GEOKUNST

22E JAARGANG NUMMER 2 JUNI 2018
ONAFHANKELIJK VAKBLAD VOOR
GEBRUIKERS VAN GEOKUNSTSTOFFEN

Deeltjesbeweging in een ballastbed gestabiliseerd met biaxiale en multiaxiale geogrids

Paalmatrassen internationaal: state of the art

KATERN VAN GEOTECHNIEK

Geokunst wordt mede mogelijk gemaakt door:

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

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

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, Gouderak
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
Tensar International, 's-Hertogenbosch
Terre Armee BV, Waddinxveen
Vulkan-Europe BV, Gouda
Witteveen + Bos, Deventer

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.

Progress through performance
A Low&Bonar solution

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

Van de redactie

Beste Geokunst lezers,

Per 1 januari 2018 zijn de activiteiten van SBRCURnet gestopt. Hiermee komt een einde aan meer dan 50 jaar van ontwikkeling van onder andere technische handboeken en richtlijnen voor de geotechniek en de funderingstechniek. Ook op het gebied van geokunststoffen zijn de afgelopen jaren diverse publicaties verschenen, met grote toegevoegde waarde voor het gehele vakgebied: voor opdrachtgevers, ontwerpers, leveranciers en uitvoerders. Hoe nu verder? Geen nieuwe inzichten ontwikkelen en vastleggen in publicaties is in kennisland NL geen optie. CROW zal de rol van SBRCURnet gaan overnemen, en de komende periode moet dat nader ingevuld worden. Vanuit het NGO bestuur zullen we met CROW het gesprek aangaan hoe de we de ontwikkeling en vastlegging van nieuwe kennis rondom geokunststoffen ook in de toekomst kunnen waarborgen. We zullen U de komende tijd informeren over de verdere invulling.

En dan nu naar de inhoud van deze GeoKunst, met twee interessante artikelen: een laboratoriumonderzoek naar de interactie van spoorwegballast en geogrids, en een verslag van de 1e internationale workshop over paalmatrassen in China.

Spoorwegballast die hoekig is kan belastingen goed afdragen. Bij langdurige cyclische belasting treedt er echter blijvende vervorming op door beweging van de korrels in het ballastbed. Door het toepassen van vormvaste geogrids worden deze bewegingen beperkt, waardoor minder spooronderhoud nodig is. Veel onderzoeken onderschrijven dit, maar er is nog weinig onderzoek gedaan naar de interactie tussen de granulaire deeltjes en een geogrid. Paul ter Horst doet verslag van recent in de USA uitgevoerd onderzoek naar dit fenomeen.

In het tweede artikel beschrijft Suzanne van Eekelen de tweedaagse First International Workshop Geosynthetic-Reinforced Piled-Supported Embankments in Shanghai in 2017. Doel van de workshop was ervaringen uit de praktijk en resultaten van onderzoek van de verschillende landen uit te wisselen, te begrijpen en te zien waarover overeenstemming is en waarover (nog) niet. Een kleine twintig specialisten uit tien landen presenteerden er hun werk. Met een publiek van rond de 70 belangstellenden werd er gediscussieerd en lukte het gemeenschappelijke conclusies te formuleren. Het artikel geeft een overzicht van de belangrijkste daarvan.

Erik Kwast
Eindredacteur Geokunst

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 **E. Kwast**
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)
Postbus 358
3840 JA Harderwijk
Tel. 085-1044 727

www.ngo.nl

Deeltjesbeweging in een ballast-bed gestabiliseerd met biaxiale en multiaxiale geogrids

ing. P. ter Horst
Tensar International

Inleiding

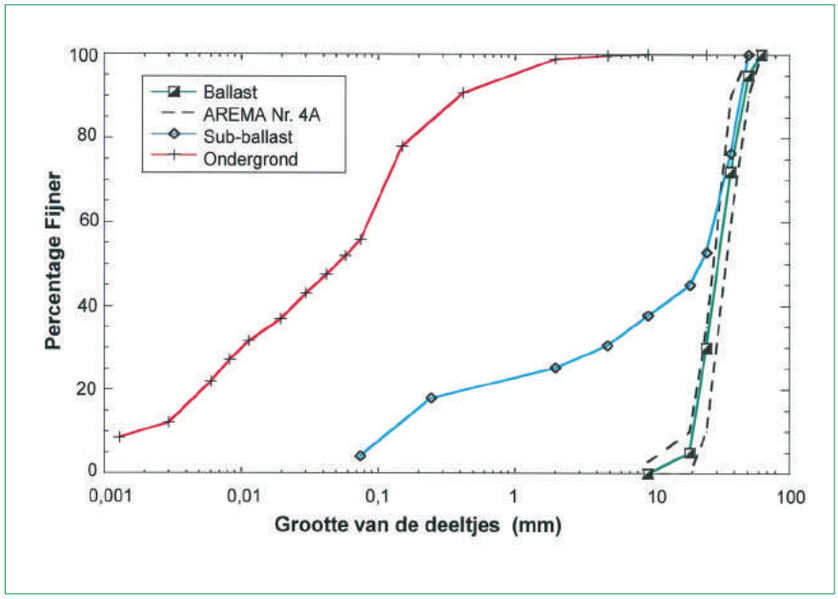
Spoorwegballast bestaat uit granulair materiaal met korrels van 2 tot 5 cm. Het ballastbed heeft als doel de belastingen van het spoor op de dwarsliggers af te dragen en een goede drainage te waarborgen. De horizontale beweging en rotatie van de stenen in het ballastbed dragen in hoge mate bij aan de zetting van de spoorstaven. De toepassing van vormvast geogrids die de stenen in het ballastbed insluiten en op hun plek houden heeft zijn werking reeds bewezen. Deze geogrids – bestaande uit een regelmatig patroon aan integraal verbonden trekelementen – minimaliseren de slijtage van de ballaststenen en zorgen dat de geometrie van de spoorstaven intact blijft. Er is echter weinig onderzoek gedaan naar de interactie tussen de granulaire deeltjes en het geogrid. Daarnaast is nog niet eerder de vorm van het geogrid in een dergelijk onderzoek meegenomen.

De primaire functie van geogrid bij het stabiliseren van een ballastbed is om de ballast lateraal op te sluiten, de deeltjesbeweging te minimaliseren, het wegzakken van de ballast in de ondergrond tegen te gaan en zodoende het het tijdsinterval tussen onderhoudsmaatregelen te verlengen. Gebruikelijke producttypes geogrid voor ballaststabilisatie zijn gestrekt geogrid uit geponste plaat met een biaxiale geometrie (rechthoekige of vierkante openingen - BX), en met een multi-axiale geometrie (driehoekige openingen, triangulair - TX). Uit veel experimentele en numerieke studies blijken de voordelen van BX- en TX-geogrids in het verbeteren van de prestaties van geogrid-gestabiliseerde lagen. De verbetering is een gevolg van het vergroten van interlock, het verbeteren van kracht-overdracht en -distributie, en daardoor het verminderen van permanente vervorming. Dit maakt de onderhoudscycli voor spoor tot wel een factor 2,5 langer, en daarmee het onderhoud per tijdvak evenzoveel minder.

Omdat er weinig studies zijn op het niveau van de individuele granulaire deeltjes en het geogrid door laboratorium- of veldonderzoek, is het mechanisme nog niet goed begrepen. Daarbij concentreren de bestaande studies met geogrid als stabilisator zich hoofdzakelijk op langetermijnbelastingen. Weinig studies hebben de deeltjesbeweging in de eerste fase onmiddellijk na de installatie onderzocht. De beweging van de ballastdeeltjes wordt vaak in twee fasen verdeeld: verdichting en na-verdichting. Verdichting treedt op onmiddellijk na de installatie en kan significante herschikking van ballastdeeltjes teweegbrengen. De fase van na-verdichting is de fase waarbij de stabilisatie van het geogrid volledig is gemobiliseerd.

Dit artikel beschrijft onderzoek waarin specifiek wordt gekeken naar het gedrag van de afzonderlijke korrels (de ballast'stenen'), de verplaatsing van de korrels en hun rotatie. Daarbij gaat het met name over de wijze waarop de korrels en de starre ribben van het geogrid samenwerken (door in- en opsluiting) op het niveau van separate deeltjes tijdens de verdichtingsfase. Daarvoor zijn testen in een ballast box uitgevoerd om het gedrag van ballastdeeltjes te simuleren onder cyclische belastingen. Om de beweging van individuele korrels bij cyclische belasting te volgen, zijn in elke test vier draadloze apparaten, bekend als SmartRocks, op verschillende posities ingebed in de ballast.

Figuur 1 – *Korrelverdeling van ballast, sub-ballast, en ondergrond*



1. Materialen

1.1. BALLAST, SUB-BALLAST EN ONDERGROND

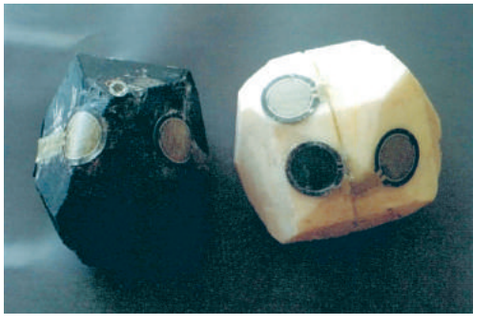
Het ballastmateriaal in deze studie bestond uit schone hoekige granietkorrels met een gradatie is conform AREMA No. 4A. Als sub-ballast is gemalen kalksteen gebruikt, fijner dan de ballast en grover dan de ondergrond. De sub-ballast vormt zodoende een filter (scheiding) zodat ondergronddeeltjes niet in het ballastbed kunnen migreren waardoor dit zou vervuilen. De gebruikte ondergrond bestond uit (fijn) gemalen kalksteen De ondergrond werd verdicht bij een watergehalte van 15% om een CBR-waarde van ongeveer 5 te bereiken, om zo een flexibele ondergrond na te bootsen (Bathurst en Raymond, 1987). De korrelverdelingen van ballast, sub-ballast, en ondergrond zijn weergegeven in figuur 1.

1.2. GEOGRID

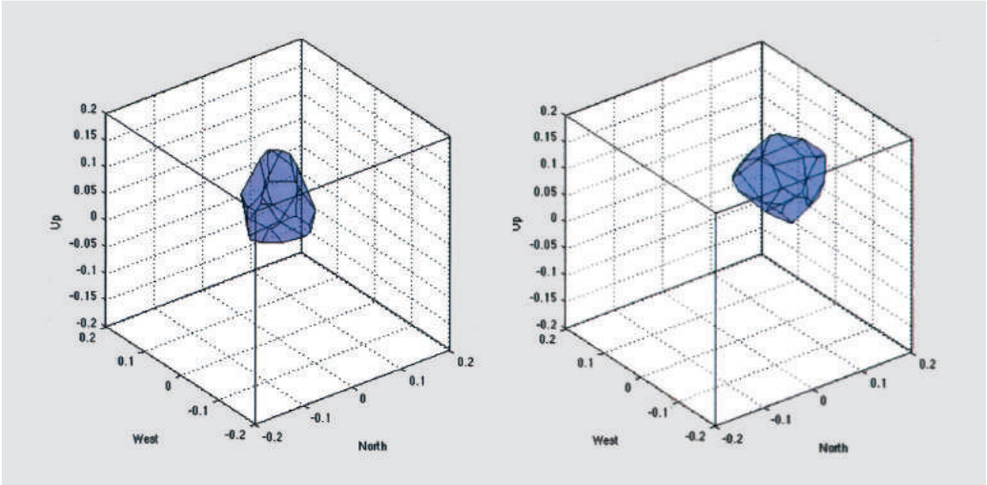
In deze proevenserie zijn twee gebruikelijke producttypes geogrid voor ballaststabilisatie toegepast, een biaxiaal geogrid, met rechthoekige

Samenvatting

Spoorwegballast is hoekig van vorm en kan daardoor belastingen goed afdragen. Bij langdurige cyclische belasting treedt er echter blijvende vervorming op door bewegingen van de korrels in het ballastbed. Door het toepassen van vormvaste geogrids worden deze bewegingen beperkt. Veel onderzoeken onderschrijven dit, maar er is nog weinig onderzoek naar de interactie tussen granulaire deeltjes en het geogrid. De hier beschreven studie behandelt naast het onderzoek van die interactie ook de invloed van de vorm van het geogrid. Uit het onderzoek blijkt dat de vorm sterke invloed heeft op de interactie en daarmee de prestaties van de spoorconstructie.



Figuur 2a – *SmartRock.*

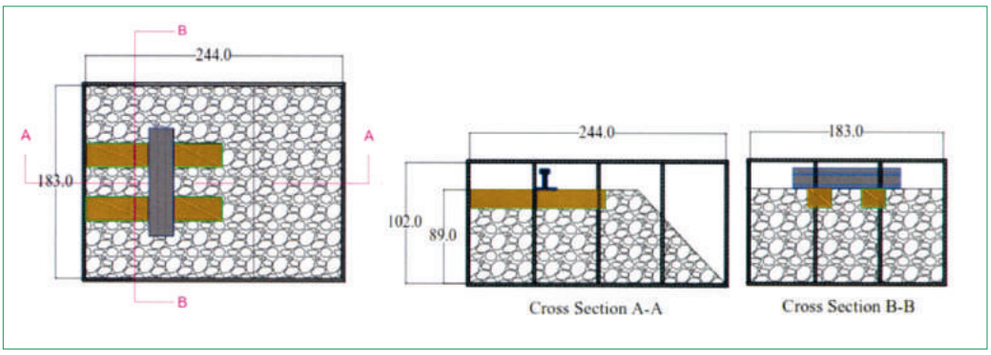


Figuur 2b – *Visualisatie van SmartRock.*

openingen (BX) (maaswijdte 40 bij 60 mm), en een multi-axiaal, met driehoekige openingen (triangular – TX) (maaswijdte 60 mm) (zie figuur 5). Voor iedere test werd een geogrid op maat gesneden in de ballast box en zodanig geplaatst dat de fabricagerichting van het geogrid was georiënteerd in de lengte van de ballast box. Het geogrid werd in diepte gepositioneerd op het grensvlak van de ballast en de subballast.

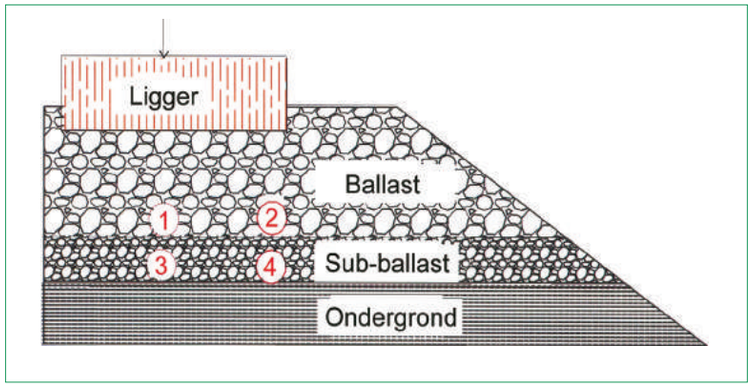
2. SmartRock instrumentarium

De deeltjesbeweging in de ballast onder cyclische belastingen werd gevolgd met behulp van een draadloos instrument genaamd SmartRock (figuur 2a). SmartRock is een met behulp van 3D printtechnologie vormgegeven namaak ballaststeen die de beweging van de ballast volgt. Het instrument omvat een gyroscoop, versnellingsmeter en magnetometer, alle drie-assig. Hiermee kunnen de rotatie en verplaatsing van de SmartRock worden gemeten. De SmartRock stuurt de meetgegevens naar een basisstation via Bluetooth zodat de data gevisualiseerd en geanalyseerd kan worden. In totaal zijn vier SmartRocks gebruikt per testopstelling. Liu et al. (2016) geven een uitgebreide beschrijving van de werking, visualisatie en effecten van de SmartRock, die in hun groep ontwikkeld is (zie Figuur 2b).



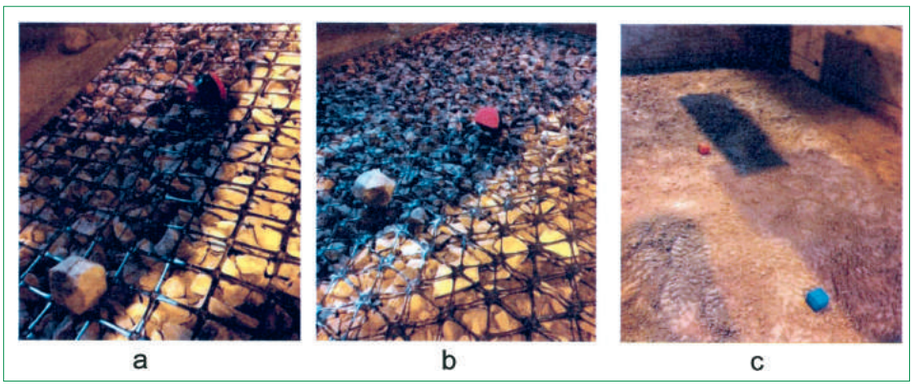
Figuur 3 – *Geometrie van de ballast box [maten in cm].*

Figuur 4 – *Dwarsligger, ballast, sub-ballast, ondergrond, en SmartRocks op de posities 1, 2, 3 en 4.*

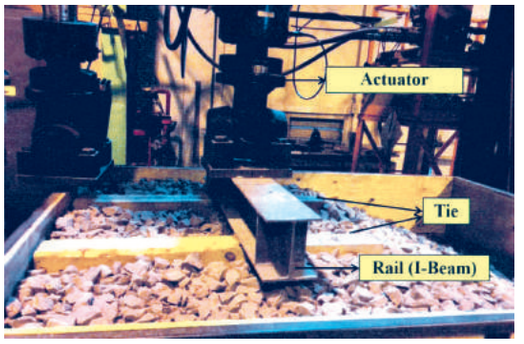


3. TEST-OPSTELLING

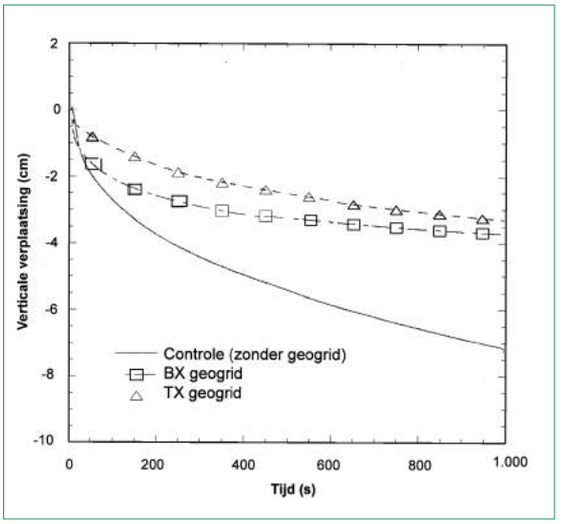
Een halfmodel van een typische spoorwegconstructie is opgebouwd in een container, de zogenaamde ballast box van 244 cm lang, 183 cm breed en 102 cm hoog. De opbouw bestond uit ca 15 cm ondergrond, een 10 cm dikke laag sub-ballast en 30 cm ballast. Op de bovenzijde van het ballastbed werden twee dwarsliggers geplaatst, hart op hart 50 cm en daarop een spoorstaaf (I-balk). De afstand tussen de schouder van het ballastbed en het einde van de dwarsligger was 30 cm. De helling van het ballastbed was 1:2 (v:h), wat een typische helling is voor een praktisch ballastbed. De dwarsliggers waren 75 cm lang, 18 cm breed en 18 cm hoog. Al met al werd het invloedsgebied onder één spoorstaaf opgebouwd. De vier posities waar de SmartRocks werden geïnstalleerd zijn aangegeven in figuur 4. SmartRocks werden geplaatst aan de onderzijde van de



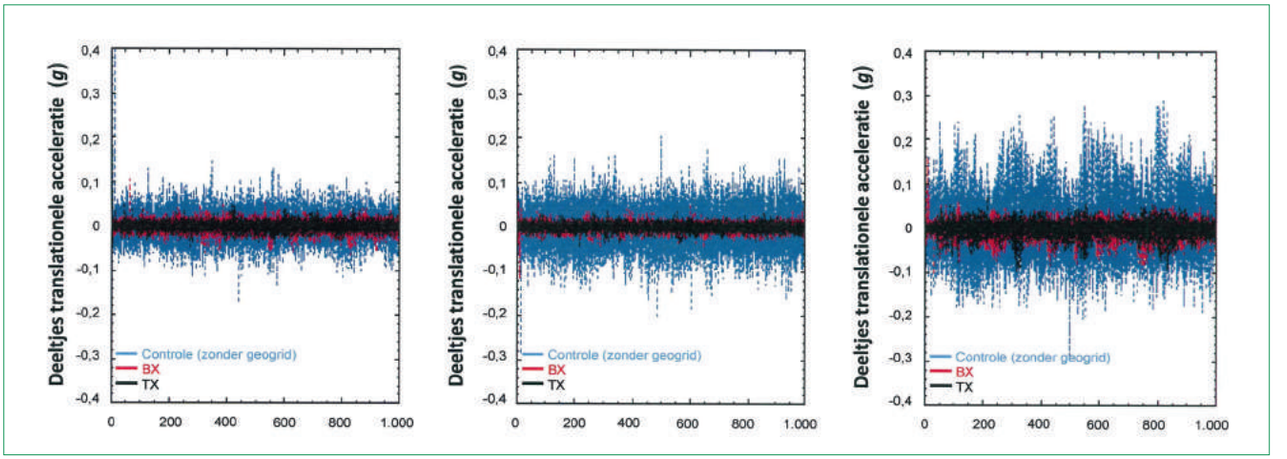
Figuur 5 – *SmartRocks geplaatst op het oppervlak van (a) BX geogrid, (b) TX geogrid, en (c) ondergrond.*



Figuur 6 – *Actuator, Spoorrail (I-Beam), en dwarsliggers (Tie) op ballastbed in de ballast box.*



Figuur 7 – *Gemeten verticale verplaatsing versus belastingcycli.*



Figuur 8 – *Lineaire versnelling in de x-, y- en z-richting (respectievelijk: links, midden en rechts) van de SmartRock op positie 1.*

ballast (positie 1 en 2) en aan de onderzijde van de sub-ballast (positie 3 en 4), onder het midden en onder de rand van de (halve) dwarsligger. Drie soorten opbouwen werden geconstrueerd: één zonder geogrid (controlemeting), één met een BX-geogrid en één met een TX-geogrid (figuur 5). Bij de tests met geogrid werd het geogrid geplaatst op het grensvlak van ballast en subballast.

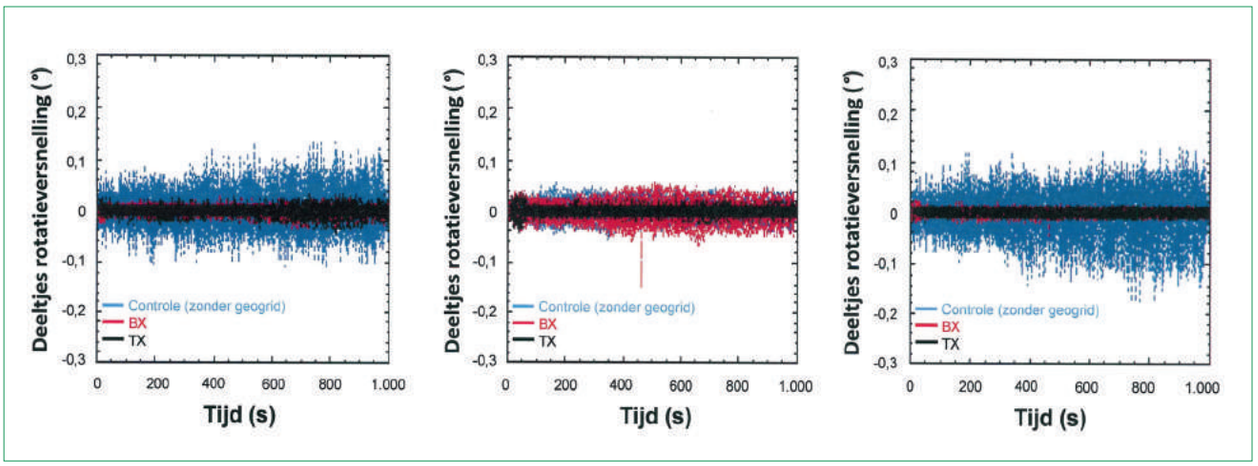
De belasting werd aangebracht met behulp van een (belastings-)actuator met een maximale kracht van 490 kN (zie Figuur 6). De actuator was voorzien van een verplaatsingsopnemer. De experimenten in deze studie zijn krachtgestuurd uitgevoerd, met een sinusvormige belasting van 0 - 85 kN en een belastingfrequentie van 1 Hz, overeenkomend met de range van een typisch treinwiel. Om variaties in de testresultaten ten gevolge van het zetten van de dwarsliggers te voorkomen werd een statische belasting van 1 kN aangebracht.

In de praktijk zijn de eerste paar honderd belastingcycli belangrijk omdat dan de meest significante herschikking van de deeltjes zich voordoet ten gevolge van verplaatsing en rotatie. In deze studie werden bij elke test 1.000 belastingcycli toegepast om de ontwikkeling van de verdichting gedurende deze eerste fase na te bootsen en te onderzoeken wat de bewegingen van de ballastdeeltjes zijn.

4. Resultaten

De verticale verplaatsing (zetting) in het ballastbed wordt in Figuur 7 voor de drie tests weergegeven, als functie van de tijd oftewel het aantal belastingcycli (belastingfrequentie 1 Hz). De verticale verplaatsing neemt toe met het aantal belastingcycli, maar de vervorming gaat steeds trager. In alle gevallen, met en zonder geogrid, nam de verticale verplaatsing snel toe tijdens de eerste ongeveer 100 belastingcycli, waarschijnlijk als gevolg van een snelle herschikking van ballast bij de eerste belasting. De stabilisatie door de geogrids wordt pas na deze eerste verdichting volledig gemobiliseerd. In de fase na de eerste 100 cycli gaan de vervormingen met en zonder geogrid uiteenlopen.

In de met geogrid gestabiliseerde ballast ontwikkelden de vervorming zich pas na veel meer belastingcycli, en daarbij traden ook kleinere verticale verplaatsingen op, dan in het niet gestabiliseerde ballastbed. Na 1000 cycli was de geaccumuleerde verticale verplaatsing ruwweg half zoveel als bij de niet-gestabiliseerde ballast:



Figuur 9 – *Deeltjes rotatieversnelling opgenomen in x-, y-, en z-richting (respectievelijk: links, midden en rechts) van de SmartRock op locatie 1.*

van ongeveer 7,4 cm (controlemeting) tot 3,8 cm met het BX-geogrid en tot 3,3 cm met het TX-geogrid. Deze verticale verplaatsingstrends in de tijd zijn dezelfde als die in de experimenten van Qian et al. (2013) en de discrete elementen berekening van Jas et al. (2015). De verminderde verticale verplaatsing is waarschijnlijk te danken aan de in- en opsluiting (interlock en confinement) door het geogrid waardoor ballastdeeltjes vast worden gehouden en niet kunnen verplaatsen of roteren. Hoewel de geaccumuleerde verticale vervorming van de ballastlaag na 1000 cycli vergelijkbaar was bij toepassing van beide geogrids, waren voor een gelijke vervorming in de ballast met TX-geogrid toch ongeveer 50% meer belastingcycli nodig.

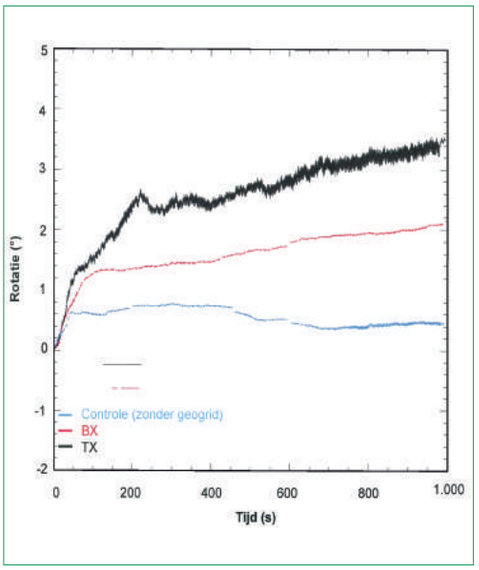
De beweging in real time van de SmartRocks geeft de bewegingen van de omringende ballaststenen tijdens cyclische belasting weer. Daarmee kon het beperkende effect van het geogrid op deeltjesniveau onderzocht worden. Als voorbeeld zijn de versnellingen van de SmartRock op positie 1, weergegeven in Figuur 8. De x-as is de dwarsrichting (richting van de dwarsligger), de y-as is de langsrichtig (de spoorrichting), en de z-as is de verticaal. De blauwe curve is de controlemeting, rood het BX- en zwart het TX-geogrid. De lineaire versnellingen van de SmartRocks op alle vier locaties werden kleiner en meer consistent (met minder fluctuaties) als er een geogrid was opgenomen in de opstelling. In de controletest vertoonden de lineaire versnellingen veel extremen (uitschieters) die leidden tot onherstelbare vervormingen.

In vergelijking met de controle-test leidt de aanwezigheid van beide geogrids tot geringere verplaatsingen. Ter plaatse van de dieper ingebouwde SmartRocks (posities 3 en 4) blijkt vooral het TX-geogrid effectief om de verplaatsingen van de ballastdeeltjes te stabiliseren.
Een voorbeeld van de rotatieversnellingen van de SmartRocks op positie 1 is weergegeven in figuur 9. Rotaties van de deeltjes worden verkregen door de integratie van de rotatiesnelheid (Figuur 10, positie 1 als typisch voorbeeld). Ook bij de rotaties zijn de amplitudes bij het TX-geogrid het kleinst. Zonder stabilisatie blijken de versnellingen sterk te variëren wat resulteert in grote verschillen in hoekverdraaiing. Met een geogrid, en met name een TX-geogrid waren de rotaties stabieler en consistenter, wat resulteert in een 300% afname. De belastingen werden door de zeshoekige ringen in het geogrid veel effectiever doorgegeven. Het stabiliserend effect van zeshoekige structuren is uiteraard ook bekend van o.a. koepels.

Een discrete elementen berekening door Jas et al. (2015) heeft aangetoond dat in met geogrid gestabiliseerde ballast zowel het aantal contacten als de grootte van de contactkrachten aanzienlijk toenemen in vergelijking met ongestabiliseerde ballast, als gevolg van de interlock. De korrels zullen daardoor minder over elkaar glijden en rollen zodat minder vervorming optreedt.

De verplaatsingen aan de bovenkant van het ballastbed en de contactkrachten op het grensvlak van geogrid en ballast bevestigen wat al jaren werd vermoed met betrekking tot het effect van geogrid op het overall gedrag van het ballastbed. Echter zijn nu voor het eerst de rotaties van individuele deeltjes geregistreerd op het grensvlak geogrid-ballast zodat duidelijk wordt hoe een geogrid leidt tot beperking van de vervorming.
Met een statistische analyse is nagegaan of de effecten van de twee geogrids significant verschilden. Het bleek dat het waargenomen verschil tussen de het BX-geogrid en het TX-geogrid inderdaad een significant verschil in prestaties weergeeft.

Omdat korrelbeweging en vervorming kan optreden als gevolg van herschikking, schuren, breuk, of verdichting van het ballastbed, is ook



Figuur 10 – *Gemeten verticale verplaatsing versus belastingcycli.*

nagegaan of tijdens de experimenten verbrijzeling was opgetreden. Uit zeefanalyses voor en na elke test bleek geen significante verandering in gradatie. Daaruit blijkt dat de ballastdeeltjes in deze studie niet merkbaar breuk, dan wel slijtage, vertonen onder cyclische belastingen. Breuk was dus niet de belangrijkste reden voor de verschillen van vervorming van het ballastbed en deeltjesbeweging in deze tests.

In eerder onderzoek (Liu et al, 2016) is onderzoek gedaan naar de herhaalbaarheid van testresultaten in de ballast box. Daaruit bleek een redelijk mate van reproduceerbaarheid.

5. Conclusies

Met een reeks testen in een ballast box is het mechanisme en het effect van geogrids op deeltjesbeweging onder cyclische belasting in een

ballastbed onderzocht. Draadloze SmartRock instrumentatie werd ingebed op verschillende plaatsen in het ballastbed om de beweging van de stenen te volgen, op verschillende dieptes. Drie typen tests werden uitgevoerd: één zonder geogrid als controlemeting, één met een rechthoekig (biaxiaal, BX) geogrid, en één met een triangulair (TX) geogrid. In alle experimenten volgden de SmartRocks met succes de real time bewegingen, verplaatsingen en rotaties, van individuele korrels. Daaruit kan geconcludeerd worden dat SmartRock een zeer goed bruikbaar monitoring-instrument is voor ballastgedrag op het niveau van individuele korrels.

Specifiek voor de testomstandigheden in deze studie (type ballast, type geogrid, belasting) kan worden geconcludeerd:

1. Het vormvaste BX-geogrid en TX geogrid verminderden de geaccumuleerde verticale verplaatsing aan de bovenkant van het ballastbed laag aanzienlijk in vergelijking met de controlemeting. Dit impliceert dat minder vaak onderstoppen van het ballastbed nodig is bij toepassing van een vormvast geogrid.
2. Een geogrid versterking vermindert translatie en rotatie van de ballaststenen significant bij een cyclische belasting. Het TX geogrid was daarin effectiever dan het BX geogrid.
3. Op grotere diepte was het versterkingseffect van de geogrids geringer. Ook daar was TX wel effectiever dan BX.
4. Rotaties van de SmartRock vlak boven het geogrid werden vooral beperkt door de interlock met de geogrid-openingen.
5. Na 1000 belastingscycli bleken significante verschillen te bestaan in de prestaties van het BX- en het TX-geogrid. Door de betere interlock en opsluiting zijn in het TX-geogrid ca. 50% meer belastingscycli nodig om tot eenzelfde vervorming te komen als een BX- geogrid.

Dit artikel is een samenvatting en bewerking van: Comparative Evaluation of Particle Movement in Ballast Track Structure Stabilized with Biaxial and Multiaxial Geogrids, 2017, door Shushu Liu en Tong Qiu (The Pennsylvania State University, USA, Civil and Environmental Engineering), Hai Huang (Penn State Altoona, Rail Transportation Engineering) en Jayhyun Kwon (Kennesaw State University, USA, Civil and Construction Engineering).

Vertaald en bewerkt door Paul ter Horst, Tensar International, Nederland.

Referenties

– Liu, S., H. Huang, T. Qiu, en J. Kwon. Effect of Geogrid on Railroad Ballast Particle Movement. Journal of Transportation Geotechnics, Vol. 9, 2016.

– Bathurst, R. J. en G. P. Raymond. Geogrid Reinforcement of Ballasted Track. Transportation Research Record, No. 1153, 1987.

– Qian, Y., D. Mishra, E. Tutumluer en J. Kwon. Comparative Evaluation of Different Aperture Geogrids for Ballast Reinforcement Through Triaxial Testing and Discrete Element Modeling. Proceedings of the 2013 Geosythetics Conference, Long Beach, Calif., 1-4 april, 2013.

– Jas, H., M. Stahl, H. Jinietzky, L. te Kamp en T. Oliver. Discrete Element Modeling of a Trafficked Sub-base Stabilized with Biaxial and Multi-Axial Geogrids to Compare Stabilization Mechanisms. Proceedings of the 2015 Geosynthetics Conference, Portland, Ore., 15-18 februari, 2015.

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

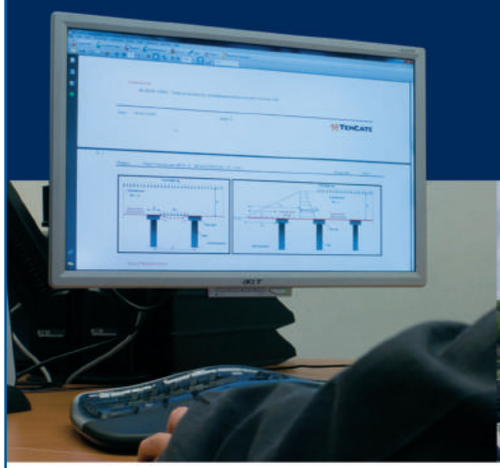
Strukton Civiel

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

OP ONS KUNT U BOUWEN

Projectondersteuning bij paalmatrassen

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

Een veilige dijk zonder dikke kleilaag

Dijkversterking met Bentofix® geosynthetische klei afdichting (bentonietmat)

Professioneel projectadvies en projectbegeleiding

NAUE

NAUE GmbH & Co. KG
Duitsland · Tel: +49 5743 41-0 · info@naue.com · www.naue.com

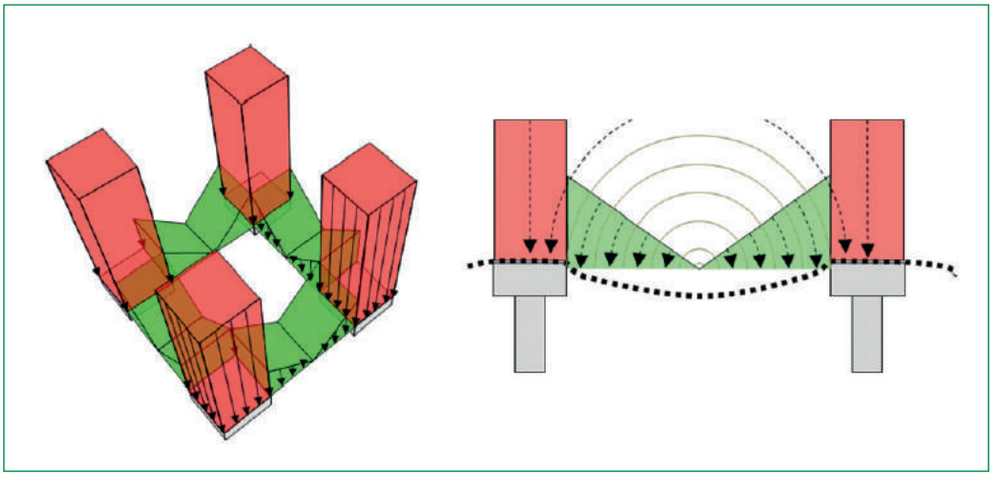
Paalmatrassen internationaal: state of the art

Dr. Ir. Suzanne van Eeleken
Deltares, Netherlands

1 Inleiding

Niet alleen in Nederland zijn paalmatrassen populair. China bijvoorbeeld bouwt in hoog tempo snelwegen en hoge-snelheidslijnen. Deze worden aangelegd in een tunnel, op een viaduct of op een paalmatras; niet op 'gewone' aardebanen met of zonder verticale drainage. Veiligheid en kwaliteit hebben topprioriteit, restzettingen of verschilzettingen zijn niet toegestaan. Om die reden heeft China in 10 jaar tijd honderden kilometers paalmatras gebouwd en daarnaast veel mooi onderzoek uitgevoerd: diverse universiteiten voerden grote onderzoeksprogramma's uit. Zo kunnen we veel leren van hun prachtige groteschaal-proeven en veldmetingen.

China was dus een mooi land voor de eerste internationale workshop over paalmatrassen. Professor Jie Han en ik hebben die gezamenlijk georganiseerd. Jie Han is van Chinese afkomst en werkt al meer dan 20 jaar in de USA. Sinds 2010 is hij full professor aan de universiteit van Kansas. We hadden een kleine 20 topspecialisten uitgenodigd uit China, India, Maleisië, Australië, de USA, Brazilië, Frankrijk, Duitsland, Nederland en Italië. Doel van de workshop was om de ervaringen uit de praktijk en de resultaten van onderzoek in de verschillende landen te delen, te begrijpen en de overeenkomsten en verschillen te identificeren. We hebben dus informatie uitgewisseld over ons onderzoek en onze praktijk en we zijn er in geslaagd om een aantal gemeenschappelijke conclusies te formuleren.



Figuur 1 – *Boogwerking: (a) belastingverdeling ten gevolge van boogwerking: hoe minder de ondergrond meegeeft, hoe meer belasting er heen gaat. De meeste belasting gaat dus naar de paaldeksels, relatief veel belasting gaat naar de geokunststof wapeningstrips tussen de paaldeksels, en op een wapeningstrip is de belasting bij benadering verdeeld als een inverse driehoek (b) het Concentric Arches model geeft een verklaring voor de belastingverdeling. De belasting loopt in de richting van de bogen, hoe groter een boog, hoe meer belasting hij transporteert.*

2 Ontwerp van de geokunststof wapening

2.1 BELASTINGVERDELING: BOOGWERKING

2.1.1 Wat is boogwerking?

Voor het ontwerp van de geokunststof wapening willen we berekenen wat de maximale trekkracht en rek in de geokunststof zal zijn. Die worden bepaald door de verdeling van de verticale belasting op de geokunststof, en deze verdeling wordt bepaald door boogwerking.

Boogwerking is het mechanisme dat de belasting wordt 'aangetrokken' door elementen die relatief stijf zijn of relatief weinig bewegen. Daardoor gaat een relatief groot deel van de belasting rechtstreeks naar de paaldeksels, de verbrede koppen van de funderingspalen. De rest van de belasting rust tussen de paaldeksels op de geokunststof en de ondergrond daaronder. Deze belasting is niet gelijkmatig verdeeld:

– Een relatief groot deel gaat naar geokunststoffen strips tussen de palen. Die strips overspannen immers de kortste afstand tussen twee naast elkaar gelegen palen, waardoor de strip relatief weinig zakt en relatief veel belasting trekt.
– De belasting op een strip is ook niet gelijkmatig verdeeld. Dicht bij het paaldeksel zakt de geokunststof immers minder dan midden tussen de paaldeksels.

We vinden dus een belastingverdeling die lijkt op de belastingverdeling in Figuur 1. Deze belastingverdeling wordt bevestigd door metingen van een groot aantal auteurs, zoals Zaeske (2001) uit Duitsland, Sloan (2011) uit de USA en onze eigen proeven (van Eekelen et al., 2012), en door numerieke berekeningen waaronder die van Girout et al. (2014) uit Brazilië-Frankrijk, Han et al. (2012) uit China-USA, en die van onszelf (Van der Peet en van Eekelen, 2014).

Ons Concentric Arches model van Figuur 2 geeft

Samenvatting

In juni 2017 organiseerden prof Jie Han van de Kansas University en schrijver dezes een tweedaagse workshop in Shanghai, China: de "First International Workshop Geosynthetic-Reinforced Piled-Supported Embankments". Doel van de workshop was ervaringen uit de praktijk en resultaten van onderzoek in de verschillende landen te delen, te begrijpen en te zien waarover overeenstemming is en waarover (nog) niet. Een kleine twintig specialisten uit tien landen presenteerden hun werk, er werd met het publiek van rond de 70 belangstellenden gediscussieerd en we formuleerden gemeenschappelijke conclusies. Dit artikel geeft een overzicht van de belangrijkste daarvan.

een verklaring van de gevonden belastingsverdeling. Dit Nederlandse model wordt door meerdere onderzoekers bevestigd, zoals bijvoorbeeld Moorman (2016), King et al. (2017) en het experimentele werk van Rui et al. (2018) (Figuur 3.) In veel van deze gevallen wordt gevonden dat de bovenste bogen wat hoger zijn (hoge ellipsen) en de onderste bogen wat lager zijn (lagere ellipsen).

Het model in figuur 1 en 2 geeft trekkrachten in de geokunststof die zeer goed overeenkomen met een groot aantal metingen, gedaan in verschillende monitoringsprojecten en proevenseries (Van Eekelen et al., 2015). Daarom is het model opgenomen in onze SBRCURnet ontwerprichtlijn voor paalmatrassen. Deze richtlijn is ook beschikbaar in het Engels en wordt in toenemende mate ook in andere landen toegepast. Tijdens de workshop werd algemeen erkend dat het CA model een goede beschrijving is van het boogwerkingsmechanisme, maar dat betekent niet dat wereldwijd alle rekenmodellen voor paalmatrassen meteen worden vervangen door het CA model.

2.1.2 Welke parameters zijn van belang voor de boogwerking?

Bij relatief veel boogwerking is relatief weinig geokunststof nodig. Er zijn veel parameters die invloed hebben op de boogwerking. Veel auteurs hebben hier onderzoek naar gedaan met proeven of numerieke berekeningen. Hun resultaten zijn vergelijkbaar, namelijk dat de boogwerking sterker wordt (er relatief meer belasting direct naar de palen gaat) bij:

– Een dikkere aardebaan, grotere paaldeksels, kleinere paalafstanden.
– Een sterkere aardebaan: dus een hogere wrijvingshoek of een grotere dichtheid van de aardebaan.
– Meer zakking van de slappe grond tussen de palen, dus meer verschilzetting tussen palen en ondergrond.
– Het toepassen van geokunststof wapening van voldoende stijfheid.
– Meer variabele bovenbelasting op de aardebaan.

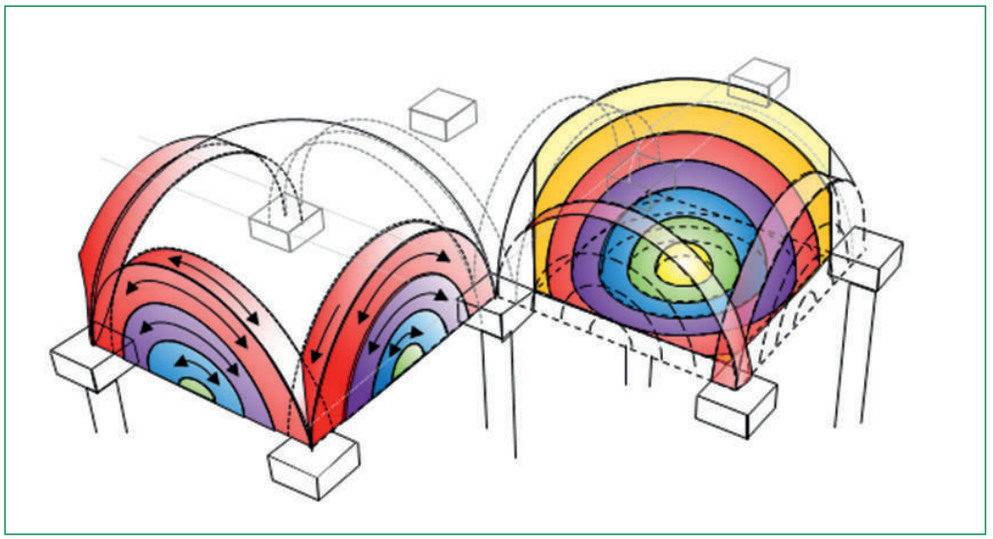
Het Concentric Arches model is in staat de meeste van deze afhankelijkheden te beschrijven. Een uitzondering daarop is de toename van verschilzetting onder de aardebaan. Tijdens deze toename (de consolidatie van de ondergrond) neemt de boogwerking toe. Het CA model beschrijft alleen de eindsituatie, waarbij de ondergrond maximaal is samengedrukt en het zettingsverschil tussen palen en ondergrond op zijn grootst is.

2.1.3 Dynamische belasting

Dynamische belasting kan de werking van de paalmatras bevorderen. Dat is ook de reden dat we met opzet werkverkeer over een paalmatras-in-aanbouw heen laten rijden: metingen laten zien dat dat de boogwerking verbetert. Dat komt doordat de aardebaan dan verdicht en sterker wordt.

Dynamische belasting kan ook de boogwerking reduceren. Dat gebeurt vooral bij passages van zware vrachtwagens over relatief dunne aardebanen. Als de aardebaan daarna even rust krijgt, meten we dat de boogwerking zich weer herstelt. Bij doorgaande dynamische belasting stabiliseert de boogwerking uiteindelijk. De reductie van de boogwerking door zware belastingen is maximaal voor ongewapende en dunne aardebanen. Wordt er geokunststof toegevoegd dan wordt de gevoeligheid van de aardebaan een stuk minder. Is de aardebaan relatief wat dikker, dan wordt de gevoeligheid ook minder. Dit werd gevonden door schaalproeven van Heitz (2006), veldmetingen van Van Eekelen et al. (2010) en grote-schaalproeven Bian en Chen et al. (2017).

De Nederlandse en Duitse ontwerprichtlijn (EBGEO, 2010) reduceren de boogwerking voor de gevallen dat de verkeersbelasting relatief zwaar is. Daarvoor gebruiken we het rekenmodel van Heitz (2006), het model. Heitz baseerde zijn model op metingen in ongewapende aardebanen. Daarmee is het model conservatief (veilig): de gevoeligheid van zijn ongewapende aardebanen voor dynamische belasting is immers groter dan voor aardebanen op palen met geokunststof wapening. In de USA doet Jie Han momenteel onderzoek naar de invloed van lokale dynamische belastingen, die meer schade kunnen geven dan lokale statische belastingen. De invloed van aardbevingen op aardebanen is nog niet onderzocht, hoewel de relevantie van dit onderwerp algemeen wordt onderkend.



Figuur 2 – *3D Versie van het Concentric Arches (CA) model (Van Eekelen et al., 2013)*

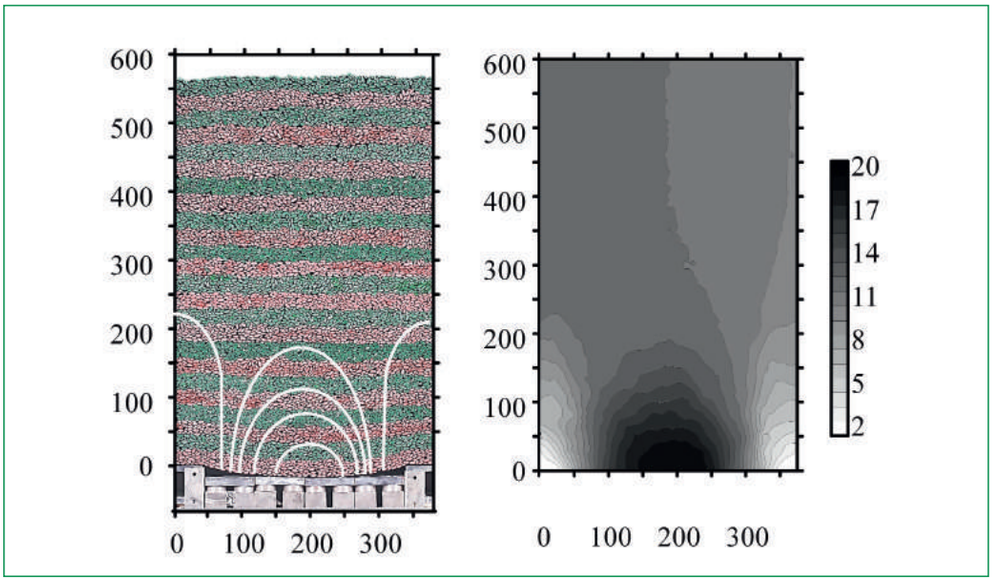
2.2 LOAD DEFLECTION BEHAVIOUR

2.2.1 Modellen

Als de belastingverdeling in de aardebaan eenmaal bekend is, kan de rek en de trekkracht in de geokunststof wapening worden uitgerekend. Wij beschouwen daarvoor alleen de geokunststof strip tussen de paaldeksels. Die belasten we met een inverse-driehoekige belasting. De ondersteuning van de ondergrond wordt eventueel ook meegenomen, in de vorm van een verende ondersteuning.

Sommige andere modellen zijn in staat om de

consolidatie van de ondergrond in rekening te brengen. Zo'n model is in de USA in gebruik: een axiaal-symmetrisch model (Filz et al., 2012), waarbij ondergrond, geokunststof en aardebaan apart worden doorgerekend. Op de randen moeten de belasting en vervorming van deze drie delen op elkaar aansluiten: vandaar dat het model het 'load-displacement-compatibility model' wordt genoemd. Het model beschrijft het gedrag van de ondergrond beter dan onze SBRCURnet richtlijn, maar is axiaal symmetrisch in plaats van 3D en is veel minder goed gevalideerd.
King et al. (2017) uit Australië ondersteunen het Concentric Arches model voor het UGT (uiterste grenstoestand) ontwerp. Voor het BGT (bruikbaarheidsgrenstoestand) ontwerp geven zij echter een alternatief voor de twee rekenstappen. Terecht stellen zij dat de boogwerking afhankelijk is van hoeveel de wapening doorhangt: als hij meer doorhangt, zal de boogwerking toenemen, maar als hij nog meer gaat doorhangen zal de boogwerking op den duur weer afnemen. King et al. doen een voorstel hoe de BGT-rek van de wapening iteratief is te bepalen. Daarbij maken zij gebruik van de empirische 'Ground Reaction Curve' (GRC), door Iglesia et al. (1991, 2013) bepaald op basis van centrifugeproeven.



Figuur 3 – *Deformaties in 2D proeven van Rui et al. (2018). Links de proefopstelling met onderin de paalmatras-constructie, rechts de gemeten deformaties die concentric arches laten zien. Maten in millimeters.*

3 Ontwerpen in de praktijk

3.1 RANDVOORWAARDEN

3.1.1 Geometrie

Er is veel onderzoek gedaan naar de kritische hoogte van paalmatrassen. Heeft een aardebaan minimaal deze kritische hoogte, dan zullen er geen verschilzettingen optreden op maaiveld. In de meeste landen worden aardebanen dunner dan de kritische hoogte niet toegestaan. In Nederland denken we daar anders over. Verschilzettingen op maaiveldniveau zijn niet erg zolang ze optreden voordat we de constructie afwerken. Vóór het asfalteren dus, of voordat het spoor wordt afgewerkt. De vervormingen gedurende de gebruiksfase moeten uiteraard zeer beperkt zijn.
Evengoed kent ook Nederland een minimale dikte voor de aardebaan: 0,66 x de diagonale dagmaat van de palen. Dunnere aardebanen staan we alleen toe tijdens de constructiefase. We rekenen dan met partiële boogwerking. De minimale aardebaandikte is verschillend in de diverse ontwerprichtlijnen en vaak is de eis gelijk aan de veronderstelde kritische hoogte.

Verder ontwerpen wij alleen voor rechthoekige palenpatronen. Dat past beter bij veel geokunststof wapeningsproducten, die orthogonaal worden toegepast. En bovendien begrijpen we dit palenpatroon veel beter dan bijvoorbeeld driehoekige palenpatronen, waarvoor geen ontwerpregels beschikbaar zijn.

3.1.2 Maximale vervormingen

De verschillende landen gaan verschillend om met vervormings-eisen. Vaak wordt alleen een maximale rek-eis gehanteerd voor de geokunststof. In Nederland wordt in de BGT vaak 2 tot 4% eindrek en 1 tot 2% kruiprek van de geokunststof toegestaan, afhankelijk van het project, en afhankelijk van het toegepaste geokunststof. De Britse norm staat 6% eindrek toe, inclusief kruip. Soms wordt voorgeschreven hoeveel de geokunststof maximaal mag doorhangen (USA: 15 cm, Han, 2015). Deze rek en zakking kunnen analytisch berekend worden.

In Brazilië worden alleen zettingseisen gesteld als er grind- of zandpalen, of MIP palen worden toegepast. Frankrijk stelt alleen eisen aan verschilzettingen op maaiveld. Die kunnen het beste numeriek worden berekend. Dat geldt ook voor horizontale vervormingen en de daaruit volgende buigende momenten in de palen.

3.1.3 Palen op stuit, kleefpalen

Palen moeten voldoende stijf zijn in vergelijking met de omliggende slappe grond om een boogwerkingsmodel te kunnen gebruiken voor het ontwerp van een paalmatras. CUR226 en de meeste andere ontwerprichtlijnen zijn gebaseerd op een ratio van de paal-grond modulus groter dan 10 tot 1000. Er is geen overeenstemming in de groep over hoe groot deze ratio mag zijn.
Kleefpalen worden in China regelmatig toegepast, in andere landen gebeurt dat zelden.

3.1.4 Water: aardebaan droog of nat

Er zijn geen paalmatrassen bekend waarin is gemeten, terwijl de aardebaan langdurig nat was door een hoge grondwaterspiegel of door overvloedige regen. Wel hebben diverse auteurs gezien dat excessieve regen een flinke reactie geeft in de boogwerking van een aardebaan op palen. Onze ontwerprichtlijn is ook niet gevalideerd voor onderwater paalmatrassen. Hier is nog onderzoek voor nodig.

3.2 VULLING AARDEBAAN

In Nederland bestaat een aardebaan altijd uit zand of puin- of menggranulaat. In andere landen wordt ook wel stenig materiaal gebruikt, of tropische grond: lateriet. Dit laatste materiaal is cohesief. Deze cohesie wordt niet meegenomen bij het ontwerp.

3.3 ONDERSTEUNING VAN DE ONDERGROND TUSSEN DE PALEN

De slappe grond tussen de palen kan ondersteuning geven aan de geokunststof wapening. Als de grond ook op lange termijn veel ondersteuning geeft, dan kan dat een flinke besparing opleveren voor het ontwerp. In Frankrijk is de ondergrond bijna altijd zo goed, dat hij standaard in het ontwerp mag meedragen. De Britse ontwerprichtlijn, echter, staat ondersteuning van de ondergrond nooit toe. In Nederland ligt dit genuanceerder. De ondergrond is vaak zo slap dat we zeker geen lange-termijn ondersteuning mogen verwachten. In de bouwfase, echter, zal de ondergrond in veel gevallen wel ondersteuning

geven. Het verschil tussen de vervormingen tijdens de bouwfase en de eindsituatie is bepalend bij ons ontwerp.
In China bereikten we overeenstemming dat ondergrond-ondersteuning wel mee mag worden genomen, ook voor lange-termijn berekeningen.

Voorzichtigheid is echter geboden in de volgende situaties:
– Hele slappe grond: cu < 10 kPa.
– Verwekende ondergrond.
– Daling van grondwaterpeil of stijghoogte.
– Sinkholes door het instorten van oplossingsholten in kalksteen.
– Collapsible soil (compactie van losgepakte grond onder invloed van bevochtiging, Chinese löss is hier berucht om).
– Zetting van huisvuil-stortplaatsen.
– Verlies van grond door afgraving of de aanleg van een tunnel dicht bij de paalmatras.

3.4 NUMERIEKE ANALYSE

De deelnemers waren het er over eens dat palen en de geokunststof wapening moeten worden berekend met analytische methoden. Numerieke berekeningen van paalmatrassen zijn zeer foutgevoelig, maar de meeste landen gebruiken numerieke methoden wel voor een overall-check, en voor het berekenen van vervormingen en buigende momenten in de palen. In Nederland en veel andere landen gebruiken we Plaxis voor deze numerieke berekeningen.

De meeste landen, waaronder Nederland, doen naast de analyse van het paalmatrassysteem geen aparte zettingsanalyse of stabiliteitsanalyse.
Strikte zettingseisen kunnen getoetst worden met numerieke berekeningen. Alleen China gebruikt aanvullende limit equilibrium berekeningen (Bishop +) voor het toetsen van de stabiliteit. Australië geeft er de voorkeur aan om na het installeren van de palen een maand te wachten met doorbouwen, zodat de wateroverspanningen kunnen dissiperen.

China kent enkele bezwijkgevallen waarbij stabiliteit een rol speelde. In die gevallen lag de draagkrachtige ondergrond onder een helling, waardoor er een risico bestaat op landslides. Andere gerapporteerde schadegevallen gaan over geroteerde paaldeksels en/of palen die bezwijken op buiging. In deze gevallen hebben horizontale of asymmetrische krachten een rol gespeeld. Mogelijk gaat het hier om uitvoeringsfouten.

4 Constructiedetails

4.1 PILE CAP DESIGN

Veel landen gebruiken gladde paaldeksels, bij voorkeur met afgeronde randen en hoeken, in Brazilië is dat zelfs verplicht. Tussen de paaldeksels en geokunststof zit bij voorkeur iets dat de geokunststof beschermt tegen beschadiging door direct contact met het paaldeksel. Dit is vaak een non-woven of een laag zand.

4.2 OVERLAPPEN OF ZOMEN

De meeste landen met hogere uurtarieven leggen geokunststoflagen een stukje over elkaar heen: de overlap. In de richting van de hoogste sterkte (meestal de lengte-richting van een weg) moet een overlap heel lang zijn (minimaal drie paalrijen), maar het is beter om te proberen de overlappen te voorkomen. Vaak is een rol lang genoeg om niet te hoeven overlappen. In bijvoorbeeld India, en soms ook in Brazilië overlapt men niet: daar worden de geokunststof lagen aan elkaar genaaid. Als dat nodig is wordt daarbij een reductiefactor gebruikt om de sterkte bij de zoom te reduceren.

5 International Society Geosynthetic Reinforced Pile-Supported embankments

Tijdens de workshop in China hebben we een internationale society opgericht die zich bezig zal houden met dit onderwerp. Doel is kennisuitwisseling en samenwerking in onderzoek. Zo bereiden we nu een special issue voor van het internationale journal Geosynthetics International en zullen we in 2022 een tweede internationale workshop organiseren.

Bronnen

— Bian, Xuecheng and Chen, R.P., 2017. Presentaties tijdens de workshop in Shanghai, juni 2017.
— BS8006-1: 2010. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. British Standards Institution, ISBN 978-0-580-53842-1.
EBGEO, 2010. Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen e EBGEO, vol. 2. German Geotechnical Society, Auflage, ISBN 978-3-433-02950-3.
— Van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A., Lodder, H.J., van Tol, A.F., 2012a. Model experiments on piled embankments Part I. Geotextiles and Geomembranes 32: 69-81.
— Van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A., Alexiew, D., 2010. The Kyoto Road Piled Embankment: 31/2 Years of Measurements. In: Proceedings of 9 ICG, Brazil, 1941-1944.
— Girout, R., Blanc, M., Dias, D. en Thorel, L. Numerical analysis of a geosynthetic-reinforced piled load transfer platform - Validation on centrifuge test. Geotextiles and Geomembranes, 42(5):525–539, 2014.
— Han, J., Bhandari, A., Wang, F., 2012. DEM Analysis of Stresses and Deformations of Geogrid-Reinforced Embankments over Piles. Int. J. Geomech. 2012.12:340-350.
— Han, 2015, Principles and practice of ground Improvement, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA. ISBN 978-1-118-25991-7.
— Iglesia, G.R., 1991. Trapdoor Experiments on the Centrifuge- a Study of Arching in Geomaterials and Similitude in Geotechnical Models. PhD thesis. Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, U.S.A.
— Iglesia, G.R., Einstein, H.H., Whitman, R.V., 2013. Investigation of soil arching with centrifuge tests. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 140 (2) http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE) GT.1943-5606.0000998.
— King, D.J., Bouazaa, A., Gniel, J.R., Rowe, R.K., Bui, H.H., 2017. Serviceability design for geosynthetic reinforced column supported embankments, Geotextiles and Geomembranes (2017) 1-19.
— Lawson, C., 2017. Persoonlijke communicatie.
— Moorman, C., 2016. Numerical Investigations on the Load Distribution over the Geogrid of a Basal Reinforced Piled Embankment under Cyclic Loading. Procedia Engineering, Volume 143, pp 435-444.
— Van der Peet, T.C., en van Eekelen, S.J.M., 2014. 3D numerical analysis of basal reinforced piled embankments. In: Proceedings of 10ICG, September 2014, Berlin, Germany. 2014.
— Rui, R. Han, J., van Eekelen, S.J.M., Wan, Y., 2018. Experimental Investigation of Soil Arching Evolution in Unreinforced and Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported Embankments. Onder review bij Journal for Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
— Sloan, J.A., 2011. Column-supported embankments: full-scale tests and design recommendations. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.