

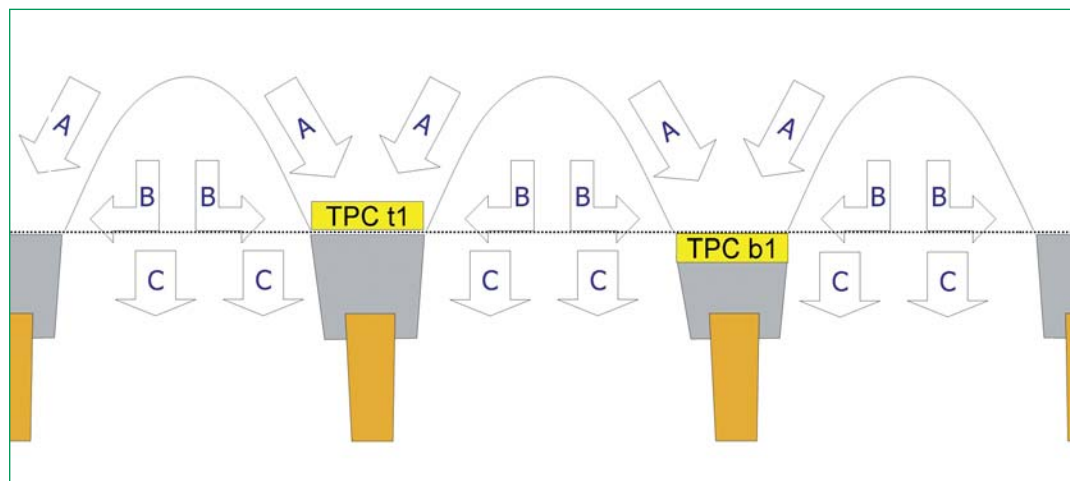
Op weg naar een Nederlandse ontwerprichtlijn voor paalmatrasen 2

Vergelijking ontwerpmodellen met veldmetingen aan de Kyotoweg

In de vorige GeoKunst schreef een aantal leden van de CUR-werkgroep (Van Eekelen en Jansen, 2008a) over een casestudie: met de drie modellen werd een parameterstudie uitgevoerd, en de resultaten werden vergeleken met numerieke (Plaxis)berekeningen.

In deze publicatie worden de voorspellingen van

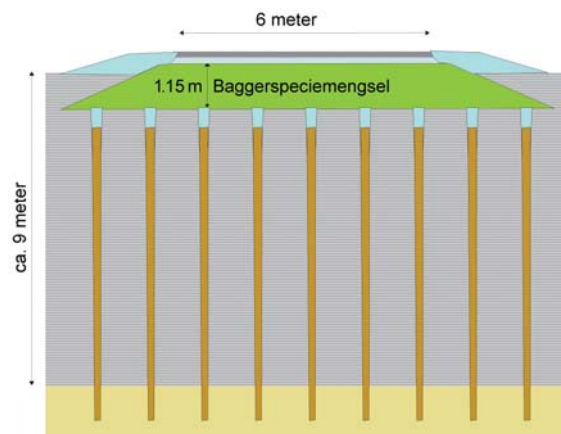
twee modellen, BS8006 en EBGeo, vergeleken met twee jaar metingen aan de Kyotoweg. Bush-Jenner wordt buiten beschouwing gelaten, omdat dit model dat uitgaat van 3 of 4 lagen geotextiel niet van toepassing is op een constructie als de Kyotoweg, omdat de Kyotoweg maar één laag wapening heeft.



Figuur 1 Rekenstap 1: Opsplitsen van de belasting in drie delen: deel A gaat rechtstreeks naar de palen, deel B gaat via de geotextiel wapening naar de palen, deel C wordt gedragen door de ondergrond. In BS8006 is $C = 0$. Deze figuur laat ook de locatie van de drukopnemers boven (TPC t1) en onder het geotextiel (TPC b1) zien.

Figuur 2

De Kyotoweg: matras van baggerspeciemengsel, gewapend met geogrid, op houten palen



Inleiding

In GeoKunst, nr 2, 2008, beschreef Jan Heemstra enkele voorlopers van paalmatrasystemen, beide bedoeld om stabiele weglichamen in slappe bodemgebieden te maken. In de tijd waar Jan Heemstra over schreef, rekende men niet echt tijdens het ontwerpproces van dit soort geavanceerde constructies. Tegenwoordig doen we dat wel en daarom werkt een CUR werkgroep samen met Delft Cluster aan het opstellen van een Nederlandse ontwerprichtlijn voor paalmatrasystemen.

Boogwerking, de basis voor het ontwerp van paalmatrasen

De basisgedachte van het ontwerp van een gewapend matras op palen is boogwerking. Boogwerking betekent dat belasting naar stijve elementen wordt 'getrokken'. Bij paalmatrasen gaat de belasting in de aardebaan zijwaarts rechtstreeks naar de palen. Het gedeelte van de belasting dat niet rechtstreeks naar de palen gaat rust op de wapening onderin het matras, en eventueel op de slappe ondergrond. De belasting op de ondergrond is bij een paalmatras-systeem veel lager dan bij een traditionele wegbaanconstructie.

Bijna alle ontwerpmodellen voor paalmatras-systemen werken met drie rekenstappen:

- 1 Splitsen van de totale belasting in twee of drie delen, zie figuur 1.
- 2 Deel B+C uit figuur 1 wordt verondersteld zich te concentreren op de relatief smalle stroken geotextielwapening tussen de paaldeksels. Het resultaat is een lijnbelasting W_T . Deze lijnbelasting kan gelijkmatig verdeeld zijn of driehoekig.
- 3 Uit de lijnbelasting W_T wordt een trekspanning in de geotextielwapening berekend.

Deze publicatie richt zich op het vergelijken van de in veldmetingen gemeten waarden van A, B en C en de resultaten van de ontwerpmodellen BS8006 en EBGeo. Deze modellen worden beschreven in de vorige paalmatrasenpublicatie in GeoKunst (Van Eekelen & Janssen, 2008a).

Beschrijving veldmetingen in de Kyotoweg

In november 2005 is bij Giessenburg de Kyotoweg gebouwd, een proefvak waarin sindsdien metingen worden gedaan. De Kyotoweg is een matras van gemengd baggerspecie op houten palen, zie figuur 2. De matras bestaat uit een mengsel van baggerspecie, cement en klei. Meestal worden paalmatrasen aangelegd met een menggranulaat. Tabel 1 geeft de eigen-

schappen van het baggerspeciemengsel (Hegemann-mengsel). γ is het volume gewicht, W is het watergehalte, K_v is de verticale permeabiliteit, φ is de interne wrijvinghoek en coh is de cohesie. Omdat het vochtgehalte in de aardebaan van de Kyotoweg varieert (er ligt geen afsluitende toplaag op), wordt gerekend met een gemiddeld volume gewicht ($\gamma_{gemiddeld}$). De beddingsconstante van de slappe ondergrond is bepaald met laboratoriumproeven op monsters, en is $k = 554 \text{ kN/m}^3$. De drukken op de palen worden al twee jaar gemeten. Hiervoor werden zowel boven als onder de geotextiel wapening, precies boven een aantal palen, een aantal drukopnemers aangebracht, zie figuur 1. In deze publicatie vergelijken we deze drukken met voorspellingen van BS8006 en EBGEO.

Basis voor de vergelijking tussen metingen en voorspellingen

Figuur 1 laat zien dat TPC t1 belastingsdeel A meet. TPC t2 en t3 staan niet in de figuur, maar zijn ieder op een andere paal, op dezelfde wijze aangebracht bovenop de geotextiel wapening. Drukopnemer TPC b1 meet A + B. TPC b1 maakt het bovendien mogelijk C uit te rekenen: $C = \text{totale belasting} - \text{TPC b1}$.

Voorspellingen met BS8006 en EBGEO

Tabel 2 laat vijf voorspellingen zien voor de Kyotoweg: twee met EBGEO en drie met BS8006.

- De eerste EBGEO voorspelling rekent zonder ondergrondondersteuning, zodat deze voorspellingen goed te vergelijken zijn met de BS8006 voorspellingen.
- De tweede EBGEO voorspelling rekent wel met ondergrondondersteuning en sluit daarmee aan op de metingen, die laten zien dat de ondergrond na 2 jaar nog altijd substantieel meedraagt.
- De eerste (oorspronkelijke versie van) BS8006 voorspelling rekent met de spanningsverdeling volgens de oorspronkelijke bedoeling van BS8006. Voor deze benadering leidde Jones (1990) formules af voor de lijn-last W_T . Hierbij ging hij uit van Marston et al (1913) en een 2D configuratie (muren in de grond in plaats van palen). Het gevolg van Jones' 2D benadering is dat er relatief hoge trekspanningen worden gevonden, zoals wordt uitgelegd in Van Eekelen en Bezuijn (2008b).



Foto 1 Aanbrengen houten palen voor de Kyotoweg.



Foto 2 Aanbrengen geogrids voor de Kyotoweg.

γ_{nat} kN/m ³	γ_{droog} kN/m ³	$\gamma_{gemiddeld}$ kN/m ³	W %	K_v m/s	φ °	$coh.$ kPa
22.2	17.0	18.6	18.1	2.1 E-9	33.8	11.5

Tabel 1 Eigenschappen van het Hegemann baggerspeciemengsel.

Parameter	EBGEO		BS8006		
	EBGEO zonder steun van slappe ondergrond	EBGEO met steun van slappe ondergrond	Oorspronkelijke versie van BS8006 2D benadering	BS8006 3D interpretatie van lijnlast op wapeningsstrip tussen palen *	Aangepaste versie van BS8006 volledig 3D **

Lastverdeling

Totale belasting (zou gelijk moeten zijn aan A+B+C)	kN kPa	34.50 21.39		34.50 21.39		
Belastingsdeel A, rechtstreeks op palen (kPa)	kN kPa	10.73 151.8		5.51 77.9		
Belastingsdeel B op geotextiel wapening (kPa)	kN kPa	23.77 15.41	11.06 7.17	28.99 18.80 ***	47.95 ***** 31.09 *****	28.99 18.80
Belastingsdeel C, op ondergrond, bij $k = 554 \text{ kN/m}^3$ and EA geotextiel = 1500 kN/m^3	kN kPa	0 0	12.71 8.24	0 0	0 0	0 0
Lijn-last WT, veroorzaakt door B+C, op strook geotextiel wapening tussen twee naast elkaar liggen paaldeksels.	kN/m'	11.88		23.88		14.44

Voorspelde trekspanning in geotextiel wapening

Trekspanning in geotextiel wapening	kN/m'	60.71	28.25	88.27	61.97
-------------------------------------	--------------	-------	-------	-------	-------

Rekenfactoren voor vergelijking met literatuurbronnen

E = belasting op paal A / totale belasting (kN/kN)	-	0.31		0.16	
1 - E = belasting op geotextiel wapening / totale belasting (kN/kN)	-	0.69	0.84	1.39 *****	0.84
Stress Reduction Ratio SRR = (gemiddelde druk op geotextiel wapening B + op slappe ondergrond C) / totale belasting (kPa/ kPa)	-	0.72	0.88	1.45 *****	0.88

Waarden die **vet cursief** zijn gedrukt, worden vergeleken met metingen.

* In overeenstemming met Love et al (2008) en Russel & Pierpoint (1997), zoals wordt beschreven in Van Eekelen en Bezuijen 2008b.

** Gemodificeerd BS8006 (Van Eekelen en Bezuijen 2008b).

*** Berekend uit W_T volgens BS8006 en een 2D relatie tussen W_T en de gemiddelde verticale belasting op de geotextiel wapening $p'r = W_T/s$

waar s is de hart op hartafstand tussen de palen, zie Van Eekelen en Bezuijen 2008b.

**** Berekend uit W_T volgens BS8006 en een 3D relatie tussen W_T en de gemiddelde verticale belasting op de geotextiel wapening $p'r: p'r = 2W_T/(s+a)$, zie Van Eekelen en Bezuijen 2008b.

***** Geen vertical evenwicht, zie Van Eekelen en Bezuijen 2008b.

Tabel 2 Twee EBGEO- en drie BS8006-voorspellingen voor de Kyotoweg.

De tweede BS8006 voorspelling rekent met de interpretatie die in veel literatuur terug is te vinden (bijvoorbeeld Love en Milligan (2003), Russel en Pierpoint (1997)). Deze auteurs gingen er vanuit dat Jones een 3D benadering zou hebben gebruikt voor het afleiden van de formules voor de lijnbelasting W_T . Deze benadering leidt niet tot andere trekspanningen, maar wel tot een andere lastverdeling (tussen A, B en C) en andere in de literatuur veel gebruikte spanningsverdelingsfactoren

(= A/totale belasting in kN/kN) of SRR (= (B+C)/totale belasting in kPa/kPa). En dat zijn nou net de waarden waarmee veel auteurs de verschillende modellen vergelijken.

De derde BS8006 voorspelling geeft de resultaten van een aangepaste Britse norm (Van Eekelen en Bezuijen, 2008b). Dit is de enige van de drie BS8006 versies waarin het verticale evenwicht altijd klopt, en waarin een volledige 3D benadering is opgenomen.

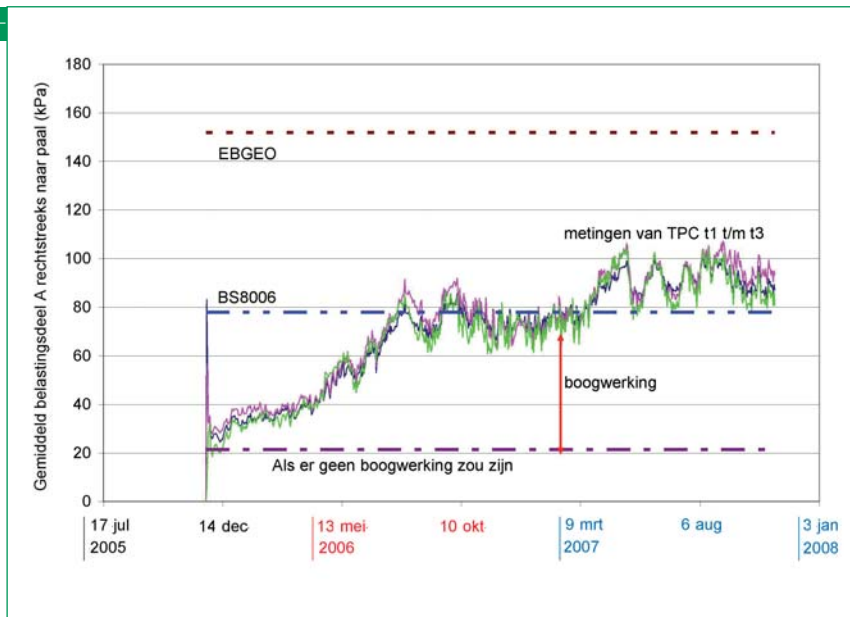
Vergelijking metingen en berekeningen

Figuur 3 vergelijkt de gemeten en berekende belasting (A) die rechtstreeks op de palen werkt. De belasting op de palen voor het geval er geen boogwerking zou zijn is: $\gamma \cdot H (+p) = (18.6 \cdot 1.15 + p) = 21.39 + p \text{ kPa}$, waarbij de bovenbelasting $p = 0 \text{ kPa}$. De afstand tussen de horizontale lijn op deze hoogte van 21.39 kPa en de metingen is een maat voor de boogwerking.

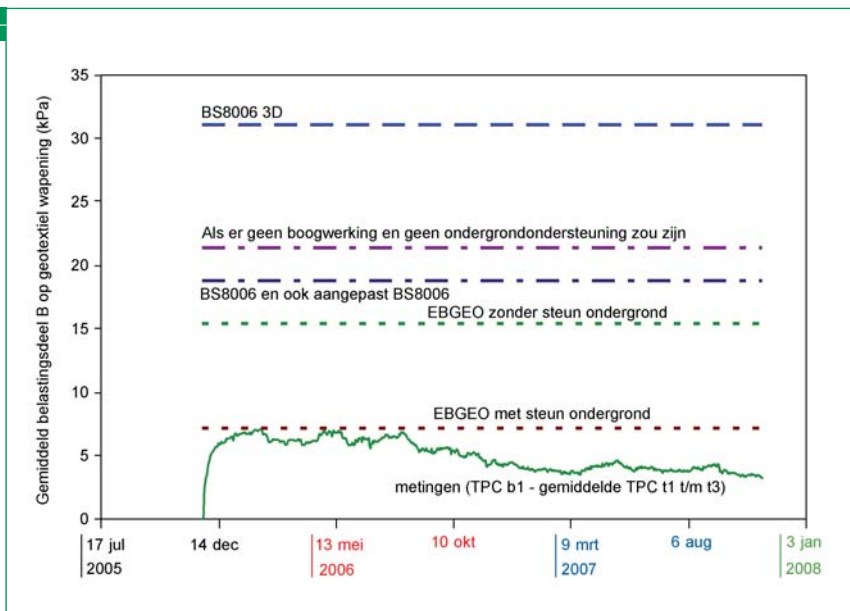
De metingen laten zien dat het enige maanden

Figuur 3

Belastingsdeel A (kPa) dat rechtstreeks naar de palen gaat.

**Figuur 4**

Gemiddelde verticale belasting B (kPa) die via de geotextiel wapening naar de palen gaat.

**Figuur 5**

Belastingsdeel C (kPa) dat via de geotextiel wapening naar de palen gaat.



Foto 3 Het storten van het baggerspeciemengsel op de geogrids.

heeft geduurd voordat de boogwerking goed tot ontwikkeling was gekomen. De boogwerking wordt ontwikkeld door zettingen in en onder de aardebaan, en cementatie van het baggerspeciemengsel. Bij het toepassen van menggranulaat in plaats van een baggerspeciemengsel wordt ook cementatie gevonden en kan de opbouw van de boogwerking op dezelfde manier worden beschouwd.

Vanaf juli 2006 zijn de metingen min of meer constant. De schommelingen die overblijven worden vooral veroorzaakt door het weer (vochtgehalte in de aardebaan), zoals uitvoerig is besproken in Van Eekelen en Bezuijzen (2007). We zien dat EBGEO de rechtstreekse belasting A op de palen overschat. BS8006 benadert de metingen veel beter. Dit is echter niet zo belangrijk. Belastingsaandeel B is veel belangrijker, daar die rechtstreeks de trekspanning in de geotextiel bepaalt. Voor het ontwerp van de palen wordt er meestal vanuit gegaan dat de palen uiteindelijk alle belasting dragen, dus $A + B + C$.

Figuur 4 laat de gemiddelde verticale belasting van de geotextiel wapening zien. De meetresultaten-curve is bepaald door het gemiddelde van TPC t1, t2 en t3 van LPT b1 af te trekken. De figuur laat zien dat de EBGEO voorspelling goed overeenstemt met de metingen. Vooral als het meedragen van de ondergrond mee wordt genomen, benadert EBGEO de metingen zeer

goed. Dit is een belangrijke conclusie, omdat deze waarde B de trekspanning in het geogrid bepaalt. Merk op dat de 3D-interpretatie van BS8006 een belasting op het geotextiel voorspelt die hoger is dan de belasting die in het systeem aanwezig is!

Figuur 5 laat zien dat de slappe ondergrond al twee jaar meedraagt. De belasting van de slappe ondergrond neemt niet af. BS8006 gaat er vanuit dat de ondergrond helemaal niet meedraagt, dus $C=0$. EBGEO doet het beter, maar voorspelt een wat te lage belasting van de ondergrond. Pas als de stijfheid van de ondergrond flink (factor 2 à 3) wordt opgehoogd, vindt EBGEO waarden die overeenkomen met de metingen. We concluderen dat alle rekenmethoden uitgaan van een lagere invloed van de ondergrond dan we tot nu toe in de Kyotoweg meten.

Conclusies

EBGEO benadert de metingen in de Kyotoweg een stuk beter dan BS8006.

De metingen laten zien dat boogwerking zich in een paar maanden tijd goed ontwikkelt en blijft bestaan.

Het meedragen van de slappe ondergrond onder de Kyotoweg is significant en wordt al twee jaar lang niet minder.

De Britse norm heeft diverse inconsistenties.

Met aangepaste formules wordt BS8006 consistent, er wordt dan verticaal evenwicht gevonden, en de formules zijn volledig 3D.

De resultaten worden beter, maar EBGEO blijft de metingen in de Kyotoweg beter benaderen.

Deze conclusies sluiten goed aan bij de conclusies van de paalmatraspublicatie in de vorige GeoKunst (Van Eekelen en Jansen 2008a).

Deze publicatie laat zien dat EBGEO consistente resultaten geeft en vindt een goede overeenstemming tussen eindige elementenberekeningen en EBGEO.

Vervolgonderzoek

EBGEO schrijft een minimale aardebaandikte voor die voor Nederlandse omstandigheden nogal hoog ligt, zeker in combinatie met grote hart-op-hart-afstanden zoals bij prefab betonnen palen gebruikelijk. In Duitsland vormt deze eis geen probleem omdat aardebanen daar doorgaans toch al dikker zijn. Vervolgonderzoek zal de geldigheid van de EBGEO-rekenregels voor dunnere aardebaan moeten aantonen.

Met dank aan

Delft Cluster, Deltares, werkgroepleden van de CUR-werkgroep 'Ontwerprichtlijn paalmatrasystemen' en CUR Bouw en Infra.

Referenties

– British Standard, BS 8006 (1995) *Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills*. BSi, including amendments March 1999.

– EBGEO: *Entwurf der Empfehlung 'Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern'*, juli 2004, Entwurf EBGEO Kapitel 6.9. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.

(DGGT). Fachsektion 'Kunststoffe in der Geotechnik' Arbeitskreis AK 5.2 'Berechnung und Dimensionierung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen'.

– Van Eekelen, S.J.M. en Bezuijen, A., 2007, *Ook slappe ondergrond steunt aardebaan op palen*, Land + Water, mei 2007, pp 36-37.

– Van Eekelen, Suzanne, Jansen, Hein, (m.m.v. Marijn Brugman, Martin de Kant, Jan van Dalen, Piet van Duijnen, Jeroen Dijkstra, Theo Huybregts, Constant Brok, Rudolf Andringa), (2008a) *Op weg naar een Nederlandse ontwerprichtlijn voor paalmatrasen 1. Verslag van een casestudie*, GeoKunst nr. 3, 2008.

– Van Eekelen, Suzanne en Bezuijen, Adam, 2008b, *Considering the basic starting points of the design of piled embankments in the British Standard BS8006*, wordt gepubliceerd in de proceedings van EuroGeo4, paper nummer 315, september 2008, Edinburgh, Schotland.

– Van Eekelen, Suzanne, Bezuijen, Adam & Alexiew, Dimiter, 2008c, *Piled Embankments in the Netherlands, a Full-scale Test, Comparing 2 years of measurements with design calculations*, wordt gepubliceerd in de proceedings van EuroGeo4, paper nummer 315, september 2008, Edinburgh, Schotland.

– Jan Heemstra, 2008, *Wat wij nu nog van Keverling Buisman kunnen leren: De betekenis van klassieke matrassen in de wegenbouw voor de paalmatras van vandaag*, GeoKunst april 2008, nr 2, blz 54-57

– Jones, C.J.F.P., Lawson, C.R., Ayres, D.J. 1990, *Geotextile reinforced piled embankments, Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Den Hoedt (ed.) 1990 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 6191 119 2, pp 155-160.

– Love, Jerry and Milligan, George 2003, *Design methods for basally reinforced pile-supported embankments over soft ground*, Ground Engineering, March 2003.

– Russell and Pierpoint 1997, *An assessment of design methods for piled embankments*, Ground engineering, Nov. 1997, pp 39-44.

– Marston, Anderson, 1913, *The theory of load pipes ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipes Iowa Engineering Experiment station Ames*, Bull. 31, Iowa, 1913. ■



Foto 3 Kyotoweg