

# Paalmatrasonderzoek, boog- en membraanwerking

ir. S. van Eekelen  
Deltares / TU Delft



prof. dr. ir. A. Bezuijen  
Universiteit Gent / Deltares



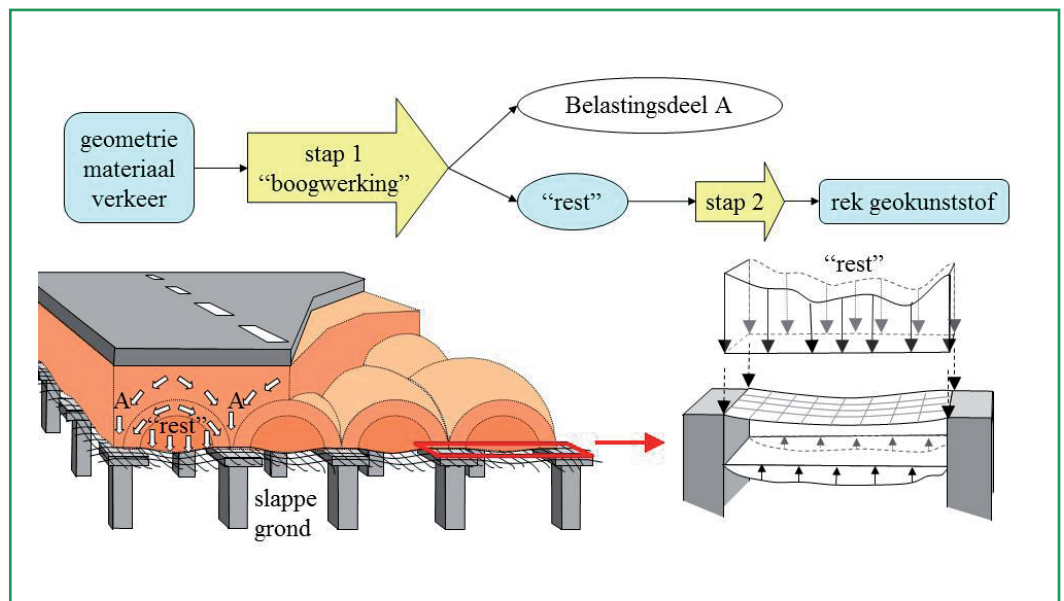
prof. ir. F. van Tol  
TU Delft / Deltares



## Inleiding

Ongeveer 50 paalmatrassen hebben we al in Nederland. De eerste is nu bijna 15 jaar oud. In het begin was het nog volkomen onduidelijk hoe je de geokunststof wapening van de paalmatras het beste kunt ontwerpen. Er waren wel verschillende ontwerpmodellen beschikbaar, maar die gaven heel verschillende antwoorden. De benodigde sterkte van de geokunststof wapening volgens die verschillende ontwerpmodellen kon zomaar een factor 10 of meer verschillen! Een paar jaar geleden heeft de CUR-commissie "paalmatrassen" de beschikbare ontwerpmodellen met Plaxis berekeningen en metingen in een tweetal veldprojecten vergeleken en ervoor gekozen om de Duitse ontwerprichtlijn EBGE0 (2010) over te nemen. Na wat aanpassingen en uitbreidingen voor de Nederlandse situatie kwam de commissie tot de huidige ontwerprichtlijn voor paalmatrassen (CUR226, 2010).

Inmiddels is Deltares in samenwerking met diverse partijen verder gegaan met het ontwikkelen van een ontwerpmodel dat de werkelijkheid beter beschrijft. Een serie specialistische laboratoriumproeven, veldmetingen en numerieke analyses gaven de benodigde gegevens. Suzanne van Eekelen zal hier in 2015 op promoveren. Samen met haar dagelijkse begeleider en promotor Adam Bezuijen en promotor Frits van Tol beschreef zij het werk in een vijftal journal papers (Van Eekelen et al., 2011, 2012a,b, 2013 en 2014). Dit artikel geeft een samenvatting van de resultaten van dit onderzoek. Het artikel beperkt zich tot het bepalen van de benodigde sterkte van de geokunststof om het eigen gewicht van de aardebaan en het verkeer te kunnen opvangen.



**Figuur 1** - Het berekenen van de rek in de geokunststof gaat in twee stappen: rekenstap 1 (boogwerking): verdeelt de belasting in deel A en de "rest"-belasting en stap 2 berekent de rek van de geokunststof.

## Ontwerp geokunststof wapening in twee stappen

Een paalmatras bestaat uit een veld van palen met daarop paaldeksels met daarop een gewapende aardebaan, zie Figuur 1. De wapening bestaat uit een geokunststof, die onderin de aardebaan ligt. In de aardebaan treedt boogwerking op. Dat is het verschijnsel dat belasting de neiging heeft naar stijvere elementen toe te trekken, in dit geval de palen. Door de boogwerking wordt de geokunststof en de ondergrond daaronder relatief niet zo zwaar belast.

In sommige landen worden ook wel paalmatrassen zonder geokunststof toegepast. Dit gebeurt bijvoorbeeld soms in Frankrijk, waar de ondergrond wat beter is. De belastingsverdeling vlak

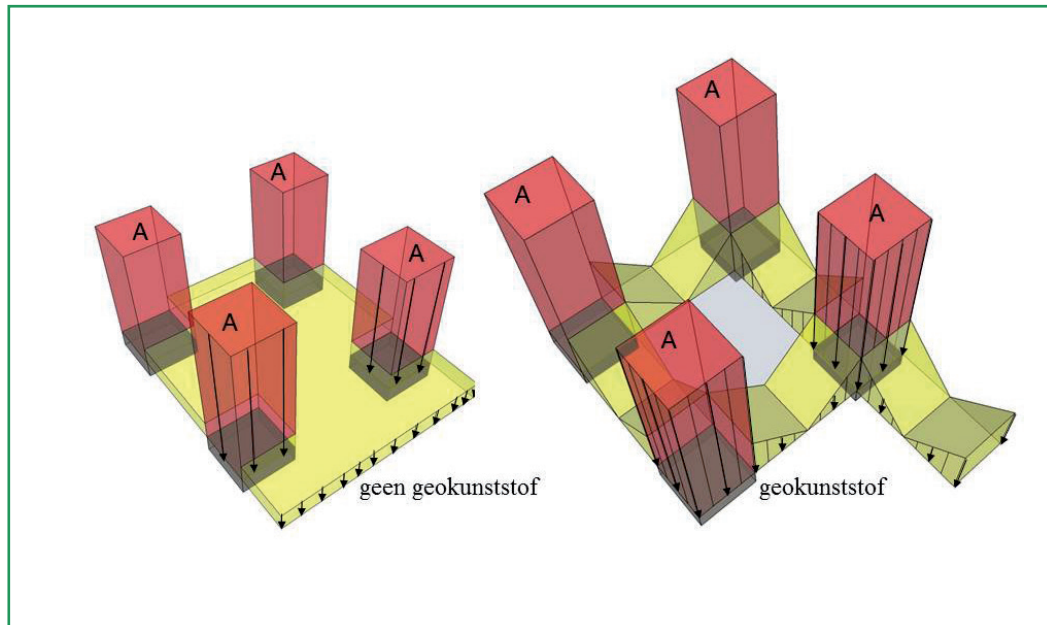
boven de palen is dan heel anders, zoals te zien is in Figuur 2. Zonder geokunststof is de belasting tussen de palen min of meer uniform verdeeld (figuur 2a). Met geokunststof rust veel meer belasting op de wapeningsstroken tussen de palen (figuur 2b) en is de boogwerking efficiënter. Meer belasting gaat dus rechtstreeks naar de palen (A is groter, zoals getoond in figuur 2). Als er bovendien (bijna) geen ondergrondondersteuning is, is de belastingverdeling op die strips bovendien min of meer 'inverse-driehoekig'. Dit wordt verderop in detail besproken.

Om de benodigde sterkte te bepalen berekenen we de rek van de geokunststof. Samen met de stijfheid van de geokunststof weten we dan de

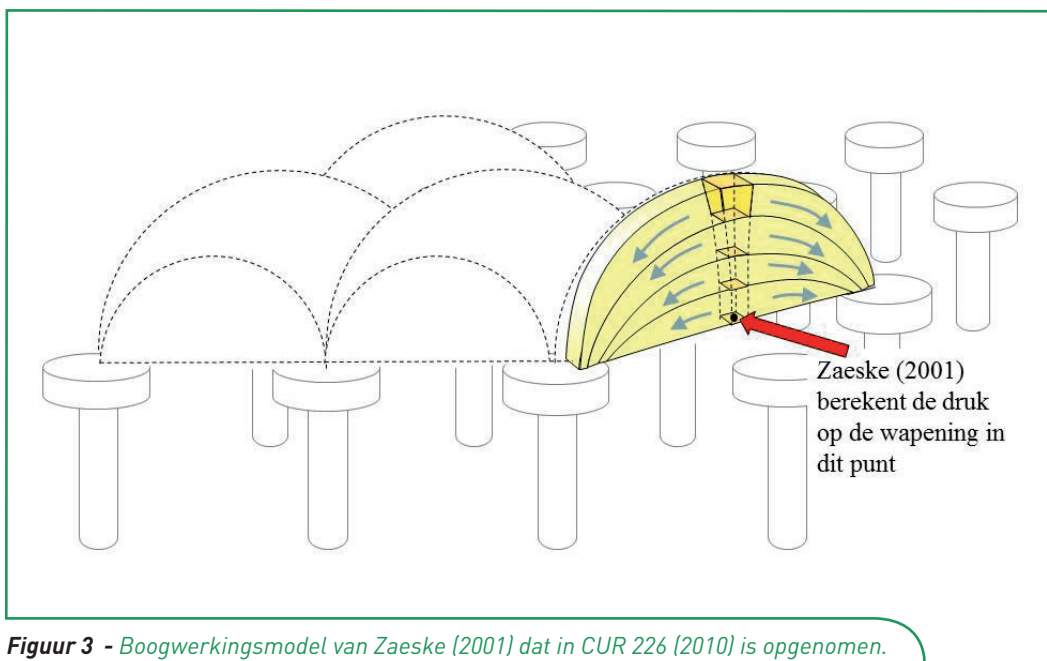
## Samenvatting

Hoe ontwerp je de geokunststof in een paalmatras? Daar hebben we in Nederland veel onderzoek naar gedaan de afgelopen jaren. Dit artikel geeft een samenvatting van de belangrijkste conclusies en het bijbeho-

rende ontwerpmodel dat is ontwikkeld. Dit onderzoek werd in september bekroond met een IGS award en het ontwerpmodel wordt opgenomen in de nieuwe CUR226 ontwerprichtlijn, dat in 2015 zal worden gepubliceerd.



**Figuur 2** - Geschematiseerde belastingsverdeling (a) net boven de paaldeksels in een paalmatras zonder geokunststof en (b) net boven de geokunststof in een paalmatras met geokunststof wapening.



**Figuur 3** - Boogwerkingsmodel van Zaeske (2001) dat in CUR 226 (2010) is opgenomen.

trekkracht in de geokunststof waarmee de benodigde treksterkte is bepaald. De rek in de geokunststof wordt in 2 stappen berekend, zie Figuur 1. In rekenstap 1 wordt de belasting verdeeld in twee delen. Een deel gaat direct naar de palen (A in Figuur 1) en het andere deel is de "rest"-belasting. A is relatief groot door de boogwerking.

In rekenstap 2 wordt alleen de wapeningsstrip tussen twee naast elkaar gelegen palen beschouwd. Deze strip wordt belast met de "rest"-belasting en eventueel ook ondersteund door de ondergrond tussen de palen. Als de verdeling van de "rest"-belasting op de strip bekend is kunnen we de rek in de geokunststof berekenen.

### Rekenstap 1: de boogwerking

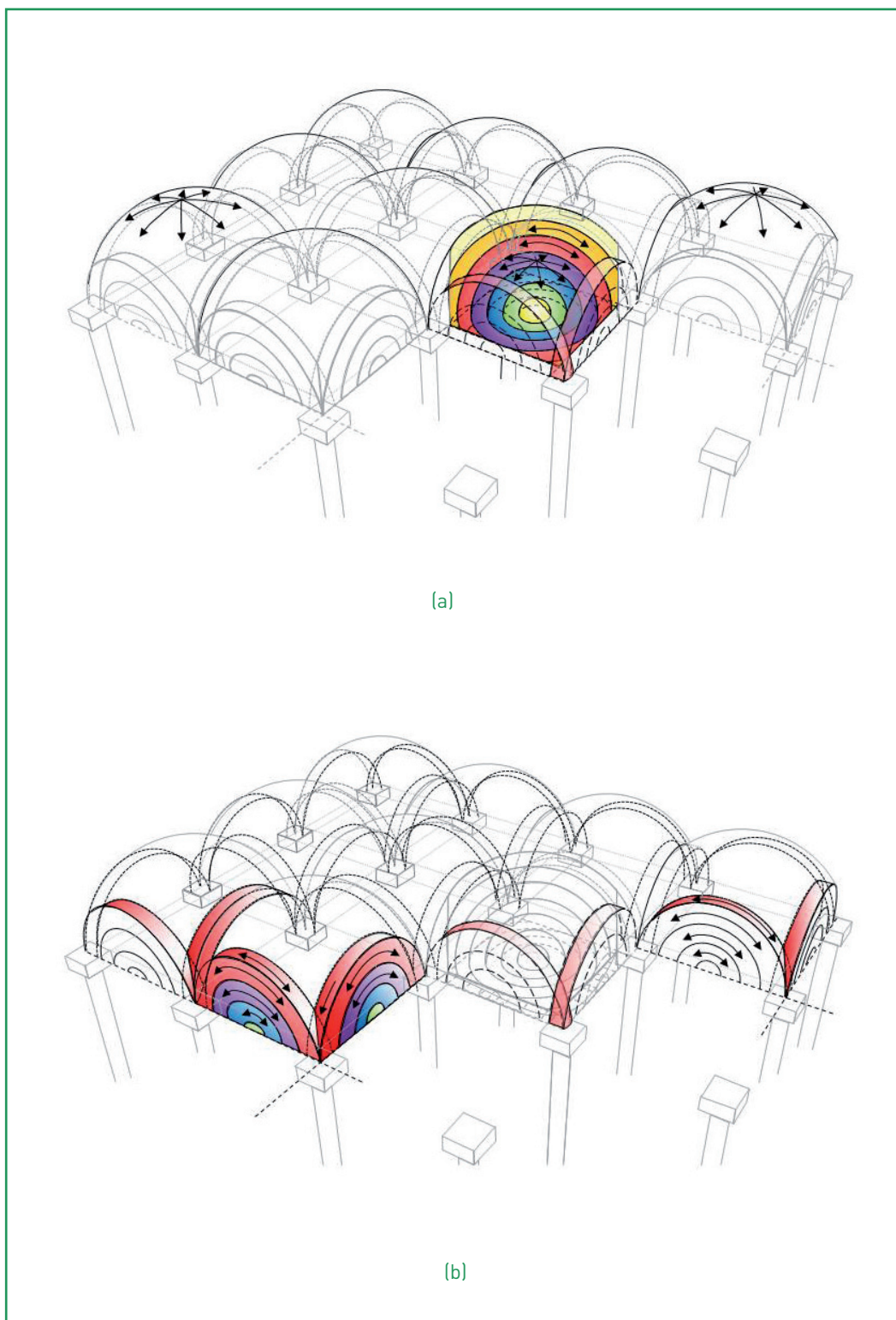
De huidige CUR226 (2010) richtlijn gebruikt het model van Zaeske (2001, zie Figuur 3). De belasting wordt zoals aangegeven in de richting van de 3D schalen afgedragen richting palen. In het punt midden onder de schalen, dat is aangegeven in de figuur, wordt de verticale druk uitgerekend. Vervolgens wordt ervan uitgegaan dat de druk op de geokunststof overal even groot is. De belastingsverdeling is dan zoals aangegeven in Figuur 2a. Dat lijkt dus niet op de belastingsverdeling zoals geobserveerd in diverse metingen en numerieke berekeningen, zoals aangegeven in Figuur 2b.

Van Eekelen et al. (2013) presenteren een nieuw boogwerkingsmodel dat wel de belastingsverdeling geeft van Figuur 2b. Dit model heet het Concentric Arches (CA) model, zie Figuur 4. De belasting wordt eerst (Figuur 4a) langs de 3D bollen afgedragen richting ondergrond of richting de 2D bogen van Figuur 4b. Vervolgens wordt de belasting langs de 2D bogen verder afgedragen richting ondergrond of palen. Van der Peet en Van Eekelen (2014) laten zien dat de resultaten van het nieuwe CA model beter overeenkomen met 3D Plaxis berekeningen dan die van het Zaeske model. Met dit artikel won Tara van der Peet de award voor 'the best paper of a young professional' van het 10e IGS congres.

### Rekenstap 2

Voor het berekenen van de rek van de geokunststof wordt de "rest"-belasting van stap 1 geconcentreerd op de strips tussen de palen. Het is van belang hoe deze "rest"-belasting op de wapeningsstrip is verdeeld. Figuur 5 laat drie opties zien. De eerste, de driehoekige verdeling wordt momenteel gebruikt in CUR226 (2010). Dit wordt gecombineerd met ondersteuning vanuit het deel van de ondergrond dat onder de wapeningsstrip ligt.

Metingen en numerieke berekeningen laten echter zien dat als de ondergrond geen noemenswaardige ondersteuning geeft, de belastingsverdeling de inverse-driehoekige verdeling van Figuur 5c benadert. Als de ondergrond wel een behoorlijke ondersteuning geeft, dan vinden we meer de uniforme verdeling van Figuur 5b. De aangepaste CUR 226 (2015) gebruikt de uniforme verdeling voor de situatie met ondergrond



**Figuur 4** - Boogwerkingsmodel van Van Eekelen et al. (2013) ofwel het "Concentric Arches Model"; de belasting gaat (a) via de 3D bollen deels naar de geokunststof en deels naar (b) de 2D bogen, die de belasting verder afvoeren naar de geokunststof en de palen.

en de inverse-driehoekige verdeling voor de situatie zonder blijvende ondersteuning van de ondergrond. In het nieuwe model is er dan bovendien voor gekozen om de gehele ondergrond onder de geokunststof mee te nemen, en niet alleen de ondergrond onder de wapeningsstrips,

zoals in de huidige CUR richtlijn. Lodder heeft dit voor zijn TUD-afstuderende uitgewerkt (Lodder et al., 2012).

#### Elf cases

In acht veldprojecten en drie experimentenseries

zijn de rekken gemeten van de geokunststof. Tabel 1 specificeert deze elf cases, die uitgebreid worden beschreven in Van Eekelen et al. (2014).

#### Vergelijken berekeningen en metingen

Figuur 6 vergelijkt de gemeten en berekende rekken van de geokunststof voor deze elf cases. Er is gerekend met twee rekenmodellen. Figuur 6a laat de resultaten zien voor het model dat is opgenomen in de huidige CUR226 (2010) en de Duitse EBGE0. Dit is een combinatie van het stap 1-model van Zaeske (Figuur 3) en de driehoekige belastingsverdeling van Figuur 5a. Figuur 6b laat de resultaten zien van het nieuwe model, dat worden opgenomen in de aangepaste CUR226 (2015). Dit is een combinatie van het Concentric Arches model (zie figuur 4) en de uniforme en inverse-driehoekige belastingsverdelingen (Figuur 5b en Figuur 5c).

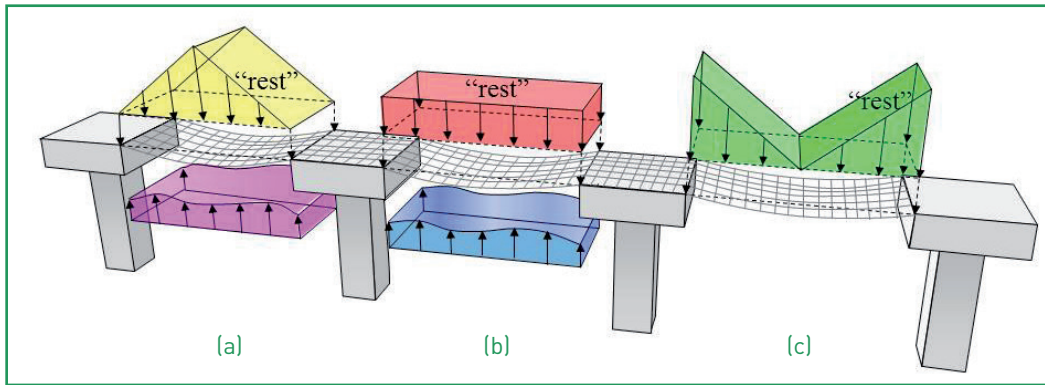
De gestreepte lijnen in Figuur 6 geven aan waar de punten liggen als de gemeten en berekende waarden precies overeenkomen. De ononderbroken lijnen geven de trendlijnen door de data. De figuur laat zien dat berekeningen met het oude model de gemeten rek gemiddeld met 146% overschatten. Het nieuwe model overschat de metingen met slechts 6%. Het nieuwe rekenmodel vertoont dus een veel betere overeenkomst met de metingen dan het oude model. In een ontwerprichtlijn hoort een rekenmodel thuis dat de werkelijkheid zo goed mogelijk beschrijft. Daarom wordt het nieuwe rekenmodel opgenomen in de nieuwe CUR226 (2015). Aanvullend wordt een set van veiligheidsfactoren bepaald die garandeert dat de betrouwbaarheid wordt gehaald die de Eurocode eist.

#### Met dank aan...

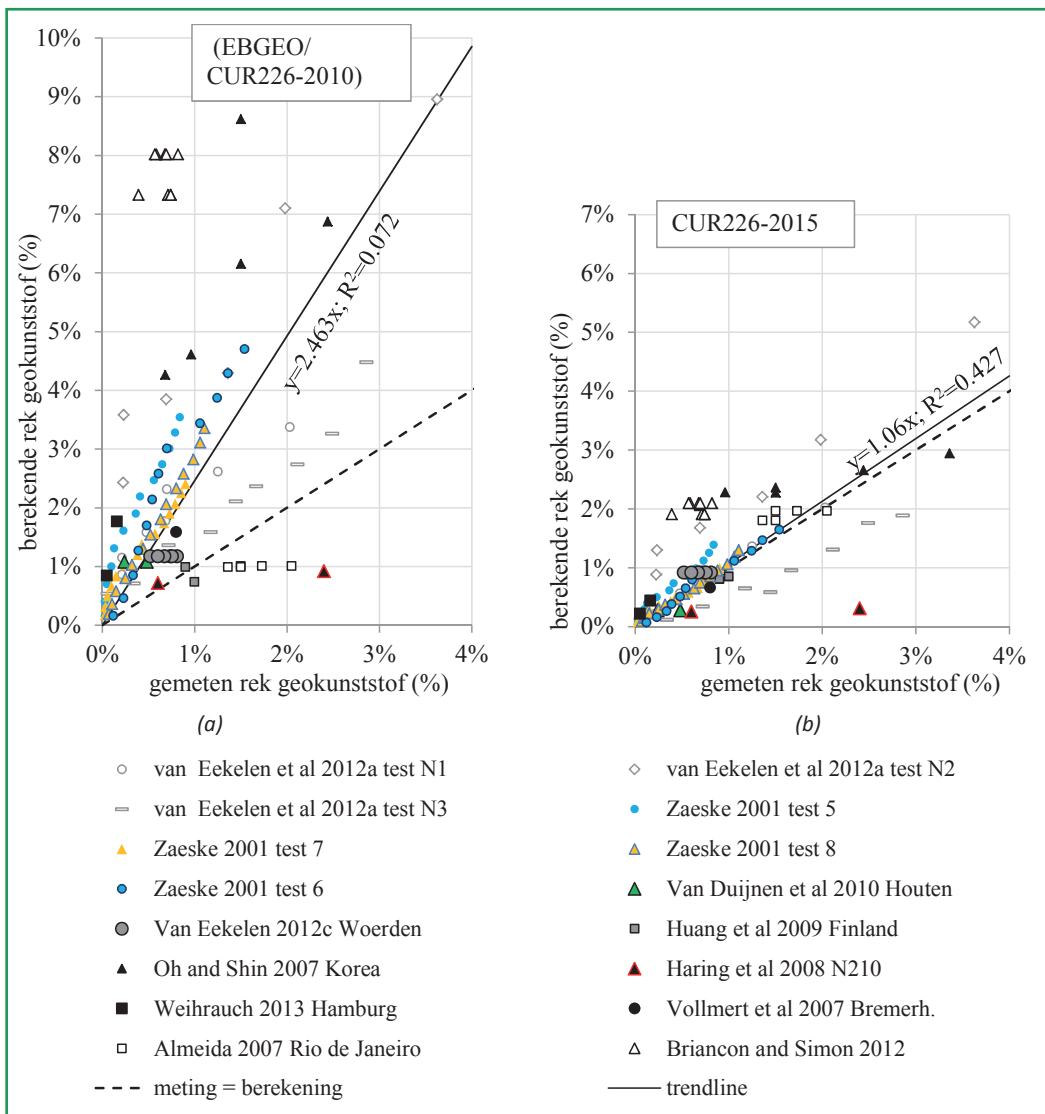
De PhD van Suzanne van Eekelen wordt gefinancierd door Deltares, Huesker, Naue en TenCate. De proevenserie in het Deltares laboratorium is gefinancierd door Deltares, Delft Cluster, Huesker, Naue, TenCate en Tensar. De vruchtbare discussies met deze leveranciers en de andere CUR226-werkgroepleden waren van grote waarde. De genoemde Nederlandse veldproeven werden naast de genoemde partijen ook gefinancierd door de Bataafse Alliantie, CFE, CRUX Engineering, Geolimpuls, KWS Infra, Mobilis, Movares, ProRail, Provincie Utrecht, Rijkswaterstaat en Voorbij Funderingstechniek.

#### Bronnen

- Almeida, M.S.S., Ehrlich, M., Spotti, A.P., Marques, M.E.S., 2007. Embankment supported on piles with biaxial geogrids. *Geotech. Eng.*, 160(4), 185-192.



**Figuur 5** - Rekenstap 2 (a) oude ontwerpmodel met driehoekige belastingsverdeling voor de situatie met of zonder ondergrond ondersteuning (b) nieuwe ontwerpmodel met uniforme belastingsverdeling voor de situatie met ondergrond-ondersteuning en (c) nieuwe ontwerpmodel met inverse-driehoekige belastingsverdeling voor de situatie zonder ondergrond-ondersteuning. De aangepaste CUR226 (2015) maakt gebruik van (b) en (c).



**Figuur 6** - Vergelijking metingen met berekeningen met: (a) de oude CUR226 (2010) met het boogwerkingsmodel van Zaeske (Figuur 3) en de driehoekige belastingsverdeling (Figuur 5a) en ondergrondondersteuning alleen onder de wapeningsstrips en (b) de nieuwe CUR226 (2015) met het Concentric Arches model van Van Eekelen et al. (2013) en de uniforme of invers-driehoekige belastingsverdeling (Figuur 5b en Figuur 5c) en ondergrondondersteuning overall onder de geokunststof tussen de palen.. Berekeningen met verwachtingswaarden en zonder partiële veiligheidsfactoren.

- ASIRI, 2012. Recommendations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides, ISBN: 978-2-85978-462-1.
- BS8006-1: 2010. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. British Standards Institution, ISBN 978-0-580-53842-1.
- Briançon, L., Simon, B., 2012. Performance of Pile-Supported Embankment over Soft Soil: Full-Scale Experiment, J. Geotechn. Geoenviron. Eng. 2012.138:551-561.
- CUR 226, 2010. Ontwerprichtlijn paalmatras-systemen (Design Guideline Piled Embankments), ISBN 978-90-376-0518-1.
- CUR 226, 2015. Ontwerprichtlijn paalmatras-systemen (Design Guideline Piled Embankments), hernieuwde uitgave, wordt gepubliceerd in 2015.
- EBGEO, 2010 (in German). Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen e EBGEO, vol. 2. German Geotechnical Society, Auflage, ISBN 978-3-433-02950-3.
- 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. In: Proceedings 4th European Geosynthetics Conference, September 2008, Edinburgh, UK.
- Hewlett, W.J., Randolph, M.F., 1988. Analysis of piled embankments. Ground Engineering, April 1988, Volume 22, Nummer 3, 12-18.
- Huang, J., Han, j., Oztoprak, S., 2009. Coupled Mechanical and Hydraulic Modeling of Geosynthetic-Reinforced Column-Supported Embankments. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 2009.135:1011-1021.
- Lodder, H.J., van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A., 2012. The influence of subsoil reaction in a basal reinforced piled embankment. In: proceedings of Eurogeo5, Valencia. Volume 5.
- Oh, Y.I., Shin, E.C., 2007. Reinforced and arching effect of geogrid-reinforced and pile-supported embankment on marine soft ground. Marine Georesources and Geotechnology, 25, 97-118.
- Van der Peet, T.C., Van Eekelen, S.J.M., 2014. 3D numerical analysis of basal reinforced piled embankments. To be published in: Proceedings of the 10th International Conference on Geosynthetics (10 ICG) in Berlijn.
- Van Duijnen, P.G., Van Eekelen, S.J.M., Van der Stoel, A.E.C., 2010. Monitoring of a Railway Piled Embankment. In: Proceedings of 9 ICG, Brazilië, 1461-1464.
- Van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A., Alexiew, D.,

**Tabel 1 - Elf cases waarin de rekken van de geokunststof zijn gemeten. Van Eekelen et al., (2015) beschrijven de cases uitgebreid.**

		hoh af-stand palen x	hoh af-stand palen y	Dia-meter paal-deksel	Dikte aarde-baan	Vo-lume ge-wicht	wrij-vings-hoek	Beddings-constante	Stijf-heid geo-kunst-stof x	Stijf-heid geo-kunst-stof y	ver-keer
		$s_x$	$s_y$	$d$	$H$	$\gamma$	$\varphi$	$k$	$J_x$	$J_y$	$p$
		m	m	m	m	kN/m <sup>3</sup>	deg	kN/m <sup>3</sup>	kN/m	kN/m	kPa
1	Rio de Janeiro, (Almeida et al. 2008)		2.50	0.90	2.50	18.0	68	0	1615		0
2	Woerden (Van Eekelen et al. 2012b)		2.25	0.85	1.79	18.3	51	0	4936		0
3	Houten (Van Duijnen et al 2010)	1.90	1.45	0.40	2.60	18.3	51	480	5237	6454	0
4	Frankrijk 3R (Briancon & Simon 2012) Frankrijk 4R		2.00	0.38	5.00	20.0	54	356	600 750		0
5	Finland, Huang et al (2009)		1.40	0.80	1.80	20.0	42	20	1700		12
6	Krimpenerwaard (Haring et al 2008)	2.35	2.28	0.85	1.35	19.0	51	250	5178	5548	0
7	Hamburg 1 (Weihrauch et al 2010) Hamburg 2	2.50	2.30	0.58	2.50 3.10	19.0	35	1765 1200	7480 6050		18 20
8	Bremerhaven (Vollmert et al 2008)		1.77	0.60	5.00	19.0	35	1333	2240		13
9	Korea test 3 (Oh & Shin 2007) Korea test 4 Korea test 5		0.75 0.60 0.95	0.17	2.70	7.20	35	236	235		0
10	Kassel Universiteit test 5 (Zaeske 2001) Kassel Universiteit test 6 Kassel Universiteit test 7 Kassel Universiteit test 8		0.50	0.18	0.35 0.35 0.70 0.70	18.1	38	2125	1000 500 1000 500		0-99 0-91 0-102 0-90
11	Deltares test N1 (Van Eekelen et al 2012a) Deltares test N2 Deltares test N3		0.55	0.10	0.42	15.74 17.24 16.16	49	8-5824 470-1742 131-3138	2211-3036 1518 1754-3036		0-44 0-41 0-64

2010. The Kyoto Road Piled Embankment: 31/2 Years of Measurements. In: Proceedings of 9 ICG, Brazilië, 1941-1944.

- Van Eekelen, S.J.M.; Bezuijen, A., Van Tol, A.F., 2011. Analysis and modification of the British Standard BS8006 for the design of piled embankments. Geotextiles and Geomembranes 29: 345-359.
- Van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A., Lodder, H.J., van Tol, A.F., 2012a. Model experiments on piled embankments Part I. Geotextiles and Geomembranes 32: 69-81.
- Van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A., Lodder, H.J., van Tol, A.F., 2012b. Model experiments on piled embankments. Part II. Geotextiles and Geomembranes 32: 82-94
- Van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A., Van Duijnen, P.G., 2012c. Does a piled embankment 'feel' the passage of a heavy truck? High frequency field measurements. In: proceedings of the 5th European Geosynthetics Congress EuroGeo 5. Valencia. Digital version volume 5: 162-166.
- Van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A. van Tol, A.F., 2013. An analytical model for arching in piled

embankments. Geotextiles and Geomembranes 39: 78-102.

- Van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A. van Tol, A.F., 2014. Validation of analytical models for the design of basal reinforced piled embankments. Wordt gepubliceerd in Geotextiles and Geomembranes.
- Vollmert, L., Kahl, M., Giegerich, G., Meyer, N., 2007. In-situ verification of an extended calculation method for geogrid reinforced load distribution platforms on piled foundations. In: proceedings of ECSGE 2007, Madrid, Volume 3, pp. 1573 - 1578.
- Weihrauch, S., Oehrlein, S., Vollmert, L., 2010. Baugrundverbesserungsmassnahmen in der HafenCity Hamburg am Beispiel des Stellvertreterprojektes Hongkongstrasse. Bautechnik. Volume 87, issue 10: 655-659.
- Zaeske, D., 2001. Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen. Schriftenreihe Geotechnik, Uni Kassel, Heft 10, February 2001.