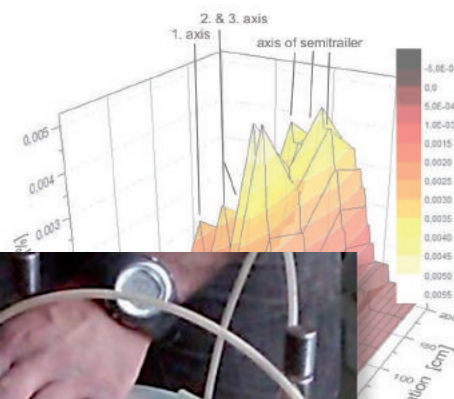
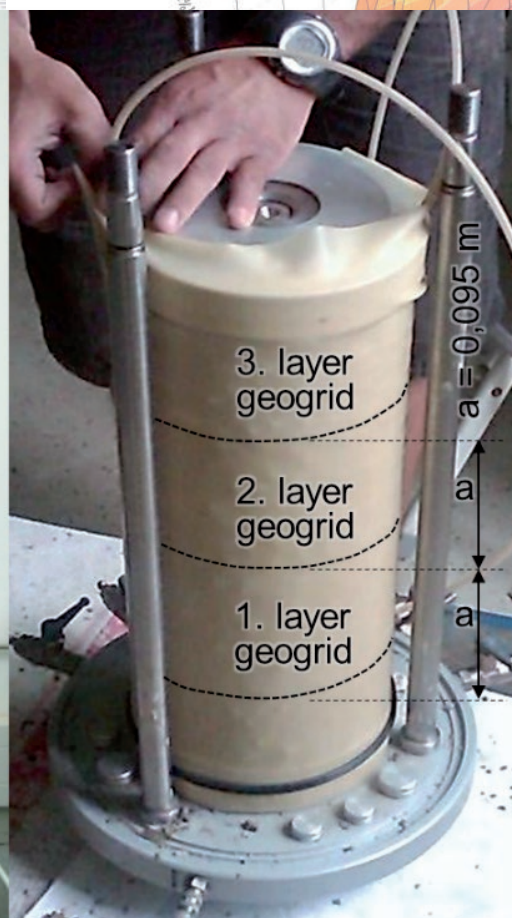
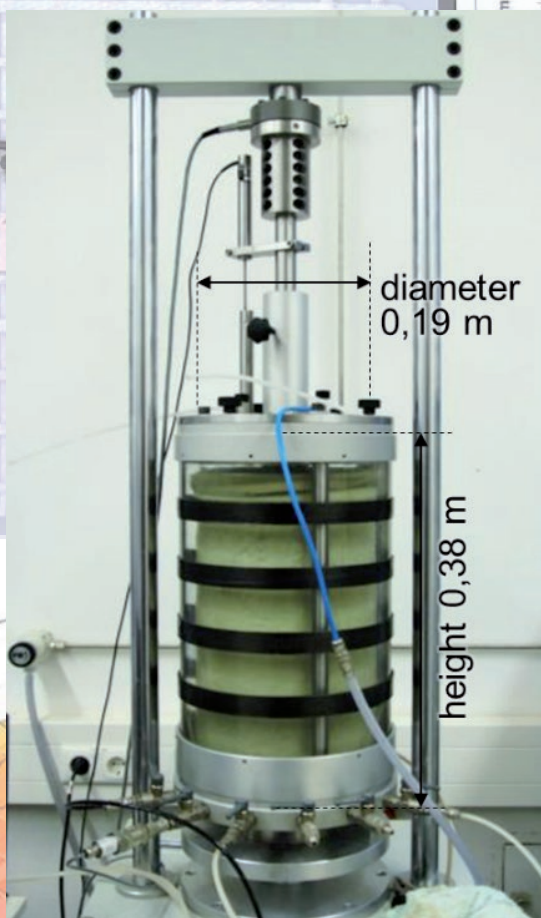
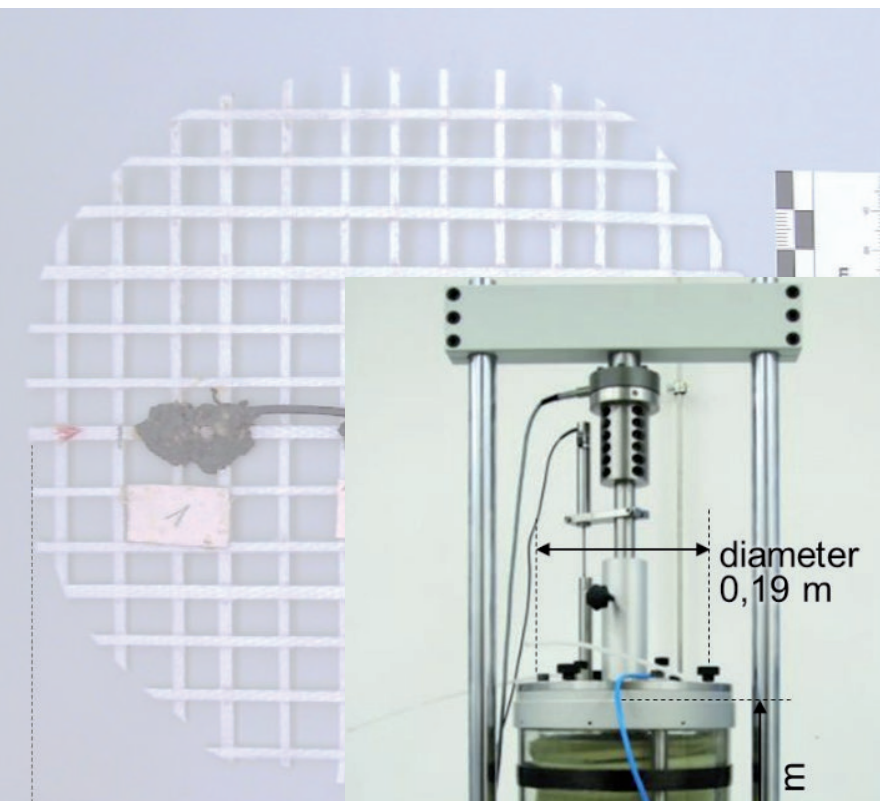
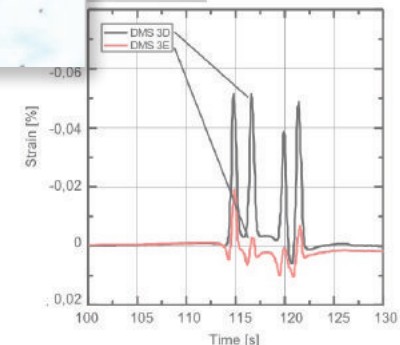
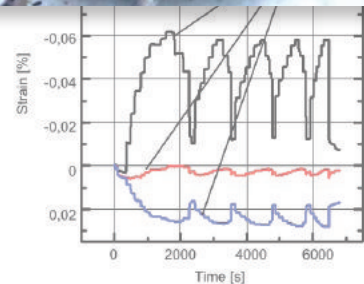
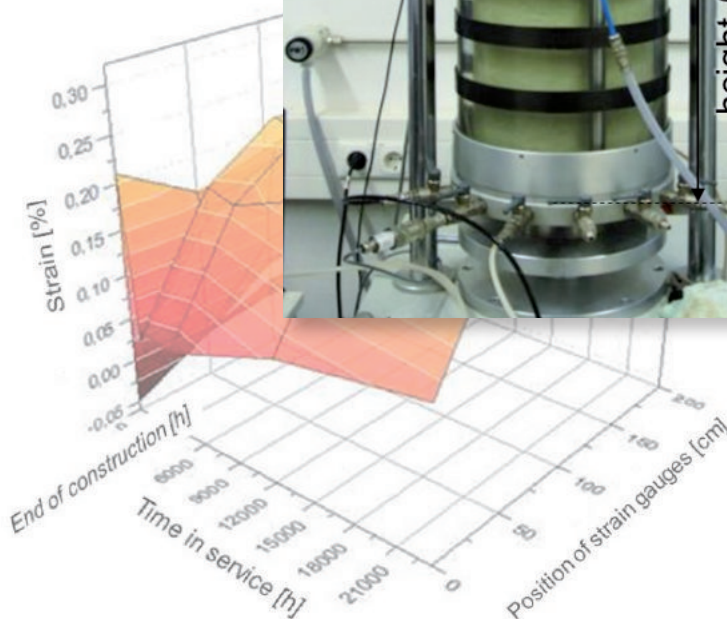
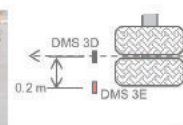




bottom layer of strain gauges



top layer of strain gauges



**Hoe geogrids de prestaties van  
wegen verbeteren (deel 2)**

**Bovenafdichting passieve  
wand constructie**

## Sub-Sponsors



### 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 GmbH & Co. KG

Gewerbestr. 2  
32339 Espelkamp-Fiestel – Germany  
Tel. +49 5743 41-0  
Fax +49 5743 41-240  
info@naue.com  
www.naue.com

## 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  
Geopex Products (Europe) BV,  
Goudarak  
GeoTec Solutions BV, Den Dungen.  
GID Milieutechniek, Velddriel  
Huesker Synthetic BV, Den Dungen  
InfraDelft BV, Delft

Intercodam Infra BV, Almere  
Juta Holland BV, Oldenmarkt  
Kiwa NV, Rijswijk  
Kwast Consult, Houten  
Low & Bonar, Arnhem  
Movares Nederland BV, Utrecht  
Naue GmbH & Co. KG,  
Espelkamp-Fiestel  
Ooms Civiel BV, Avenhorn  
Prosé Geotechniek BV,  
Leeuwarden  
Quality Services BV, Bennekom  
Robusta BV, Genemuiden  
S&P Clever Reinforcement  
Company Benelux, Aalsmeer  
T&F Handelsonderneming BV,  
Oosteind  
Ten Cate Geosynthetics  
Netherlands BV, Nijverdal  
Tensor International,  
's-Hertogenbosch  
Terre Armee BV, Waddinxveen  
Vulkan-Europe BV, Gouda  
Witteveen + Bos, Deventer



### TenCate Geosynthetics

Hoge Dijkje 2  
7442 AE Nijverdal  
Tel. +31 (0)546-544 811  
Fax +31 (0)546-544 470  
geonederland@tencate.com  
www.tencate.com/geonederland

## Mede-ondersteuners



### 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



### Ooms Construction / Strukton Civiel

Scharwoude 9  
1634 EA Scharwoude  
Tel. +31 (0)229 54 77 00  
info@ooms.nl  
www.ooms.nl

## Enka®solutions

# Enkagrid® voor stabilisering van funderingslagen en grondlichamen

Enkagrid kent een breed assortiment van stijve en flexibele geogrids tot zeer hoge treksterkte en staat voor efficiëntie en betrouwbaarheid voor elk project waar grondstabilisering een vereiste is.



### Low & Bonar

Westervoortsedijk 73 / 6827 AV Arnhem / T +31 85 744 1300  
info@enkasolutions.com / www.enkasolutions.com

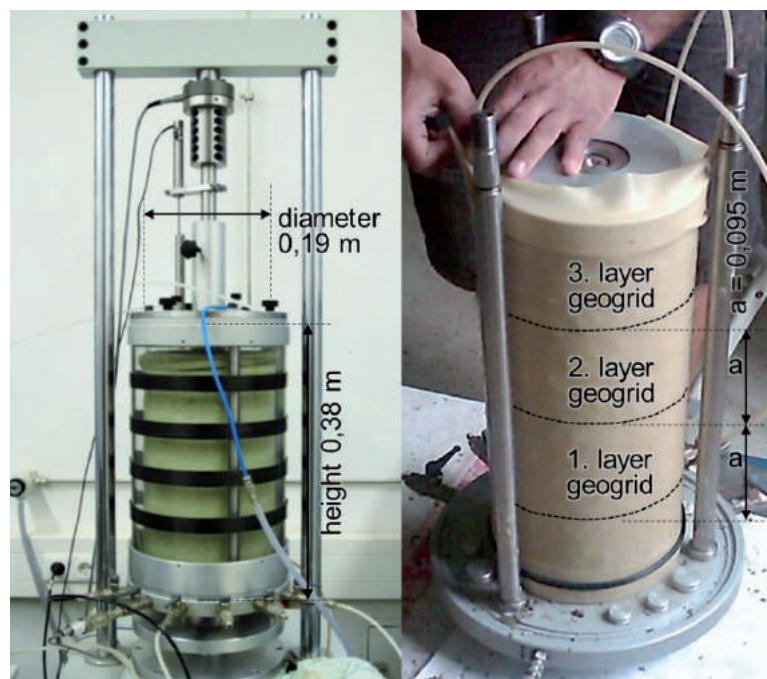
**Beste Geokunst lezer,**

Op 16 november zagen wij elkaar bij de NGO lezingenmiddag en de jaarlijkse ALV. Een drietal lezingen boden ons de laatste stand der techniek op het gebied van geokunststoffen. Rutger Holtes trapte af met een historisch overzicht en een blik op de toekomst van geotextielen. Rutger heeft kort geleden zijn actieve werkzaamheden beëindigd en is met pensioen. Namens NGO sprak Milan Duškov een dankwoord uit: Rutger was jarenlange actief in het vakgebied, zowel nationaal als internationaal. Hij is jarenlang zeer betrokken geweest bij NGO, en heeft veel bijgedragen in diverse functies. Ook van deze plaats: dank je wel Rutger!

Vervolgens nam Adam Bezuijen ons mee in het lopende onderzoek aan de Universiteit van Gent. Dit keer over natte waterbouw: de invloed van vallende stenen op geotextiel, bij de aanleg van filterconstructies. Adam toonde de invloed van het verschil tussen vlies en weefsel en de vorm van de vallende stenen. Tenslotte ging Christ van Gurp in op de nieuwe publicatie 'Geokunststoffen als funderingswapening in ongebonden funderingslagen': één van de laatste publicaties van SBRCURnet. Deze publicatie geeft een nieuwe ontwerpmethode voor onverharde wegen, straatsteen- en asfaltverhardingen. Met veel kennis wijzer konden we daarna de onderlinge contacten aanhalen bij de netwerkborrel.

En dan nu naar de inhoud van deze GeoKunst, met twee lezenswaardige artikelen over de berekening van de bovenafdichting bij hooggefundeerde viaducten op gewapende grond en een vervolg op het artikel over funderingswapening in het vorige nummer.

Een viaduct kan hoog worden gefundeerd op een landhoofd van gewapende grond. Dan moet wel de gewapende grond de ruimte hebben om enkele centimeters horizontaal te vervormen. Hiervoor kan een spouw worden toegepast tussen het voorzetpaneel en de gewapende grond. Deze spouw moet aan de bovenzijde worden afgedicht, wat kan gebeuren met een geotextiel. Om de trekkrachten in het afdichtingsgeotextiel te berekenen heeft Piet van Duijn het analytische Concentric Arches (CA) model gebruikt. Omdat Suzanne van Eekelen dit CA-model ontwikkelde voor paalmatrassen, is nadere verificatie verricht met numerieke analyses. Piet van Duijn beschrijft in het eerste artikel het gehanteerde model en de numerieke verificaties en licht het verhaal toe met een voorbeeldberekening.



Het tweede artikel van Lars Vollmert en Jörg Klomp maker is een vervolg op hun artikel in de vorige GeoKunst. Deel 1 ging in op de theoretische achtergronden van funderingswapening. Deel 2, in deze GeoKunst, valideert de conclusies van deel 1 over het gedrag van de hele wegverharding. In het bijzonder wordt ingegaan op de resultaten van proeven onder gecontroleerde laboratoriumomstandigheden. Het stabiliserende effect van funderingswapening blijkt al op te treden bij zeer kleine rekken. Hiermee draagt funderingswapening bij aan een langere bruikbaarheid en levensduur van een wegconstructie.

Veel leesplezier met deze GeoKunst,

*Erik Kwast*

*Eindredacteur GeoKunst*

**Colofon**

**Geokunst wordt uitgegeven door de Nederlandse Geotextiel organisatie. 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  
Redactieraad

Productie

E. Kwast  
A. Bezuijen  
P. van Duijn  
M. Duškov  
S. van Eekelen  
P. ter Horst  
Uitgeverij Educom

Een abonnement kan worden  
aangevraagd bij:  
**Nederlandse Geotextielorganisatie**  
Tel. 065 - 064 6760  
mail@ngo.nl

[www.ngo.nl](http://www.ngo.nl)

# Bovenafdichting passieve wand constructie

ing. Piet van Duijnen  
GeoTec Solutions



ing. Constant Brok  
Huesker B.V.



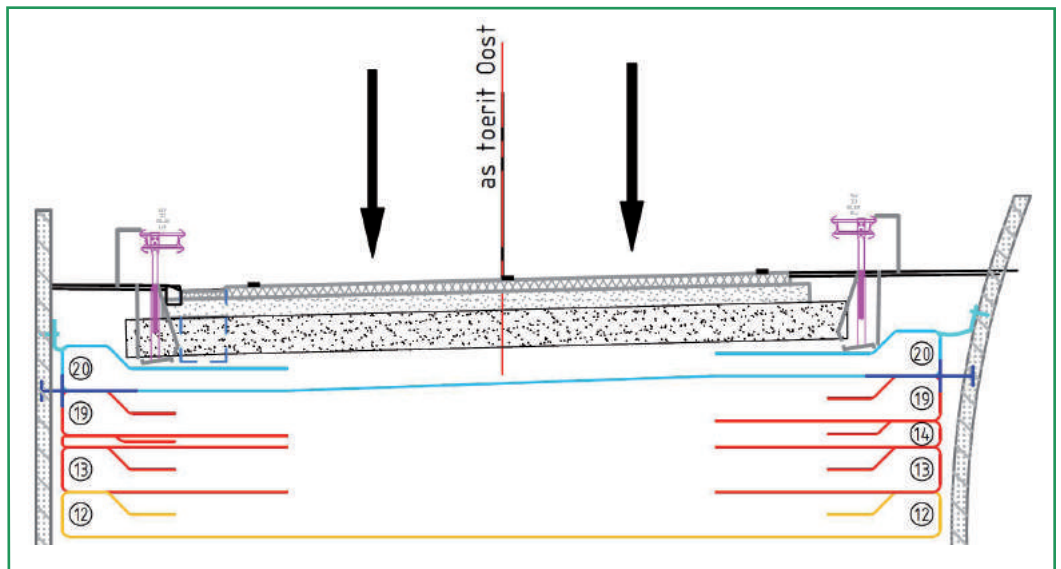
Sjoerd Bouwman  
GeoTec Solutions



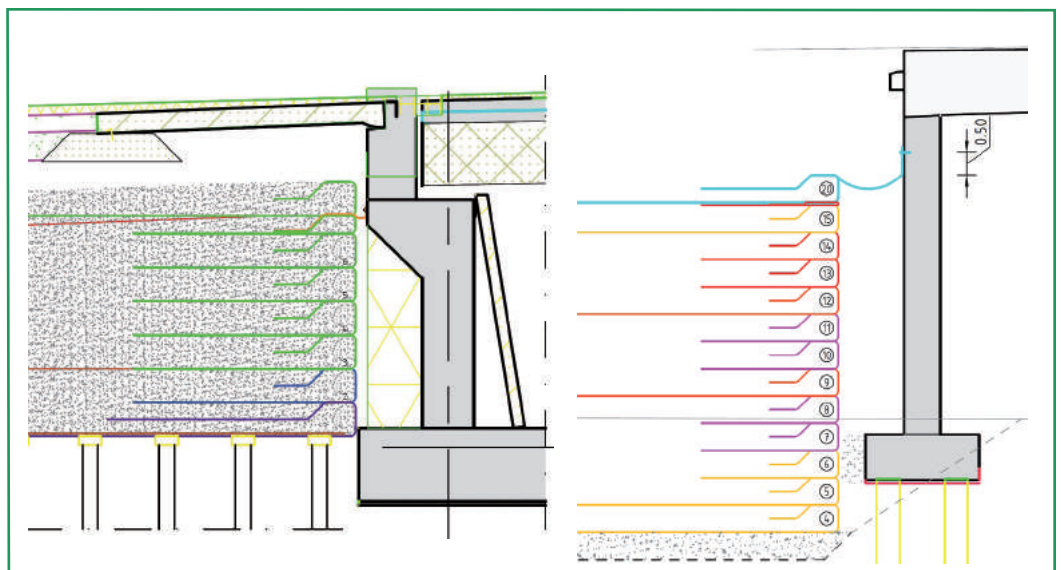
## Inleiding

Het gebruik van een passieve wandconstructie voor een landhoofd, een betonnen voorzetpaneel in combinatie met gewapende grond, wordt steeds vaker toegepast. Hierbij draagt de gewapende grond de belasting van de constructie en dient het betonpaneel ter aankleding en bescherming. Tussen de prefab voorzetwand en de gewapende grond constructie, die is gebouwd met de terugslag methode, is een holle ruimte, ofwel een zogenaamde "spouw" noodzakelijk. Deze spouw heeft een dubbele functie. Ten eerste kunnen de maatvoeringstoleranties en de vervormingen tijdens de bouw worden gecorrigeerd. Ten tweede kunnen vervormingen in de tijd door kruip van de geogrids ongehinderd optreden. Deze vervormingen geven dan geen belasting op de wand. De spouw wordt aan de bovenzijde afgedicht, anders zakt het zand tussen de gewapende grond en het betonpaneel, zie figuur 1a, 1b en 1c. De bovenafdichting wordt gerealiseerd door de spouw af te dekken met een geotextiel, bijvoorbeeld Stablenka 100, gecombineerd met een non woven in langsrichting.

Door GeoTec Solutions is in samenwerking met Huesker B.V. en Voets Gewapende Grond een berekeningsmethode voor het dimensioneren van deze bovenafdichting opgesteld, waarbij gebruik is gemaakt van het model van Van Eekelen [2015]. Deze methode is gevalideerd door een vergelijking te maken met numerieke analyses. Ook is er zeer primitief geëxperimenteerd hoe een bovenafdichting zich in de praktijk gedraagt. Dit laatste onderzoek is verhelderend geweest in de werking en de effecten die optreden, maar nog onvoldoende voor publicatie.



Figuur 1a - Bovenafdichting bij 2 verschillende type prefab voorzetwanden



Figuur 1b & 1c - Ontlastconstructie met kleine spouw (links) en grote spouw (rechts)

## Samenvatting

Een viaduct kan hoog worden gefundeerd op een landhoofd van gewapende grond. Dan moet wel de gewapende grond de ruimte hebben om enkele centimeters horizontaal te vervormen. Hiervoor kan een spouw worden toegepast tussen het voorzetpaneel en de gewapende grond. Deze spouw moet aan de bovenzijde worden afgedicht, wat kan gebeuren met een

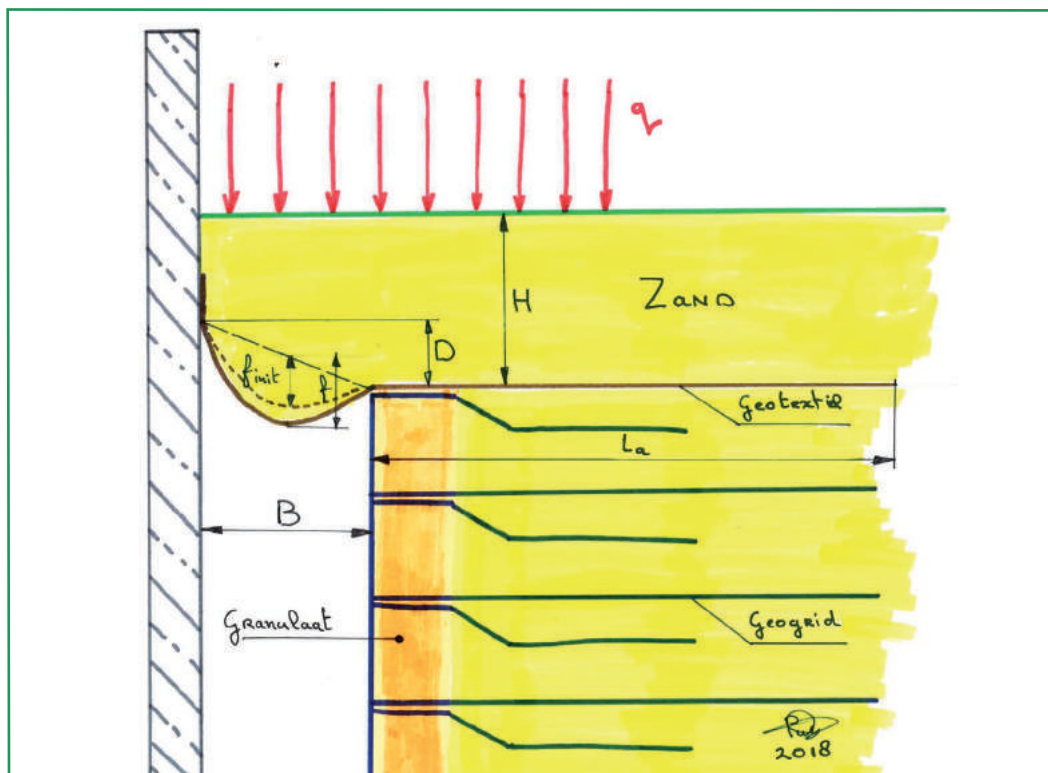
geotextiel. Om de trekkracht in het afdichtings-geotextiel te berekenen, wordt het Concentric Arches (CA) model toegepast, dat Van Eekelen [2015] ontwikkelde voor paalmatrassen. De resultaten worden vergeleken met Plaxis berekeningen. Hieruit blijkt dat voor spouwbreedten groter dan 1,0 m het CA model representatieve resultaten geeft.

Dit artikel bevat de analyse van de krachten in het geotextiel waarmee de spouw wordt afgedekt. De analytische methode bestaat uit 4 stappen, waarbij de eerste 3 stappen in dit artikel zijn uitgewerkt. Stap 4, de dimensionering van de bevestiging van het geotextiel aan de wand valt buiten de scope. In stap 1 wordt de belasting op het geotextiel berekend, waarbij rekening wordt gehouden met boogwerking. De boogwerking is gebaseerd op het concentric arches (CA) model van Van Eekelen [2015]. Het CA model is afgeleid voor paalmatrassen, waarbij een combinatie van concentrische bolvormige bogen en 2D bogen een groot deel van de belastingen transposeert naar de paaldeksels (vergroete paalkoppen). Van Eekelen [2015] geeft het CA model in een 3D en een 2D versie: 3D voor paalmatrassen met palen en 2D voor 2D-paalmatrassen, dus met balken op de palen of diepwanden in plaats van palen. De in dit artikel beschouwde bovenafsluitingen wijken op een aantal punten af van de basis van het CA model, denk bijvoorbeeld aan:

- Van het CA model is de 2D formulering geadopteerd, echter in dit geval heeft de 'paaldeksel' aan de ene zijde een oneindige breedte en bestaat de 'paaldeksel' aan de andere zijde uit een verticale wand.
- Het CA model gaat uit van horizontaal dragende tegels welke in verhouding tot de ondergrond tussen de deksels als oneindig stijf en niet vervormbaar worden beschouwd. Daarentegen is bij een bovenafsluiting het dragende element aan één zijde de verticale wand, en aan de andere zijde de enigszins vervormbare "kop" van een gewapende grondwand. Vraag is hoe in dit geval de waarde moet worden bepaald van de equivalenten voor de hart-op-hart afstand  $s_x$  van de paalmatras en de breedte van de paalmatras-paaldeksel, die in dit geval bestaan uit een wand en een erg breed gewapend grondmassief.
- Bij een paalmatras wordt uitgegaan van symmetrie. De beschouwde boog wordt omringd door bogen, zodat in het hart van de deksel de horizontale randvoorwaarden duidelijk zijn. Bij een bovenafsluiting is dat totaal anders.

## Analytische berekening

De analytische analyse bestaat uit 4 stappen:  
1 Bepaling van de belasting op het geotextiel



Figuur 2 - Geometrie bovenafsluiting

- 2 Bepaling van de trekkracht in het geotextiel
- 3 Controle van de slip / uittrekkracht
- 4 Dimensionering bevestiging aan het beton

De dimensionering van de bevestiging aan de betonnen (voorzet)wanden (stap 4) valt buiten de scope van dit artikel.

Figuur 2 geeft de doorsnede van de bovenafsluiting. Het geotextiel wordt op de prefab wand gemonteerd met een klemstrip welke qua principe gelijk is aan een aansluiting van een folieconstructie op een wand. Vanuit oogpunt van installatie wordt de bevestiging circa 0,2 m boven de gewapende grond gemonteerd.

## Belasting

Wanneer het geotextiel boven de spouw meer verticale vervorming ondergaat dan de betonwand en de versterkte grond, dan zal er een drukboog ontstaan waardoor de verticale belasting op het geogrid reduceert. We nemen in dit artikel aan dat deze reductie van de verticale spanning op het geotextiel vergelijkbaar is met

hoe dat gebeurt in het 2D Concentric Arches (CA) model, dat is gemaakt voor paalmatrassen [van Eekelen, 2015, bladzijden 122-123 en CUR 226, 2016]. Deze aanname wordt verderop geverifieerd met numerieke berekeningen. We nemen de formules van het 2D CA model hier over:

$$F_{GRstr;p=0} = 2 \frac{P_{2D}}{K_p} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot L_{2D} \right)^{K_p} + \frac{1}{4} \cdot Q_{2D} \cdot L_{2D}^2 + F_{GRstr2;p=0} \quad (1)$$

$$P_{2D} = K_p \cdot H_{g2D}^{(1-K_p)} \cdot \gamma \cdot \left[ H - H_{g2D} \frac{K_p - 1}{K_p - 2} \right] \quad (2)$$

$$L_{2D} = 2 \cdot H_{2D} \quad \text{voor } H < \frac{1}{2} \cdot (s_x - b_{eq})$$

$$L_{2D} = s_x - b_{eq} \quad \text{voor } H \geq \frac{1}{2} \cdot (s_x - b_{eq}) \quad (3)$$

$$H_{2D} = \frac{s_x}{2} \quad \text{voor } H \geq \frac{s_x}{2}$$

$$H_{2D} = H \quad \text{voor } H < \frac{s_x}{2} \quad (4)$$

$$Q_{2D} = \frac{K_p \cdot \gamma}{K_p - 2} \quad (5)$$

$$F_{GRstr2;p=0} = \gamma \cdot H \cdot (S_x - b_{eq} - L_{2D}) \quad \text{voor } H < \frac{1}{2} \cdot (S_x - b_{eq}) \quad (6)$$

$$F_{GRstr2;p=0} = 0 \quad \text{voor } H \geq \frac{1}{2} \cdot (S_x - b_{eq})$$

De gemiddelde verticale belasting op het geogrid in kN/m<sup>2</sup> wordt berekend met:

$$Q_{boog} = \frac{\gamma \cdot H + q}{\gamma \cdot H} \cdot \frac{F_{GRstr2;p=0}}{S_x - b_{eq}} + f_{init} \cdot \gamma \quad (7)$$

Uit de Plaxis analyses blijkt dat bij spouwbreedten < 0,7 m de 2D boog op een andere locatie wordt ontwikkeld dan in eerste instantie wordt verwacht, zie Figuur 5. Het geotextiel krijgt zelfs meer belasting dan in de situatie zonder boogwerking:  $\gamma \cdot H + q$ . De boog lijkt zich juist op het geotextiel af te zetten. Paragraaf 3.3 en figuur 4 en 5 gaan hier verder op in. Voor spouwbreedten tussen 0 tot 0,7 m wordt hierom lineair geïnterpoleerd van 0% tot 100% boogwerking.

De verticale spanning op het geotextiel, zonder boogwerking is:

$$\sigma_v = (H + f_{init}) \cdot \gamma + q \quad (8)$$

De verticale belasting op het geotextiel wordt dan:

$$Q_{average} = \sigma_v - (\sigma_v - Q_{boog}) \cdot \frac{B}{0,7} \quad \text{voor } B < 0,7 \quad (9)$$

$$Q_{average} = Q_{boog} \quad \text{voor } B \geq 0,7$$

#### Kracht in geotextiel

Voor de berekening van de kracht in het geotextiel wordt gebruik gemaakt van de

basis vergelijking voor gebogen kabels onder een uniforme belasting [Bouma]. Conform Van Eekelen [2015] is de inverse-driehoekige belastingsverdeling logischer, maar gekozen is voor de conservatieve benadering:

$$f = \frac{q \cdot B^2}{8 \cdot T_h} \quad (10)$$

De z-coördinaat van het geotextiel kan berekend worden met:

$$z(x) = \frac{4 \cdot f \cdot (B \cdot x - x^2)}{B^2} + \frac{D}{B} \cdot x \quad (11)$$

De laatste term verdisconteert het hoogteverschil van het geogrid, voor het geval dat de bevestiging van het geogrid op het paneel een hoogte  $D$  boven de afwerkhoogte van de gewapende grond wordt gemonteerd.

Na enig herschrijven volgt:

$$z(x) = -\frac{4 \cdot f \cdot x^2}{B^2} + \frac{(4 \cdot f + D) \cdot x}{B} \quad (12)$$

De richtingscoëfficiënt is de eerste afgeleide:

$$z'(x) = -\frac{8 \cdot f \cdot x}{B^2} + \frac{(4 \cdot f + D)}{B} \quad (13)$$

De geometrische lengte van het geotextiel bij doorhang  $f$  kan eenvoudig berekend worden met:

$$L_{geo} = \int_{x=0}^B \sqrt{1 + z'(x)^2} \cdot dx \quad (14)$$

Indien de kabel initieel een doorbuiging heeft, kan de initiële lengte van de kabel met vergelijking (5) worden berekend door in de vergelijkingen (12) tot en met (14) voor  $f$  de

initiële doorbuiging  $f_{init}$  in te vullen.

Wordt op het initieel doorgebogen geotextiel een belasting ( $q$ ) aangebracht, dan zal door rek het geotextiel extra doorbuigen. De lengte verandering die in het geogrid optreedt wordt berekend met de wet van Hooke. Voor een segment van de kabel volgt dan:

$$dL(x) = \frac{T(x) \cdot L_{init}(x)}{EA} \quad (15)$$

De optredende trekkracht in het geotextiel voor coördinaat ( $x$ ) wordt berekend met:

$$T(x) = T_h \cdot \sqrt{1 + z'(x)^2} \quad (16)$$

De initiële lengte wordt berekend met de initiële doorbuiging  $f_{init}$ , ter onderscheid is daarom aan de eerste afgeleide van de zakking het subscript "init" toegevoegd.

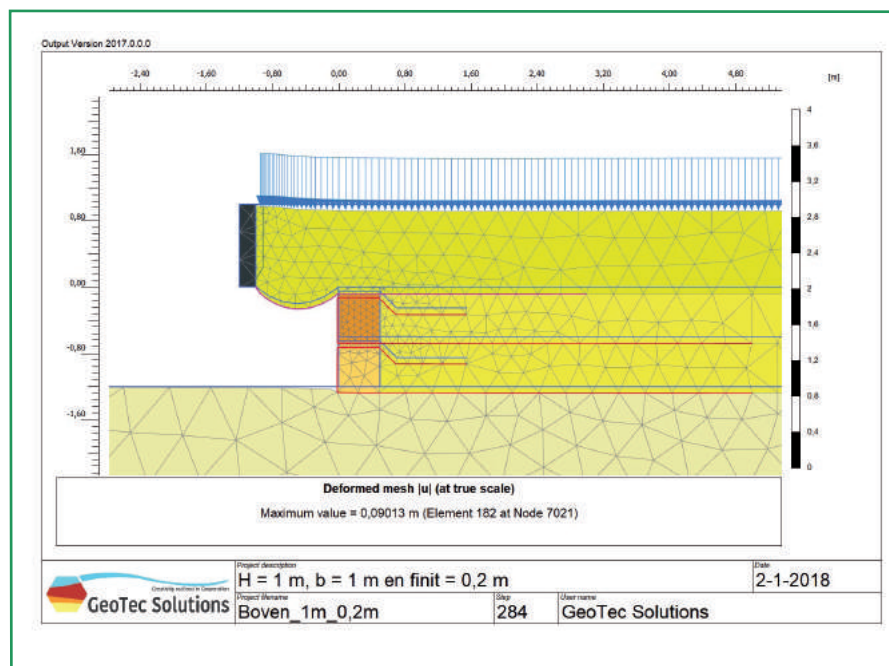
$$L_{init}(x) = \sqrt{1 + z'_{init}(x)^2} \cdot dx \quad (17)$$

Voor het gehele geotextiel is de lengte na belasten:

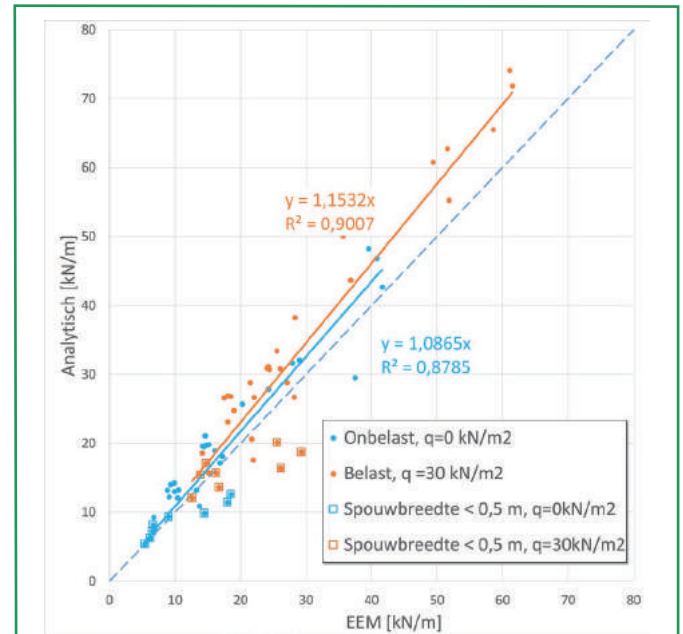
$$L_{con} = L_{init} + \frac{T_h}{EA} \cdot \int_{x=0}^B (\sqrt{1 + z'(x)^2} \cdot \sqrt{1 + z'_{init}(x)^2} \cdot dx) + 0,5 \cdot \frac{T_h}{EA} \cdot L_{anker} \quad (18)$$

Deze lengte noemen we de constitutieve lengte van de kabel, zijnde de initiële lengte + lengte verandering ten gevolge van de trekkracht.

De waarde van de onbekende  $T_h$  kan worden opgelost door de constitutieve lengte



Figuur 3 - Geometrie bovenafdichting



Figuur 4 - Vergelijking berekende trekkracht EEM versus analytische analyse

(vergelijking 16) gelijk te stellen aan de geometrische lengte (vergelijking 5), waarbij in beide vergelijkingen voor  $f$  de zakking wordt ingevuld na het belasten. De doorbuiging  $f$  na belasten kan berekend worden met vergelijking 1. Door iteratie wordt een oplossing verkregen. De verticale ontbonden kracht van het geogrid wordt berekend volgens:

$$T_v(x) = T_h \cdot z'(x) \tag{19}$$

Controle slip

Aan 1 zijde wordt het geotextiel verankerd in de grond. De berekening van de slip gebeurt volgens [CUR 198], vergelijking 3.61.

$$R_a = \sigma_v \cdot a' \cdot \tan(\varphi') \cdot L_a \tag{20}$$

De voorwaarde is dat de wrijvingscapaciteit  $R_a$  groter is dan de horizontale kracht  $T_h$ . Deze vergelijking geeft een overschatting van de benodigde ankerlengte. Circa de helft van het gewicht boven de spouw wordt immers getransponeerd, zodat de verticale spanningen op en daarmee de schuifspanning capaciteit van de verankering groter is dan vergelijking (20) doet vermoeden.

Validatie van het model

Het analytische model is gevalideerd door voor diverse geometrieën een numerieke analyse uit te voeren. Hiervoor is gebruik gemaakt van het computer programma Plaxis. Omdat de bovenafdichting veelal wordt toegepast boven een verticale wand van gewapende grond, zijn 2 lagen gewapende grond gemodelleerd, waarop de bovenafdichting wordt gemaakt. Van de voorzetwand is alleen het deel tussen maaiveld tot het niveau waarop het geogrid wordt vastgemaakt aan de strip gemodelleerd. In de berekeningen waarbij het geogrid initieel doorhangt, is de vorm van de geogrid (parabolisch) gelijk aan het analytische model aangehouden (zie figuur 3).

Validatie

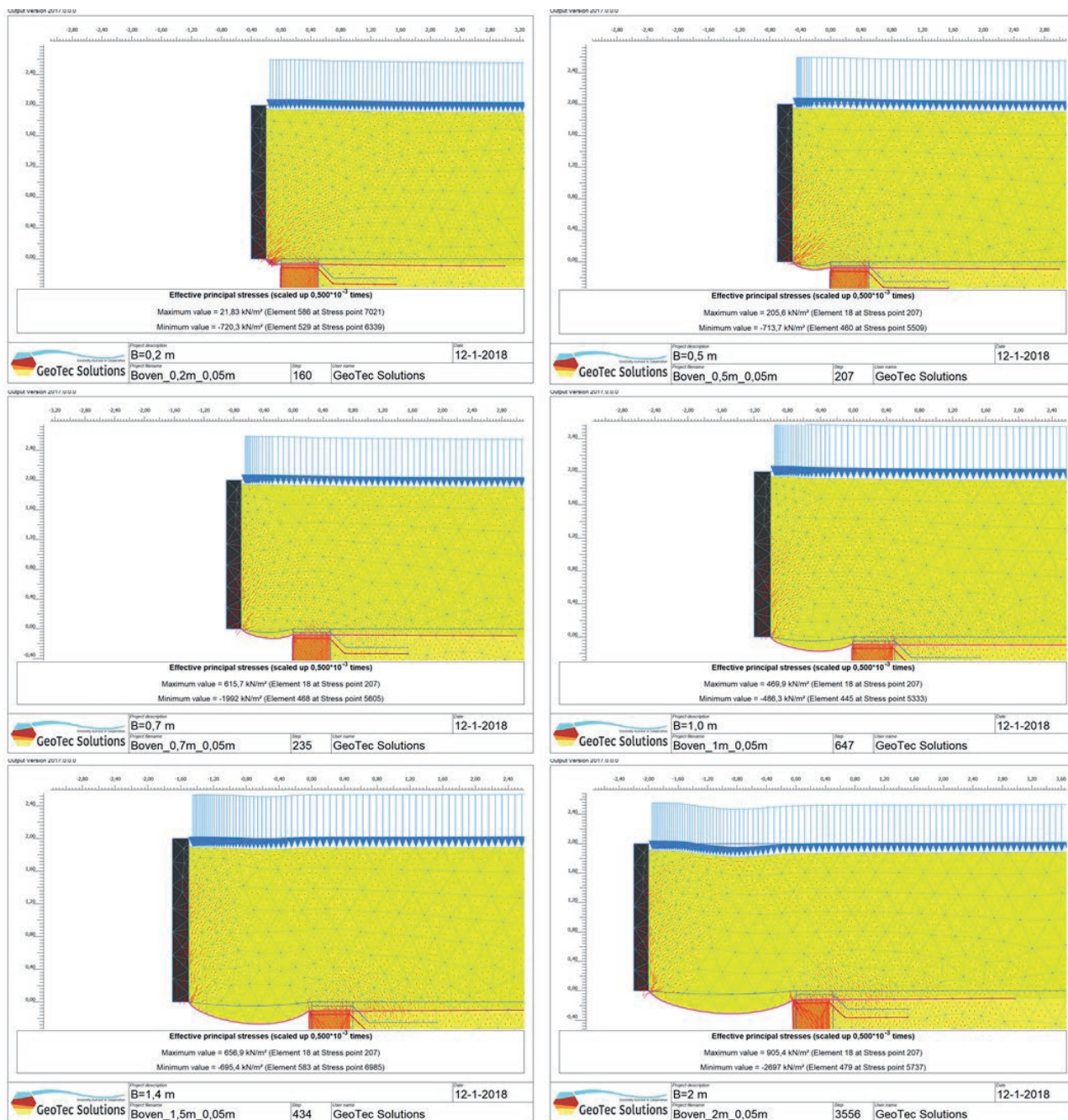
Figuur 4 geeft de vergelijking weer voor 35 analyses. Op de X-as is de berekende maximale trekkracht met het Plaxis model weergegeven en op de Y-as de maximale kracht berekend met het analytische model. In het ideale geval ligt de marker exact op de gestippelde diagonaal.

We zien dat:

- De overeenkomst tussen de analytische en de numerieke analyse is gemiddeld erg goed, de richtingscoëfficiënt van de trendlijn is 1,08 á 1,15.

Tabel 1 - Rekenvoorbeeld: Deze tabel geeft een rekenvoorbeeld, dat is uitgewerkt voor karakteristieke waarden.

|                                                                                        |                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                       |                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Gegeven:                                                                               |                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                       |                              |
| • spouwbreedte B = 0,6 m                                                               |                                                                                                                                                                                     | • verankeringslengte L <sub>a</sub> = 3,0 m                                                                           |                              |
| • montage hoogte D = 0,2 m                                                             |                                                                                                                                                                                     | • wrijvingsfactor geotextiel - zand a' = 0,6                                                                          |                              |
| • hoogte aanvulling H = 1,0 m                                                          |                                                                                                                                                                                     | • bovenbelasting q = 30 kN/m <sup>2</sup>                                                                             |                              |
| • volumegewicht aanvulmateriaal γ = 18 kN/m <sup>3</sup>                               |                                                                                                                                                                                     | • geotextiel PET 100 => EA = 700 kN/m                                                                                 |                              |
| • hoek van inwendige wrijving φ' = 35 graden                                           |                                                                                                                                                                                     | • initiële doorbuiging f <sub>init</sub> = 0,1 m                                                                      |                              |
|                                                                                        |                                                                                                                                                                                     | • geotextiel PET 100, lange duur sterkte is T <sub>r</sub> = 50 kN/m                                                  |                              |
| Stap 1: Belasting                                                                      |                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                       |                              |
| Passieve gronddruk coëfficiënt                                                         | tan <sup>2</sup> [45+35/2]                                                                                                                                                          | K <sub>p</sub> = 3,69                                                                                                 | (a)                          |
| Fictieve breedte drukboog                                                              |                                                                                                                                                                                     | b <sub>eq</sub> = 0,5 m                                                                                               | (a)                          |
| s <sub>x</sub>                                                                         | 0,6 + 0,2 + 0,5                                                                                                                                                                     | s <sub>x</sub> = 1,3 m                                                                                                | (a)                          |
| Belastingdeel tussen drukboog                                                          | H > 0,5 (1,3 – 0,5)                                                                                                                                                                 | F <sub>GRstr2;p</sub> = 0 = 0 kN                                                                                      | (6)                          |
| Rekenparameter Q2D                                                                     | 3,69 x 19 / (3,69-2)                                                                                                                                                                | Q2D = 39,30 kN/m <sup>3</sup>                                                                                         | (5)                          |
| Hoogte drukboog                                                                        | H > 0,5 x s <sub>x</sub> dus<br>H <sub>2D</sub> = 1,3 / 2                                                                                                                           | H <sub>2D</sub> = 0,65 m                                                                                              | (4)                          |
| Lengte belast geotextiel drukboog                                                      | H > 0,5 (1,3 – 0,5)<br>L <sub>2D</sub> = 1,3 – 0,5                                                                                                                                  | L <sub>2D</sub> = 0,8 m                                                                                               | (3)                          |
| Rekenparameter P <sub>2D</sub>                                                         | 211,623 (1 – 1,0346)                                                                                                                                                                | P <sub>2D</sub> = -7,325                                                                                              | (2)                          |
| Totale verticale belasting op geotextiel                                               | -0,135+ 6,288 + 0                                                                                                                                                                   | F <sub>GRstr;p</sub> = 0 = 6,153 kN                                                                                   | (1)                          |
| Gemiddelde verticale spanning op geotextiel met boogwerking                            | 2,667 x 6,153 / 0,8 + 1,8                                                                                                                                                           | Q <sub>boog</sub> = 22,31 kN/m <sup>2</sup>                                                                           | (7)                          |
| Verticale spanning op geotextiel zonder boogwerking                                    | (1+0,1) x 18 + 30                                                                                                                                                                   | α <sub>v</sub> = 49,8 kN/m <sup>2</sup>                                                                               | (8)                          |
| Verticale spanning op geotextiel                                                       | 49,8 – (49,8-22,31) 0,6/0,7                                                                                                                                                         | Q <sub>average</sub> = 26,24 kN/m <sup>2</sup>                                                                        | (9)                          |
| Stap 2: Trekkracht in geotextiel                                                       |                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                       |                              |
| Initiële lengte geogrid                                                                | Numerieke integratie (13) en (14) voor d <sub>x</sub> = 0,01 m, x <sub>1</sub> = 0,005 m tot x <sub>60</sub> = 0,595 m                                                              | L <sub>init</sub> = 0,669 m                                                                                           | (13)<br>(14)                 |
| Horizontale kracht T <sub>h</sub>                                                      | Kies T <sub>h</sub><br>Bereken f (10)<br>Bereken geometrische lengte door numerieke integratie van (13) en (14).<br>Bereken constitutieve lengte door numerieke integratie van (18) | zie Figuur 6<br>T <sub>h</sub> = 8,80 kN/m<br>f = 0,134 m<br>L <sub>geo</sub> = 0,697 m<br>L <sub>con</sub> = 0,698 m | (10)<br>(13)<br>(14)<br>(18) |
| Bereken maximale axiale kracht (x = 0 en x = B)                                        | f = 0,134 m<br>z'(0) = -0+1,23 = 1,23<br>z'(0,6) = -1,79 +1,23 = -0,56                                                                                                              | T <sub>x</sub> (0) = 13,93 kN/m<br>T <sub>x</sub> (0,6) = 10,1 kN/m                                                   | (13)<br>(16)                 |
| Bereken verticale oplegreacties                                                        |                                                                                                                                                                                     | T <sub>v</sub> (0) = 10,80 kN/m<br>T <sub>v</sub> (0,6) = 4,94 kN/m                                                   | (19)                         |
| Controle verticaal evenwicht:                                                          | F <sub>v</sub> = 26,24 x 0,6 = 15,744 kN/m<br>T <sub>v</sub> = 10,80 + 4,94 = 15,74 kN/m                                                                                            | F <sub>v</sub> = T <sub>v</sub>                                                                                       |                              |
| Controle treksterkte                                                                   | T <sub>x,max</sub> = 13,93 kN/m<br>R = 50 kN/m                                                                                                                                      | R > T <sub>x,max</sub> dus voldoet                                                                                    |                              |
| Stap 3: Controle uittrekkracht                                                         |                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                       |                              |
| Voor de uittrekkracht wordt gerekend met het minimale verticale gewicht op het geogrid | R <sub>a</sub> = 1 x 18 x 0,6 x tan(35) x 3                                                                                                                                         | R <sub>a</sub> = 22,67 kN/m<br>R <sub>a</sub> > T <sub>h</sub> dus voldoet                                            | (20)                         |



**Figuur 5 - Hoofdspanningen voor 0,5 - 0,7 - 1,0 - 1,5 en 2,0 m spouwbreedte**

- De correlatie tussen de EEM resultaten en de analytische resultaten is zeer sterk ( $R^2 = 0,88$ ).

#### Spouwbreedten < 0,7 m.

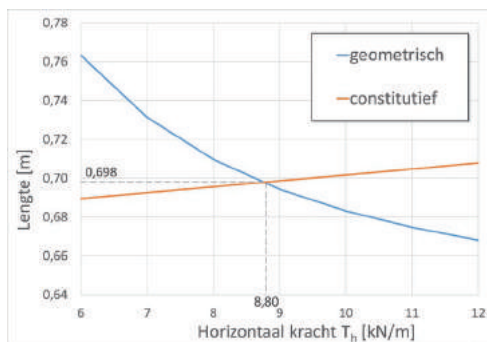
Zoals al eerder opgemerkt, lijkt de boogwerking bij kleine spouwbreedten tot 0,7 m anders te werken. Figuur 5 geeft de hoofdspanningen weer voor diverse spouwbreedten oplopend van

0,2 - 0,5 - 0,7 - 1,0 - 1,5 en 2,0 m, allemaal met een 2,0 m hoge aanvulling boven de spouw. Voor een aanvulling van 1,0 m dikte boven de spouw wordt hetzelfde beeld verkregen. Bij een spouwbreedte van 0,2 m en 0,5 m zien we boogwerking, alleen zet de boog zich af op het geotextiel boven de spouw. In plaats van ontlasting geeft de boogwerking dus een extra belasting op het geotextiel. Bij de

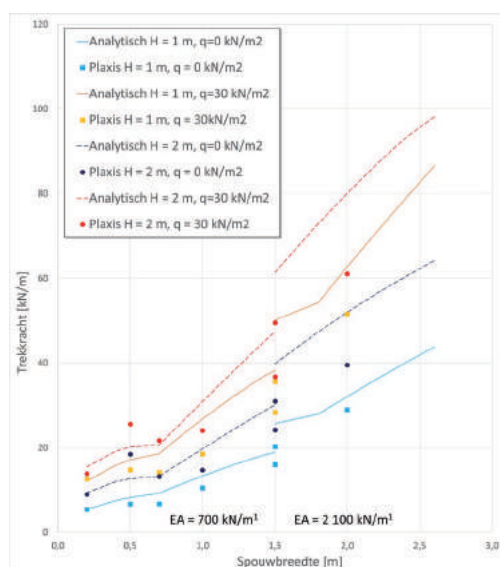
spouwbreedte van 0,7 m en groter is duidelijk een boogwerking waarneembaar, waarbij het geotextiel wordt ontlast.

#### Parameterstudie

Figuur 7 laat de invloed zien op de berekende trekkracht van de variatie van een drietal parameters: de spouwbreedte, de hoogte van de aanvulling en de bovenbelasting. Om de



**Figuur 6** - Iteratieve oplossing optredende horizontale kracht  $T_h$ .



**Figuur 7** - rekkracht voor diverse overspanningen. Bij een spouwbreedte van 1,5 m wordt een geotextiel toegepast met een hogere sterkte en stijfheid.

berekeningen realistisch te houden, is vanaf een spouwbreedte van 1,5 m een geotextiel toegepast met een hogere sterkte en stijfheid.

### Conclusie

Het Concentric Arches (CA) model dat Van Eekelen [2015] voor paalmatrassen maakte is toegepast om de trekkrachten te berekenen in een geotextiel dat als afdichting aan de bovenzijde van een spouw wordt toegepast. Voor spouwbreedten groter dan 1,0 m is aangetoond dat het analytische model representatieve resultaten geeft.

### Literatuur

- A.L. Bouma, Mechanica van constructies, Elasto-statica van slanke structuren, A.L. Bouma, ISBN 90 6562 114 8 cip, (1989)

**Tabel 2 - Gebruikte afkortingen**

| Afkorting           | Omschrijving                                                                                                                     | Eenheid                           |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| $a'$                | Interactie factor tussen geogrid en aanvulmateriaal, voor Stabilenka 0,6                                                         | -                                 |
| B                   | Breedte van de spouw                                                                                                             | m                                 |
| $B_{eq}$            | Fictieve breedte van de drukboog, aangenomen op 0,5 m                                                                            | m                                 |
| D                   | Hoogteverschil tussen bevestiging geogrid aan de wand en bovenzijde gewapende grondmassief                                       | m                                 |
| EA                  | Axiale stijfheid van het geotextiel                                                                                              | kN/m                              |
| F                   | Doorbuiging van het geotextiel                                                                                                   | M                                 |
| $F_{GRstr;p=0}$     | Verticale kracht op het geotextiel voor een bovenbelasting $q=0$ kN/m <sup>2</sup>                                               | kN/m                              |
| $F_{GRstr;p\neq 0}$ | Verticale kracht op het geotextiel inclusief bovenbelasting $q$                                                                  | kN/m                              |
| $F_{GRstr2;p=0}$    | Totale verticale belasting op de strip                                                                                           | kN/m                              |
| $f_{init}$          | Initiële doorbuiging van het geotextiel (onbelaste doorbuiging bij montage)                                                      | m                                 |
| $H_{g2d}$           | Hoogte van de drukbogen                                                                                                          | m                                 |
| $K_p$               | Passieve gronddruk coëfficiënt                                                                                                   | -                                 |
| $L_{2D}$            | Lengte van de 2D drukbogen werkend op het geotextiel.                                                                            | m                                 |
| $L_{con}$           | Constitutieve lengte van de kabel                                                                                                | m                                 |
| $L_{geo}$           | Geometrische lengte van de kabel                                                                                                 | m                                 |
| $P_{2D}$            | Rekenparameter voor de 2D concentrische bogen                                                                                    | kN/m <sup>3</sup> -K <sub>p</sub> |
| Q                   | Uniforme bovenbelasting op maaiveld                                                                                              | kN/m <sup>2</sup>                 |
| $Q_{2D}$            | Rekenparameter voor de 2D concentrische bogen                                                                                    | kN/m <sup>3</sup>                 |
| $Q_{average}$       | Verticale spanning op het geotextiel                                                                                             | kN/m <sup>2</sup>                 |
| $Q_{boog}$          | Verticale spanning op geogrid bij volledige boogwerking                                                                          | kN/m <sup>2</sup>                 |
| $s_x$               | Fictieve overspanning is gelijk aan $B + 0,2 + B_{eq}$ . De 0,2 m extra overspanning is bepaald op basis van de Plaxis analyses. | m                                 |
| T                   | Axiale trekkracht in het geotextiel                                                                                              | kN/m                              |
| $T_h$               | Horizontale component van de trekkracht in het geotextiel                                                                        | kN/m                              |
| $T_r$               | Axiale lange duur sterkte van het geotextiel, bijvoorbeeld te bepalen volgens CUR 226 (2016), hoofdstuk 2.9.1 kN/m               | kN/m                              |
| x                   | x-coördinaat                                                                                                                     | m                                 |
| z                   | z-coördinaat                                                                                                                     | m                                 |
| $\gamma$            | Volume gewicht van het aanvulmateriaal                                                                                           | kN/m <sup>3</sup>                 |
| $\varphi'$          | Effectieve hoek van inwendige wrijving van het aanvulmateriaal                                                                   | deg                               |
| $\sigma_v$          | Verticale spanning op geogrid bij zonder boogwerking                                                                             | kN/m <sup>2</sup>                 |

- van Eekelen, 2015, Van Eekelen, S.J.M., 2015. Basal Reinforced Piled Embankments. Proefschrift TU Delft, ISBN 978-94-6203-825-7.
- Eekelen et al., 2015, Van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A. van Tol, A.F., 2015. Validation of analytical models for the design of basal reinforced piled embankments. Geotextiles and Geomembranes. Volume 43, Issue 1, 56 - 81.
- CUR 198, Ontwerprichtlijn Kerende constructies van Gewapende grond, Tweede

herziene editie CUR-publicatie 198, ISBN 978-90-5367-650-9, (2017)

- CUR 226, Ontwerprichtlijn Paalmatrassystemen, tweede herziene editie van CUR-publicatie 226, ISBN 978 90 5367 627 1 (2016)

# Hoe geogrids de prestaties van wegen verbeteren (deel 2)

**Dr.-Ing. Lars Vollmert**  
BBG Bauberatung  
Geokunststoffe GmbH & Co.  
KG, Duitsland



**Dipl.-Ing. Jörg Klompaker**  
NAUE GmbH & Co. KG,  
Duitsland



## Inleiding fase 2 en 3

Deresultaten van fase 1 (Vollmert & Klompaker, 2017) lieten zien dat een meerlagensysteem van ongebonden granulair materiaal in combinatie met een geogrid in funderingen kan worden beschouwd als een samengesteld materiaal. Vooral in constructies waarin buig-, trek- en drukzones aanwezig zijn, toont het concept van een meerlagenmodellering zijn meerwaarde. Wegconstructies zijn daar een voorbeeld van, zoals aangetoond door Zander, 2007 (zie figuur 1). Proefvak 1.1 op een zwakke ondergrond (zie figuur 7 in Vollmert & Klompaker, 2017) met een op elkaar afgestemde laagopbouw en meerlagige geogridversterking toonde een hoge stijfheid en afnemende snelheid van permanente vervorming bij toenemend aantal belastingscycli. Hoewel de uiteindelijke stijfheid van de ondergrond niet voldeed aan de gangbare ontwerpeisen, kan dit proefvak worden beschouwd als een referentieconstructie voor wegconstructies, zowel vanuit oogpunt van stijfheid ( $E_{v2} \geq 130 \text{ MN/m}^2$ ; voor conversie naar Nederlandse stijfheidsindicatoren zie bijvoorbeeld SBRCURnet (2018)) als van permanente vervorming (spoordiepte minder dan 1 cm bij directe belasting door meer dan 300 10-tons aslasten). De rek in de wapening bleek na 1000 herhalingen van een 10-tons standaard aslast minder dan 0,05% te zijn. Met andere woorden, er was sprake van stabilisatie van de onverharde constructie in zijn grenstoestand in de gebruiksfase.

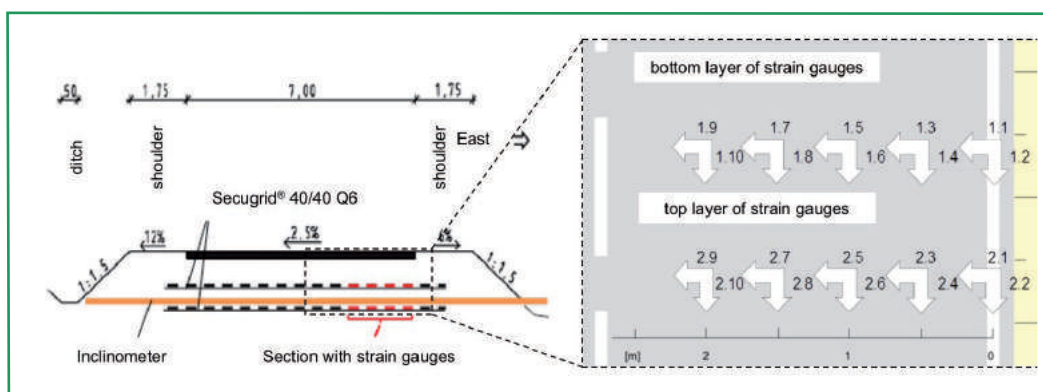
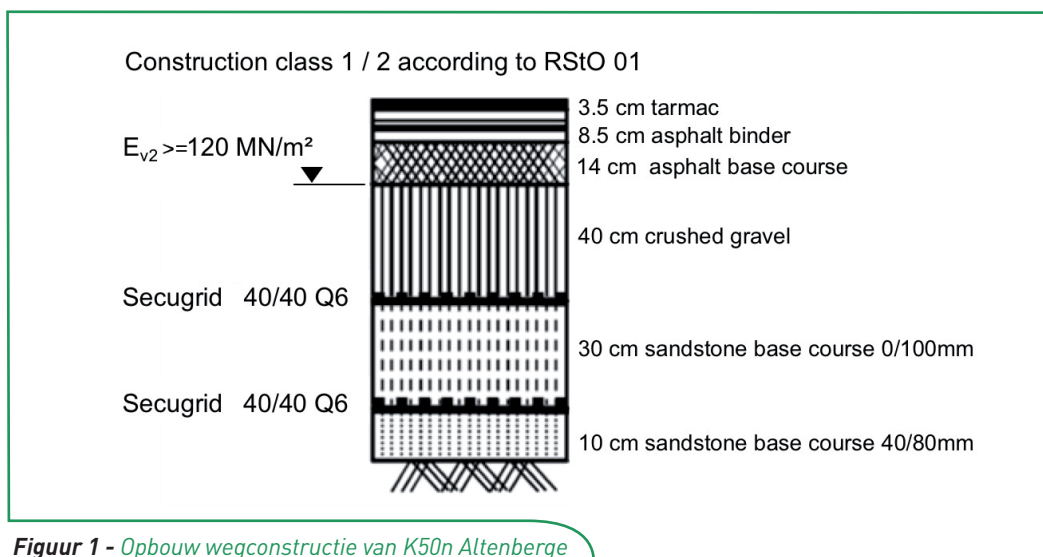
Om deze bevinding om te zetten naar verharde wegen zijn veldmetingen uitgevoerd op twee proefvakken. Deze vakken werden gekenmerkt door slechte ondergrondomstandigheden, hoge asbelastingen en zeer grote aantallen lastherhalingen. Het doel van de proeven in fase 2 was om een beeld te krijgen van de spanningscondities in de stijve wegconstructies en om in de wapening spanningen te meten onder cyclische belasting. Met kennis van de spannings- en permanente vervormingseigenschappen van ongebonden granulair materiaal en de

eigenschappen van de wapening, moest een test worden ontwikkeld om in fase 3 de prestaties van het samengestelde materiaal (meerlaags gewapend funderingsmateriaal) te kunnen valideren en voorspellen. Dit om meer inzicht te krijgen in het materiaalgedrag bij gecontroleerde cyclische belasting.

## Fase 2 – in-situ proeven op verharde wegen

De hierna gepresenteerde projecten worden besproken in RStO-constructieklasse codering.

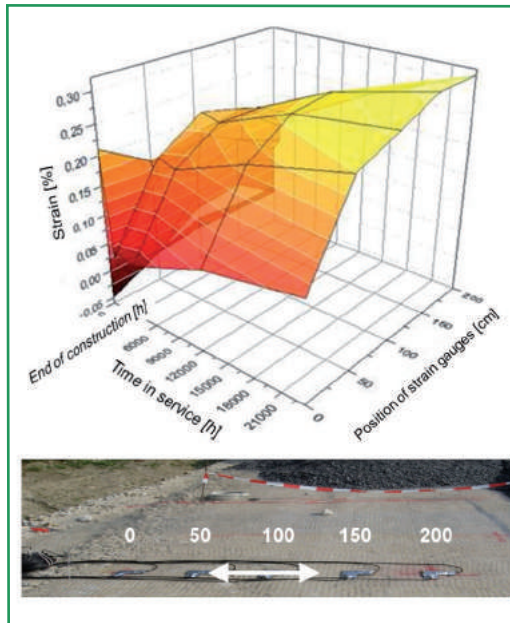
De RStO is de basis waarop wegen in Duitsland worden ontworpen en in constructieklassen worden ingedeeld. De constructieklasse is gevalideerd met onderzoeken met een valgewichtdeflectiemeter op afgebouwde wegconstructies (zie bijvoorbeeld Grätz, 2009). In die onderzoeken en in dit artikel is de systematiek van de constructieklassen conform de RStO-versie 2001 gebruikt. Met behulp van bijvoorbeeld Plehm (2013) kan de klassenaanduiding worden omgezet naar de huidige klassenindeling volgens RStO 2012.



## Samenvatting

In deel 1 van dit artikel is ingegaan op onderzoekswerkzaamheden die aantoonen dat een hoge stijfheid van een geogrid gecombineerd met een toepassing in meerdere lagen een gunstigere bijdrage levert dan een wapening die slechts uit een enkele laag bestaat. Dit artikel presenteert fase 2 en 3 van het onderzoeksprogramma. Deze fasen 2 en 3 valideren de eerdere bevindingen van het gedrag van complete wegverhardingen, en in het bijzonder proefresultaten onder gecontroleerde laboratoriumomstandigheden. Het stabiliserende effect

van geogrids blijkt al op te treden bij minder dan 1% rek in het geogrid. De structuur en trekstijfheid van de geogrids blijken de twee belangrijkste eigenschappen te zijn voor de prestaties van geogrids. Het opsluitende effect zorgt voor verbetering van de draagkracht van de gewapende laag zelfs bij een laag vervormingsniveau. De ontwikkeling van permanente vervorming wordt een factor kleiner. Daarom dragen geogrids bij aan een langere bruikbaarheid en levensduur van een wegconstructie.

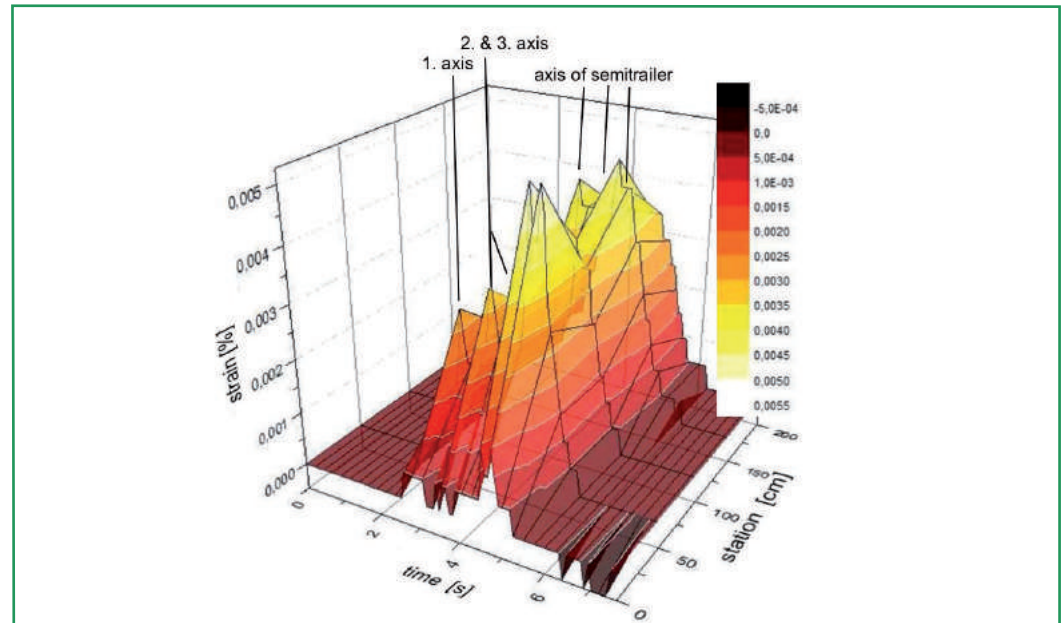


**Figuur 3 -** Verloop permanente vervorming in onderste laag van wapening (zie Afb. 1) dwars op de rijrichting

### Constructieklasse 1/2 (hoofdwegen)

Bij de aanleg van de nieuwe zuidelijke rondweg van de stad Altenberge in Duitsland is een weg van constructieklasse 1/2 geïnstrumenteerd (zie figuur 1). De lokale ondergrond bestaat uit glaciale leem- en keileemlagen van circa 0,7 tot 1,8 m dik. De glaciale leemlagen tonen een vaste tot halfvaste consistentie, maar hebben de neiging tot verweking als water binnendringt en te barsten tijdens droge periodes. Tot een diepte van ongeveer 0,6 m onder maaiveld blijkt het vochtgehalte ongeveer 18% te zijn. De ongedraineerde afschuifsterkte is bepaald met over 10 kN/m<sup>2</sup>.

De vereiste stabilisatie van de funderingslagen met een geogrid was geïntegreerd in de totale laagopbouw. Om de draagkracht te vergroten, is de constructie versterkt door twee lagen gelast PET-geogrid (zie figuur 1) met een hoge stijfheidsmodulus ( $J_{0-1,0\%, 0-1,0\%}$ , MD & CMD > 1700 kN/m) en een langeduur sterkte van 26 kN/m toe te passen. Het gekozen product vertoont een minimale kruiprek, waardoor de



**Figuur 4 -** Rekwaarden in onderste laag wapening loodrecht op wegas in afgebouwde asfaltverharding onder vrachtwagenbelasting van 40 ton en rijnsnelheid 10 km/h

stijfheid over een zeer langdurige periode kan worden gegarandeerd.

Het meetprogramma had tot doel om de rekken te meten in het vlak van de wapening, zowel in langs- als in dwarsrichting op de as van de weg. De verticale permanente vervormingen bovenop de eerste wapeningslaag werden over de volle wegbreedte vastgelegd door een horizontale hellingsmeter (zie figuur 2). De temperatuur in de wapeningslaag werd geregistreerd met PT100 temperatuursensoren.

Figuur 3 toont de op verschillende tijden gemeten rekken dwars op de weg. In de buurt van het midden van de geïnstrumenteerde rechter rijstrook zien we een maximum waarde die afneemt naar de rand van de rijstrook (zie figuur 3). De rekken nemen in de tijd continu toe vanaf het einde van de bouwwerkzaamheden. Na één jaar gebruiksfase blijken de rekken enigszins toe te nemen. De toename van rekwaarden dwars op de wegas kan worden verklaard door meer lastspreiding als gevolg van naverdichting vanwege de slechte

ondergrondcondities. In 2017 heeft de wapening meer dan 8 jaar onder verkeer gelegen. De reksnelheid is dan aanzienlijk verlaagd en er is geen noemenswaardige permanente vervorming waargenomen, die de bruikbaarheid van de wegconstructie negatief zou beïnvloeden. Doordat de stijfheid van de wegconstructie met elke aangelegde laag toeneemt, neemt de rekwaarde van de funderingswapening die volgt uit de verdichtings- en zettingsvervormingen af. De gemiddelde rekwaarden in de bovenste wapeningslaag bedragen over de wegbreedte slechts ongeveer 50% van de rekwaarden in de onderste wapeningslaag.

Bovenop het statische spanningsniveau, dat weliswaar met de tijd verandert en met elke constructiefase (zie figuur 3), ontstaan kortstondige toename van de spanningen door dynamische belasting (verdichting), cyclische belasting (bouwvoertuigen en verkeersbelasting in gebruiksfase) en/of tijdelijke quasi-statische belasting (statische plaatbelastingsproef) (zie figuur 4). In de bouwfase zijn deze rekwaarden als gevolg van verdichting en bouwverkeer

in de orde van 1%. Deze rekken nemen sterk af als de stijfheid is toegenomen nadat de asfaltverharding is aangebracht en de wegconstructie is afgebouwd.

#### Constructieklasse 3/4 (plattelandswegen)

Voor de verharding van een havengebied is een constructie met een totale dikte van 87 cm ontworpen. De verhardingsconstructie wordt getoond in figuur 5a, constructie III. Vanwege de voorbelasting van al aanwezige constructies, is in de ontwerpberekening uitgegaan van een ondergrondstijfheid met  $E_{v2} \geq 80 \text{ MN/m}^2$ . Vanwege inhomogeniteiten in de ondergrond en variaties in de draagkracht van de ondergrond is een versterking met twee lagen gelast PP-geogrid (zie figuur 5) aangebracht ( $J_{,-0-1,0\%, -0-1,0\%, MD \& CMD > 1100 \text{ kN/m}$  en een langeduur sterkte van  $15 \text{ kN/m}$ ). De ligging van de wapening werd bepaald op basis ervaring.

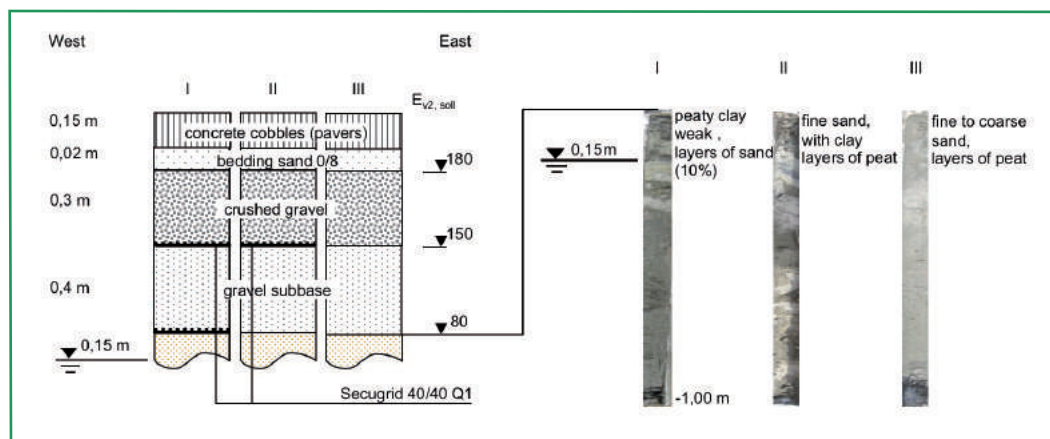
Aankankelijk was de wapening niet ontworpen om de draagkracht, geverifieerd met  $E_{v2}$ -waarden, te vergroten. Tijdens de bouwphase kunnen geogrids echter lokale gebieden met onvoldoende draagkracht overbruggen en als klankbodem dienen waarop alsnog de vereiste verdichting van de onderfunderingslagen kan worden gerealiseerd. Omdat de voorgaande projecten in het gebied hadden aangetoond dat de ondergrondstijfheid de ontwerpwaarde van  $E_{v2} \geq 80 \text{ MN/m}^2$  waarschijnlijk niet zou halen, werd de aanleg met twee wapeningslagen verplicht voorgeschreven (zie figuur 5a, constructie I).

Op voorstel van NAUE GmbH & Co. KG en met de hulp van het Havenplanningsbureau werden eisen gespecificeerd waaraan de proefvakken moesten voldoen om het effect van de wapening te evalueren. Voor dit doel

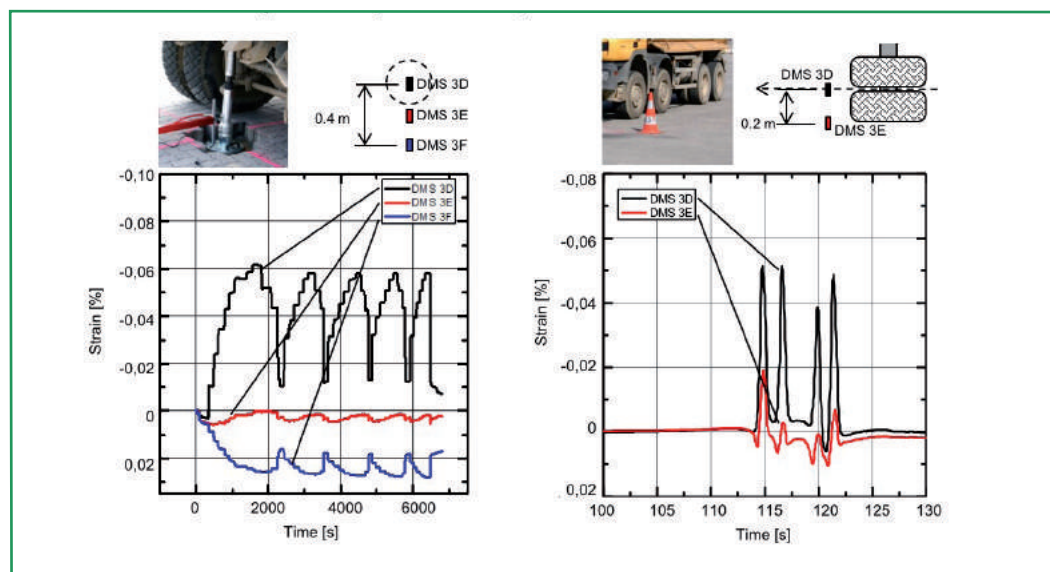
werd in twee proefvakken ten oosten van de referentieconstructie de hoeveelheid wapening gereduceerd. In proefvak II (zie figuur 5a, constructie II) werd de onderste wapeningslaag weggelaten. Proefvak III werd geconstrueerd zonder enige wapening (zie figuur 5a, constructie III). Om het effect van eventuele schade als gevolg van de onderdimensionering te beperken, werd de niet-gewapende constructie ten oosten van de twee gewapende vakken gesitueerd, omdat hier gunstigere ondergrondomstandigheden werden verwacht. Figuur 5b toont de ondergrondprofielen van de drie testsecties. Opvallend is de zeer variërende opbouw van de laag van fijn zand/veen-klei over de lengte van het proefvak van slechts 15 m lopend van humeuze klei zonder zandlagen (II) naar zand met tussenlagen van humeuze klei (III).

De initiële draagkracht van de ondergrond is van primair belang voor de evaluatie van de proefvakken. In vak I moest de statische plaatbelastingsproef voortijdig worden gestopt vanwege hoge zakkingen (na de eerste belastingtrap werd een  $E_{v1}$ -waarde van slechts  $3,1 \text{ MN/m}^2$  gemeten, reden om de proef te beëindigen). Daarentegen werd in vak III een draagkracht gemeten met  $E_{v2} = 13,9 \text{ MN/m}^2$ . De resultaten bevestigen de testresultaten van het rapport van het bodemonderzoek van de ondergrond. Dat onderzoek leverde een  $E_{v2} = 7,5 \text{ MN/m}^2$  op ten westen van de proefvakken en  $E_{v2} = 25 \text{ MN/m}^2$  ten oosten van de proefvakken. De vervormingsmodulus  $E_{v2}$  gemeten op de granulaire onderfundering varieerde tussen  $92 \text{ MN/m}^2$  en  $123 \text{ MN/m}^2$  met een verhouding  $E_{v2}/E_{v1}$  liggend tussen 2,14 en 2,57. De gunstigste waarden werden bereikt bovenop de zandgrond. De proefresultaten waren significant lager dan de gebruikte (hoge) ontwerpstijfheid van de onderfundering en de ondergedimensioneerde laagdikten. Een aanpassing van de constructie-opbouw was niet voorzien. Op deze locatie is met de tijd een toename van de vervormingsmodulus waargenomen, zoals ook het geval was bij de vakken Altenberge. De gemiddelde  $E_{v2}$ -waarde bedroeg voorafgaand aan de aanleg van de bestrating  $155 \text{ MN/m}^2$ , terwijl na 2 jaar ingebruik een gemiddelde waarde van  $E_{v2} = 168 \text{ MN/m}^2$  werd gemeten (voor de meting waren de betonnen straatstenen tijdelijk verwijderd).

Naar analogie van de proefvakken voor wegen van constructieklasse 1/2 zijn ook rekstrookjes (DMS) aangebracht op het geogrid, aangevuld met drukdozen om de verticale en horizontale gronddruk te meten. De lengteverandering



**Figuur 5a & 5b** - Links: Opbouw verhardingsconstructies I, II en III (I = referentie). Rechts: Ondergrondprofielen proefvakken I, II en III.



**Figuur 6a & 6b** - Links: Verloop van rek in een plaatbelastingsproef met vijf belastingstrappen in proefvak II d.d. 22.08.2011 (rek = "-"; druk = "+"). Rechts: Verloop van rek onder een langzaam rijdende 40-tons vrachtwagen in proefvak II d.d. 23.08.2011 (rek = "-"; druk = "+")

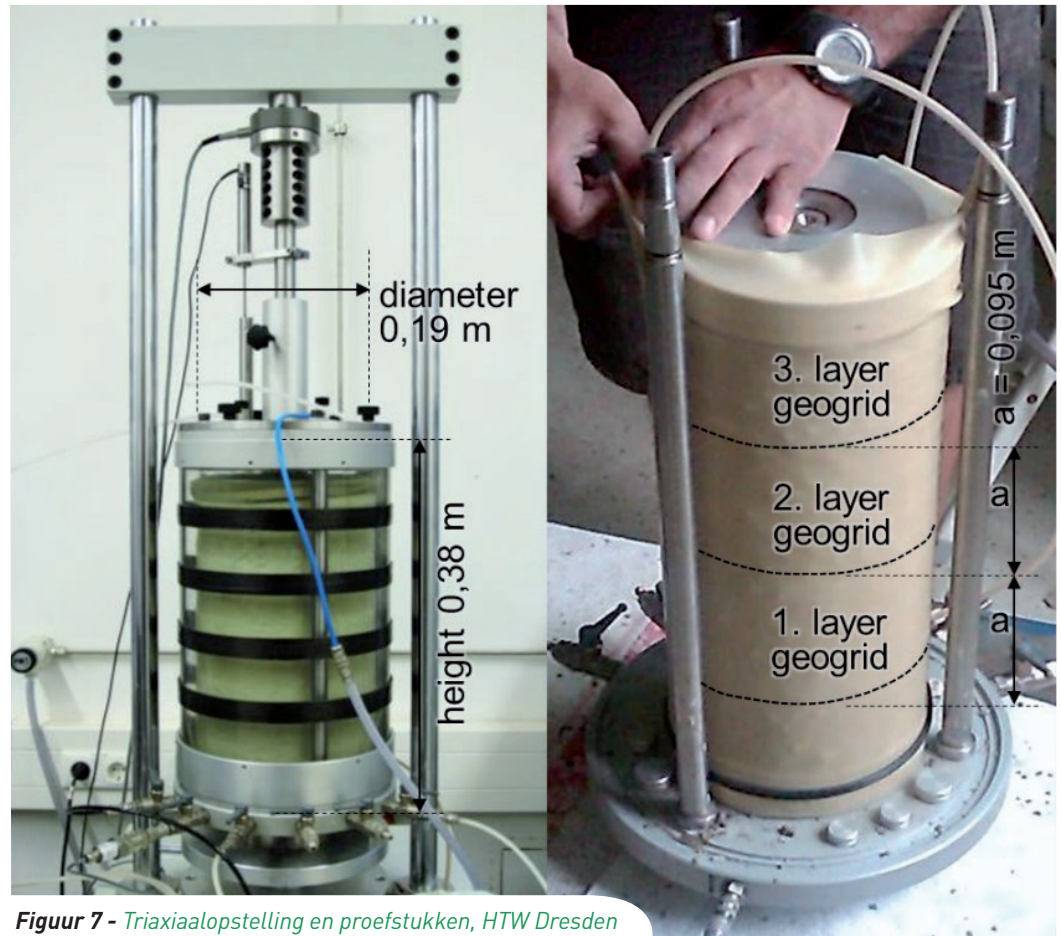
van de wapening onderin de granulaire laag kan goed worden bepaald met een statische plaatbelastingsproef. De voetplaat kan namelijk exact in het midden van het proefvak worden geplaatst en de afzonderlijke belastingtrappen kunnen nauwkeurig worden aangebracht. De straatstenen en de straatsplit werden voor dit doel verwijderd, zodat de test direct op het oppervlak van de granulaire laag kon worden uitgevoerd.

Figuur 6a toont de rekwaarden voor de meetpunten DMS 3D tot 3F gedurende een statische plaatbelastingsproef met een voetplaat met diameter 300 mm en vijf trappen in belasten en ontlasten. De vervormingsmodulus bedroeg  $E_{v2} = 166 \text{ MN/m}^2$ . Zoals verwacht werden de grootste rekken gemeten in het midden van de voetplaat (DMS 3D). Naarmate de afstand groter werd, namen de rekken af (DMS 3E) en werden drukwaarden op een afstand van 0,4 m van het lastcentrum geregistreerd. Fliguur 6b toont dat onder een vrachtwagen Mercedes Benz Actros 4144 (8x4/4) de rekken bijna identiek zijn aan de resultaten van de statische plaatbelastingsproef ondanks de verschillende asbelastingen (2 x 7,5 ton voor de enkele banden en 2 x 13 ton voor de dubbellucht wielstellen). De aanzienlijk lagere asbelasting van de enkele banden met 7,5 tonsasbelasting wekten rekken op van dezelfde omvang als de dubbellucht wielstellen van de achterassen.

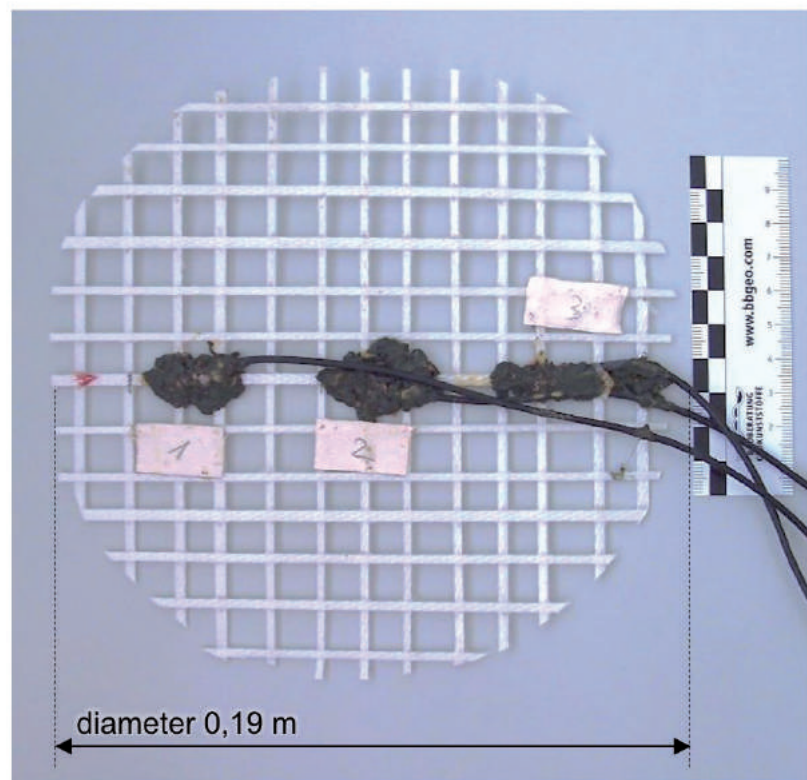
### Fase 3 - cyclische triaxiaalproeven voor verificatie van wapenend/stabiliserend effect Concept

De triaxiaalproef is gekozen als uitgangspunt voor de testopstelling (figuur 7). Deze proef is algemeen geaccepteerd in de grondmechanica om materiaaleigenschappen van grond en bouwmaterialen te bepalen. De proef maakt een gedifferentieerde beoordeling van de testresultaten mogelijk. In een geschikte testopstelling kunnen de proefstukken worden onderworpen aan grote aantallen lastherhalingen, waardoor ook het verloop van de permanente vervorming kan worden onderzocht.

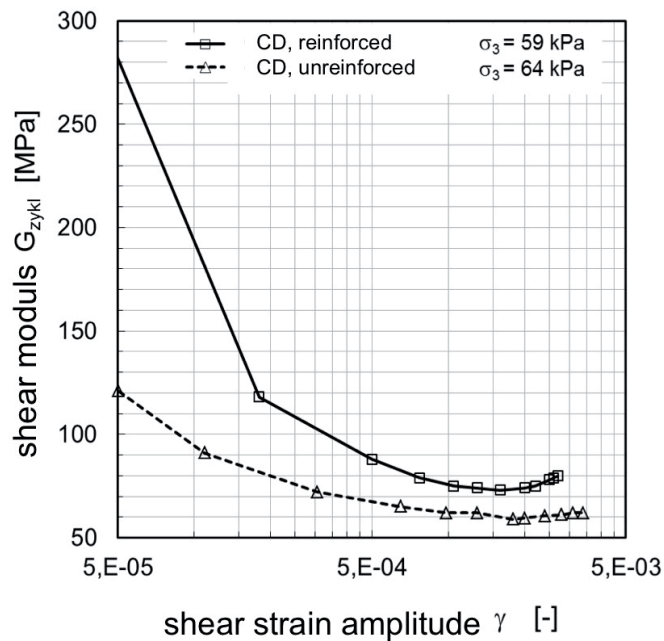
De beperkte grootte van het proefstukmonster ( $d = 19 \text{ cm}$ ,  $h = 38 \text{ cm}$ ) vereist noodgedwongen een aanpassing van de korrelverdeling en in het bijzonder van de maximale korrelgrootte van het mineraal aggregaat aan de testfaciliteit of proefopstelling. Het geogrid is voor dit doel verschaald tot een geometrische schaal van 1:2,6 [zie figuur 8] en afgestemd op de korrelgrootteverdeling. De treksterkte van



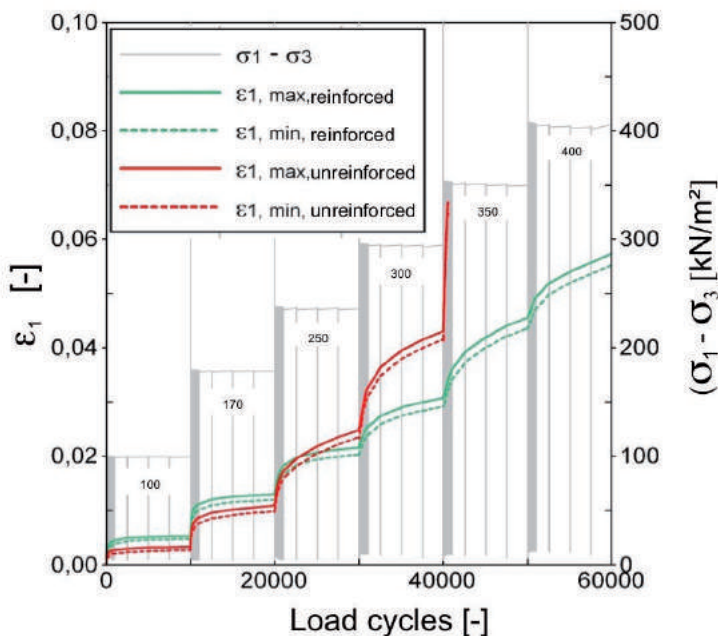
Figuur 7 - Triaxiaalopstelling en proefstukken, HTW Dresden



Figuur 8 - Geogrid Secugrid® 30/30 Q1 geometrisch verschaald naar 1:2,6



**Figuur 9** - Relatie tussen schuifrekamplitude en afschuifmodulus voor gewapende en ongewapende situatie (ASTM-D3999-91)



**Figuur 10** - Toename van de uniaxiale samendrukking van een gewapend en een ongewapend proefstuk bij toenemende deviatorspanning, 45 kN/m<sup>2</sup> constante steundruk en 10.000 lastwisselingen per belastingtrap (CD, EN 13286-7 mod.)

het te onderzoeken modelgeogrid is vrijwel hetzelfde als de referentie Secugrid® 30/30 Q1. Omdat de afmetingen werden gedicteerd door de testopstelling zijn de modelgeogrids in drie lagen gerangschikt. Omdat de laagdikte in de laboratoriumproef kleiner is dan in de praktijk is hier een geogrid met geringere

sterkte gebruikt dan in de veldproeven. In totaal zijn 19 tests uitgevoerd, niet alleen volgens nationale en internationale testinstructies voor geclassificeerde aggregaten voor wegen maar ook gezien de aangepaste beproevingsomstandigheden.

### Belangrijkste resultaten

In een reeks proeven met cyclische belasting uitgevoerd conform ASTM-D3999, heeft het gewapende proefstuk onder gedraineerde condities een significant hogere stijfheidsmodulus dan het niet-gewapende proefstuk. De toename van de stijfheidsmodulus en daarmee samenhangend de toename van de afschuifmodulus is al meetbaar bij zeer kleine vervormingen ( $\epsilon_1 = 0,004\%$ ) en ligt conservatief aangenomen tussen de 25% en 70% (zie figuur 9) voor een maximum gemeten elastische rek van  $\epsilon_1 = 0,25\%$ .

Het gunstige effect van de wapening kan ook worden gevisualiseerd met proeven die zijn uitgevoerd volgens EN 13286-7, maar dan met aangepaste belastingen. Figuur 10 toont het verloop van de uni-axiale indrukking van een gewapend en een niet-gewapend proefstuk onder een spanningsregime (deviatorspanning) dat na elke 10.000 belastingcycli werd verhoogd terwijl de zijdelingse opsluitdruk constant werd gehouden. Tot een deviatorspanning van 100 kPa stabiliseren de vervormingen in beide proefstukken op een vergelijkbaar niveau. In het geval van een verdere toename van de spanning treden zichtbare plastische vervormingen op in het niet-gewapende proefstuk. Deze worden steeds groter onder het aantal belastingcycli en leiden tot een sterke samendrukking van het proefstuk. De sterke samendrukking van het niet-gewapende monster resulteert in een voortijdig falen in vergelijking met de prestaties van het gewapende proefstuk. De samendrukking van het proefstuk kan in principe worden vergeleken met de verdichting van een funderingslaag op zeer stijve grondslag.

Wanneer de spanningen van het gewapende proefstuk verder wordt verhoogd neemt ook hier de plastische vervorming zichtbaar toe; alleen blijkt het gewapende proefstuk minder gevoelig te zijn voor de cyclische belastingen. De rek van het geogrid in het lage en middelgrote spanningsbereik ligt in deze proeven tussen 0,05% en 0,5% (Vollmert, 2016).

De evaluatie van de elasticiteitsmodulus voor de opeenvolgende belastingscycli toont een sterke toename van de draagvermogen. Na een "opwarming" van het proefstuk (toename van de rek) stabiliseert het proefstuk na de eerste 5.000 lastwisselingen van elke belastingtrap. Interessant is dat de elasticiteitsmodulus van het gewapende proefstuk bijna constant blijft en vergelijkbare waarden geeft voor alle spanningscondities. De elasticiteitsmodulus van

het niet-gewapende proefstuk neemt als gevolg van de samendrukking echter eerst enigszins toe met toenemende spanningsconditie. Het niet-gewapende proefstuk versterkte monster bezwijkt daarentegen voordat de hoogste spanningsniveaus van het gewapende proefstuk kunnen worden bereikt.

### Conclusies

Cyclische triaxiaalproeven tonen voor spanningscondities die representatief zijn voor ongebonden funderingen in weg- en spoorwegbouw aan dat de elasticiteitsmodulus toeneemt met toenemende spanning. Analooq hieraan neemt de afschuifmodulus van een gewapend proefstuk toe ten opzichte van die van een niet-gewapend proefstuk. De toename van de materiaalparameters treedt op bij zeer kleine vervormingen van minder dan 0,01% uniaxiale samendrukking van de combinatie mineraal aggregaat en geogrid en rekwaarden in het geogrid van ongeveer 0,05%. Dit effect treedt in sterkere mate op als de voor de wegfunderingen typische vervormingen enigszins groter zijn, wat vooral tijdens de bouwphase het geval is.

De toename van de afschuifmodulus in de triaxiaalproef komt overeen met de waarden van de veldmetingen (Weisemann & Vollmert, 2017). Vanwege de toename van de stijfheid van de fundering en de reductie van de permanente vervormingen wordt de slappe ondergrond blootgesteld aan lagere schuifspanningen.

De resultaten laten, vooral wanneer deze direct worden vergeleken met waarnemingen en meetresultaten van veldmetingen en grootschalige testseries, zien dat plastische vervormingscomponenten voor elke belastingscyclus een bepalende invloed hebben op het gedrag van de hele constructie.

Met triaxiaalproeven kan worden aangetoond dat de plastische vervorming van granulaire materialen aanzienlijk wordt verminderd als geogrids worden toegepast. Zelfs bij kleine spanningsverschillen en na een zekere voorspanning treedt er toename van stijfheid op die kan worden gekenmerkt door een verhoogde afschuifmodulus. Proefresultaten laten zien dat de plastische vervormingen, dus de opeenhoping van permanente rekken van elke lastwisseling, worden beperkt door een geogrid toe te passen. Niet-gewapende proefstukken tonen een gestage groei van de permanente vervorming met uiteindelijk bezwijken tot gevolg. Hoewel de gewapende proefstukken ook te lijden hebben van plastische vervormingen,

blijven de vervormingen laag en maken ze dus een aanzienlijk langere gebruiksfase mogelijk. Bovendien blijft de verhouding van optredende belasting en uiterste grenstoestand klein. Bij grotere initiële vervormingen en hogere spanningsniveaus, zoals die kunnen optreden bij een lokaal slappe grondslag of verzwakte bovenbouw, wordt het positieve stabiliserende effect van de wapening meer uitgesproken.

De effectiviteit van de wapening vloeit voort uit de interactie met het funderingsmateriaal. Randvoorwaarden daarvoor zijn een hoge kwaliteit aan mineraal aggregaat, een goede interactie en een goede samenwerking tussen de twee materialen bij zeer kleine rekken in het geogrid. Het geogrids die in de hiervoor beschreven proeven zijn gebruikt hebben een hoge trekstijfheid die leidt tot een hoge stijfheid van de hele constructie en een overeenkomstige uiteindelijke sterkte, zelfs onder langdurige omstandigheden. De resultaten zijn nog niet gevalideerd op andere geogridconstructies. Niettemin verschaffen de onderzoeksresultaten in het algemeen een beter begrip van de bijdrage van geogrid in termen van grondmechanisch gedrag.

Volgens de auteurs van dit artikel kan stabilisatie van een wegconstructie worden gezien als 'cyclische verstijving' omdat door het verminderen van de zeer kleine plastische vervormingen per lastwisseling, de met een groot aantal belastingscycli opgehoopte permanente vervorming wordt beperkt. Bij wapening wordt per definitie gebruik gemaakt van de sterkte-rek karakteristiek van een product, dus ook als de vervormingen klein zijn. Als het niveau van vervorming hoog is en de grenswaarde van de afschuifsterkte van granulaire materialen wordt overschreden, kan, zoals elke weggebruiker uit ervaring weet, de geaccumuleerde permanente vervorming leiden tot vermindering van de stijfheid, sterkte en bruikbaarheid van de verhardingsconstructie. In welke mate dit effect optreedt hangt af van de verhouding optredende en toelaatbare spanning in de constructie. In zeer stijve wegconstructies zijn de vervormingen klein. Toch hebben proeven bij zeer kleine vervormingsniveaus laten zien dat geogrids een gunstige bijdrage kunnen leveren. In slappe constructies is het voordeel van de geogrids duidelijker aanwezig en vergelijkbaar met wapeningsstaal in een betonnen balk. Het versterkende effect van het geogrid is echter relatief klein, omdat de voornaamste structurele parameters als korrelopbouw en

afschuifsterkte door de grote vervormingen geen optimale waarden kunnen bereiken.

### Bronnen

- Grätz, B. (2009): Bewertung der Tragfähigkeit und der Standfestigkeit bestehender Asphaltstraßen zur Wahl zweckmäßiger Erhaltungsmaßnahmen. Habilitationsschrift. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Straßenwesen mit Versuchsanstalt, TU Darmstadt.
- Plehm, T. (2013): Erläuterungen zur RStO 2012, VSVI-Seminar am 04.02.2013. Frankfurt (Oder).
- RStO - Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. FGSV 499. FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln: FGSV-Verlag.
- SBRCURnet (2018): Geokunststoffen als funderingswapening in ongebonden funderingslagen – publicatie verwacht begin 2018.
- Vollmert, L. (2016): Zur Gebrauchstauglichkeit geogitter-bewehrter Tragschichten unter zyklisch-dynamischen Beanspruchungen. Dissertation. TU Clausthal, 2016.
- Vollmert, L. & Klompmaier, J. (2017): Hoe geogrids de prestaties van wegen verbeteren - deel 1. Geokunst, Jaargang 21, 4/2017, pp. 78-83.
- VSVI Berlin-Brandenburg.
- Weisemann, U. and Vollmert, L. (2017). Wirkung von geogitter-bewehrten Schutzschichten. Eisenbahn Ingenieur Kompendium (EIK), Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure e.V. (VDEI), Frankfurt/Main
- Zander, U. (2007): Grundlagen einer rechnerischen Dimensionierung des Straßenoberbaus aus Asphalt. Straße und Autobahn, 9.2007, 6.

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](http://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](http://www.ooms.nl/specialismen)  
[www.struktonciviel.nl](http://www.struktonciviel.nl)

## Cofra B.V.

de specialistische aannemer  
grondverbeteringstechnieken  
& folieconstructies



building worldwide on our strength

[www.cofra.nl](http://www.cofra.nl)



*De beschikbare ruimte voor infrastructuur wordt steeds beperkter en de uitvoeringstijd korter. Hierdoor groeit de behoefte aan innovatieve oplossingen voor het bouwrijp maken van zettingsgevoelige gebieden.*

*Cofra voorziet in deze behoefte en heeft zich gespecialiseerd in innovatieve grondverbeteringstechnieken die wereldwijd worden toegepast.*

*Met de aanwezige kennis en ervaring biedt Cofra oplossingen op maat en bestaat de mogelijkheid om het gehele proces van ontwerp tot uitvoering voor u te verzorgen.*

Kwadrantweg 9 - 1042 AG Amsterdam  
Postbus 20694 - 1001 NR Amsterdam  
Tel. 020-693 4596 - Fax 020-694 1457



Your success depends on excellent results. That's why you can rely on our innovative solutions. Customised to your requirements, our tried and tested products provide the basis for any earthworks or ground engineering project. Discover the world of geosynthetics. Discover HUESKER.



## Your Project in Safe Hands

[www.HUESKER.nl](http://www.HUESKER.nl) | E-mail: [info@HUESKER.nl](mailto:info@HUESKER.nl) | Phone: +31 (0) 88 594 00 50



## HUESKER

Ideen. Ingenieure. Innovationen.

# Een veilige dijk zonder dikke kleilaag

## Dijkversterking met Bentofix® geosynthetische klei afdichting (bentonietmat)



Professioneel projectadvies en projectbegeleiding



NAUE GmbH & Co. KG

Duitsland · Tel: +49 5743 41-0 · [info@naue.com](mailto:info@naue.com) · [www.naue.com](http://www.naue.com)

## OP ONS KUNT U BOUWEN

### Projectondersteuning bij paalmatrasen

TenCate biedt kennis en ondersteuning bij het ontwerp en de realisatie van uw paalmatras project. Wereldwijde ervaring en uitvoerige kennis van de meest recente ontwerprichtlijn zorgen voor een economisch en betrouwbaar ontwerp. Onze oplossing bevat ontwerpadvies, hoge sterkte geogrids en geotextielen en installatie ondersteuning. TenCate, materials that make a difference!



#### TenCate Geosynthetics Netherlands bv

Hoge Dijkje 2  
7443 AE Nijverdal  
Postbus 9  
7440 AA Nijverdal

Tel. +31 (0)546 544 811  
Fax +31 (0)546 544 490

geonederland@tencate.com  
www.tencategeosynthetics.com

**TENCATE**  
materials that make a difference

# Deltagoot

**Deltares**  
Enabling Delta Life

## > Hydrodynamisch onderzoek op ware grootte

De Deltagoot is een unieke testfaciliteit waar op ware grootte kan worden getest wat het effect is van extreme golven op dijken, duinen, golfbrekers of offshore constructies. Waterbouwkundige constructies kunnen natuurgetrouw worden beproefd onder controleerbare en extreme omstandigheden.

De Deltagoot biedt kostenefficiënte en toekomstbestendige oplossingen voor:

- waterkeringen, duinen, golfbrekers
- offshore constructies
- bescherming van kabels en pijpleidingen
- geotubes en geocontainers
- reststerkte van dijken en steenzettingen
- verweking van de ondergrond
- nature based toepassingen zoals golfdempende werking van vegetatie



[www.deltares.nl/deltagoot](http://www.deltares.nl/deltagoot)