et al. 2002]

MIP KOLOMMEN

MIP (Mixed in place) is een grondstabilisatie techniek. De bestaande grond wordt in-situ gemengd met een bindmiddel, zie *figuur 3*. Er ontstaat een nieuw materiaal met een hogere druksterkte en stijfheid, dat ongevoelig is voor consolidatie. Mixed in place wordt meestal uitgevoerd in de vorm van kolommen $\varnothing 600$ à 800 mm h.o.h. 1,2 à 2,0 m. De kolommen dragen het merendeel van de belasting, het restant draagt op de onbehandelde grond tussen de kolommen. Bij ontwerpen met 25% à 35%

behandeld oppervlak gaat, zelfs bij relatief dunne aardebanen, de belasting via gewelfwerking naar de kolommen. Langs de randen kan een geotextiel nodig zijn om als trekband de taludstabiliteit te verzekeren. Naast alleenstaande kolommen zijn ook overlappende kolommen in de vorm van wanden en blokken mogelijk. Dan spreekt men van blokstabilisatie.

Evenals bij GSP/GMOP en de hierna te noemen GEC-oplossing kunnen de taluds steil worden opgezet. Gestabiliseerde grondkolommen hebben niet de stijfheid van een betonpaal. Het bindmiddel vormt samen met de fijne gronddelen een matrix waarin klei- en veenbrokjes zijn ingebed. Enkele decimeters zetting is mogelijk. Dit vindt plaats in de aanlegfase onder invloed van het baangewicht en de tijdelijke overhoogte als equivalent van de toekomstige verkeersbelasting. Na 3 maanden kan de overhoogte worden verwijderd en resteert een nagenoeg zettingsvrije baan. De kolomproductie is geheel trillingvrij en geluidarm.

Een voorbeeld van een project met MIP kolommen is de aardebaan voor de spoorlijn Hamburg - Berlijn, waar alleenstaande kolommen zijn toegepast, zie *figuur 4*. In Nederland is ook ervaring opgedaan met MIP kolommen, echter nog niet als fundering van een aardebaan. De kolommen zijn toegepast als blokstabilisatie en wel voor de tunnelboormachine (TBM) van de Botlekspoortunnel in Hoogvliet in 1997 - 2001 en voor de TBM van RandstadRail te Rotterdam in 2004.

KOLOMMEN OMHULD MET EEN GEOTEXTIEL KOUS

GEC (Geotextile Encased Columns), ook wel GOZ (Geotextiel Omhulde zandkolommen) genoemd, zakken ook enkele decimeters om het rondgeweven geotextiel op spanning te krijgen. Daarna ondersteunt het rondweefsel de kolomvulling (zand of een ander korrelig materiaal) zijdelings. Ook de grond tussen de kolommen draagt mee aan het gewicht van de aardebaan. De kolommen worden gemaakt met een hulpbuis $\varnothing 800$ mm met aan de onderzijde twee scharnierende kleppen onder 60° , zie *figuur 5*. De kleppen voorkomen dat tijdens het intrillen grond in de buis dringt. Zodra de punt de draagkrachtige grond heeft bereikt, wordt het geotextiel in de buis neergelaten en gevuld met zand. Terwijl de buis wordt getrokken, verdicht zich het zand in het rondweefsel. Een geotextiel over de kolommen langs de randen van de aardebaan voorkomt taludinstabiliteit.



↑ **Figuur 4** MIP kolommen voor de spoorlijn Hamburg - Berlijn

In Nederland gerealiseerde GEC projecten zijn:

- Kunstwerk 40 Betuweroute in 2002
- HSL ter plaatse van voormalig vuilstort Westrik, Breda in 2003, zie figuur 6
- Bastions Oost en West te Houten in 2005 [Brok et al. 2006]

GEEN WACHTTIJD

Kenmerkend voor alle hier besproken oplossingen is dat wachttijd voor consolidatie van de ondergrond niet meer nodig is. Direct na het aanbrengen van de palen of kolommen kan de aardebaan in een hoog tempo worden aangelegd. Na het verwijderen van de tijdelijke overhoogte bij MIP en GEC kan de verhardingsconstructie worden aangebracht; de restzettingen zijn gering. De GSP-technieken zijn nagenoeg restzettingvrij.

PAALFUNDERING OF GRONDVERBETERING?

Belangrijke vraag bij de ontwerpberekeningen is of we te maken hebben met een fundering op palen of met een grondverbetering. MIP kolommen en GEC neigen meer naar een grondverbetering, mede omdat ook de grond tussen de kolommen meedoet in de krachtoverdracht. Bij de GSP/GMOP is sprake van een paalfundering, maar niet duidelijk is of NEN 6740 en NEN 6743-1 van toepassing zijn. Deze normen zijn in eerste instantie bedoeld voor bouwwerken met een woonfunctie,

waarvoor strenge restzettingseisen gelden. Voor infrastructuur gelden minder strenge eisen. De flexibiliteit van de matras staat bovendien grotere vervormingen toe. Het zonder meer toepassen van NEN 6740/6743-1 met de daarin gehanteerde veiligheidsfilosofie en bijbehorende partiële factoren kan dan voor de GSP/GMOP leiden tot een onnodig zware, en dus dure paalfundering. CUR-rapport 2002-7 geeft het volgende voorstel voor de ontwerpprocedure:

- draagkracht van de palen berekenen conform NEN 6743-1:2006, dus uitgaande van sonderingen met $\xi = 0,72$ à $0,80$ en $\gamma_{m,b} = 1,2$ (niet proefbelaste palen)
- belasting op de palen berekenen met gereduceerde belastingfactoren, mits ervan uit wordt gegaan dat alle belasting op de palen terecht komt. Voor rustende en mobiele belasting geldt dan $\gamma_s = 1,0$ à $1,1$ voor respectievelijk veiligheidsklasse 2 en 3.

De overall veiligheidsfactor bedraagt dan 1,5 à 1,7.

Bij de op palen gefundeerde wegverbreding N247 was een verschil in zettingsgedrag met de bestaande aardebaan ongewenst [Habib et al. 2002]. Daar zijn, in afwijking van bovenstaande, alle materiaal- en belastingfactoren zelfs op 1,0 gezet.

De negatieve kleeft speelt bij het ontwerp ook een rol. Korrelspanningsverhoging door de

aardebaan en de verkeersbelasting treedt niet op als de palen de totale belasting dragen. Dit is momenteel de gebruikelijk wijze van ontwerpen.

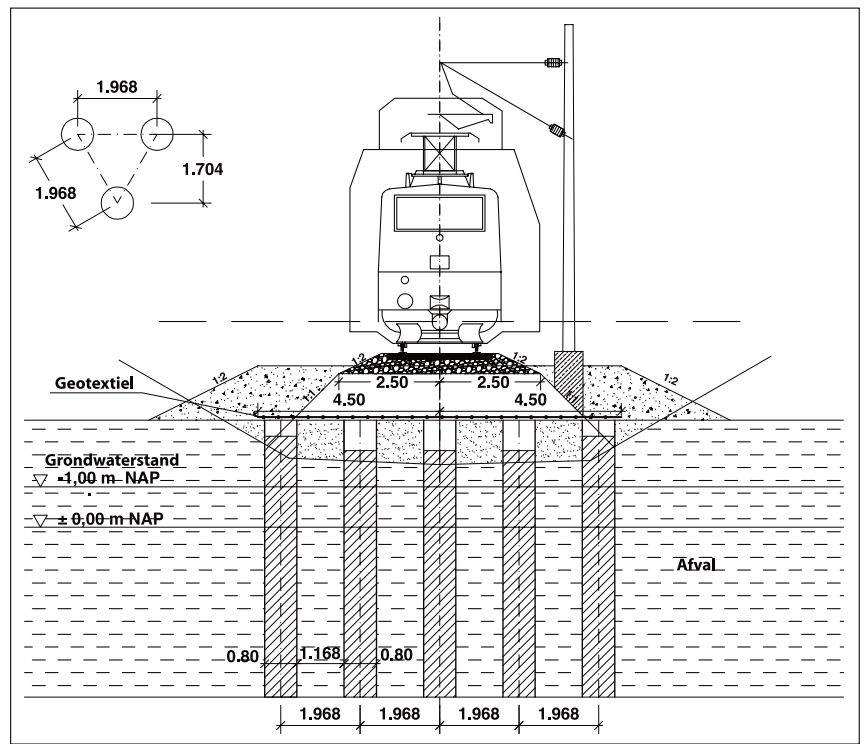
Ook kan ervoor gekozen worden de ondergrond een deel van de belasting te laten dragen. In dat geval kan bespaard worden op de paalfundering, waarbij wel een geringe restzetting geaccepteerd moet worden.

Negatieve kleeft kan overigens ook ontstaan door andere zettingsprocessen, zoals autonome zetting, zetting door grondwaterstandverlaging en/of seculaire zetting door korrelspanningsverhoging in het verre verleden. Maar zelfs dan is het de vraag of de volledige negatieve kleeft in rekening moet worden gebracht. De door de negatieve kleeft verhoogde paalbelasting leidt tot zinking van de paal waardoor de negatieve kleeft afneemt. Met een interactieberekening kan de maximaal in rekening te brengen negatieve kleeft worden bepaald. De paal zakt dan evenveel als het evenwichtspunt.

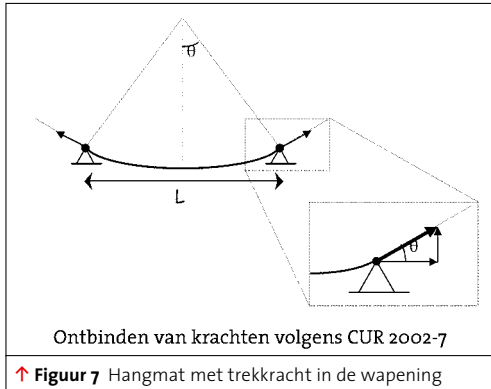
Uit kosten oogpunt zijn dit belangrijke aspecten, omdat de palen meer dan 50% van de kosten van de gehele constructie (gewapende matras met palen) uitmaken. Momenteel wordt in CUR-verband samen met Delft Cluster gewerkt aan een Nederlandse ontwerprichtlijn om meer eenduidigheid in het ontwerpproces van de GSP/GMOP te bereiken.



↑ Figuur 5 Principe / foto uitvoering van een GEC



↑ Figuur 6 GEC Ringtrac® voor de HSL te Westrik



GEWAPENDE MATRAS

Voor de ontwerpberekening van de gewapende matras zijn verschillende methoden bekend die zeer uiteenlopende resultaten kunnen geven. In CUR-rapport 2002-7 wordt hier uitgebreid aandacht aan besteed. De methode Bush-Jenner geeft de laagste krachten in de wapening, de methode volgens de Britse norm BS 8006 vaak de hoogste. In Duitsland is een aanbeveling verschenen, die onderdeel is van de richtlijnen EBGE0.

De analytische ontwerpmethoden hanteren het hangmatprincipe voor de berekening van de trekkrachten in de geogrids. De verschillen in resultaten ontstaan door de mate van boogwerking die wordt verondersteld. Ook de aanname dat de matras permanent door de ondergrond wordt gesteund, of dat een holle ruimte onder de matras kan ontstaan, leidt tot verschillen in uitkomsten. Voor deze aspecten zal de eerder genoemde, in ontwikkeling zijnde Nederlandse ontwerprichtlijn, hopelijk duidelijkheid verschaffen.

OVERSPANNING VAN DE HANGMAT

De trekkracht in de wapening wordt berekend met het hangmatmodel, zie *figuur 7*. Bij de meeste ontwerpberekeningen moet een aanname worden gedaan voor de overspanning van de hangmat. Alleen bij een volledig 3D-model hoeft dat niet.

Als de palen in een vierkantstramien staan, wordt voor de overspanning de diagonaal van het vierkant genomen. Als de afstand tussen de kopplaten wordt aangeduid met $(s-a)$, bedraagt de overspanning volgens deze regel $L = (s-a)\sqrt{2}$, zie *figuur 8*. Dit is mogelijk een enigszins pessimistische keuze, doch in de literatuur bestaat hierover geen discussie.

De trekkracht in de wapening bedraagt:
• volgens formule BS 8006:

$$F_{g,rp} = \frac{q_{grid} \cdot (s-a)}{2a} \sqrt{1 + \frac{1}{6\varepsilon}}$$

• volgens formule Bush-Jenner [CUR-rapport 2002-7]:

$$F_{g,rp} = \frac{\sigma_{v,grid} \cdot L \cdot (1 + \varepsilon)}{2 \cdot \sin\theta}$$

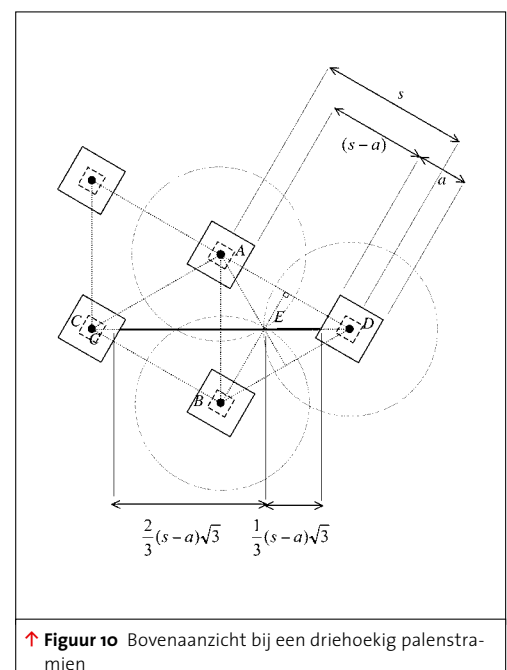
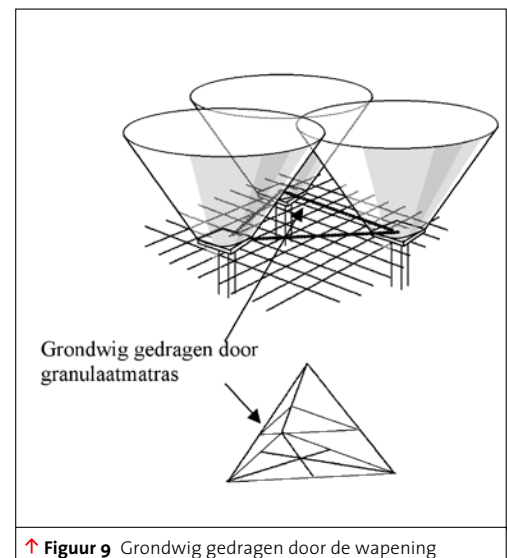
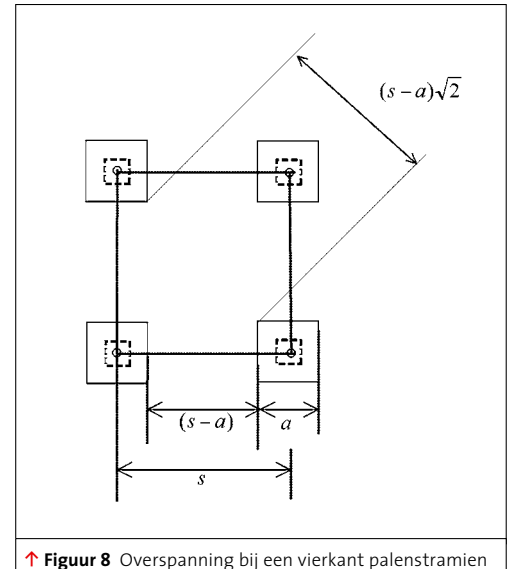
waarin:

- $F_{g,rp}$ is de trekkracht in het geogrid ten gevolge van membraanwerking [kN/m]
- ε is de rek in het geogrid [-]
- q_{grid} is de belasting op het geogrid [kN/m], rekening houdend met boogwerking
- $\sigma_{v,grid}$ is de verticale belasting op het geogrid [kPa]
- s is de h.o.h.-afstand van de palen [m]
- a is de breedte van de paalkop [m]
- θ is de halve tophoek van de cirkelboog [rad]
- ε is de rek in het geogrid [-], bijvoorbeeld $\varepsilon = 0,05$ (5% rek)
- L is de overspanning van het geogrid [m]

Bij palen in een driehoekstramien wordt het ingewikkelder. De geogrid wapening draagt een kegelvormige grondwig, zie *figuur 9*. De Duitse EBGE0 neemt voor de overspanning van de hangmat de grootste afstand tussen de palen, namelijk van punt C naar punt D, zie *figuur 10*, dat wil zeggen $L = (s-a)\sqrt{3}$. In CUR-rapport 2002-7 is de hoogte van de driehoek aangehouden, dat wil zeggen $L = 0,5(s-a)\sqrt{3}$. De redenering achter deze aanname is niet geheel duidelijk. De waarde lijkt aan de kleine kant, omdat de wapening op de lijn AB (*figuur 10*) geen vaste ondersteuning heeft. Zoals in *figuur 10* is geschetst, kan beredeneerd worden dat een redelijke waarde voor de overspanning van punt C naar punt E is (*figuur 10 en 11*), en dus $L = 0,67(s-a)\sqrt{3}$.

2D EINDIGE ELEMENTEN BEREKENINGEN

Bij 2D eindige elementen berekeningen (2D EEM) worden de palen als wanden geschematiseerd. Om een goed beeld van de kracht in de wapening te krijgen, kan de hart-op-hart-afstand van de wanden gelijk worden gekozen aan de overspanning van de hangmat. De wanden krijgen dus een fictieve hart-op-hart-afstand, die bij een vierkantstramien



gelijk is aan de diagonaal van het vierkant en bij een driehoekstramien de hierboven genoemde waarde.

In Plaxis kan de wapening worden gemodelleerd met speciale elementen die alleen een axiale stijfheid hebben, en geen buigstijfheid. In deze elementen kan alleen een trekkracht ontstaan als na iedere stap het elementennet opnieuw wordt gegenereerd. Hierbij krijgen de coördinaten van de knooppunten nieuwe waarden. In Plaxis geschiedt dit bij een zogenaamde updated mesh berekening.

3D EINDIGE ELEMENTEN BEREKENINGEN

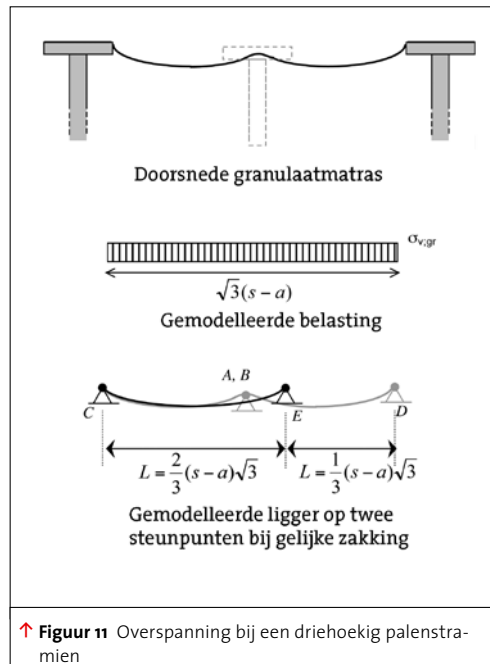
Net als in 2D EEM-berekeningen, moet in 3D EEM-berekeningen een updated mesh berekening worden gemaakt om de kracht in de wapening te kunnen bepalen. Het grote voordeel van 3D EEM berekeningen is evenwel dat het daadwerkelijke palenplan kan worden gemodelleerd. Er hoeft geen fictieve hart-op-hart-afstand te worden gekozen, zoals bij 2D EEM-berekeningen. De 3D EEM-berekeningen lenen zich ook beter om een asymmetrische verkeersbelasting, zoals bijvoorbeeld het assenstelsel volgens de VOSB (NEN 6788), te modelleren. *Figuur 12* geeft een voorbeeld van een 3D EEM-berekening. Uit de berekening volgt dat door de verkeersbelasting de trekkracht in de geogrid wapening belangrijk toeneemt.

De berekeningsfasering van een 3D EEM-berekening luidt bijvoorbeeld:

- o. Aanbrengen van de initiële spanning voor een horizontaal maaiveld met een K_0 -procedure, gevolgd door een plastische nulstap (numerieke rekenstap).
1. Ontgraving (eventueel).
2. Uitrollen geotextiel als laagscheiding op veen/klei ondergrond.
3. Aanbrengen werkvloer van zand.
4. Uitrollen geogrid wapening.
5. Eventueel, aanbrengen granulaat en uitrollen volgende laag geogrid wapening, enz.
6. Aanbrengen wegfundering en asfaltverharding.
7. Opleggen verkeerbelasting.

BEREKENINGSMETHODE MIP KOLOMMEN EN GEC/GOZ

Voor de berekening van de verdeling van de belasting over de kolommen en de grond geldt het principe dat de kolom en de omringende

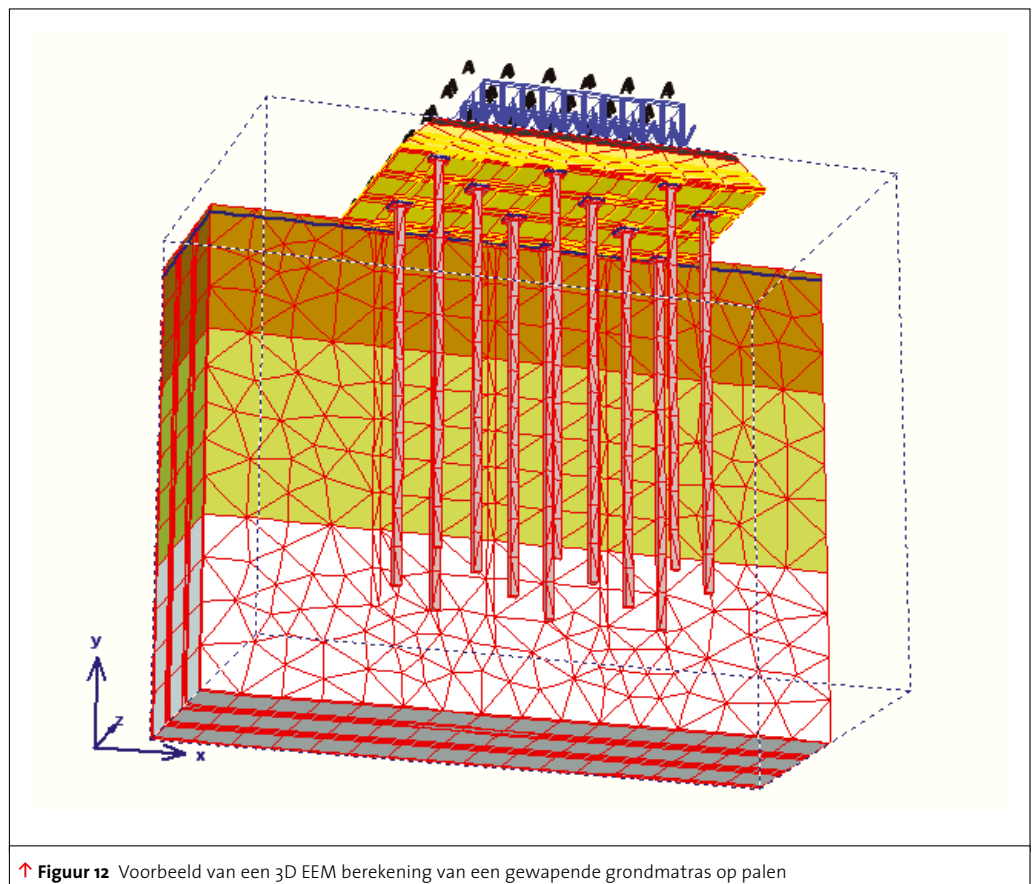


grond op alle niveaus dezelfde samendrukking ondergaan (*equal strain assumption*). Dit betekent dat de belasting op de grond tussen de kolommen geleidelijk afneemt (naarmate de grond samendrukt) en die op de kolommen geleidelijk toeneemt. De voet van de kolommen draagt de belasting vervolgens over op de

draagkrachtige ondergrond. CUR-publicatie 2001-10 *Diepe grondstabilisatie in Nederland* geeft de berekeningsmethode voor MIP kolommen. Raithel en Kempfert doen uitgebreid verslag van de berekeningsmethode voor de met een geotextiel kous versterkte zandkolommen (GEC/GOZ). CUR-publicatie 199 *Handreiking toepassing No-Recess technieken* geeft een samenvatting van de methode. Bij de berekening van de kracht in de geotextiel omhulling wordt verondersteld dat de zandkolom zich plastisch gedraagt. Het geotextiel zelf gedraagt zich elastisch. Voor de horizontale steundruk van de grond tegen de kolommen geldt een elasto-plastisch model. Behalve voor krachtoverdracht fungeren GEC/GOZ kolommen ook als verticale drain.

SLOTOPMERKINGEN

De hier beschreven innovatieve aardebaan is een veelbelovende techniek die al een aantal malen in Nederland is toegepast. Over de berekeningsmethode vindt momenteel een brede discussie plaats. Het ligt in de verwachting dat op afzienbare termijn meer duidelijkheid ontstaat. Belangrijk hierbij is zo veel mogelijk metingen te verrichten om het inzicht in de krachtswerking te vergroten.



LITERATUUR

- [1] CUR-publicatie 2006-2, Innovatieve aardebaan, CUR Bouw & Infra, Gouda
- [2] CUR-publicatie 2002-7, Gewapende granulaatmatras op palen, Gouda
- [3] CUR-publicatie 2001-10, Diepe grondstabilisatie in Nederland - Handleiding voor toepassing, ontwerp en uitvoering, Gouda
- [4] CUR-publicatie 199, Handreiking toepassing No-Recess technieken, CUR, Gouda
- [5] NEN 6740:2006 Geotechniek - TGB 1990 - Basiseisen en belastingen, september 2006
- [6] NEN 6743-1:2006 Geotechniek - Berekeningsmethode voor funderingen op palen - Drukpalen, november 2006
- [7] NEN 6788, Het ontwerpen van stalen bruggen - Basiseisen en eenvoudige rekenregels - VOSB 1995, 1995/1999
- [8] BS 8006, Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills, British Standards Institution, London, 1995 / 1999
- [9] EBGEO Empfehlung für Bewehrungen aus Geokunststoffen, DGGT, Ernst & Sohn, 1997 en Entwurf EBGEO Kapitel 6.9 Bewehrte erdkörper auf punkt- oder klinienförmigen Traggliedern, Stand Juli 2004
- [10] Brok, C. en A. Kleinjan, Geotextiel omhulde zandpalen als fundering voor Bastions te Houten (1), Geokunst juli 2006
- [11] Brok, C. en A. Kleinjan, Geotextiel omhulde zandpalen als fundering voor Bastions te Houten (2), Geokunst oktober 2006
- [12] Broens, M., A. de Lange, A. van der Stoel, Aanleggen geluidswal aan de Hoge Ring in Almere, Geokunst oktober 2006
- [13] Habib, H.A.A., M.H.A. Brugman, B.G.J. Uijting, Widening of Road N247 on a geogrid reinforced mattress on piles, 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, 2002
- [14] Raithel, Marc, H.G. Kempfert, Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen, juli 1999, Schriftenreihe Geotechnik Universität Gh Kassel
- [15] Stoel, A.E.C. van der, A.P. de Lange, Granulaatmatras op palen beperkt zettingen, Land + Water, mei 2005
- [16] Verweij, A., W.A. Nohl, D. Knijff, Innovatief verbreden en ophogen van rijkswegen: Reconstructie A15-Oost, Geotechniek, april 2006

Reacties op dit artikel kunnen tot 1 juli 2007 naar de uitgever worden gestuurd