

Paalmatrasproeven II

Eindige elementenberekeningen

Ir. Theresa den Boogert
TU Delft (nu Mobilis)



Ing. Piet van Duijnen
Movares (nu Mobilis)



Ir. Marco Peters
Grontmij



Ir. Suzanne van Eekelen
Deltares/TU-Delft



Inleiding

Vorig jaar verscheen de ontwerprichtlijn CUR226 voor paalmatrasen. Vraag is of we deze CUR226 misschien kunnen aanscherpen, zodat we economischer kunnen bouwen.

In twee vorige GeoKunsten (Van Eekelen et al., 2011a en Van Eekelen et al., 2011b), introduceerden we een paalmatras-proevenserie. In de volgende paragraaf worden de belangrijkste conclusies nog eens kort op een rijtje gezet. In dit artikel zullen we bekijken of deze conclusies worden bevestigd door eindige elementen berekeningen. Hiervoor voerde Theresa den Boogert (2011) in het kader van haar TU-afstuderen een aantal eindige elementensimulaties uit van de proeven met Plaxis 3D Tunnel. Daarnaast wordt er ook gekeken of vergelijkbare conclusies worden gevonden met 'normale' 3D-paalmatras eindige elementen berekeningen.

Belastingverdeling in een paalmatras

De belastingverdeling in een paalmatras wordt als volgt gedefinieerd (zie figuur 1):

Belastingdeel 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 het deel van de belasting dat door de ondergrond wordt gedragen.

Van Eekelen et al., 2011a en 2011b beschreven een serie paalmatrasproeven die zijn uitgevoerd door Deltares in samenwerking met een viertal geokunststofleveranciers: Huesker, Naue, TenCate en Tensar. De laatste van deze twee publicaties vergeleek de meetresultaten met het rekenmodel van CUR226 (ontwikkeld door Zaeske, 2001, ook overgenomen in de Duitse EBGeo, 2010). Dit rekenmodel werkt met twee rekenstappen (zie figuur 2).

In stap 1 verdeelt de boogwerking de belasting over de palen (A, zie kader) en het deel daartussen (B+C), stap 2 is het last-zakingsgedrag van de geokunststof (GR).

Gedurende stap 1 wordt een nauw verband gevonden tussen de netto belasting op de aardebaan en de belastingverdeling. De netto belasting is de bovenbelasting min de ondergrondondersteuning en de wrijving tussen aardebaan en boxwanden. Ondergrondvervorming (consolidatie) blijkt essentieel in de ontwikkeling van boogwerking. Dit zit nog niet in de rekenmodellen van CUR226

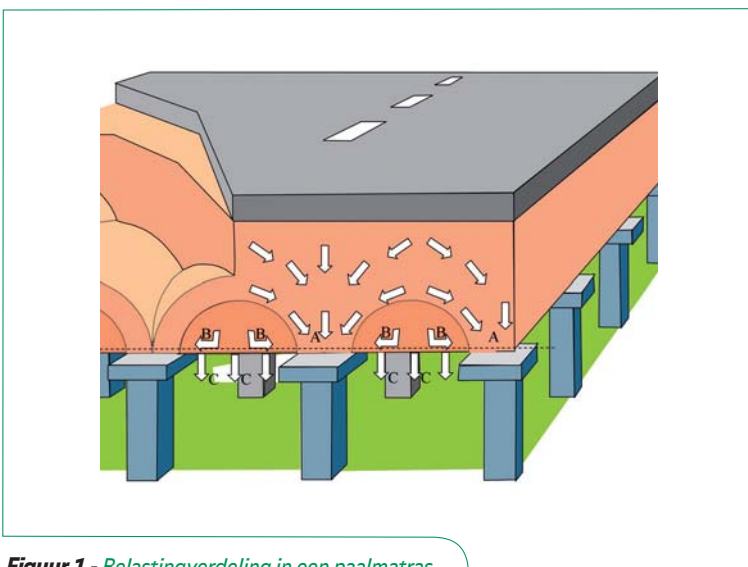
en zou beter moeten worden uitgewerkt.

Gedurende stap 2 berekent CUR226 een ongeveer 2 keer zo grote rek dan er wordt gemeten. Het vorige artikel liet zien dat twee aanpassingen voor het stap 2 - rekenmodel een betere overeenstemming geeft met de metingen, en dat de combinatie van beide verbeteringen leidt tot het beste resultaat. Deze verbeteringen zijn:

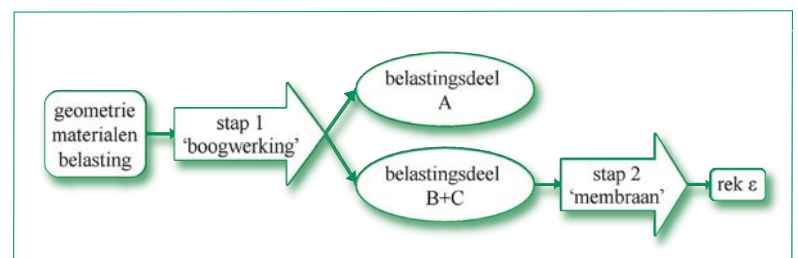
- In CUR 226 is de vorm van de belasting op een GR strip driehoekig. In de vorige twee artikelen zagen we dat een inverse-driehoekige belasting beter is, zie figuur 3.
- In CUR226 wordt het GR alleen ondersteund door de ondergrond die letterlijk onder de GR strip ligt. In het laatste artikel werd duidelijk dat rekenen met het volledige oppervlak van de ondergrond, zoals eerder beschreven door Lodder (2010) betere overeenstemming met de metingen geeft.

Doorvoeren van deze twee aanpassingen in de CUR226 zouden op termijn kunnen leiden tot economischere paalmatrasontwerpen. Dit artikel vergelijkt de volgende drie conclusies van de proeven met EEM berekeningen:

- 1 De belastingverdeling is nauw verbonden met de netto belasting op de aardebaan, waarbij netto belasting $W_N = p - C - R$ (bovenbelasting - ondergrondondersteuning - wrijving langs de testbox-wanden);
- 2 De boogwerking verbetert als gevolg van ondergrond consolidatie;
- 3 De belasting op de GR strip benadert de vorm van een inverse driehoek.



Figuur 1 - Belastingverdeling in een paalmatras.

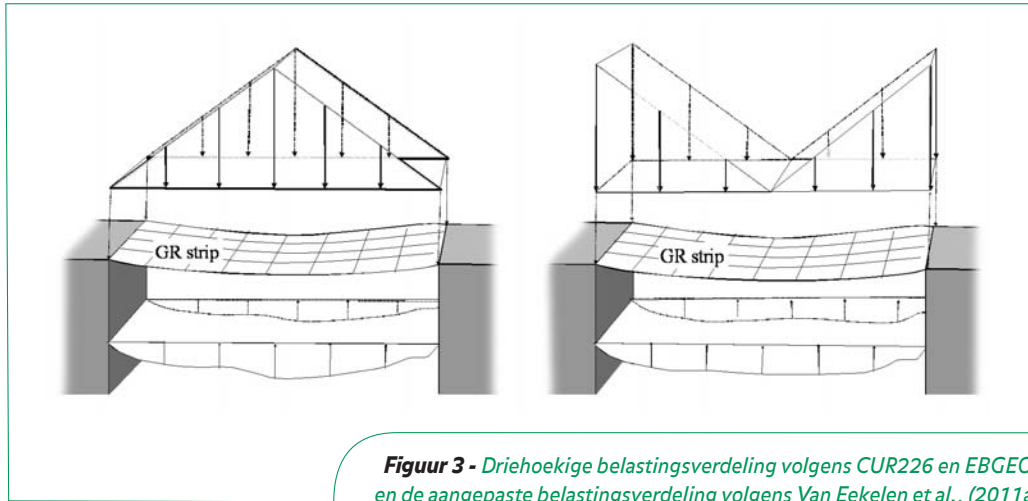


Figuur 2 - Het rekenmodel van Zaeske (2001), dat is overgenomen in CUR226 bestaat uit twee rekenstappen: stap 1 en stap 2.

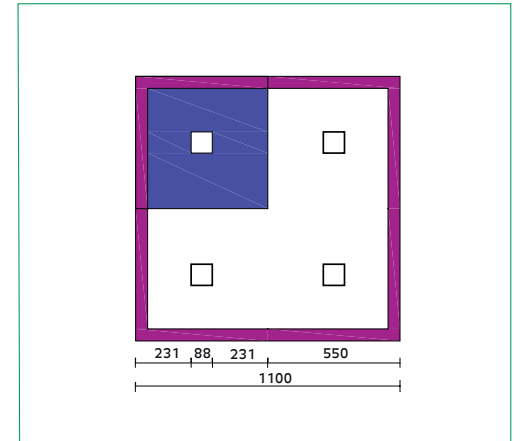
Samenvatting

In de voorgaande twee Geokunsten werden een aantal resultaten van een serie paalmatras-laboratoriumproeven beschreven. De conclusies die daar werden beschreven kunnen leiden tot goedkopere paalmatrasen. In deze derde publicatie wordt gekeken of deze conclusies worden bevestigd door eindige elementen-

berekeningen. Hiervoor worden zowel de paalmatrasproeven als een praktijkproject gesimuleerd met Plaxis 3D Tunnel. De berekeningsresultaten bevestigen de eerder getrokken conclusies.



Figuur 3 - Drie hoekige belastingsverdeling volgens CUR226 en EBGeo, en de aangepaste belastingsverdeling volgens Van Eekelen et al., (2011a)



Figuur 4 - Bovenaanzicht van de paalmatrasproef.

3D Eindige Elementen Model paalmatrasproeven

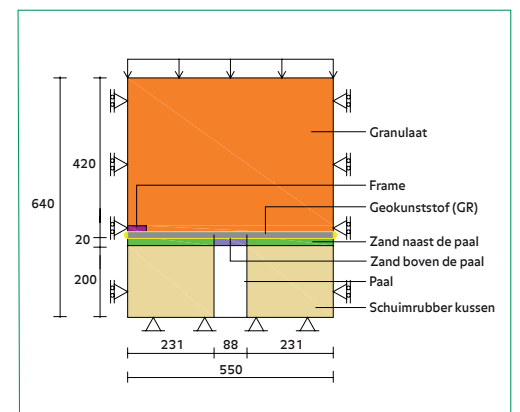
De paalmatras proeven zijn gemodelleerd in Plaxis 3D Tunnel versie 2.4. Er is voor deze versie gekozen, omdat het de functie 'updated mesh' bevat en de meeste ervaring voor paalmatrasen is opgebouwd met deze versie. De functie 'updated mesh' is nodig zodat trekspanningen zich kunnen opbouwen in het geokunststof. Dit omdat er vervormingen moeten optreden om de GR te mobiliseren. De geometrie van het EEM model is gebaseerd op de geometrie van de paalmatrasproeven die zijn beschreven in Van Eekelen et al. 2011a. Vanwege symmetrie is het mogelijk om een kwart van de proefopstelling te modelleren (zie figuur 4), namelijk één paal met omliggend kussen van schuimrubber. Dit kussen modelleert de slappe ondergrond en noemen we vanaf nu 'schuimkussen'. De dwarsdoorsnede van het eindige elementen model is in figuur 5 weergegeven. Voor het volledige 3D beeld zie figuur 6. Hieronder worden de eigenschappen van de verschillende onderdelen van het model besproken. Deze eigenschappen zijn samengevat in tabellen 1 en 2.

De geometrie van de ronde paal is omgerekend naar een vierkante paal omdat Plaxis 3D Tunnel alleen met vierkante palen kan rekenen. De eigenschappen van de paal zijn gebaseerd op de parameters van PVC. PVC is lineair elastische en niet-poreus. Naast de paal is het schuimkussen gemodelleerd. Het waterdichte en met water verzadigde schuimkussen reageert lineair elastisch in de proefopstelling. De druk in het schuimkussen

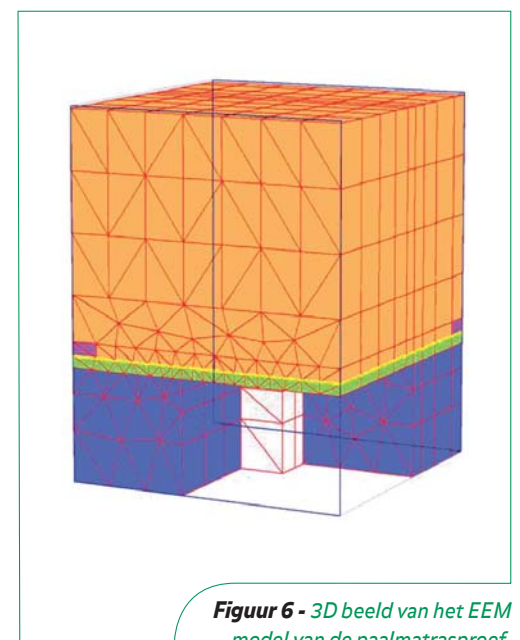
is gemeten tijdens het uitvoeren van de proeven. Dit wordt gemodelleerd door een freatisch vlak toe te wijzen aan het kussen. Hiervoor wordt de gemeten druk omgerekend naar een stijghoogte. Op de paal en het schuimkussen rust een zandlaag met daarboven het GR gespannen in een stalen frame. Het stalen frame wordt gemodelleerd vanwege eventuele invloed op de krachtenverdeling door zijn eigengewicht. De axiale stijfheid van het GR is bepaald aan de hand van vijf standaard trekproeven die zijn uitgevoerd volgens de DIN EN ISO 10319. De parameters van het stalen frame waaraan het GR is bevestigd, is gebaseerd op de eigenschappen van staal.

De zandlaag onder de GR en de aardebaan van menggranulaat zijn gemodelleerd met het Hardening Soil model. De parameters van het zand en menggranulaat zijn bepaald met triaxiaal testen. In het geval van het menggranulaat gebeurde dat op monsters met een diameter van 600 mm zoals beschreven in Den Boogert, 2011.

Tijdens de uitvoering van de proeven werd een deel van de belasting gereduceerd door wrijving. Deze wrijving tussen de wand van de opstelling en het menggranulaat bleek tussen de 10% en 20%. Normaal gesproken wordt wandwrijving gemodelleerd met een interface. In Plaxis 3D Tunnel is het echter niet mogelijk om een interface te modelleren aan de achterzijde van de opstelling. Daarom is besloten de opgelegde belasting te verminderen met de verloren wandwrijving, om de krachten in het model gelijk te houden aan de krachten



Figuur 5 - Dwarsdoorsnede van het EEM model van de paalmatrasproef.



Figuur 6 - 3D beeld van het EEM model van de paalmatrasproef.

Tabel 1 - Materiaal eigenschappen van zand en menggranulaat in de paalmatrasproef

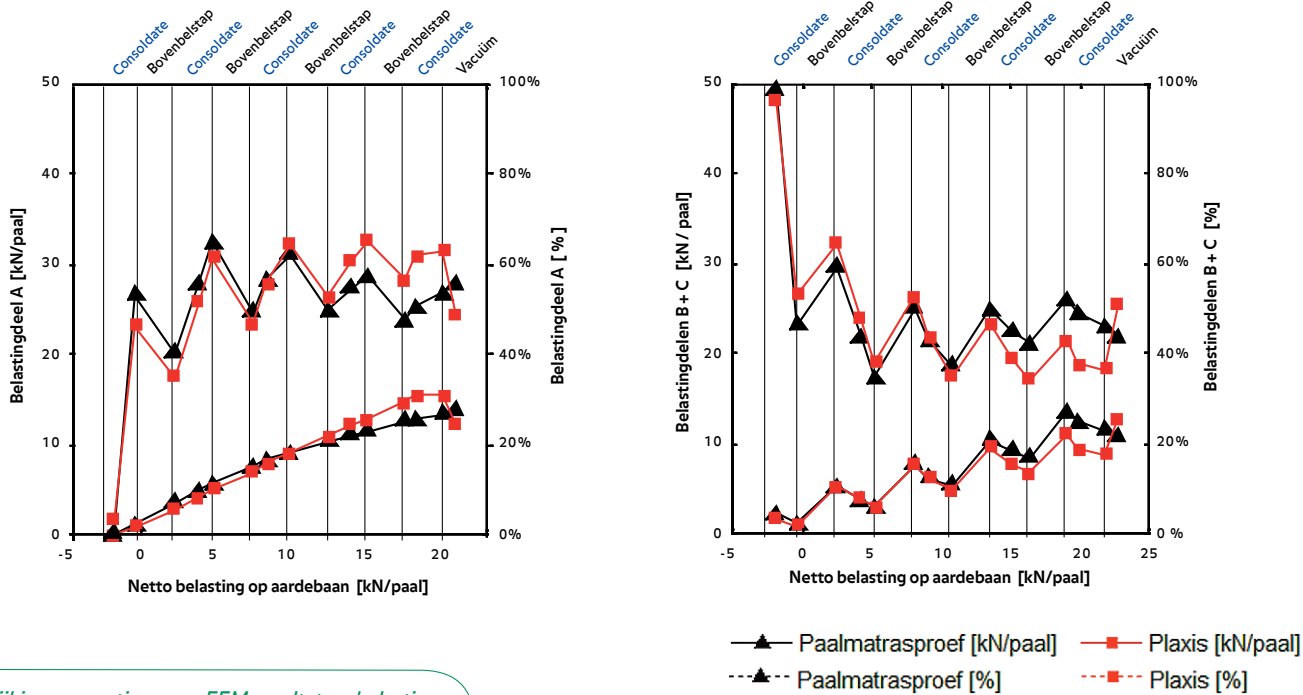
	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²]	φ [°]	ψ [°]	E_{50}^{ref} [kN/mv]	E_{50}^{ref} [kN/m ²]	m [-]	E_{50}^{ref} [kN/m ²]	ν_{ur} [-]	p^{ref} [kN/m ²]	R_f [-]
Zand boven paal	20.06	1	40.93	10.93	51.470	51.470	0.5	154.410	0.2	100	0.9
Zand naast paal	18.67	1	32.52	2.52	19.660	19.660	0.5	58.980	0.2	100	0.9
Menggranulaat	16.65	1	47	11	58.870	58.870	0.74	176.610	0.2	100	0.9

Tabel 2 - Materiaal eigenschappen van paal, schuimkussen, geokunststof en frame in de paalmatrasproef

	γ [kN/m ³]	E_{ref} [kN/m ²]	ν [-]	EA [kN/m]
Paal	13.64	2.9E6	0.0	-
Schuimkussen	10.15	10	0.2	-
Geokunststof	-	-	-	2269
Frame	70.45	2.1E8	0	-

Tabel 3 - Trekkrachten in het GR van de praktijkproef, vergelijking resultaten CUR, CUR-gemodificeerd en EEM (Plaxis)

Bedding ondergrond	k [kN/m ³]	$T_{x,max;analytisch}$ [kN/m]	Modellering bedding in EEM	$T_{x,max;EEM}$ [kN/m]	Verhouding % T_{EEM}/T_{CUR}
Geen	0	15,5	geen (luchtspleet)	14,0	0,9
$k_{S;CUR226}$	322	6,4	volledig aanwezig	2,2	0,3
$k_{S;modified}$	530	3,9	volledig aanwezig	2,2	0,5
$k_{S;modified}$	530	3,9	met luchtrand	2,5	0,7



Figuur 7 - Vergelijking van metingen en EEM resultaten, belastingdeel A (links) en belastingdeel B+C (rechts) in de paalmatrasproef

de proefopstelling. De wrijving tussen de paal en kussen wordt verwaarloosd. Dit geldt ook voor de wrijving tussen het GR en menggranulaat.

Tijdens het uitvoeren van de proeven wordt in stappen de belasting op de aardebaan verhoogd en de druk in het schuimkussen verlaagd (= consolidatie van de ondergrond). Elke stap in de proeven correspondeert met een berekeningsfase in het eindige elementen model. In iedere berekeningsfase wordt de gemeten bovenbelasting en druk in het schuimkussen ingevoerd. Met deze opgelegde waarden worden de spanningsver-

delingen in het granulaat en de vervormingen in het model berekend.

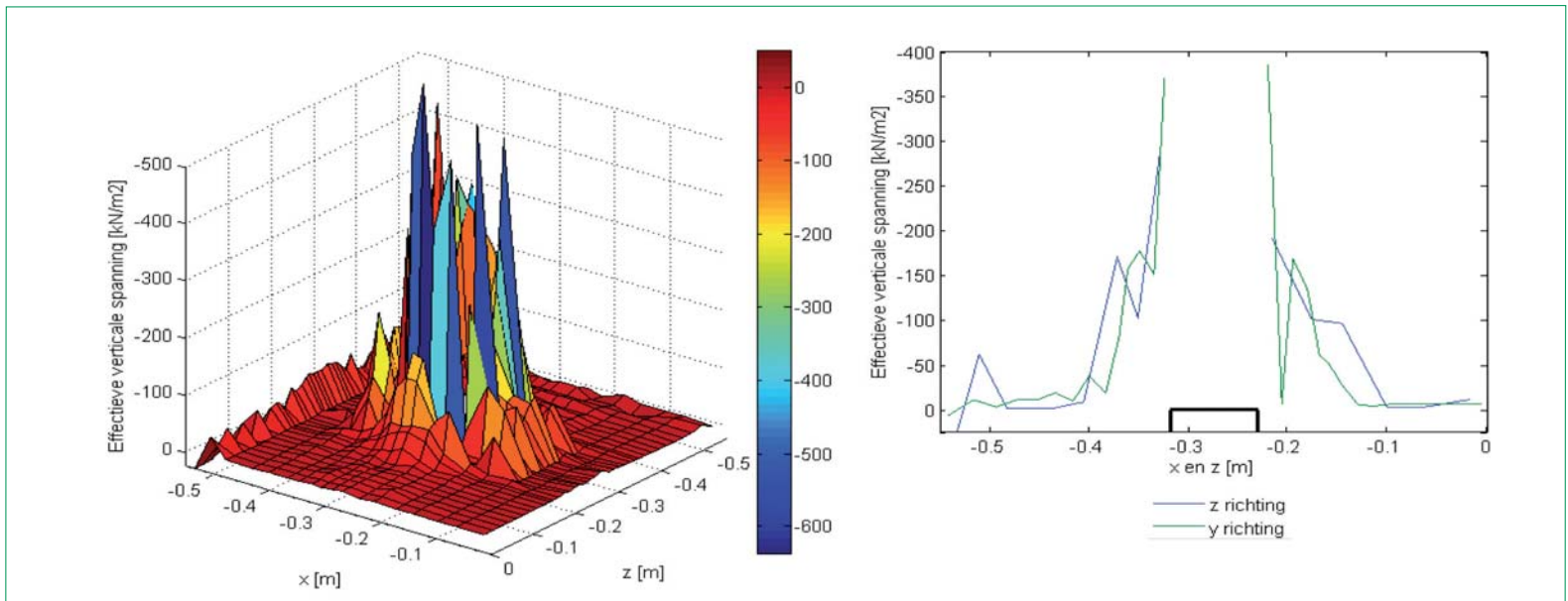
Vergelijking 3D EEM- en meetresultaten paalmatrasproeven

Figuur 7 vergelijkt de metingen van een representatieve (Huesker) proef (K2) en de resultaten van de bijbehorende EEM berekeningen. De figuren laten zien wanneer de bovenbelasting in de proef toeneemt en wanneer het schuimkussen consolideert (drainage). Op de horizontale as staat de gemeten netto belasting op de aardebaan. De netto belasting is de bovenbelasting minus de

ondergrondondersteuning en de wrijving langs de testbox-wanden.

De linker figuur vergelijkt de berekende en de gemeten belasting die rechtstreeks naar de palen gaat als gevolg van boogwerking (deel A). Zowel voor de meetresultaten als voor de EEM resultaten wordt voor A (kN/paal) een vloeiende curve gevonden. Dit geeft aan dat ook met de EEM een verband wordt gevonden tussen de belastingverdeling en de netto belasting op de aardebaan.

De figuur geeft A ook als een percentage van de totaal gemeten belasting (A%). We zien dat de A%

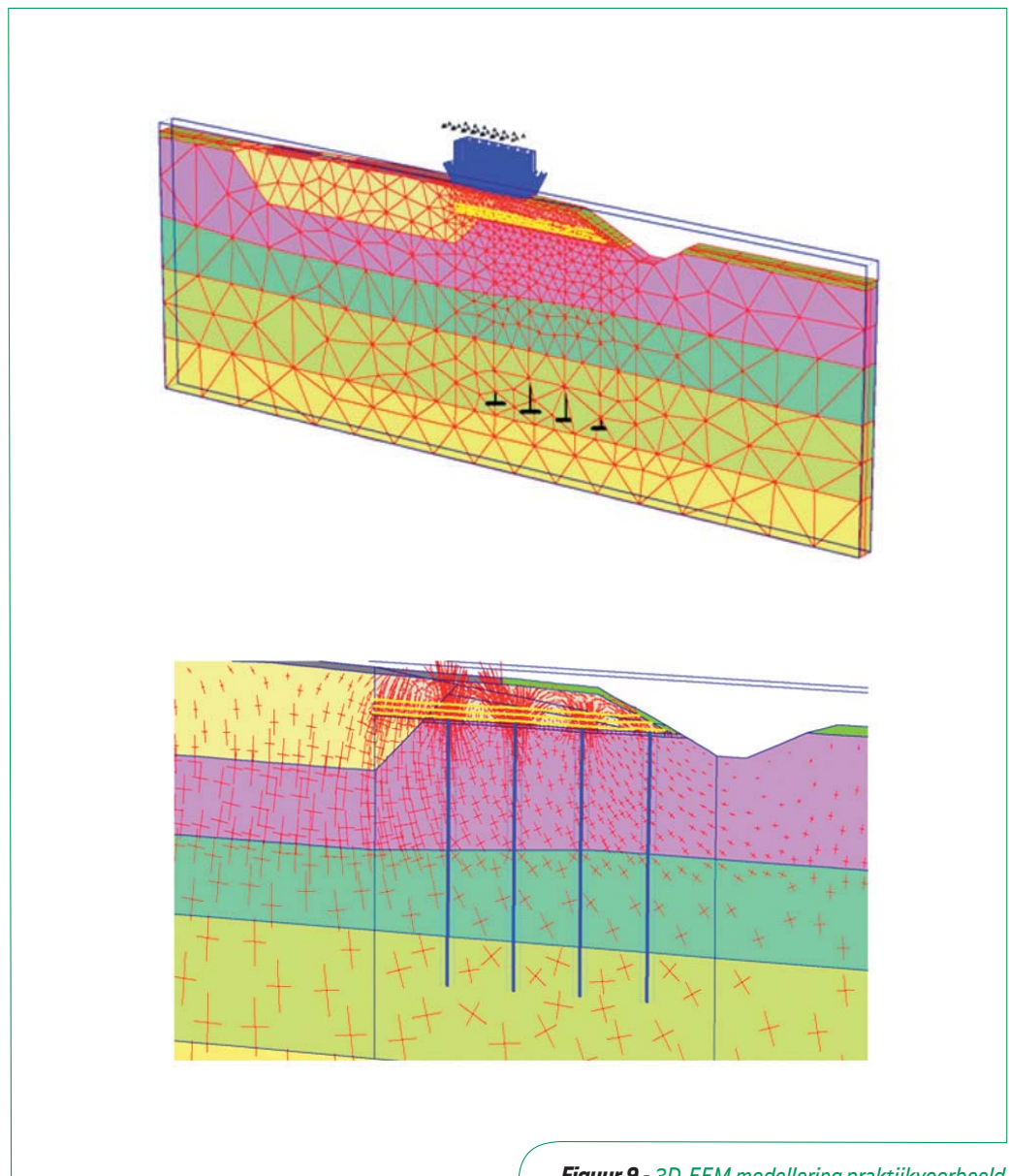


Figuur 8 - Verticale spanningen op GR, paalmatrasproef.

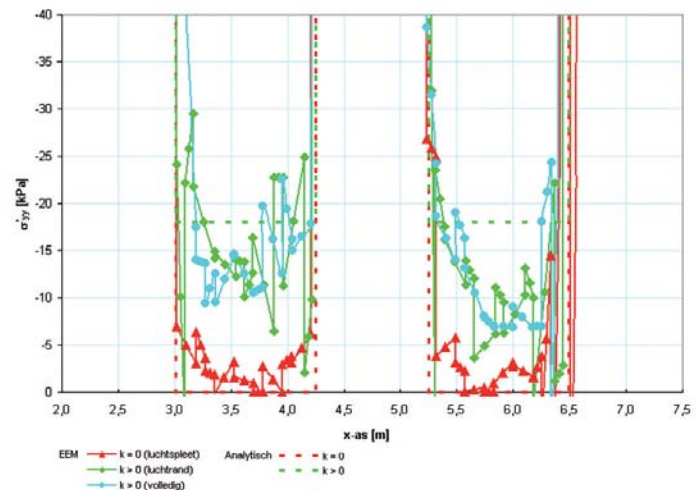
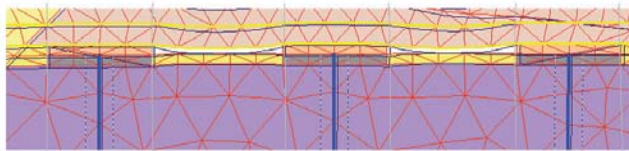
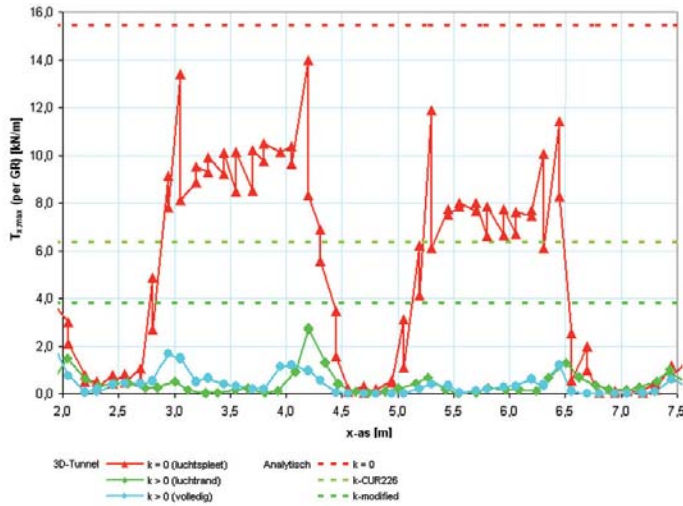
significant toeneemt tijdens de eerste drainage stap. Tijdens de eerste drainage stap treedt dus direct boogwerking op. Niet alleen tijdens de eerste drainage stap neemt belastingdeel A% toe, ook tijdens de volgende drainage stappen. Dit geeft aan dat ondergrond consolidatie leidt tot een verbetering van de boogwerking (dat wil zeggen: een toename van A als percentage van de totaal gemeten belasting, A%). De figuur laat zien dat dit zowel geldt voor de gemeten resultaten als voor de EEM resultaten. Tijdens de stappen met toenemende bovenbelasting op de aardebaan neemt belastingdeel A% juist af. Dit geeft aan dat tijdens toenemende bovenbelasting de boogwerking afneemt (zolang althans de ondergrond nog niet de kans krijgt te consolideren, zoals in deze proeven).

De belasting gedragen door de geokunststof en de slappe ondergrond (belasting B+C), wordt in figuur 7 (rechts) gepresenteerd. Als de boogwerking afneemt tijdens toenemende bovenbelasting, neemt belastingdeel B+C toe. Tijdens de drainagestappen neemt de boogwerking juist toe, waardoor belastingdeel B+C afneemt. De resultaten van de EEM komen overeen met de meetresultaten.

De berekende verticale druk op de GR is weergegeven in figuur 8. De omtrek van de paal is aangegeven met een zwart vierkant. De figuur laat zien dat de verticale belasting op de GR zich concentreert in het gebied dicht bij de paal. Dit bevestigt de conclusie in het vorige artikel (van Eekelen et al., 2011b): dat de vorm van de belasting op de GR strip beter wordt benaderd door een inverse driehoek dan door een driehoek. Dat wil zeggen: de verticale druk op de GR is midden tussen de palen



Figuur 9 - 3D-EEM modellering praktijkvoorbeeld



Figuur 10 - Verloop trekkracht in GR en effectieve verticale spanning op GR voor verschillende gevallen zonder en met ondersteuning - praktijkvoorbeeld.

lager dan meer naar de palen toe. De benadering is niet geweldig, dit komt mede doordat er pieken ontstaan rondom de paalrand, als gevolg van de beperkte fijnheid van de mesh rondom die paalrand.

3D EEM berekeningen praktijkproject

Ook in de ontwerp praktijk blijken EEM-berekeningen vaak noodzakelijk als onderdeel binnen het ontwerp van paalmatrasen. Voor het bepalen en toetsen van bijvoorbeeld de momenten in de palen als gevolg van horizontale belastingen vanuit de matras (spreidkrachten, verkeersbelastingen) of eventuele zijdelingse grondverplaatsingen in de ondergrond schieten analytische methoden al snel te kort. Daarnaast is ook inzicht vereist in de te verwachten vervormingen op het niveau van de verhardingsconstructie. Vanwege de vaak complexe geometrie en faseringen vormen EEM analyses vooralsnog de enige methode om afdoende inzicht hierin te kunnen krijgen.

Bij het opzetten van het EEM-model in PLAXIS 3D Tunnel is een fitting met de analytisch berekende trekkrachten gewenst. Echter, uit onderzoek binnen de Commissie CUR 159B is gebleken, dat in PLAXIS de trekkrachten in het GR lastig zijn te modelleren in een situatie waarbij de ondergrond over het volledige oppervlak ($A_{Lx,y}$) de geokunst-

stof zou ondersteunen (bijvoorbeeld als deze nog niet is geconsolideerd). Door toepassing van een zogenaamde luchtspleet tussen de palen kunnen de rekken in het GR wel goed worden benaderd, bijvoorbeeld voor een situatie met weggezakte of geconsolideerde ondergrond.

Teneinde de bijdrage van de ondergrond toch (grotendeels) te laten meewerken, is het EEM model aangepast, waarbij ondermeer niet de gehele ruimte tussen de paalkoppen wordt uitgeschakeld door een luchtspleet, maar slechts een kleine ruimte rondom de paalkop wordt gedeactiveerd. Deze modellering komt dichterbij van een situatie met bedding op basis van $k_{s;modified}$ zoals in het tweede deel van deze artikelreeks gedefinieerd.

Als voorbeeld zijn in figuur 10 de berekende axiale trekkracht in en de effectieve verticale spanning op het GR weergegeven voor de paalmatras op de N247 Busbaan Monnickendam¹⁾. In tabel 3 zijn de maximum trekkrachten in het GR uit de 3D-EEM-analyses samengevat en vergeleken met de analytische berekening volgens CUR 226 voor de situaties zonder bedding ($k_s = 0$) en met bedding conform CUR 226 ($k_s = k_{s;CUR}$) en op basis van de aangepaste bedding ($k_s = k_{s;modified}$). Uit de vergelijkende analyses kan bij dit voorbeeld het volgende worden vastgesteld:

- Het verloop van de effectieve verticale spanning op het GR vertoont gelijkenis met het verloop uit de EEM analyse van de laboratoriumproef uit figuur 8. Bij beide benadert de vorm van de belasting op de GR ruwweg de inverse driehoeksvorm.
- Voor de situatie met ondersteuning bedraagt de maximum trekkracht in het GR met het 3D-EEM model met luchtrand rondom paaldeksel circa 50% van de analytisch berekende trekkracht conform CUR model met $k = k_s$.
- Voor de situatie met ondersteuning bedraagt de maximum trekkracht in het GR met het 3D-EEM model met luchtrand rondom paaldeksel circa 70% van de analytisch berekende trekkracht op basis van de gemodificeerde beddingsconstante $k = k_{s;modified}$.
- Voor de situatie zonder ondersteuning bedraagt de maximum trekkracht in het GR uit het 3D-EEM model met luchtspleet circa 90% van de analytisch berekende trekkracht conform CUR-model voor $k = 0$.

Als we een niet-geconsolideerde situatie opvatten als de situatie met bedding en een geconsolideerde situatie als de situatie met verminderde bedding (in het extreme geval tot $k_s = 0$ in een weggezakte situatie) dan zien we dat consolidatie leidt tot een toename van de effectieve verticale spanningen recht boven de palen. Dus ook in dit geval vinden we dat consolidatie leidt tot een betere boogwerking, namelijk een grotere rechtstreekse belasting van de palen.

Aanbevelingen voor het verder ontwikkelen van de EEM berekeningen paalmatrasen

Het vereist enige inspanning om de maximum rek in het GR gedurende de consolidatie van de ondergrond nauwkeurig te kunnen berekenen met 3D-

EEM. Het is namelijk lastig om lokale spanningsconcentraties als gevolg van zettingen rondom de paaldeksel goed te kunnen modelleren zonder daarvoor elementen in één keer uit te moeten schakelen.

Bovenstaande vergelijkende analyses zijn slechts gebaseerd op één voorbeeld uit de praktijk en het simuleren van de paalmatrasproeven. Verdergaand onderzoek waarbij modellen zouden kunnen worden gevalideerd aan de hand van bijvoorbeeld postdictie-analyses is hiervoor zinvol. Daarnaast zou met toepassing van momenteel nog in ontwikkeling zijnde complexere rekenmodellen, waarbij gebruik wordt gemaakt van elementen die bijvoorbeeld los kunnen worden losgekoppeld of losgesneden (vb. MPM-model), het gedrag naar verwachting nog beter kunnen worden gesimuleerd.

Conclusies

Voor zowel de meetresultaten als de EEM resultaten voor de paalmatrasproeven wordt een nauw verband gevonden tussen de netto belasting op de aardebaan en de belastingverdeling. Daarnaast wordt met de EEM resultaten, zowel in de simulatie van de proeven als het praktijkproject een

verbetering van de boogwerking geconstateerd wanneer de ondergrond consolideert. De verticale belasting van beide EEM berekeningen benadert de vorm van een inverse driehoek op de GR strip. Dit is in overeenstemming met de resultaten van de paalmatrasproeven.

Noten

¹ Als voorbeeld is hier een EEM postdictie-analyse opgenomen van de paalmatras die in 2000 is gerealiseerd op de N247 (Busbaan Monnickendam). Hoewel deze paalmatras niet strikt conform de randvoorwaarden zoals deze zijn gesteld in CUR richtlijn 226 kan worden gemodelleerd (de palen zijn bijvoorbeeld in een driehoeksstramien geplaatst en de methode uit CUR 226 is uitgewerkt voor rechthoekige paalstramien), is deze paalmatras voor dit voorbeeld zodanig aangepast, dat de rekken en trekkrachten in de GR volgens de analytische methode uit CUR 226 en met PLAXIS 3D kunnen worden berekend.

Referenties

- [1] CUR 226, 2010, *Ontwerprichtlijn paalmatras-systemen* ISBN 978-90-376-0518-1
 [2] Den Boogert, T.J.M., 2011. *Piled embank-*

ments with geosynthetic reinforcement, Numerical analysis of scale model tests, Master of Science thesis, Technische Universiteit Delft.

[3] EBGE, 2010, *Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen* – EBGE, 2. Auflage, German Geotechnical Society, Ernst & Sohn, ISBN: 978-3-433-02950-3.

[4] Lodder, H.J., 2010. *Piled and reinforced embankments, Comparing scale model tests and theory*, Master of Science thesis, Technische Universiteit Delft.

[5] Van Eekelen, S.J.M., Lodder, H.J., Bezuijen, A., 2011a, *Paalmatrasproeven I, Vervormingen van geokunststoffen in een paalmatras en de daaruit volgende belastingsverdeling*, GeoKunst 42, april 2011, 42-44.

[6] Van Eekelen, S.J.M., Van der Vegt, J.W.G., Lodder, H.J., Bezuijen, A., 2011b, *Paalmatrasproeven II, belangrijkste conclusies*, GeoKunst 43, juli 2011, pp 46-50.

[7] Zaeske, D., 2001. *Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen*. Schriftenreihe Geotechnik, Uni Kassel, Heft 10, February 2001. ●

Kijkend naar de toekomst

Geotechniek met Geokunststoffen



infrastructuur
geogrid

CITEKO
civiele techniek
www.citeko.com

afdichting en
installatie

PROSE
KUNSTSTOFFEN.NL
BODEMBESCHERMENDE VOORZIENINGEN

www.prosekunststoffen.nl