JAARGANG 25 NUMMER 4 NOVEMBER 2021

GEOkunst

ONAFHANKELIJK VAKBLAD
VOOR GEBRUIKERS VAN
GEOKUNSTSTOFFEN

PAALMATRASSEN, STATE-OF-THE-ART HOOGWATER LIMBURG 2021

GEOKUNST WORDT MEDE MOGELIJK GEMAAKT DOOR:

Sub-Sponsors

Low & Bonar
Progress through performance

Low & Bonar
Westervoortsedijk 73
6827 AV Arnhem
Tel. +31 (0) 85 744 1300
Fax +31 (0) 85 744 1310
info@lowandbonar.com
www.lowandbonar.com

NAUE

NAUE GmbH & Co. KG
Gewerbestr. 2
32339 Espelkamp – Germany
Tel. +49 5743 41-0
Fax +49 5743 41-240
info@naue.com
www.naue.com

TENCATE
materials that make a difference

TenCate Geosynthetics
Netherlands BV
Europalaan 206
7559 SC Hengelo
service.nl@tencategeo.com
www.tencategeo.eu

Mede-ondersteuners

Strukton Civiel

Strukton Civiel Regio West
Scharwoude 9
1634 EA Scharwoude
Tel. +31 (0)229 54 77 00
info@struktonciviel.com
www.strukton.com

enviro QUALITY CONTROL BV

Enviro Quality Control B.V.
Daalseweg 1-B
3611 AA Oud-Zuilen
Tel. +31 (0)30 244 1404
mail@enviro-quality-control.nl
www.eqc.nu

De collectieve leden van de NGO zijn:

CDR International BV, Rijssen
Cofra B.V., Amsterdam
Deltares, Delft
Enviro Quality Control BV, Maarssen
Fugro NL Land B.V., Leidschendam
Genap BV, 's Heerenberg
Geo2 Engineering BV, Utrecht
Geopex Products (Europe) BV, Gouderak
GeoTec Solutions BV, Culemborg
GID Milieutechniek, Velddriel
Havenbedrijf Rotterdam, Rotterdam
Huesker Synthetic BV, Rosmalen
InfraDelft BV, Delft
Juta Holland BV, Oldenmarkt
Joosten Kunststoffen, Bemmel
Kiwa NV, Rijswijk
Kwast Consult, Houten
Low & Bonar, Arnhem
Movares Nederland BV, Utrecht
Naue Prosé Geotechniek BV, Leeuwarden
Quality Services BV, Bennekom
Robusta BV, Genemuiden
Rijkswaterstaat, Utrecht
S&P Clever Reinforcement Company Benelux, Aalsmeer
Strukton Civiel, Scharwoude
Stybenex, Nijmegen
T&F Handelsonderneming BV, Oosteinde
Ten Cate Geosynthetics Netherlands BV, Nijverdal
Tensar International, 's-Hertogenbosch
Witteveen + Bos, Deventer

Enka® Solutions

EnkaGrid®

Voor een stabiele fundering van wegen en kraanopstelplaatsen bij windmolens

EnkaGrid MAX funderingswapening bij Windpark WP Energiek, Waardpolder

Low & Bonar

Low & Bonar
Westervoortsedijk 73, 6827 AV Arnhem | T +31 85 744 1300
www.enkasolutions.com | info@enkasolutions.com

BESTE GEOKUNST LEZERS,

Bij het verschijnen van deze editie naderen we alweer het einde van het jaar. Een goed moment om terug te kijken. Het voorwoord van editie Geokunst 2021#2[2] ging over 'leven met water'. Met de overstromingen in Nederland, België en Duitsland staat dit onderwerp sinds juli weer vol in de schijnwerpers. De grote hoeveelheid neerslag in korte tijd leidde tot zeer snelle stijging van waterstanden, grote overstromingen en een ongekend hoog aantal dodelijke slachtoffers: 184 in Duitsland en 38 in België. De schade aan infrastructuur en gebouwen is enorm;

Overstroming te Valkenburg juli 2021 (Mediacentrum Defensie)

het herstel zal jaren duren. De schade is het grootst in Duitsland en wordt door de Duitse autoriteiten geraamd op 30 miljard euro directe schade (!).
De neerslaghoeveelheden hebben historische reeksen ruimschoots overtroffen. Onderzoeken geven aan dat als gevolg van klimaatverandering de kans op herhaling van extreme neerslag al 9 keer hoger kan zijn dan eerder aangenomen[1]. Kunnen wij de voorspelbaarheid en kracht van water nog wel op een goede manier inschatten? Blijven we in staat om veilige en betaalbare waterkeringen te bouwen tegen het stijgende water? Kunnen we op bepaalde plekken nog wel blijven wonen? Om hoogwater het hoofd te bieden zullen de investeringsbudgetten voor duurzame landinrichting en hoogwaterbescherming fors moeten stijgen. Tevens zal de snelheid van dijkversterkingen omhoog moeten en zullen er drastische keuzes gemaakt dienen te worden. De komende decennia betekent dit ongekende uitdagingen in de vakdisciplines van geotechniek en waterbouw. Hoe mooi is het dat wij met zijn allen kunnen bijdragen aan een duurzame en veilige toekomst van Nederland!

Over het raakvlak tussen klimaatverandering/weersextremen en de toepassing van geokunststoffen bij waterkeringen en kustverdediging is in Geokunst 2019#01[2] eerder een uitgebreid artikel verschenen. De toepassingsmogelijkheden van geokunststoffen in de waterbouw, en specifiek bij dijken, zijn dan ook zeer divers. Er zijn mogelijkheden voor filterconstructies onder steenbekleding; grondwapening voor grotere stabiliteit of steilere taluds; erosiebescherming van taluds (gewapende grasbekleding); scheiding van bodemlagen; drainage (beheersing grondwaterstand) of afdichting door bijvoorbeeld folieconstructies en/of bentonietmatten. De toepassing van hoogwaardige geokunststoffen als bouwmateriaal kan een aanzienlijke bijdrage leveren om Nederland veilig en leefbaar te houden. Tevens kan met dit soort toepassingen sneller én goedkoper worden gebouwd in vergelijking met traditionele oplossingen. Recent hadden we in de uitgave van Geokunst 2021#3[2] een artikel over de toepassing van geokunststoffen in de waterbouw. Samen werken aan een duurzame en (waterveilige) toekomst doen we met elkaar!

In deze editie van Geokunst vinden jullie een zeer interessant artikel door Suzanne van Eekelen en Jie Han met een overzicht en highlights op de state-of-the-art van paalmatrassen.

Rijk Gerritsen
Eindredacteur GeoKunst

[1] World Weather Attribution 2021
[2] Zie PDF-artikelen Geokunst op www.ngo.nl
[3] Coverfoto: Hoogwater Limburg juli 2021, Waterschap Limburg

COLOFON

Geokunst wordt uitgegeven door de Nederlandse Geotextielorganisatie. Het is bedoeld voor beleidsmakers, opdrachtgevers, ontwerpers, aannemers en uitvoerders van werken in de grond-, weg- en waterbouw en de milieutechniek. Geokunst verschijnt vier maal per jaar en wordt op aanvraag toegezonden.

Eindredactie **R. Gerritsen**
Tekstredactie **J. van Deen**
Redactieraad **A. Bezuijen**
P. van Duijnen
M. Duškov
S. van Eekelen
P. ter Horst
Productie **Uitgeverij Educom**

Een abonnement kan worden aangevraagd bij:
Nederlandse Geotextielorganisatie (NGO)
info@ngo.nl
www.ngo.nl

dr. ir. Suzanne J.M. van Eekelen
Deltares

Prof. Jie Han
The University of Kansas, USA

PAALMATRASSEN, STATE-OF-THE-ART

Inleiding

Een paalmatras bestaat uit palen met daarboven een aardebaan met onderin een of meer lagen geokunststof wapening. Paalmatrassen zijn een effectieve en economische bouwtechniek bij bouwen op slappe grond. Paalmatrassen worden internationaal steeds meer toegepast voor wegen, spoorwegen, opslagterreinen, industriële terreinen en soms zelfs gebouwen. Ze bieden voordelen boven alternatieve oplossingen, zoals de korte bouwtijd, weinig tot geen restzettingen, weinig invloed op nabijgelegen constructies en weinig tot geen onderhoud.

De afgelopen dertig jaar is er wereldwijd veel onderzoek gedaan naar paalmatrassen. Zo is de technologie verder gebracht en zijn we het gedrag van paalmatrassen beter gaan begrijpen. In 2017 organiseerden de auteurs van dit artikel in Shanghai, China, een Eerste Internationale Workshop over Paalmatrassen. Een vervolg hierop was een Special Issue van het internationale journal *Geosynthetics International* over paalmatrassen. De lead paper hierin gaf een state-of-the-art review over de paalmatras-technologie, gebaseerd op het persoonlijk werk van de auteurs, onderzoeksresultaten van anderen in de literatuur, en de uitkomsten van de workshop in Shanghai (Van Eekelen en Han, 2020b). Dit artikel geeft enkele highlights uit deze state-of-the-art review.

Het principe van boogwerking

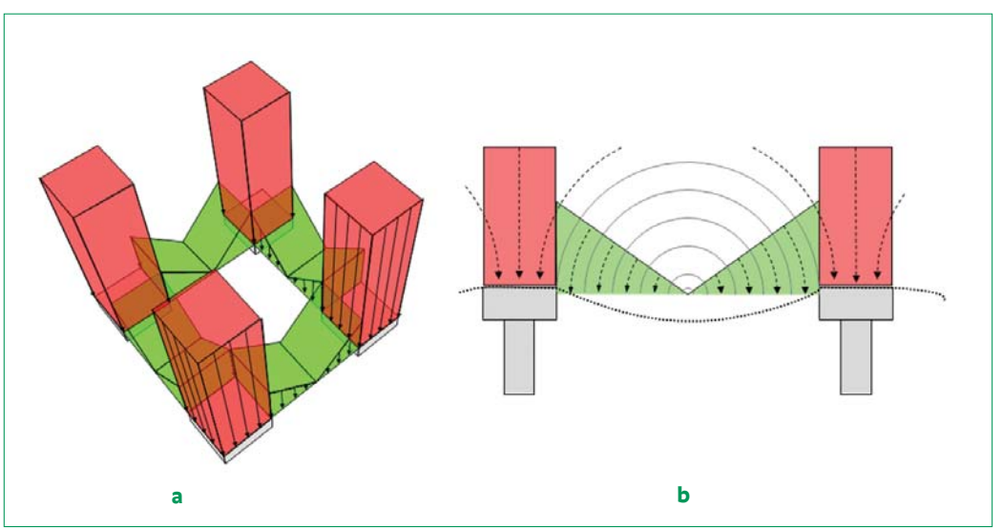
WAT IS BOOGWERKING?

Boogwerking, en de daaruit volgende belastingsverdeling is de basis van elk rekenmodel waarmee de geokunststof wapening van een paalmatras kan worden ontworpen.

Boogwerking is het mechanisme dat belasting naar relatief stijve elementen wordt getrokken. Deze elementen gedragen zich relatief stijf, of ze bewegen relatief weinig in vergelijking met omliggende elementen. Bij een paalmatras gaat dat als volgt: veel belasting wordt naar de palen getrokken (rood in figuur 1). De palen bewegen immers het minste. De rest van de belasting rust op de geokunststof tussen de palen, die samen met de ondergrond vervormt. Deze belasting wordt als volgt verdeeld:

- Veel belasting rust op de wapening-strips tussen elke twee naast elkaar gelegen palen (groen in figuur 1). Dat komt doordat deze strips de kortste overspanning vormen tussen twee palen. Daardoor zakken de strips relatief weinig. Hierdoor wordt er relatief veel belasting naar deze strips getrokken. . Het feit dat de strips relatief veel verticale belasting krijgen, is aangetoond in diverse experimenten (bijvoorbeeld Zaeske, 2001), veldmetingen (bijvoorbeeld Khansari en Vollmert, 2020), en 3D numerieke berekeningen (bijvoorbeeld Lee et al., 2020, Van der Peet en Van Eekelen, 2014). Door de grotere belasting op de strips, rekken de strips meer dan de omliggende geokunststof. Ook dat is door veel onderzoekers aangetoond, zowel experimenteel (bijvoorbeeld Van Eekelen et al., 2012), numeriek (bijvoorbeeld Lee et al., 2020) als met veldmetingen (bijvoorbeeld Almeida et al., 2014).
- De belasting op de wapening-strips is niet uniform. Immers: hoe dichter bij de paal, hoe minder de strip kan zakken, en hoe meer belasting er heen gaat. Er rust dus meer belasting op de strip dicht bij de paal dan op het deel van de strip midden tussen twee palen.

Figuur 1b laat zien hoe concentrische bogen deze belastingsverdeling kunnen verklaren. In dit model loopt de belasting in de richting van de bogen. Grotere bogen geven meer belasting door. Dit concept werd bedacht en uitgewerkt door Van Eekelen et al. (2013, 2015 , zie figuur 2) en later bevestigd door verschillende onderzoekers met numerieke berekeningen, waaronder Van der Peet en Van Eekelen (2014) en experimenten (Rui et al., 2019, zie figuur 3). Veel onderzoekers (bijvoorbeeld Girout et al. (2016), Lehn et al. (2016), Pham et al. (2021) en Sondermann et al. (2014)) hebben inmiddels het analytische Concentric Arches (CA) model ook gevalideerd en vergeleken met andere analytische modellen. Het CA model heeft zo zijn beperkingen, maar het doet het beter dan andere beschikbare analytische modellen. Onze CUR 226 (2016) rekent er ook mee.



Figuur 1 – Boogwerking in een paalmatras (a) schematisatie van de belastingsverdeling en (b) concentrische bogen verklaren deze belastingsverdeling. Grotere bogen geven meer belasting door.

BOOGWERKING BIJ ZAKKING VAN DE ONDERGROND

Boogwerking ontwikkelt zich als de ondergrond tussen de palen zakt. De meeste boogwerkingsmodellen nemen dit niet mee. Het CA model ook niet. Sommige modellen rekenen wel met zetting van de ondergrond. We noemen hierbij één belangrijke ontwikkeling: de Ground Reaction Curve (GRC).

In Californië ontwikkelden Iglesia en medewerkers oorspronkelijk dit GRC concept (Iglesia et al, 1991, 1999 en 2014). Anderen pasten het weer wat aan, zie bijvoorbeeld figuur 4. De GRC beschrijft hoe boog-werking zich ontwikkelt bij doorgaande zetting van de ondergrond tussen de palen, voor een paalmatras zonder geokunststof. In het begin

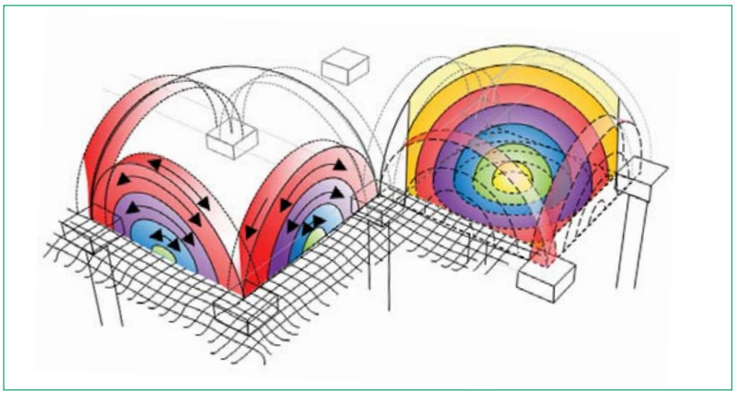
SAMENVATTING

In 2017 organiseerden de auteurs van dit artikel de Eerste Internationale Workshop over Paalmatrassen. Twintig internationale experts en 70 deelnemers waren aanwezig bij de workshop die werd gehouden in de Tongji universiteit in Shanghai in China. Vervolgens kregen de auteurs van dit artikel de kans om op te treden als gast-redacteur van een Special Issue van het internationale wetenschappelijke tijdschrift Geosynthetics International (Van Eekelen en Han, 2020a). Deze speciale uitgave bevat 14 journal papers, plus een lead paper van de hand van de gast-redacteurs (Van Eekelen en Han, 2020b). De paper geeft een zeer uitgebreid overzicht van de state-of-the-art van paalmatrassen. Dit artikel in GeoKunst beschrijft enkele highlights uit de state-of-the-art paper.

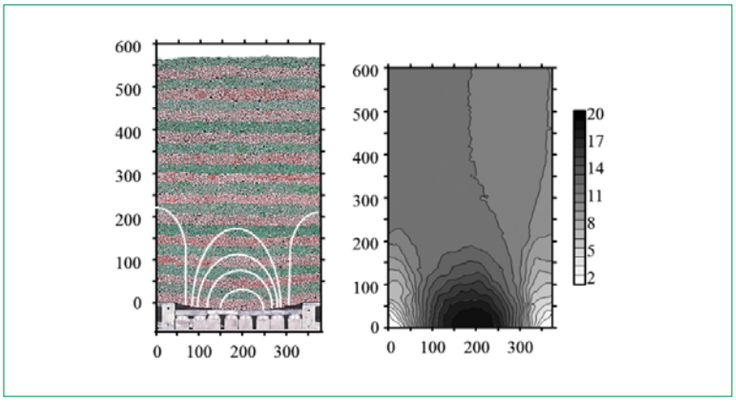
neemt de boogwerking toe bij toenemende zakking van de ondergrond. Dat betekent dat de lijn in figuur 4 daalt: de belasting op de ondergrond tussen de palen neemt af. Op een bepaald moment bereikt de boogwerking een maximum. Dat gebeurt bij punt C in figuur 4. Bij verdere zakking van de grond tussen de palen ontstaan glijvlakken en neemt de boogwerking weer af en de belasting op de ondergrond toe. Uiteindelijk wordt een 'ultimate arching' bereikt (punt F) en ontstaan rechte glijvlakken. Als de aardebaan niet te hoog is, dan kunnen die glijvlakken doorlopen tot aan het oppervlak.

De GRC relateert de boogwerking aan de zakking van de grond tussen de palen. Dit doet het Concentric Arches model niet. Het GRC kan daarom een uitbreiding zijn van het Concentric Arches model en sommige onderzoekers uit bijvoorbeeld de USA en Australië stellen dat ook voor. Tot nu toe baseren ook zij hun werk echter op proeven zonder geokunststof wapening.

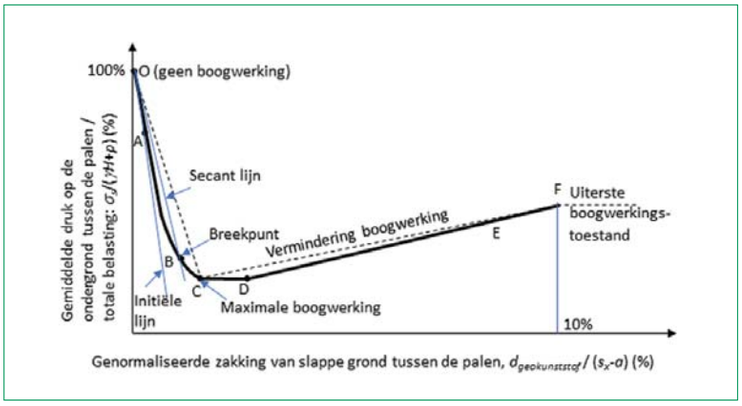
Experimenten met geokunststof wapening (figuur 5) laten zien dat bij het gebruik van geokunststof wapening de boogwerking zich sneller ontwikkelt en stabieler is. Bovendien wordt de uiterste boogwerkings-toestand niet bereikt omdat de geokunststof wapening actief wordt en het ontstaan van glijvlakken voorkomt. Rechte glijvlakken worden dan ook niet gevonden, zoals te zien in figuur 3. Verder onderzoek zal aantonen hoe de GRC curve er uit moet zien als er geokunststof wapening wordt toegepast. Daarna kan het een waardevolle aanvulling zijn op het Concentric Arches model.



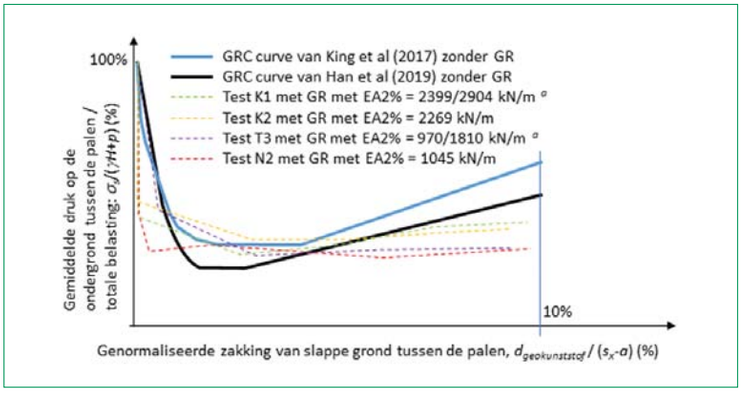
Figuur 2 – 3D versie van het Concentric Arches model van Van Eekelen et al. (2013) en Van Eekelen (2015).



Figuur 3 – Deformaties in de 2D-experimenten van Rui et al. (2019). We zien concentrische bogen, waarbij de bovenste bogen hoger zijn dan cirkels, en de onderste bogen lager zijn dan cirkels. Dat is anders dan in het CA model. Maten in mm. Rechts metingen, links een interpretatie daarvan geprojecteerd op het vervormde schaalmodel.

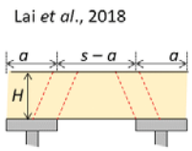
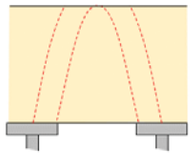
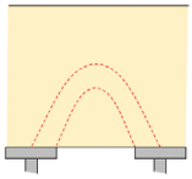
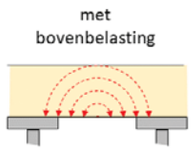
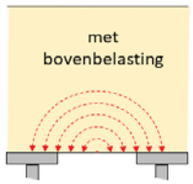
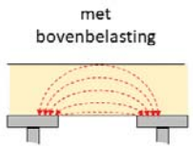
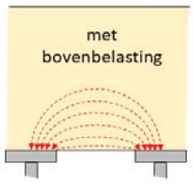
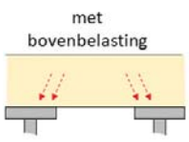
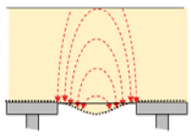
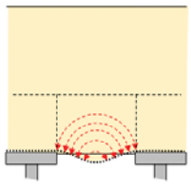
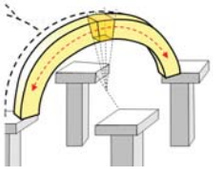
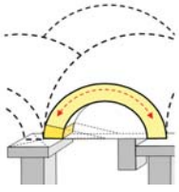


Figuur 4 – De Ground Reaction Curve voor paalmatrassen zonder geokunststof wapening (versie van Han et al., 2019, gebaseerd op het werk van Iglesia et al, 1991, 1999 en 2014) $d_{geokunststof}$ (m) is de maximale doorhanging van de geokunststof. s_x en a worden uitgelegd in Tabel 1, het eerste plaatje.



Figuur 5 – De Ground Reaction Curve in vier experimenten met geokunststof wapening van Van Eekelen et al., (2012) vergeleken met de GRC's van King et al (2017) en Han et al. (2019), beide zonder geokunststof wapening. GR = geokunststof wapening. $d_{geokunststof}$ (m) is de maximale doorhanging van de geokunststof. s_x en *a* worden uitgelegd in Tabel 1, het eerste plaatje. EA2% is de stijfheid van de geokunststof bij 2% rek en een belastingsduur die overeenkomt met de proefduur (1 dag).

[a] Bij tests K1 en T3 is de stijfheid van de geokunststof in de x- en y-richting verschillend, beide waarden zijn gegeven.

	Hele lage aardebaan	*Lage aardebaan*	*Hoge aardebaan*
a. Lai et al. (2018): geen GR ; gebaseerd op 2D DEM berekeningen, H_{ca} is de kritische hoogte boogwerkings hoogte, bijvoorbeeld $0.8\cdot(s_x - a)$ en H_{co} de kritische aardebaan hoogte, bijv, $3\cdot a$.	 2D: $H < H_{ca}$ "shear plane arching"	 2D: $H_{ca} \leq H < H_{ca} + H_{co}$ "partial arching"	 2D: $H \geq H_{ca} + H_{co}$ "full arching"
b. CUR226, 2016 (Van Eekelen, 2015). Met GR. Gebaseerd op kleine-schaal-proeven en een theoretische oplossing.	2D: $H < 0.5(s_x - a)$ 3D: $H < 0.5(s_d - d)$ "partial arching"	 2D: $0.5(s_x - a) \leq H < 0.5s_x$ 3D: $0.5(s_d - d) \leq H < 0.5s_d$ "partial arching"	 2D: $H \geq 0.5s_x$ 3D: $H \geq 0.5s_d$ "full arching"
c. EBGEO, 2010 (Zaeske, 2001): met GR. Gebaseerd op kleine-schaal-proeven en een theoretische oplossing.	3D: $H < 0.5s_d$ "partial arching"	 3D: $H < 0.5s_d$ "partial arching"	 3D: $H \geq 0.5s_d$ "full arching"
d. BS8006 2010 (Jones et al., 1990): met GR, gebaseerd op experimenten met leidingen.	Niet van toepassing. 3D: $H < 0.7\cdot(s_x - a)$	 3D: $0.7(s_x - a) \leq H < 1.4(s_x - a)$ "partial arching"	3D: $H \geq 1.4(s_x - a)$ "full arching"
e. Rui et al. (2019a): met GR, gebaseerd op 2D experimenten.	 "Concentric Ellipse Pattern (CEP)" $H < 1.75\,(s_x - a)$ and $(s_x - a)/a < 2.5$		 "Equal Settlement Pattern - Concentric Arches (ESP-CA)" $H \geq 1.75\,(s_x - a)$ en $(s_x - a)/a \geq 2.5$
f. Hewlett and Randolph (1988): gebaseerd op lab proeven en een theoretische oplossing. Zonder GR. Hewlett and Randolph (1988) bevelen wel aan GR te gebruiken maar nemen de invloed van het GR niet mee en geven geen rekenregels voor het GR.	Niet van toepassing. $H < 0.5\,s_d$	 Kritische gebied in de top van iedere 3D boog $E_{crown} < E_{pile\ cap}$ $H \geq 0.5\,s_d$ en bijvoorbeeld voor $\varphi = 30°$ en $s = 3\cdot a \rightarrow H < 2\cdot s$	 Kritisch gebied bij de paaldeksels $E_{crown} > E_{pile\ cap}$, wat bijvoorbeeld gebeurt bij $\varphi = 30°$ en $s = 3\cdot a \rightarrow H < 2\cdot s$

Tabel 1 - Partiële en volledige boogwerking voor paalmatrassen met en zonder geokunststof voor verschillende aardebaanhoogtes. De gestreepte lijnen tonen de richting van de grootste hoofdspanning. GR = geokunststof wapening, s_x is hart-op-hart afstand van de palen in de x-richting, a is de breedte van een vierkante paaldeksel, d is de diameter van een ronde paaldeksel.

DUNNE EN DIKKE AARDEBANEN

Als een aardebaan voldoende dik is, dan kan de boogwerking zich volledig ontwikkelen. Zonder geokunststof wapening kunnen zich dan rechte glijvlakken ontwikkelen. Met geokunststof wapening vertonen de vervormingen concentrische ellipsen zoals te zien in figuur 3. Is de aardebaan niet voldoende dik, dan zal de boogwerking zich slechts gedeeltelijk kunnen ontwikkelen: 'partial arching'. De beschrijving van deze partiële en volledige boogwerking verschilt per onderzoeksgroep (zie Tabel 1).

FACTOREN VAN INVLOED OP BOOGWERKING

Veel onderzoekers onderzochten de invloed van diverse factoren op de boogwerking. Ze toonden aan dat de volgende factoren veel invloed hebben, zoals:

- aardebaandikte: hoe dikker hoe meer boogwerking;
- grotere paaldeksels en een kleinere afstand tussen de palen geeft meer boogwerking;
- een hogere wrijvingshoek van de matrasvulling geeft meer boogwerking;
- zettingen van de slappe ondergrond tussen de palen (consolidatie) spelen een rol bij de ontwikkeling van de boogwerking, zie figuren 4 en 5;
- bovenbelasting: uniform, lokaal of dynamisch. De boogwerking blijkt een stuk minder gevoelig voor dynamische belasting als er (voldoende) geokunststof wapening wordt toegepast. Ook het vergroten van de dikte van de aardbaan helpt. Er wordt nog veel onderzoek uitgevoerd naar de invloed van lokale of dynamische belastingen. Onder andere bij de Kyung Hee Universiteit in Zuid-Korea, in samenwerking met Deltares, loopt een onderzoek naar de invloed van een hoge-snelheidstrein op een paalmatras. Momenteel hanteert CUR 226 een model van Heitz (2006) om de boogwerking te reduceren als er een relatief zware verkeersbelasting is. Van Eekelen en Han (2020b) gaan uitgebreid in op de invloed van verschillende typen bovenbelasting.

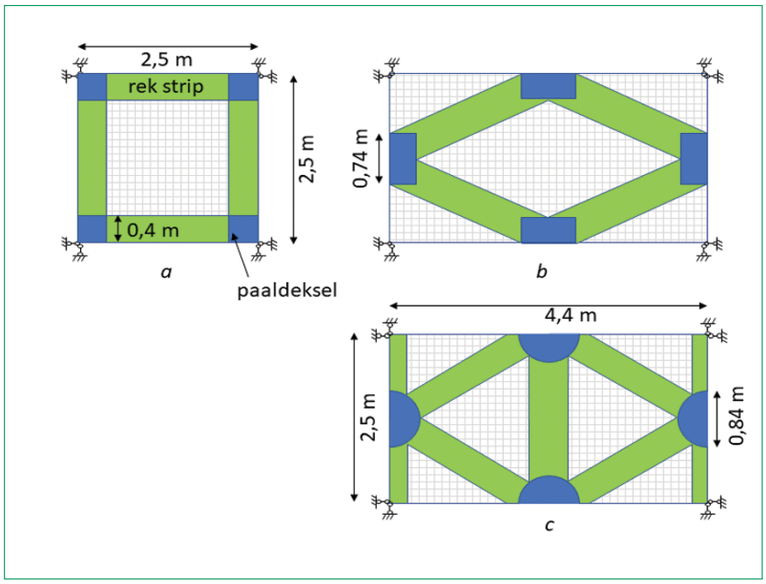
Het ontwerp in de praktijk

Dit hoofdstuk gaat in op enkele factoren die zijn gerelateerd aan het ontwerp van paalmatrassen. Meer factoren en meer details zijn te vinden in de oorspronkelijke paper (Van Eekelen en Han, 2020b)

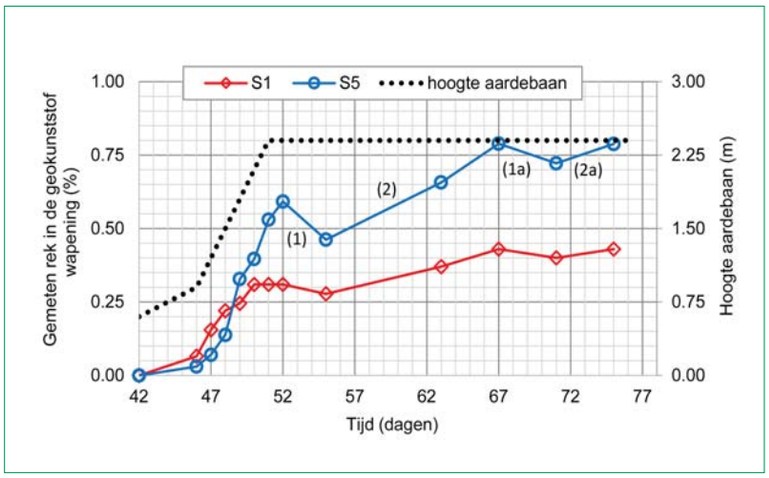
Eisen en randvoorwaarden

AARDEBAANHOOGTE

Er zal geen verschilzetting optreden aan het oppervlak als de aardebaandikte groter is dan de kritische dikte, H_{crit}. Veel ontwerpers hanteren H_{crit} daarom als een minimum. Er is daarom veel onderzoek verricht naar de dikte van H_{crit}, en daar is nog geen consensus over. Onze CUR 226 (2016) vindt het niet nodig om Hcrit als minimum te hanteren, zolang na oplevering van het werk de verschilzettingen maar acceptabel zijn. Een groot deel van de zettingen treedt immers op tijdens de bouw: de geokunststof wapening begint al meteen tussen de palen te zakken. Als vlak voor oplevering het wegdek vlak wordt afgewerkt dan moet de weg daarna vlak blijven. CUR 226 schrijft wel een minimale matrasdikte van $0.66(s_{diagonaal}-a)$. Hierbij is $s_{diagonaal}$ (m) de diagonale hart-op-hart afstand tussen de palen en a (m) de breedte van de paaldeksel. De deelnemers van de Eerste Internationale Workshop over paalmatrassen in China waren het er over eens dat dit een goede eis is.



Figuur 6 – Rek-strips: waar treedt de meeste rek op in de geokunststof wapening? 3D numerieke berekeningen van Zhang et al. (2019). Ze modelleerden een geogrid als een biaxiaal lineair elastisch materiaal. (a) vierkant palen patroon en vierkante paaldeksels, voor ronde paaldeksels is het resultaat hetzelfde (b) driehoekig palenpatroon en vierkante paaldeksels (c) Driehoekig palenpatroon en ronde paaldeksels.



Figuur 7 – Veldproeven Cao et al. (2016). Rek gemeten in de geokunststof wapening, gemeten gedurende en na het ophogen van een aardebaan op kleefpalen.

PALENPATROON

De meeste richtlijnen zetten de palen in een rechthoekig patroon, hoewel de USA en Duitsland ook driehoekige palenpatronen accepteren. Rechthoekige patronen werken beter met uniaxiale en biaxiale geokunststoffen en zijn gemakkelijker om te analyseren en te berekenen. Over de aanpak van het ontwerp van driehoekige patronen bestaat nog geen consensus, hoewel er al veel over is geschreven. Zo lieten Zhang et al. (2019) zien dat de locatie van de geokunststof-strips die het meeste rekken, mede afhankelijk is van de vorm van de paaldeksels (figuur 6). De groep van Liyanapathirana laat met 3D numerieke berekeningen zien dat een vierkant palenpatroon efficiëntere boogwerking oplevert: bij dezelfde 'coverage ratio' (evenveel paaldeksel per m²) was minder geo-kunststof wapening nodig (Wijerathna & Liyana-pathirana, 2020). Zij modelleerden de geokunst- stof wapening als een membraan met een uniforme stijfheid (multi-axiaal).

PALEN OP KLEEF

Palen op kleef worden weinig toegepast. Er zijn wat uitzonderingen, zoals in India en China, en onze busbaan van begin deze eeuw langs de N247 bij Monnickendam. Maar meestal waagt men er zich niet aan, zelfs niet bij bijzonder dikke slappe lagen. Zo is er in Lissabon een paalmatras op meer dan 50 m lange palen. Er is wel veel onderzoek gedaan naar palen op kleef. Interessant is bijvoorbeeld het werk van Cao et al. (2016), zie figuur 7. De rekken in hun veldmetingen nemen afwisselend af en toe. Zij verklaren dat als volgt:

1. Toename van belasting op de palen laat de palen zakken. Dit geeft een afname van de verschilzettingen tussen paaldeksels en consoliderende slappe grond tussen de palen. Hierdoor neemt de rek in de geokunststof af.
2. Na het zetten van de palen wordt een deel van de axiale belasting op de palen overgedragen op de omliggende slappe grond. Hierdoor gaat die slappe grond zakken en neemt de rek in de geokunststof wapening toe.

Dit proces herhaalt zich vervolgens in fasen 1a en 2a, zie figuur 7. Als de palen zich te slap gedragen in vergelijking met de omliggende slappe grond, dan mag er niet worden gerekend met boogwerking.

De inzichten over hoeveel stijver de palen moeten zijn dan de omliggende grond verschillen sterk. De auteurs van dit artikel vinden dat er met boogwerking mag worden gerekend als de palen-grond ratio 50-100 is of groter (Han, 2015). Dat wil zeggen: $k_p / k_s > 50$ tot 100, waarbij $k_p = F_p / (s_p \cdot A_p)$ met F_p (kN) de totale axiale paalbelasting, s_p (m) de zetting van de paaldeksel, A_p (m^2) het oppervlak van de paaldeksel, $k_s = \sigma_s / z$ met s (kPa) de gemiddelde belasting op de slappe grond en z (m) de zetting van de grond. Dit betekent meestal dat steenkolommen niet voldoen, en mixed-in-place kolommen wel. Deze eis is strenger dan die van CUR 226 ($k_p / k_s \geq 10$).

WATER

Het komt internationaal nauwelijks voor dat de aardebaan geheel of gedeeltelijk onder de grondwaterspiegel ligt. Juist in Nederland gebeurt het wel eens, hoewel de rekenregels van CUR 226 hiervoor niet zijn gevalideerd. Valideren valt namelijk niet mee, aangezien er nauwelijks metingen van paalmatrassen zijn die deels of geheel onder grondwater liggen. Een uitzondering vormen de metingen van Van Eekelen et al. (2021), en deze metingen lopen nog. Franse, Amerikaanse en Nederlandse onderzoekers hebben eerder al eens gemeten dat heftige regenval een (tijdelijke) invloed heeft op de boogwerking. Song et al. (2018) lieten met experimenten zien dat de boogwerking minder kan worden als de aardebaan voor een belangrijk deel onder de freatische lijn ligt. Deltares is momenteel schaalproeven aan het uitvoeren met wisselende waterstanden.

Verticale deformatie maaiveld

Er wordt maar weinig analytisch gerekend aan zettingen of zettingsverschillen die op maaiveldniveau optreden. Veel vaker worden vervormingseisen gesteld aan de verschilzettingen op het niveau van de geokunststof of de rekken van het geokunststof. Dat rekent namelijk veel eenvoudiger. Uitzonderingen zijn de rekenmodellen van Rui et al. (2020, 2D), Filz et al. (2019) en onze eigen oude CUR 226 uit 2010. Voor dit laatste was een 3D -uitbreiding gemaakt voor paalmatrassen van het werk van Peck (1969).

SPREIDKRACHTEN

De meeste ontwerprichtlijnen (Duits, USA, Brits, Nederlands) schrijven voor hoe spreidkrachten moeten worden meegenomen langs de randen van de paalmatras. Zeker voor hoge aardebanen heeft dit veel impact op het geokunststof-ontwerp. Fahmy (2008 en 2019) liet met proeven en numeriek onderzoek zien dat de spreidkrachten mogelijk worden overschat, omdat onder andere het effect van de stijfheid van de ondergrond wordt onderschat. Duitsland heeft in de EBGEO Fahmy's model overgenomen en rekent daarom met minder spreidkrachten.

Numerieke berekeningen

Vrijwel alle landen voeren numerieke berekeningen uit om het volgende te bepalen:

– Vervormingen en buigende momenten in de palen. Dit is vooral belangrijk onder taluds, of bij horizontale grondverplaatsingen ten gevolge van bouwactiviteiten.
– Naar globale stabiliteit wordt in de meeste landen niet of nauwelijks gekeken. Dat is niet helemaal terecht. Onderzoekers en incidenten bij praktijkprojecten toonden onder andere instabiliteit aan door overschrijding van het opneembaar buigend moment of dwarskracht van de palen, door het kantelen van de palen of het roteren van paaldeksels. Limit equilibrium modellen (zoals Bishop) overschatten de veiligheid van paalmatrassen, vooral als de palen bezwijken door buigend moment of rotatie. Numerieke berekeningen worden daarom steeds vaker ingezet voor dit doel.
– Complexe geometrieën of complexe constructieprocessen.
– Gevolgen van horizontale belastingen, zoals verkeersbelastingen.

Bronnen

– Cao, W.Z., Zheng, J.J., Zhang, J. & Zhang, R.J., 2016. Field test of geogrid-reinforced and floating pile-supported embankment. Geosynthetics International, 2016, 23(5): 348-361.
– CUR 226, 2016. Ontwerprichtlijn paalmatrassystemen. CROW – CBRCurnet.
– CUR 226, 2010. Ontwerprichtlijn paalmatrassystemen. CUR Bouw & Infra.
– Van Eekelen, S.J.M., Zwaan, R., Nancey, A, Hazenkamp, M., Jung, Y.-H., 2021. Veldmetingen in een onderwater paalmatras met geotextiel wapening. GeoKunst, GeoTechniek, juni 2021, 54-59.
– Van Eekelen, S.J.M. en J. Han (Eds.), 2020a. Special Issue on Geosynthetic-reinforced pile-supported embankments. Geosynthetics International, Volume 27, no. 2. *https://www.icevirtuallibrary.com/toc/jgein/27/2* en *https://www.icevirtuallibrary.com/toc/jgein/27/3.*
– Van Eekelen, S.J.M. en J. Han, 2020b. Geosynthetic-reinforced pile-supported embankments: state of the art. Geosynthetics International, Volume 27, no. 2, pp 1-30, *https://doi.org/10.1680/ jgein.20.00005.*
– Van Eekelen, S.J.M., 2015. Basal Reinforced Piled Embankments. PhD thesis, TU Delft, Delft. *http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3A492dc4f3-9345-439e-9268-7c27c57e110b/.*
– 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., Lodder, H.J. & Van Tol, A.F., 2012. Model experiments on piled embankments Part I. Geotextiles and Geomembranes, 32: 69-81.
– Fahmy, G.S., 2008. Lateral spreading in basal reinforced embankments supported by pile-like elements. PhD thesis, Schriftenreihe Geotechnik. Heft 20. Universität Kassel, Germany.
– Fahmy, G.S., 2019. Reinforced Embankments on Soft Soil, Focus on Lateral Spreading. In: Proceedings of GeoMeast 2018, Giza, Greater Cairo, Egypt. Choudhury, D. et al. (Eds.), SUCI, pp. 53–61.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-01920-4_5.
– Filz, G.M., Sloan, J. A., McGuire, M.P., Smith, M., and Collin, J., 2019. Settlement and vertical load transfer in column-supported embankments. J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 145(10): 04019083-1 to 15.
– Girout, R., Blanc, M., Thorel, L., Fagundes, D.F. & Almeida, M.S.S., 2016. Arching and Deformation in a Piled Embankment: Centrifuge Tests Compared to Analytical Calculations. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Volume 142 Issue 12.
– Han, J., 2015. Principles and Practice of Ground Improvement, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, ISBN: 978-1-118-25991-7, 432p.
– Han, J., Wang, F., Al-Naddaf, M., and Xu, C., 2017. "Progressive development of soil arching with displacement." ASCE International Journal of Geomechanics, 17(12), 04017112-1 to 12.
– Heitz, C., 2006. Bodengewölbe unter ruhender und nichtruhender Belastung bei Berücksichtigung von Bewehrungseinlagen aus Geogittern. PhD Thesis, Schriftenreihe Geotechnik, Uni Kassel, Heft 19.
– Iglesia, G.R., Einstein, H.H. & Whitman, R.V., 2014. Investigation of Soil Arching with Centrifuge Tests. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 140(2).
– Iglesia, G.R., Einstein, H.H., and Whitman, R.V., 1999. Determination of vertical loading on underground structures based on an arching evolution concept. Geo-Engineering for Underground Facilities, G. Fernandez and R. A. Bauer, eds., ASCE, Reston, VA, 495–506.
– Iglesia, G.R., 1991. Trapdoor experiments on the centrifuge: A study of arching in geomaterials and similitude in geotechnical models. Ph.D. thesis, Dept. of Civil Engineering, MIT, Cambridge, Massachusetts, USA.

– Khansari, A. & Vollmert, L., 2020. Load transfer and deformation of geogrid-reinforced piled embankments: field measurement. Geosynthetics International, Special Issue GRPS Embankments, *https://doi.org/10.1680/jgein.19.00002.*
– King, D.J., Bouazza, A., Gniel, J.R., Rowe, R.K. & Bui, H.H., 2017. Serviceability design for geosynthetic reinforced column supported embankments. Geotextiles and Geomembranes, 45(4): 261-279.
– Lee, T., Van Eekelen, S.J.M., Jung, Y.-H., 2020. Numerical verification of the Concentric Arches model for geosynthetic-reinforced pile-supported embankments: applicability and limitations. In: Can. Geotech. Canadian Geotechnical Journal. 58(3): 441-454. *https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0625.*
– Lehn, J., Moormann, C. & Aschrafi, J., 2016. Numerical Investigations on the Load Distribution over the Geogrid of a Basal Reinforced Piled Embankment under Cyclic Loading. Advances in Transportation Geotechnics 3. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), Guimarães, Portugal. Procedia Engineering, 143: 435–444, Elsevier.
– Peck, R.B., 1969. Deep excavations and tunneling in soft ground. Proc. ICSMFE7, Mexico City, 225-290.
– Van der Peet, T.C. and Van Eekelen, S.J.M., 2014. 3D numerical analysis of basal reinforced piled embankments. Proceedings of 10ICG, September 2014, Berlin, Duitsland.
– Pham, T.A., Dias, D., 2021. Comparison and evaluation of analytical models for the design of geosynthetic-reinforced and pile-supported embankments. Geotextiles and Geomembranes, Volume 49, Issue 3, June 2021, pp 528-549.
– Rui, R., Han, J., Van Eekelen, S.J.M. & Wan, Y., 2019. Experimental Investigation of Soil-Arching Development in Unreinforced and Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported Embankments. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(1): 04018103,e10.1061/(ASCE) GT. 1943-5606.0002000.
– Rui, R., Zhai, Y. Han, J., Van Eekelen, S.J.M., & Chen, C., 2020. Deformations in Trapdoor Tests and Piled Embankments. Geosynthetics International, Special Issue GRPS Embankments, Volume 27 Issue 2, April, 2020, pp. 219-235 *https://doi.org/10.1680/jgein.19.00014.*
– Sondermann, W., Topolnicki, M., 2014. Bemessung von Lastverteilungsschichten mit unterschiedlichen Berechnungsmodellen und Vergleich mit In-situ Messungen. 33. Baugrundtagung, 23-26.09. 2014, Berlijn, Duitsland.
– Wijerathna, M. & Liyanapathirana, D.S., 2020. Load transfer mechanism in geosynthetic reinforced column-supported embankments, Geosynthetics International, Special Issue GRPS Embankments, 27:3, 236-248, *https://doi.org/10.1680/jgein.19.00022.*
– Zaeske, D., 2001. Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen. PhD Thesis, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Gh Kassel, Kassel, Germany. Heft 10.
– Zhang, Z., Wang, M., Ye, G.-B. & Han, J., 2019. A novel 2D-3D conversion method for calculating maximum strain of geosynthetic reinforcement in pile-supported embankments. Geotextiles and Geomembranes, 47(3): 336-351. ●

enviro QUALITY CONTROL BV

Kwaliteit met zekerheid

Geaccrediteerd sinds 2005 door de Raad voor Accreditatie als type A onafhankelijke inspectie-instelling op basis van de NEN-ISO/IEC 17020, RvA registratie I188 voor het uitvoeren van inspecties bij:

- Aanleg van onder- en bovenafdichtingen van stortplaatsen
- Aanleg van een werk waarin IBC-bouwstof wordt toegepast voor protocol AS6901
- Tijdens de gebruiksfase van een IBC-werk voor protocol AS6902
- Levensduuronderzoek op kunststoffolie en lasverbindingen

Inspectie in het werk

Testen op het werk

Beproeven in het laboratorium

+31 30 244 1404 **www.eqc.nl**

OOMS-VOEG

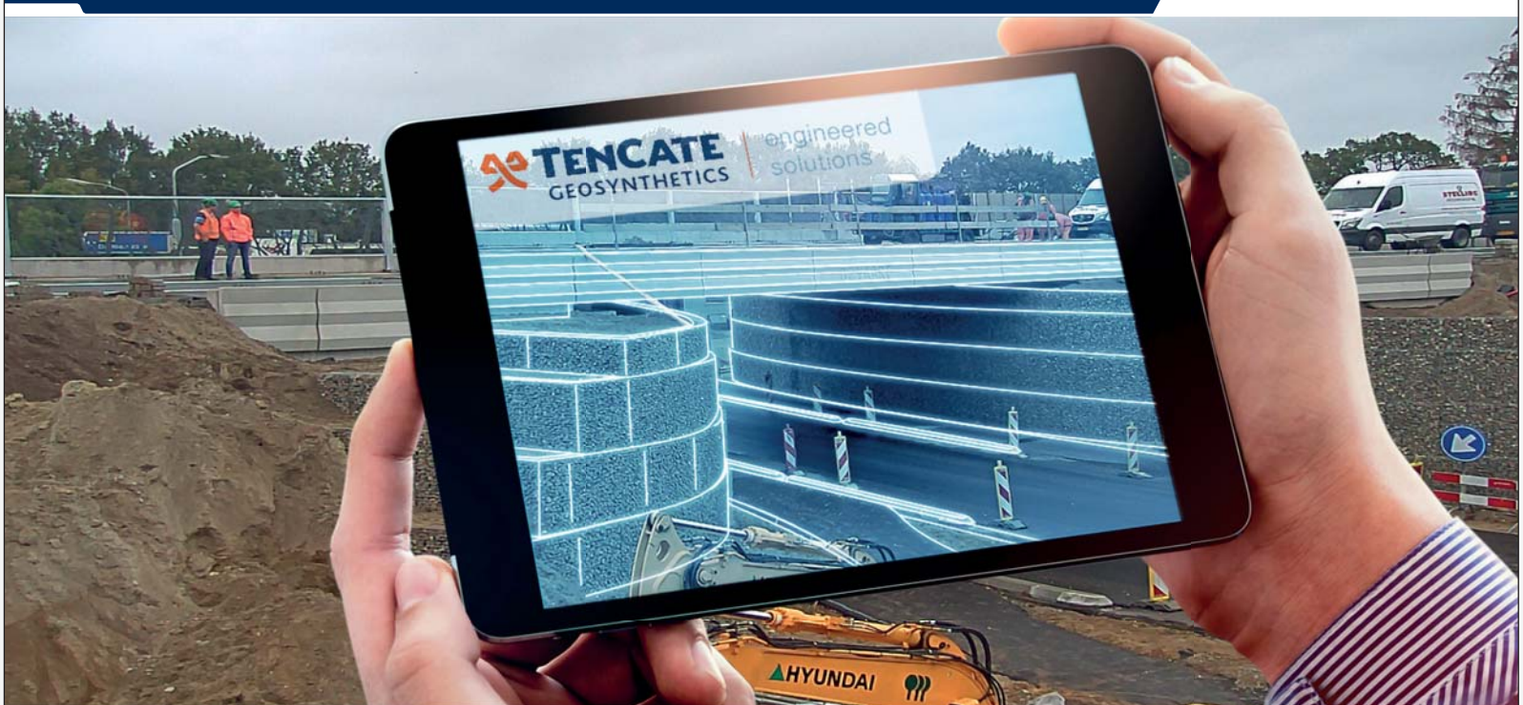
Toepassing van de Ooms-voeg bij bruggen, viaducten en tunnels heeft voordelen voor beheerder, gebruiker en omwonende. De eerste voeg is toegepast in 2003 op de A50 en de techniek heeft zich bewezen op tal van andere plaatsen in Nederland.

- Reductie van geluid en trillingen geeft comfort en minder omgevingshinder
- Geen spoorvorming maakt het wegdek veilig
- Hoge kosteneffectiviteit doordat onderhoud niet nodig is

Strukton Civiel

Meer informatie:
www.ooms.nl/specialismen
www.struktonciviel.nl

YOUR KNOWLEDGE PARTNER IN GEOSYNTHETICS



Europalaan 206
7559 SC Hengelo
Nederland

+31 (0)546 544 811
geonederland@tencategeo.com
www.tencategeo.nl

twitter: @tencate_geo_nl

TENCATE GEOSYNTHETICS