

Vervormingen van geokunststoffen in een paalmatras en de daaruit volgende belastingverdeling

Ir. Suzanne van Eekelen
Deltares/TU-Delft



Ir. Herman-Jaap Lodder
TU-Delft (nu RPS BCC
B.V. Nederland)



Dr. Ir. Adam Bezuijen
Deltares



Foto 1 Testopstelling.

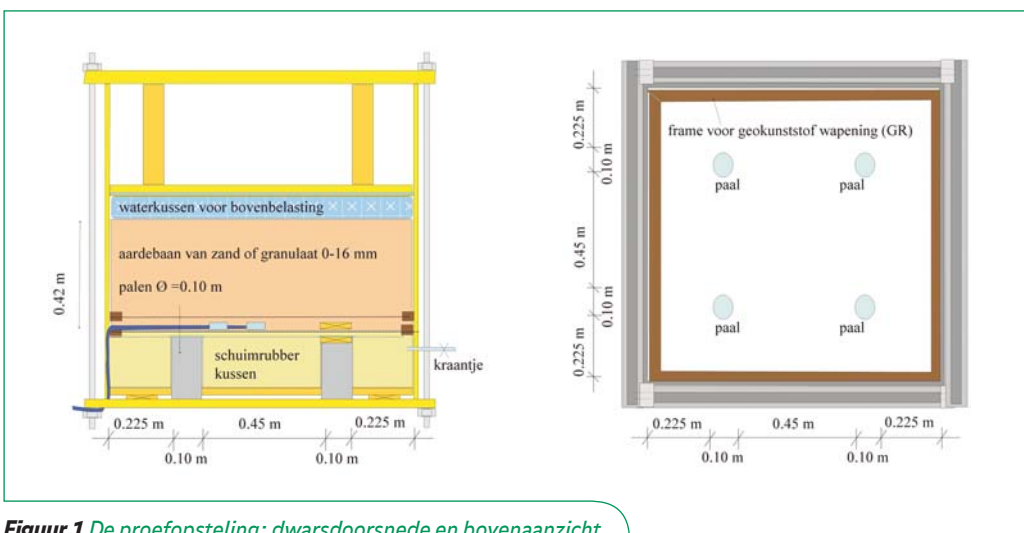
Inleiding

Paalmatrasen worden tegenwoordig regelmatig toegepast daar waar een weg zettingsarm moet zijn, er niet voldoende tijd is om het grondlichaam onder de weg te laten consolideren of wanneer er kwetsbare constructies dichtbij liggen. De paalmatras bestaat uit een veld van palen waarop paaldeksels zijn geplaatst. Over de paaldeksels worden één of meer lagen van geotextiel en/of een geogrid (in het vervolg samen genoemd GR, wat staat voor Geosynthetic Reinforcement) uitgerold en het geheel wordt overdekt met een aardebaan tot de gewenste hoogte.

Voor het ontwerp van dit soort constructies zijn zowel in Nederlands, Duitsland en Engeland in 2010 (vernieuwde) richtlijnen verschenen (CUR 226, 2010, zie ook Van Eekelen et al, 2010, EBGeo, 2010, en BS8006, 2010). In Nederland loopt een onderzoeksprogramma om de CUR ontwerprichtlijn in de toekomst aan te scherpen. Zo lopen er bijvoorbeeld verschillende veldmetingen en de afgelopen jaren zijn door Deltares experimenten uitgevoerd in samenwerking met de geokunststof fabrikanten Huesker, Naue, TenCate en Tensar. Dit artikel behandelt één onderdeel van die experimenten.

Beschrijving experimenten

In een container van 1.1x1.1x1 m werd een GR aangebracht op 4 modelpalen. De slappe grond tussen de palen werd gemodelleerd met een waterdicht schuimrubber kussen dat gevuld was met water. Het kussen had een kraantje waardoor het water gecontroleerd uit het kussen kon lopen. Hiermee werd de consolidatie van de slappe grond gesimuleerd. Bovenop het schuimrubber kussen en de palen werd een laagje zand van ca. 2 cm dik



Figuur 1 De proefopstelling: dwarsdoorsnede en bovenaanzicht.

Samenvatting

Wanneer een geotextiel of geogrid wordt gebruikt in een paalmatrasconstructie, zal dat gaan vervormen. Dat is ook de bedoeling, want alleen zo kan het de verticale belasting weerstaan en kan de boogwerking in de paalmatras zich goed ontwikkelen. Hoe het geotextiel precies vervormt, is in het veld niet eenvoudig

te bepalen. In een proefopstelling, die door Deltares is ontwikkeld is dat wel gelukt. Uit de gemeten vervorming is terug te rekenen hoe de belasting op het geokunststof is verdeeld. Dat blijkt anders te zijn dan in de rekenregels wordt aangenomen. Dat is weer van groot belang het ontwerp van paalmatrasen.

aangebracht. Daarboven kwam het GR, dat was opgespannen op een metalen vierkanten frame. Op de GR werd 0.42 m aardebaan aangebracht. Daarop kwam een waterkussen om spanningen in de aardebaan te simuleren die vergelijkbaar zijn met die in het veld. Daarna werd de opstelling met trekstangen gesloten, zie *figuur 1* en *foto 1*. De proeven werden uitgevoerd door in stappen de druk boven de aardebaan te verhogen en met het schuimkussen consolidatie te simuleren. In totaal zijn 12 proeven uitgevoerd met verschillende typen geokunststof wapening. Twee maal bestond de aardebaan uit zand, tien maal uit menggranulaat 0-16 mm. De proeven en de resultaten zullen elders uitgebreid beschreven worden.

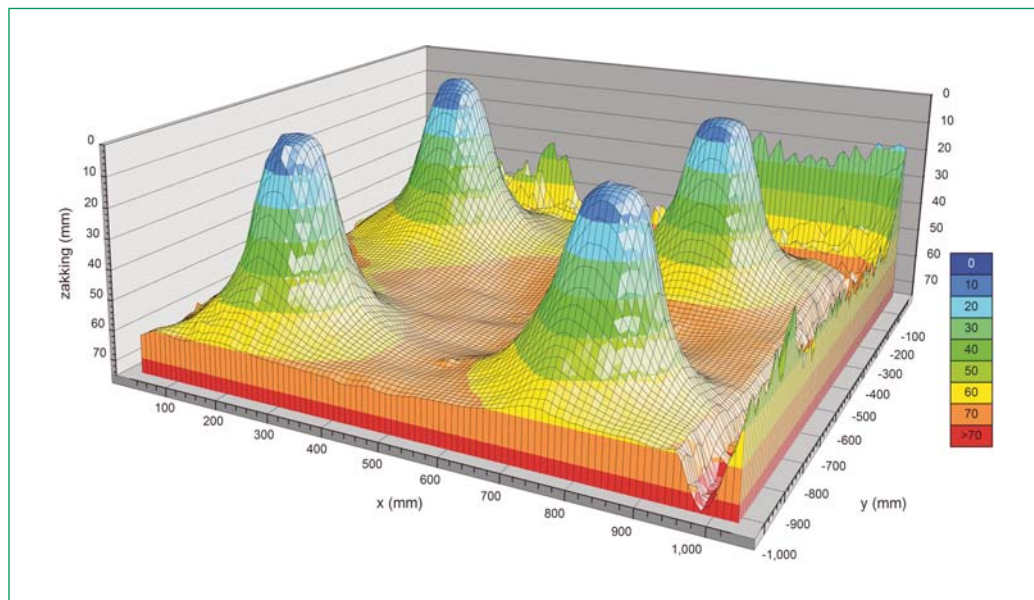
Meting van de vervorming

Behalve drukken en de krachtsverdeling werden op een beperkt aantal locaties ook de verticale vervormingen van de GR tijdens de proef gemeten. Bij één proef was het mogelijk om de vervorming te meten over het gehele oppervlak van de GR. Dat was bij een proef waar een aardebaan van zand werd gecombineerd met een (TenCate) geotextiel. Hiervoor werd na afloop van de proef het kraantje van het schuimrubber kussen gesloten en de aardebaan en de GR voorzichtig verwijderd. De vervormingen van het zandlaagje bleven daarbij bewaard. Het oppervlak van het vervormde zandlaagje kon worden gescand met een laser hoogtemeter. Het resultaat van deze scan is te zien in *figuur 2*.

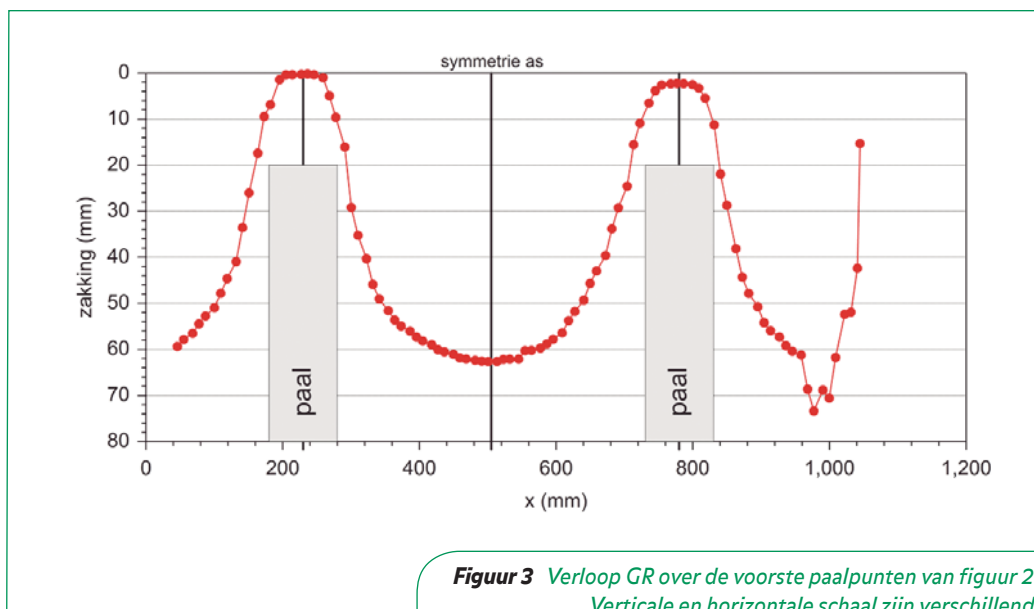
De figuur toont waar de 4 palen hebben gezeten; daar is de GR nauwelijks gezakt. Tussen de palen is het veel gezakt. Opmerkelijk is dat de meeste vervorming direct rondom de palen zit. Tussen de palen is de GR wel gezakt, maar toch nog steeds ongeveer vlak.

Belastingsverdeling bepalen uit gemeten vervormingen

Uit de rekmetingen is gebleken dat de rekken in de GR met name optreden in de GR strip die over twee naast elkaar staande palen gaat (zie *figuur 5* tot en met *figuur 7*). Hier gingen de bestaande rekenmethoden al vanuit: de benodigde sterkte wordt specifiek voor deze strips bepaald. Binnen ieder rekenmodel wordt een aanname gedaan hoe die wordt belast en daarmee dus ook hoe de vervormde strip eruit ziet.



Figuur 2 Vervormingen gemeten aan de GR na een paalmatrasproef. Duidelijk is de positie van de palen te zien. Vertrokken schaal, de vervorming is vertikaal ongeveer 5 keer groter weergegeven dan de horizontale afmetingen, afgezien van het perspectief.



Figuur 3 Verloop GR over de voorste paalpunten van *figuur 2*. Verticale en horizontale schaal zijn verschillend.

Uit de metingen is af te leiden dat de GR strip over de twee voorste modelpalen (*figuur 2*) de vorm heeft zoals getoond in *figuur 3*. De bovenkant van de palen is 20 mm onder de GR getekend omdat er ongeveer 20 mm zand tussen de palen en de GR is aangebracht.

Voor een dergelijke strip zonder ondersteuning van de onderkant geldt de kabelvergelijking (Bouma, 1989):

$$\frac{d^2z}{(dx)^2} = \frac{-q(x)}{T_H} \quad (1)$$

Met x de coördinaat in horizontale richting (m), z de coördinaat in verticale richting (m), q de verticale belasting op de GR strip (kPa) en T_H de horizontale component van de trekkracht in de GR per meter GR (kN/m). Uit deze formule blijkt dat het verloop van de verticale belasting $q(x)$ op de GR te bepalen is door de tweede afgeleide van de vervorming $z(x)$ te nemen. Hiervoor is het nodig dat de vorm van de vervormde GR strip over de palen en de horizontale component van de trekkracht T_H in de GR bekend zijn. Het bepalen van het verloop van de verticale belasting is van belang omdat niet alleen de grootte van die kracht, maar ook de verdeling van die kracht over de GR strip grote invloed heeft op de trekkrachten in de GR. De Britse Standaard BS8006 gaat er vanuit dat de kracht gelijkmatig is verdeeld over de GR (figuur 5). De EBGEO en de CUR nemen aan dat de grootste belasting in het midden zit en dat die naar de palen toe gelijkmatig minder wordt (dus een driehoekige belasting, zie figuur 6).

Nu is het weer niet zo eenvoudig om de 2e afgeleide te bepalen van de gemeten vervormingen, omdat kleine meeton nauwkeurigheden dan dominant worden. Er is wel een andere benadering mogelijk. Als de BS8006 gelijk heeft en de belasting op de GR tussen de palen uniform is over de GR, dan volgt direct uit vergelijking (1) dat de metingen van de vervormde GR tussen de palen op een zuivere parabool liggen die een minimum heeft midden tussen de palen. Als we het meetpunt midden tussen de palen als oorsprong nemen (dus we stellen dat daar $x=0$ en $z=0$) dan moet de functie door de meetpunten een vorm hebben als de machtsfunctie:

$$z = a \cdot x^2 \quad (2)$$

Voor een driehoekige belasting is af te leiden dat de vervormde GR strip een functie volgt van een derde orde polynoom ($z = cx^3 + dx^2$). Uit curve fitten blijkt dat dit is te benaderen door een functie als gegeven in vergelijking (2) maar dan niet de macht 2 maar een macht van ongeveer 1.67. De gemeten vorm van het vervormde GR is gegeven in figuur 4. Het stuk links van het midden is in dit plaatje gespiegeld, zodat voor beide metingen het midden tussen twee palen links ligt en er rechts een paal ligt, zoals aangegeven.

Het blijkt dat de kromme niet helemaal symmetrisch is, wat ook leidt tot een andere macht. Maar wel is duidelijk dat de macht die wordt gevonden groter is dan 2. Er is dus geen uniforme verdeling van de kracht door de grond uitgeoefend op de GR, zoals is voorgesteld in BS8006, ook zeker geen driehoekige verdeling zoals is wordt aangenomen in de rekenregels van EBGEO en CUR 226. Volgens

vergelijking (1) is de vorm van de belasting op de strip gelijk aan de 2e afgeleide van z en dus moet de vorm van de belasting een functie zijn met x tot de macht 0.8 volgens de kromme gemeten rechts van het midden en met x tot de macht 1.7 voor de kromme links van het midden. De belasting is dus juist klein in het midden tussen de palen en neemt toe dicht bij de palen, juist tegenovergesteld van wat is voorgesteld in EBGEO en de CUR rekenregels. Gezien de onzekerheden lijkt het redelijk om een lineaire toename te veronderstellen, dus q is een functie met x tot de macht 1. Uit vergelijking (1) is dan te bepalen dat de vervorming dan te schrijven is als vergelijking (2) maar dan met x^3 in plaats van x^2 . Dus:

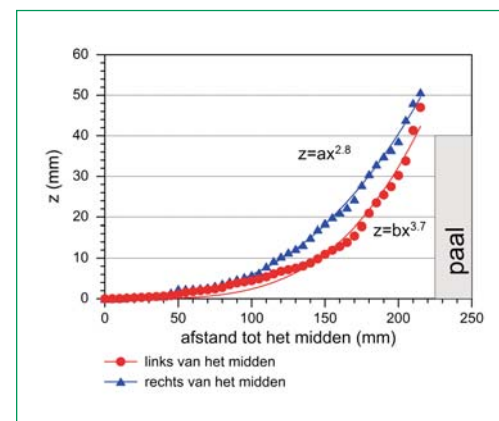
$$q = e \cdot x \quad \text{en} \quad z = f \cdot x^3 \quad (3)$$

De krachtsverdeling is dan dus niet zoals getekend in figuur 6, maar volgens figuur 7.

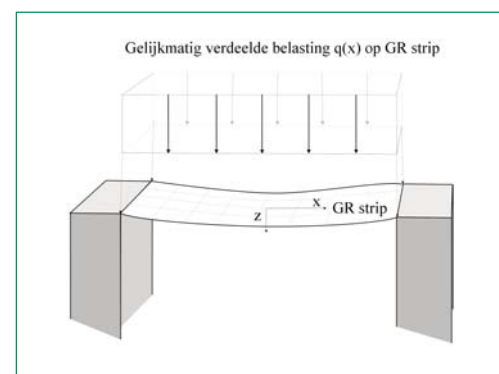
De verticale vervorming van het GR gedurende de proeven, die continu zijn gemeten, bevestigen deze conclusies. Bovenstaande alinea's hebben consequenties voor de praktijk. De gemeten krachtsverdeling geeft bij dezelfde totale belasting (dus de hoogte van de driehoeken is in beide gevallen even groot) 20 tot 25% lagere rekken en 30% minder doorzakking in het midden tussen de palen. Dit betekent dat EBGEO en ook CUR226 de benodigde treksterkte met ruim 20% lijkt te overschatten en dat er dus een besparing mogelijk is. Dit kan er toe leiden dat een paalmatras concurrerend wordt met andere oplossingen, waar die dat bij de tot nu toe gebruikte rekenmethodes nog niet zou zijn.

Referenties

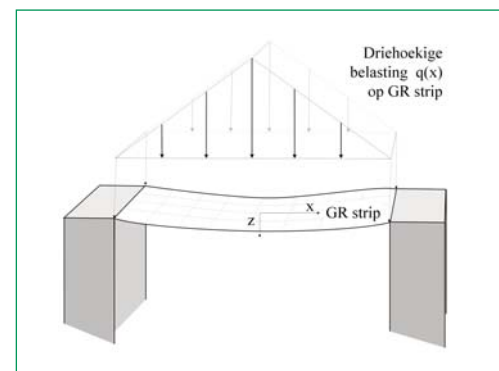
- BS8006-1:2010 *Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills*, BSI 2010, ISBN 978-0-580-53842-1.
- Bouma, A.L., 1989. *Mechanica van constructies, elasto-statica van slanke structuren*. Delftse Uitgevers Maatschappij B.V. ISBN 90 6562 11.
- CUR 226, 2010, *Ontwerprichtlijn paalmatras-systemen*. ISBN 978-90-376-0518-1.
- EBGEO (2010), *Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen* – EBGEO, 2. Auflage, Deutsche Gesellschaft für Geotechniek, Ernst & Sohn, ISBN: 978-3-433-02950-3.
- Eekelen, S.J.M. van, Jansen, H.L.; Duijnen, P.G. van; De Kant, M.; Dalen, J.H. van; Brugman, M.H.A.; Stoel, A.E.C. van der.; Peters, M.G.J.M.; (2010b), *The Dutch Design Guideline for Piled Embankments*, Proceedings van 9 ICG, Brazil, pp. 1911-1916. ●



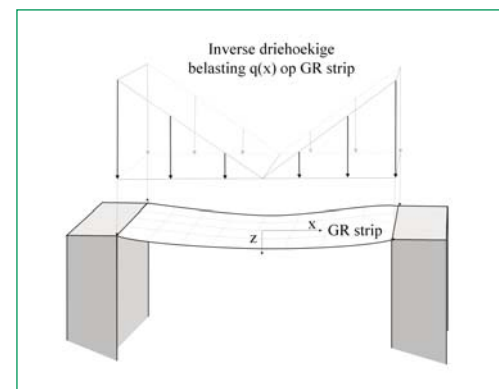
Figuur 4 Gemeten vorm van de vervormde GR links en rechts van het midden tussen de palen en fit met machtsfunctie.



Figuur 5 Krachtsverdeling volgens BS8006.



Figuur 6 Krachtsverdeling volgens EBGEO en CUR 226.



Figuur 7 Krachtsverdeling volgens de metingen.