

Paalmatrasproeven II

Belangrijkste conclusies

Ir. Suzanne van Eekelen
Deltares/TU-Delft



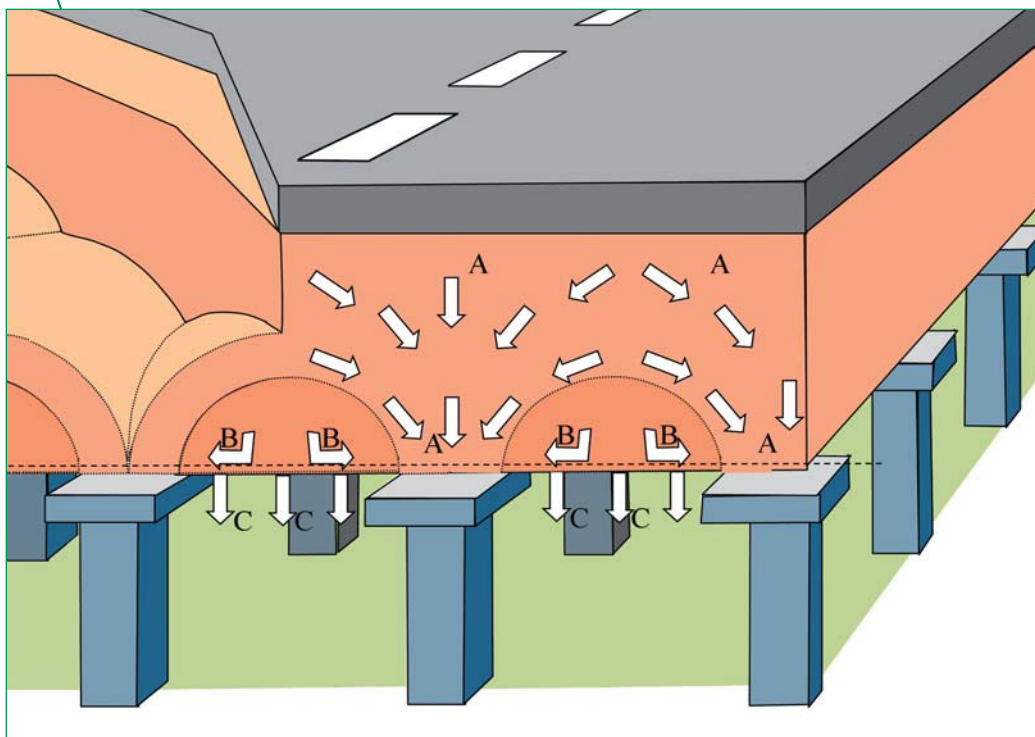
Jack van der Vegt
Deltares



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



Dr. Ir. Adam Bezuijen
Deltares



Figuur 1 - Belastingverdeling in een paalmatras.

het deel van de belasting dat door de ondergrond wordt gedragen, zie *figuur 1*.

Beschrijving experimenten

In de vorige GeoKunst (Van Eekelen et al, 2011a) werd de proefopstelling al beschreven, zie *figuur 2* en *figuur 3*. De consoliderende slappe ondergrond werd gesimuleerd met een waterdicht, met water verzadigd schuimrubberen kussen. Dit kussen had een kraantje waardoor het water gecontroleerd uit het kussen kon lopen. Het toepassen van dit kussen maakte het mogelijk om de ondersteuning van de ondergrond te meten en te controleren.

De proeven werden uitgevoerd door in stappen de druk boven de aardebaan te verhogen en met het schuimrubberen kussen consolidatie te simuleren. Na iedere verhoging van de bovenbelasting volgen meerdere consolidatiestappen. 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.

Metingen

De belangrijkste metingen staan aangegeven in *figuur 3*. Bovenop de palen zitten boven en onder de GR drukopnemers. De drukopnemers onder de GR meten de A+B, de opnemers bovenop de GR meten de A alleen. Het verschil geeft dus belastingsdeel B, dat via de GR naar de palen gaat. Tenslotte wordt de druk in het schuimrubberen kussen gemeten, wat belastingsdeel C oplevert.



Figuur 2 - Testopstelling.

Inleiding

Vorig jaar verscheen de ontwerprichtlijn CUR226 voor paalmatrasen. Vraag is of we deze CUR226 misschien kunnen aanscherpen, zodat we goedkoper kunnen bouwen zonder de betrouwbaarheid te verminderen.

In de vorige GeoKunst introduceerden we een proefenserie die Deltares heeft uitgevoerd in samenwerking met Huesker, Naue, TenCate en Tensor. Dat eerste artikel behandelde de gemeten vervorming van de GR en daaruit leidden we de belastingsverdeling op de GR af. Dit artikel gaat verder in op de proeven. We beschrijven de proeven en de meetmethoden. Voor een representatieve proef vergelijken we de metingen met de berekeningen volgens de CUR226 richtlijn en met een gemodificeerde versie daarvan.

Belastingverdeling in een paalmatras

De belastingsverdeling in een paalmatras wordt als volgt gedefinieerd:

Belastingsdeel A is de belasting die rechtstreeks naar de palen gaat, deel B is het deel van de belasting dat via het GR naar de palen gaat, en deel C is

Samenvatting

In een paalmatras wordt de verticale belasting verdeeld over de palen, de geokunststof wapening (GR, dat staat voor geosynthetic reinforcement) en eventueel de slappe ondergrond tussen de palen. In de paalmatras-proeven van Deltares zijn deze belastingsdelen voor het eerst volledig gescheiden gemeten. Daardoor is het mogelijk om de boogwerking nauwkeuriger te

bestuderen. In de vorige GeoKunst gingen we in op één onderdeel van de proeven. In dit artikel gaan we verder in op de uitvoering van de proeven. De rekken van de geokunststof werden bijvoorbeeld gemeten met een nieuw systeem, namelijk met fiets-versnellingskabels. We presenteren verder de gevolgen van consolidatie van de ondergrond en het last-rekgedrag van de GR.

Al deze metingen worden dubbel uitgevoerd zodat er voor iedere meting een controlewaarde beschikbaar is.

In de literatuur zijn verschillende artikelen te vinden over paalmatras-proeven met een geokunststof wapening bijvoorbeeld bijv. Chen et al., (2008 and 2010), Zaeske (2001) and Heitz (2006). Bij geen van deze proeven was men echter in staat de ondergrondondersteuning C apart te meten. Dat was in deze proeven wel mogelijk, en dat levert nieuwe mogelijkheden op voor interpretatie van de resultaten.

De zettingen van het GR zijn op enkele plekken gemeten met een liquid levelling system (dat wil zeggen: waterspanningsopnemers in een slang die is gevuld met vloeistof, de slang komt uit in een bakje met vloeistof). Bij 1 proef was het ook mogelijk om het gehele gedeformeerde GR oppervlak achteraf in te scannen. Daarover schreven we in de vorige publicatie (Van Eekelen et al., 2011). Daarnaast werd de bovenbelasting gemeten door de druk in het waterkussen te meten.

Nieuw systeem voor het meten van rekken van geokunststof

Rekken van geokunststoffen meten is erg moeilijk. De bevestiging van rekstrookjes op geokunststof is moeilijk of onmogelijk en het rekstrookje of de lijm kan het gedrag van de geokunststof beïnvloeden.

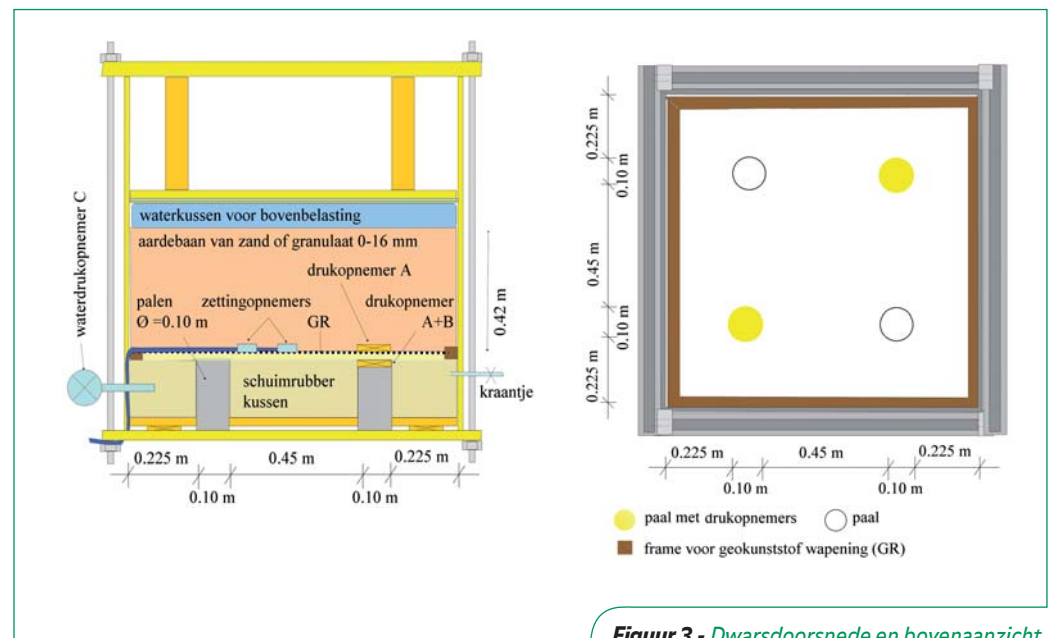
Daarom werd een nieuw systeem ontwikkeld voor deze proeven om de rekken te meten. Hiervoor werden versnellingskabels gebruikt die eigenlijk voor fietsen zijn bedoeld. De binnenkabel en de buitenbuis werden een eindje van elkaar goed vastgemaakt aan de GR met kabelbinders (tyribs). De veranderingen in lengte tussen deze twee bevestigingspunten kan worden gemeten zoals te zien is in *figuur 4* en *figuur 5*.

De 'rekkabels' hebben rekken gemeten die kwalitatief betrouwbaar zijn, maar in de eerste proeven waren de gemeten rekken structureel te groot. Het bleek noodzakelijk om de binnenkabel voldoende voor te spannen en de versnellingskabel over de volle lengte op regelmatige afstanden vast te zetten aan de GR. De resultaten van dit systeem waren zo veelbelovend dat het systeem is opgeschaald en inmiddels in het veld is toegepast bij het aansluiting A12/N204 te Woerden.

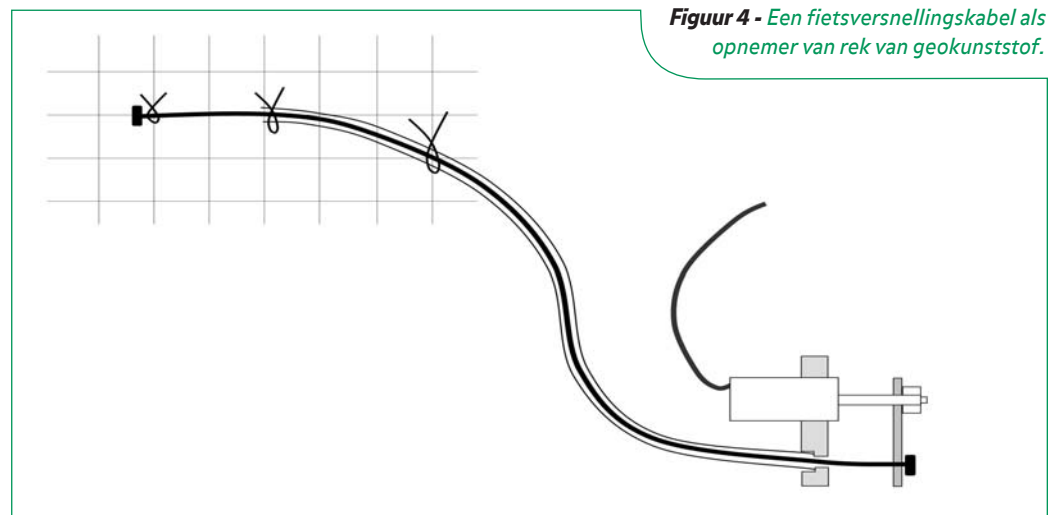
Figuur 4 laat een voorbeeld zien van de metingen met de rekkabels, bij een representatieve proef (Hueskergrid + granulaat). We zien dat de grootste (te grote) rekken worden gemeten bovenop de palen. In het veld wordt dat niet gemeten, zie bijvoorbeeld de Kyotoweg (Van Eekelen et al., 2010), de N210 (Haring et al., 2008), de spoorweg in Houten (Van Duijnen et al., 2010) en een paalmatras in Hamburg in Duitsland (Weihrauch et

al, 2010). Dit verschil tussen veld en labproeven wordt verklaard doordat de palen in de proeven klein (diameter 10 cm) en glad zijn, en in deze praktijkgevallen groot en stroef. Hier wordt de geokunststof als het ware ingeklemd bovenop het paaldeksel.

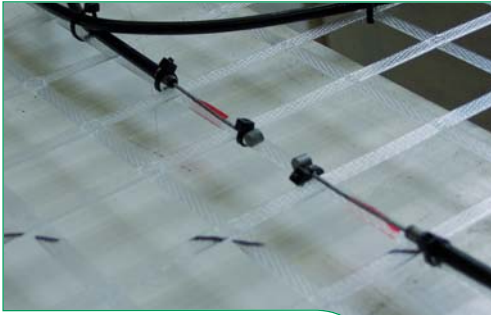
De op-een-na-grootste rekken worden gemeten in de GR strips tussen twee palen. Op andere plekken



Figuur 3 - Dwarsdoorsnede en bovenaanzicht.



Figuur 4 - Een fietsversnellingskabel als opnemer van rek van geokunststof.



Figuur 5 - Fietsversnellingskabels als opnemer van rek van geokunststof.

wordt niet of nauwelijks rek gemeten. Dit komt overeen met de aanname in CUR226 dat de rekken in de GR strip maatgevend zijn. Hoewel de prestaties van de rekkabels gedurende de proevenserie verbeterden, zijn de resultaten kwantitatief nog niet betrouwbaar. De 'gemeten' rekken in de rest van dit artikel zijn bepaald uit de zettingsmetingen van de GR, waarbij er vanuit wordt gegaan dat de GR vervormt volgens een kromme volgens de functie $y = Ax^3$ met $x=0$ midden tussen 2 palen. Eén GR was geschikt om ook rekstrookjes op te plakken. Hieruit bleek dat deze manier om de rek uit de zakkings te bepalen redelijk nauwkeurig is.

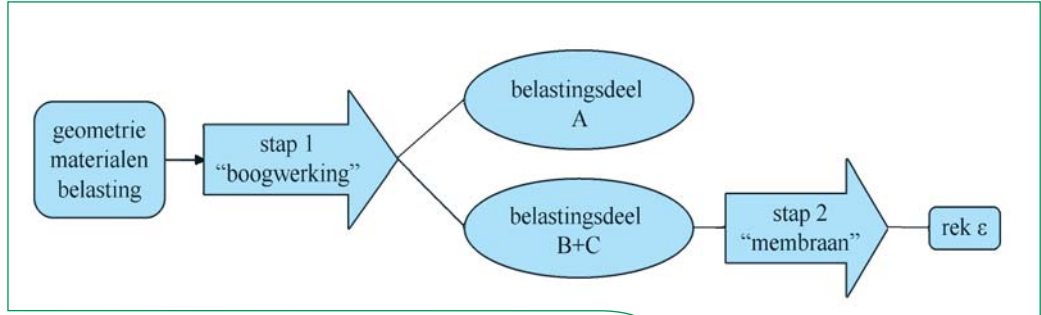
Rekenmodellen

We vergelijken de metingen met berekeningen met de CUR226 ontwerprichtlijn voor paalmatrasen. CUR226 heeft, net als de Duitse EBGEO, de rekenregels overgenomen uit Zaeske (2001). We rekenen zonder partiële factoren, en zonder spreidkrachten, want die treden niet op in de testbox. De berekeningen van CUR226 bestaan uit twee stappen (zie figuur 6):

1. Stap 1: belastingsverdeling in de aardebaan. Door boogwerking gaat een relatief groot deel van de belasting direct naar de palen (belastingsdeel A). De 'rest', dus belasting deel B+C, werkt op de GR plus de onderliggende slappe ondergrond.

2. Stap 2: Het last-zakkingsgedrag van de GR. Hierbij wordt met belastingdeel B+C, de GR stijfheid en de beddingsconstante k_s de gemiddelde rek in het GR uitgerekend. Stap 2 beschouwt alleen de GR strips tussen twee naast elkaar liggende palen. We rekenen met twee varianten voor stap 2: CUR226 en een aangepaste versie daarvan, die noemen we hier 'Modified Step 2':

- In CUR 226 is de vorm van de belasting op een GR strip driehoekig. Het artikel in de vorige GeoKunst (Van Eekelen et al., 2011) liet echter zien dat een inverse-driehoekige belasting beter is (zie figuur 7). Die gebruiken we in Modified Step 2.



Figuur 6 - Het rekenmodel van Zaeske (2001), dat is overgenomen in CUR226 bestaat uit twee rekenstappen: stap 1 en stap 2.

- In CUR226 wordt het GR alleen ondersteund door de ondergrond die letterlijk onder de GR strip ligt. In Modified Step 2 rekenen we met het volledige oppervlak van de ondergrond, zoals eerder beschreven door Lodder (2010). Hiervoor wordt een rekenwaarde voor de beddingsconstante K ingevoerd, die voor Modified Step 2 groter is dan voor CUR226.

$$K_{CUR226} = k_s$$

$$K_{ModifiedStep2} = \frac{A_{L,x,y}}{A_{strip,x,y}} \cdot k_s \quad (1)$$

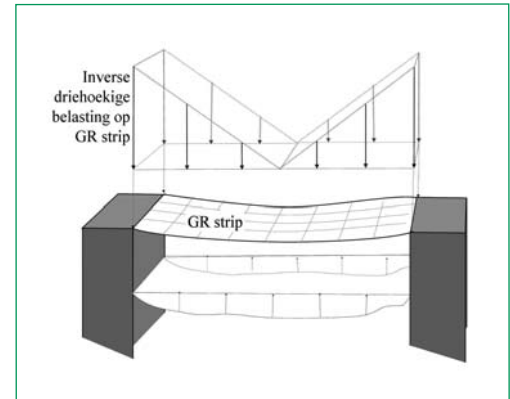
Hierin is $A_{L,x,y}$ het oppervlak van de ondergrond dat bij de GR strip hoort, zie figuur 6.

Vergelijken meet- en rekenresultaten van stap 1: de boogwerking

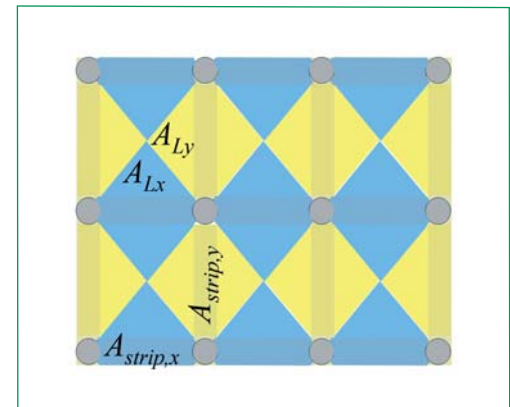
Figuur 9 vergelijkt de metingen en de berekeningen voor de representatieve proef. Op de horizontale as staat de gemeten netto belasting op de aardebaan. Dat is de bovenbelasting min de ondergrondondersteuning min de wrijving tussen aardebaan en boxwanden. Opvallend is dat we vloeiende curven vinden. Kennelijk bestaat er een verband tussen de netto belasting op de aardebaan en waarden zoals A . Dat is op zich al een belangrijke conclusie.

We zien nog iets opvallends in de figuren. We zien dat gedurende de consolidatiestappen de A toeneemt, als je die uitdrukt in percentage van de totaal gemeten belasting ($A\%$). Hieruit concluderen we dat er ondergrondvervorming nodig is om de boogwerking ($A\%$) te laten ontwikkelen. En dat de boogwerking verder toeneemt bij verdere ondergrondconsolidatie. Deze observatie is niet in overeenstemming met het CUR-model. Die gaat er namelijk vanuit dat de ondergrond helemaal geen invloed heeft op A of $A\%$. In vervolgonderzoek zal vastgesteld moeten worden door welk mechanisme dit verschil tussen metingen en berekeningen wordt veroorzaakt.

Omdat het CUR model A niet laat toenemen



Figuur 7 - Eerste aanpassing die wordt voorgesteld voor stap 2: aangepaste vorm van de belasting op GR strip. In het oorspronkelijke model had de belasting de vorm van een driehoek.

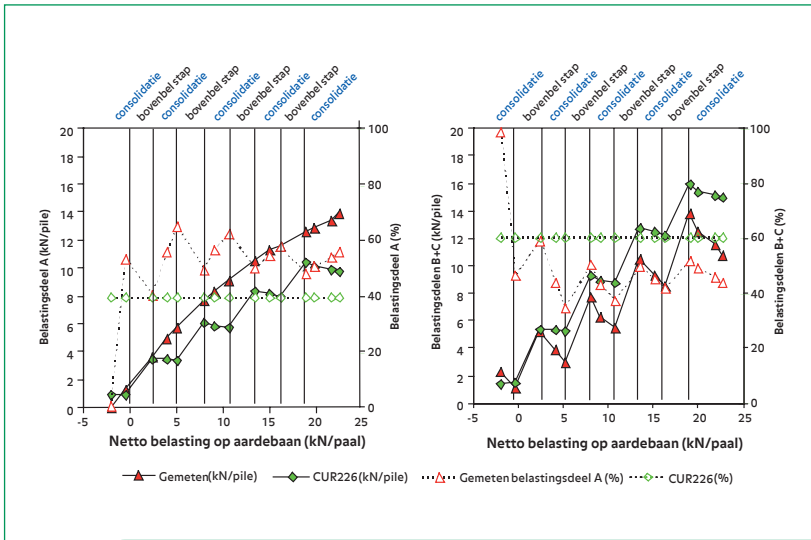


Figuur 8 - Tweede aanpassing die wordt voorgesteld voor stap 2: Modified subsoil

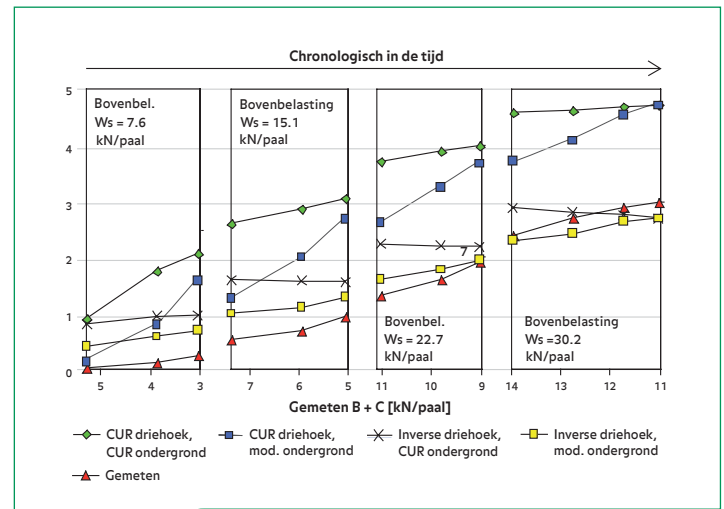
gedurende de consolidatiefasen, berekenen we een lagere A dan in de metingen. En een hogere B+C. Dit leidt tot ontwerpen aan de 'veilige' kant (we ontwerpen een sterker GR dan nodig).

Vergelijking meet- en rekenresultaten van stap 2: last-zakkingsgedrag van de GR

Figuur 10 en figuur 11 vergelijken de metingen en de berekeningen voor de 2e stap van dezelfde representatieve proef. In figuur 10 is de horizontale as van links naar rechts chronologisch in de

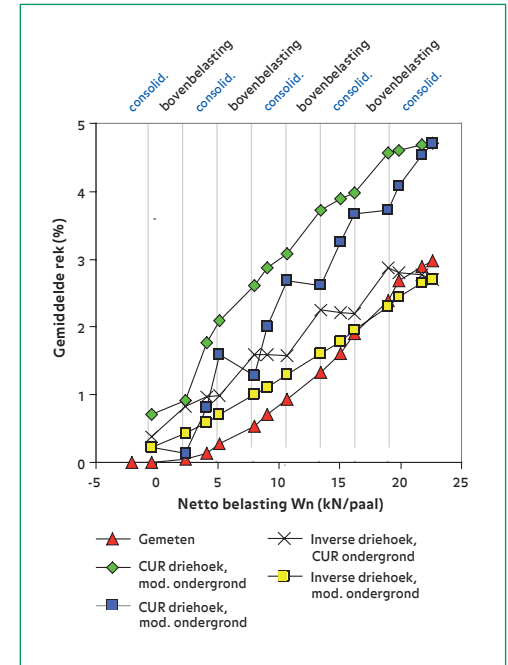


Figuur 9 - Vergelijkingen metingen en berekeningen voor rekenstap 1 (belasting wordt verdeeld in belastingdeel A (links) en belastingdeel B+C (rechts)).



Figuur 10 - Vergelijkingen metingen en berekeningen voor rekenstap 2 (berekening van de rekken uit belastingdeel B+C). De figuur is van links naar rechts chronologisch in tijd.

Input parameters voor de berekeningen		
Dikte aardebaan	m	0.42
Diameter paal (paaldeksels zijn niet toegepast)	m	0.10
Hart-op-hart afstand palen	m	0.55
Interne wrijvingshoek granulaat (bepaald met triaxiaalproeven op grote diameter monsters (zie Den Boogert, 2011))	°	49.00
Bovenbelasting (= opgelegde bovenbelasting – gemeten wrijving in de proefbox)	kN/paal	0.37, 6.82, 6.71, 6.65, 13.34, 12.60, 12.45, 18.97, 18.51, 18.09, 24.34, 23.40, 22.92, 22.67
Beddingsconstante	kN/m ³	548, 2923, 881, 330, 1194, 583, 233, 733, 383, 175, 512, 294, 85, 2
Gemiddelde stijfheid geokunststof	kN/m	2269, in de laatste 4 stappen: 2263, 2259, 2256, 2255
Gemeten B+C (voor berekeningen stap 2)	kN/paal	1.14, 5.28, 3.88, 3.06, 7.79, 6.35, 5.48, 10.51, 9.30, 8.53, 13.77, 12.57, 11.55, 10.84



Figuur 11 - Vergelijkingen metingen en berekeningen voor rekenstap 2 (berekening van de rekken uit belastingdeel B+C), maar nu op de horizontale as de netto belasting op de aardebaan (top load – ondergrond ondersteuning – wrijving testbox).

tijd. Tijdens iedere bovenbelasting worden meerdere consolidatiestappen uitgevoerd, waardoor de gemeten B+C (op de horizontale as) afneemt bij iedere constante bovenbelasting. In figuur 9 staat dezelfde gemeten netto belasting op de horizontale as als in figuur 11.

We zien dat het oorspronkelijke CUR model (driehoek + CUR ondergrond) de rekken flink overschat. Dit leidt dus ook weer tot overdimensionering bij het ontwerpen. De figuur laat zien dat de beide modificaties een flinke verbetering opleveren. De combinatie van beide modificaties levert de beste overeenstemming op met de metingen (er wordt meer dan 40% minder rek berekend). Bijvoorbeeld in het geval dat alleen modified ondergrond wordt toegepast, vinden we een grote overschatting van de reactie op consolidatie.

Conclusies

Een nieuw systeem is ontwikkeld voor het meten van rekken van geokunststoffen. Hiervoor zijn fiets-versnellingskabels gebruikt. De resultaten werden gedurende de proevenserie steeds beter. Berekeningen met CUR226 bestaan uit twee stappen. Stap 1 is de belastingverdeling (boogwerking), stap 2 is het last-zakingsgedrag van de GR. Beide stappen leiden tot een overschatting van wat er met de GR gebeurt. Dus CUR226 leidt tot een ontwerp aan de ‘veilige’ kant. Gedurende stap 1 wordt een nauw verband gevonden tussen de netto belasting op de aardebaan en de belastingverdeling. Ondergrondvervorming (consolidatie) blijkt essentieel in de ontwikkeling van boogwerking. Dit zit nog niet in de rekenmodellen van CUR226 en zal later nader worden beschouwd.

Gedurende stap 2 berekent CUR226 een ongeveer 2 keer zo grote rek dan er wordt gemeten. Er worden twee aanpassingen voor rekenmodel voorgesteld, beide laten een betere overeenstemming zien met de metingen, de combinatie van beide verbeteringen leidt tot het beste resultaat. Doorvoeren van deze aanpassingen in de CUR226 kan op termijn leiden tot goedkopere paalmatrassen.

Referenties

- Den Boogert, T.J.M., 2011. *Piled Embankments with Geosynthetic Reinforcement, Numerical Analysis of Scale Model Tests*, afstudeerrapport, Delft University of Technology.
- Chen, R.P., Chen, Y.M., Han, J., Xu, Z.Z., 2008b. *A theoretical solution for pile-supported embankments on soft soils under one-dimensional compression*, Can. Geotech. J. 45; 611-623.
- Chen, R.P., Xu, Z.Z., Chen, Y.M., Ling, D.S., Zhu, B., 2010. *Field Tests on Pile-Supported Embankments over Soft Ground*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Volume 136, Number 6, June 2010, pp. 777-785
- 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, German Geotechnical Society, Ernst & Sohn, ISBN: 978-3-433-02950-3
- Van Duijnen, P., Van Eekelen, S.J.M., 2010. *Holland's first railway on a piled embankment, design against monitoring*, proceedings van 9ICG, Brazil, 2010, 1461-1464.
- Van Eekelen, S., Bezuijen, A. and Alexiew, D., 2010. *The Kyoto Road, monitoring a piled embankment, comparing 31/2 years of measurements with design calculations*, proceedings van 9ICG, Brazil, 2010, 1941-1944.
- Van Eekelen, S.J.M., Lodder, H.J., Bezuijen, A., 2011, *Paalmatrasproeven I, vervormingen van geokunststoffen in een paalmatras en de daaruit volgende belastingsverdeling*, GeoKunst 42, Juli 2011, 42-44.
- Van Eekelen, S.J.M. en Bezuijen, A., 2011, *Paalmatrasproeven IIa, Eén laag biaxiaal of twee lagen uniaxiale wapening in een paalmatras*, GeoKunst 43, juli 2011.
- Haring, W., Profittlich, M. & Hangen, H., 2008. *Reconstruction of the national road N210 Bergambacht to Krimpen a.d. IJssel, NL: design approach, construction experiences and measurement results*, 4th European Geosynthetics Conference, September 2008, Edinburgh, UK.
- Heitz, C., 2006. *Bodengewölbe unter ruhender und nichtruhender Belastung bei Berücksichtigung von Bewehrungseinlagen aus Geogittern*. Schriftenreihe Geotechnik, Uni Kassel, Heft 19, November 2006.
- Lodder, H.J., 2010. *Piled and reinforced embankments, Comparing scale model tests and theory*, Master of Science thesis, Technische Universiteit Delft.
- Weihrauch, S., Oehrlein, S. & Vollmert, L., 2010. *Baugrundverbesserungsmaßnahmen in der HafenCity Hamburg am Beispiel des Stellvertreterobjektes Hongkongstraße*. Tagungsband zur 31. Baugrundtagung der DGGT, 03 – 06 November 2010, München, ISBN 978-3-9813953-0-3, pp. 147-153.
- Zaeske, D., 2001. *Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen*. Schriftenreihe Geotechnik, Uni Kassel, Heft 10, February 2001. ●

CUR aanbeveling VC 92: Uitvoeringsrichtlijn geokunststoffen in de waterbouw

Ir. Wim Voskamp



In 2009 is door een CUR werkgroep een herziening gemaakt van het CUR rapport 174, Geokunststoffen in de waterbouw. Op de CUR-website (www.cur.nl/upload/documents/CUR%20174.pdf) is dit rapport gratis te downloaden.

In de praktijk is gebleken dat bij de uitvoering van projecten waarbij geokunststoffen gebruikt werden in de waterbouw, behoefte was aan een uitvoeringsrichtlijn. In 2010 heeft een commissie zich bezig gehouden met het samenstellen van deze aanbeveling. Binnenkort zal het als een CUR uitgave gepubliceerd worden.

De richtlijn is o.m. gebaseerd op het CUR 174 rapport. In de richtlijn wordt een overzicht gegeven van:

- Materiaaleigenschappen en de functies van geokunststoffen
- Kwaliteitscontroles, procedures en verantwoordelijkheden
- Instructies over het prefabriceren, voorbereiden en verwerken op de bouwplaats, installatie/plaatsing van geokunststoffen.

Het toepassingsgebied is geokunststoffen in

waterbouwkundige constructies, o.m. in zee-, rivier- en meerdijken, vooroeverbestortingen en geosystemen. De gebruikers zullen met name de mensen op de bouwplaats zijn, die met de kwaliteitscontrole en de uitvoering belast zijn. Daarnaast is de richtlijn van belang voor bestekschrijvers en opstellers van contracteisen en vraagspecificaties. De aanbeveling zal in het eerste kwartaal van 2011 gepubliceerd worden.

PIANC report, *The Application of Geosynthetics in Waterfront Areas*

In 2009 en 2010 heeft een werkgroep MarCom 56 van de internationale organisatie PIANC (Permanent International Association of Navigation Congresses) een rapport opgesteld over de toepassing van Geokunststoffen in de Kustwaterbouw. Nederland heeft de leiding van deze werkgroep gehad met Bram Steijn als lid, Ed Berendsen als secretaris en Wim Voskamp als voorzitter. Verder waren er leden uit Denemarken, UK, USA, Frankrijk en Duitsland.

Deze werkgroep heeft in een 126 pagina's dik rapport een overzicht gegeven van alle toepassingsmogelijkheden van geokunststoffen in de

kustwaterbouw (Golfbrekers en kunstmatige riffen, (voor)oeverbescherming, dijken, strand en duinen, kribben, opsluitbermen en harde strandconstructies, kademuren, afdekking van pijplijnen en zeekabels, palen en platformen, ontzandingpreventie en erosiebescherming). Voor deze toepassingsgebieden is aangegeven welke functie het geokunststof vervult, welke eigenschappen vereist zijn, met welke kritische ontwerpfactoren rekening gehouden moet worden. De hydrostatische, mechanische en andere belastingen zijn per toepassingsgebied genoemd. Ook is in het eerste deel van het rapport een uitgebreide introductie in de functie, vorm en eigenschappen van geokunststoffen gegeven.

Het rapport wordt afgesloten met een hoofdstuk over de uitvoeringsaspecten. Alle toepassingen, de uitvoeringsaspecten en veel andere informatie zijn met tekeningen en foto's geïllustreerd.

Dit rapport is in 2011 door PIANC digitaal gepubliceerd*. Voor Nederlanders die met kustwaterbouw in te maken hebben is het een interessant state-of-the-art report.

*www.pianc.org/technicalreportsbrowse.asp ●