

GEO KUNST

21E JAARGANG NUMMER 4 DECEMBER 2017
ONAFHANKELIJK VAKBLAD VOOR
GEBRUIKERS VAN GEOKUNSTSTOFFEN



*Hoe geogrids de prestaties van
wegen verbeteren (deel 1)*

*Verplaatsen van 1,6 miljoen
kilo over gewapende
transportbanen*

KATERN VAN

GEO
TECHNIEK

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 GeoServices BV,
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, Oldemarkt
Kem Products NV,
Heist op den Berg (B)
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
SBRCURnet, Delft
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

**Kwast Consult**

Cascademuur 38
3991 VP Houten
Tel. +31 (0)6 29 27 28 01
info@kwastconsult.nl
www.kwastconsult.nl

**Nederlandse
Geotextielorganisatie (NGO)**

Tel. +31 (0)65 - 064 6760
mail@ngo.nl
www.ngo.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 7 november was de Geotechniekdag in het Chassé Theater te Breda. Een weerzien van vele vakgenoten, leuke lezingen en volop netwerkgelegenheid. Vast onderdeel van de Geotechniekdag is de uitreiking van de Keverling Buismanprijs. Deze prijs kent drie categorieën en wordt eens in de twee jaar toegekend.

Dit keer is een artikel uit de GeoKunst van 2016 genomineerd in de categorie "publicaties uit het vakblad Geotechniek". Het betreft het artikel "Calibration of partial factors for basal reinforced piled embankments" van Piet van Duijnen, Ed Calle, Timo Schweckendiek en Suzanne van Eekelen. Het artikel beschrijft de probabilistische afleiding van de partiële factoren voor de paalmatras ontwerprichtlijn. Gebruik deze set van partiële factoren en je voldoet aan de betrouwbaarheidseis van Eurocode 7, zo laten de auteurs zien. Vanuit NGO zijn we heel trots op de nominatie van dit Geokunst-artikel. Een felicitatie waard!

En dan nu naar de inhoud van deze GeoKunst, met twee interessante artikelen over funderingswapening. Het eerste artikel betreft een projectmatige toepassing van funderingswapening en in het tweede artikel komt de theoretische achtergrond aan de orde.

Om de aanleg van de 3e kolk Beatrixsluis en de verbreding van het Lekkanaal mogelijk te maken, moesten een aantal unieke cultuurhistorische elementen verplaatst worden. Het ging om drie kazematten, een schutsluis en een duikerhoofd. Allemaal onderdelen van de Nieuwe Hollandse waterlinie die ruimte moesten maken voor de verbreding. Met immense draagportalen zijn de betonnen kolossen opgepakt en over zwaar gewapende transportbanen naar hun nieuwe plek getransporteerd. Jeroen Ruiters, Gabriël Rammeloo en Leo Kuljanski doen in het eerste artikel verslag van dit interessante project met een praktische toepassing van funderingswapening.

Een aantal van ons bezocht het project in Nieuwegein op woensdag 27 september. Aannemerscombinatie Sas van Vreeswijk in samenwerking met de NGO en KIVI - afdeling Geotechniek, gaven uitleg over de aanleg

van de 3e kolk Beatrixsluis en een rondleiding over het werk. Een kort verslag van de excursie is terug te vinden op de website van NGO (www.ngo.nl).



Het tweede artikel van Lars Vollmert en Jörg Klompmaker beschrijft de theoretische achtergronden van funderingswapening. Kan een wegfundering überhaupt worden verbeterd met funderingswapening? Bij welke vervormingen levert de wapening dan een toegevoegde waarde? Metingen in proefvakken in een 120 m lange proefbaan zonder verharding helpen bij het beantwoorden van deze vragen. In een vervolg artikel zullen de auteurs de resultaten geven van metingen in een proefbaan met verhardingslagen en het aanvullende laboratoriumonderzoek.

Ik wens u, mede namens het NGO bestuur en de GeoKunst redactie, een voorspoedig en goed gefundeerd 2018 toe.

Ik wens u 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

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

Productie

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

www.ngo.nl

Verplaatsen van 1,6 miljoen kilo over gewapende transportbanen

Gabriël Rammeloo MSc.
Geotechnisch adviseur Geonius



Leo Kuljanski BSc.
Design Engineer Tensar
International



Jeroen Ruiter MSc.
Regional Salesmanager
TenCate Geo



Inleiding

Om de aanleg van de 3e kolk Beatrixsluis en de verbreding van het Lekkanaal mogelijk te maken moesten een aantal unieke cultuurhistorische elementen verplaatst worden. Het ging om 3 kazematten, een inundatiesluis en een duikerhoofd welke onderdeel zijn van de Nieuwe Hollandse waterlinie die ruimte moesten maken voor de verbreding. Met immense draagportalen zijn de betonnen kolossen opgepakt en over zwaar gewapende transportbanen naar hun nieuwe plek getransporteerd.

Woensdag 27 september heeft aannemers-combinatie Sas van Vreeswijk in samenwerking met de NGO en KIVI NIRI uitleg gegeven over dit project en een rondleiding over het werk gegeven. Een kort verslag van de excursie is terug te vinden op de website van NGO (www.ngo.nl).

Het project

De 3e kolk Prinses Beatrixsluis moet ervoor zorgen dat de scheepvaart ook in de toekomst het sluiscomplex vlot en veilig kan passeren. De 3e kolk wordt daarom langer, breder en dieper dan de bestaande kolken. Tegelijkertijd moet de nieuwe kolk zo min mogelijk opvallen in het landschap.

De Prinses Beatrixsluis stamt uit 1938 en is een rijksmonument dat in de wijde omgeving zichtbaar is. Rijkswaterstaat stelde als voorwaarde voor het ontwerp dat het beeld van het historische sluiscomplex met zijn heftorens intact blijft door de 3e kolk als een 'snede' in het landschap aan te leggen. De nieuwe 3e kolk krijgt in plaats van heftorens, dubbele roldeuren.

Afmetingen 3e kolk

De 3e kolk krijgt een lengte van minimaal 276 meter, een breedte van 25 meter en een sluisdiepte voor schepen met een diepgang tot 4 meter. De huidige kolken zijn een stuk kleiner: 225 meter lang en 18 meter breed. Ze kunnen schepen doorlaten met een diepgang tot 3,5 meter. De 3e kolk bevat straks dubbele roldeuren als sluisdeuren. Dit heeft twee grote voordelen: Bij het onverhoopt falen van een sluisdeur - bijvoorbeeld na een aanvaring - blijft de sluis toch in bedrijf. Er is namelijk nog een tweede deur beschikbaar. Het tweede voordeel wordt verkregen doordat bij gebruik van alleen de buitenste deuren de kolk 290 meter lang is en ruimte ontstaat voor het schutten van 2 schepen van ieder 135 meter lang. Dit wordt ook

wel 'schutten XL' genoemd. Een ander bijzonder element in het ontwerp is dat de roldeuren in de sluis kas onderhouden kunnen worden. De roldeuren hoeven voor onderhoud niet naar een onderhoudsdok te worden vervoerd. Hiermee blijft bij onderhoud de hinder beperkt.

Verbreden voorhavens en Lekkanaal

De voorhavens van de Prinses Beatrixsluis worden verbreed om de nieuwe sluis ook voor grotere schepen veilig en toegankelijk te maken, die moeten aan beide kanten van de sluis genoeg ruimte hebben om te manoeuvreren. Om ruimte te maken voor de nieuwe kolk en nieuwe voorhaven, wordt het Lekkanaal over een lengte van zo'n 1200 meter tot 130 meter verbreed.

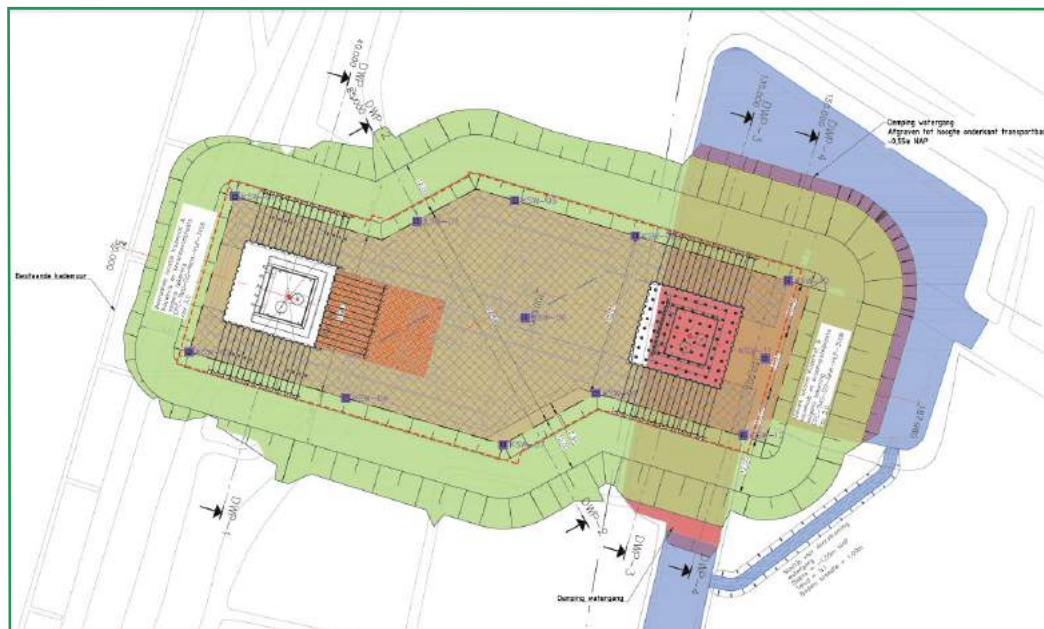


Figuur 1 - Omdat het in de nieuwe dijk ingraven van de objecten de schijn zou wekken van authenticiteit, worden de objecten als gevonden voorwerp ('objets trouvés') in het landschap terug geplaatst, als waren zij liefdevol terzijde geplaatst. Op deze wijze zijn de kazematten ook beter zichtbaar en kan het verhaal makkelijker verteld worden.

Samenvatting

Om het transport van 3 kazematten met een maximaal gewicht van 1,6 miljoen kilo in een gebied met slappe bodem mogelijk te maken zijn een aantal transportbanen aangelegd. In het ontwerp is niet alleen rekening gehouden met een ondergrond bestaande uit klei- en veenlagen, maar

ook met het risico op opbarsten van de bodem bij ontgraving voor de transportbaan. De stabiliteit van deze transportbanen wordt mogelijk gemaakt door het gebruik van verschillende geokunststoffen.



Figuur 2 - Boven-aanzicht transportbaan met links de oorspronkelijke locatie van de kazemat Schalkwijkse Wetering en rechts de nieuwe locatie



Figuur 3 - 3D visualisatie van de transportbaan

Het ontwerp van de transportbanen

Om plaats te maken voor de 3e kolk en de verbreding van het Lekkanaal zijn in totaal zijn drie kazematten en enkele bijbehorende objecten van de Nieuwe Hollandse Waterlinie verplaatst. De Nieuwe Hollandse Waterlinie staat op de nominatie om de Unesco-Werelderfgoed status te verkrijgen. Daarom is gekozen voor een

verplaatsing van de objecten in plaats van sloop. De objecten komen uiteindelijk als een soort museale objecten in schijnbaar willekeurige positie in het landschap te liggen.

De kazemat Schalkwijkse Wetering – de grootste van de drie – dient verplaatst te worden naar een nieuwe locatie ca. 90 m oostelijker. Dit geschiedt

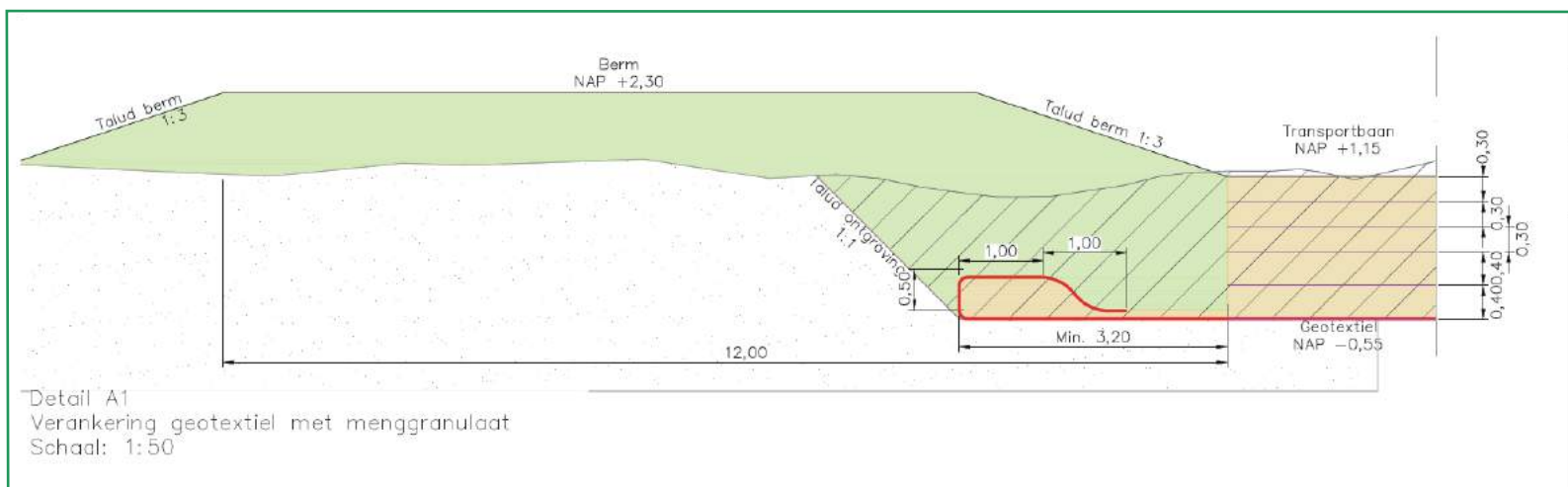
door middel van transport met SPMT's (Self-Propelled Modular Transporters). De bestaande kazemat wordt in zijn geheel van de fundering opgetild en getransporteerd. In de onderstaande beschrijving is het ontwerp van de transportbaan behorende bij kazemat Schalkwijkse Wetering beschreven. De transportbanen voor de overige kazematten zijn op vergelijkbare wijze uitgevoerd.

Gezien de slappe ondergrond bestaande uit klei- en veenlagen is een draagkrachtige fundering ontworpen. Daarnaast is rekening gehouden met het risico op opbarsten van de bodem bij ontgraving voor de transportbaan. Bij het ontwerp is eerst bekeken tot welk niveau ontgraven kan worden ten behoeve van het funderingspakket van de transportbaan. Het maximale ontgravingsniveau wordt in dit gebied bepaald door archeologie (het is niet toegestaan dieper dan 2 m minus maaiveld te ontgraven) en opbarsten van de ondergrond. Het ontwerpniveau van de bovenkant van de transportbaan staat vast. Daarna is bepaald welk funderingspakket past tussen het maximale ontgravingsniveau en de ontwerphoogte van de transportbaan. Tijdens het ontwerpproces zijn meerdere opties afgewogen waarbij kosten, tijd en risico een rol spelen. Zo moest de transportbaan zeer snel afgebroken kunnen worden nadat de kazemat op de nieuwe locatie gearriveerd is. Hierbij is de keus gevallen op een funderingspakket bestaande uit een onderlaag van geotextiel met daarop meerdere lagen geogrids en menggranulaat afgedekt met rijplaten. Een traditionele transportbaan bestaande uit zand of menggranulaat zou een te dik funderingspakket van enkele meters opleveren. Andere opties zoals een paalmatras of zandcementstabilisatie zijn afgefallen omdat het verwijderen ervan lastiger of tijdrovender is.

In figuur 2 is een overzicht van de transportroute gegeven.

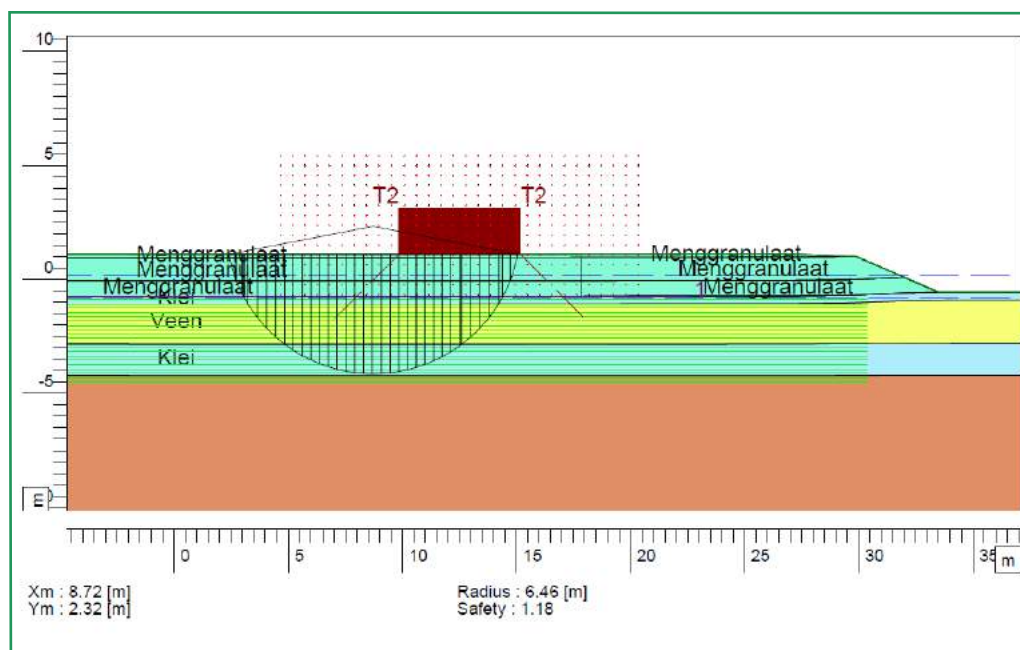
Grondwaterstand

De stijghoogte binnendijs bij de transportbaan is afhankelijk van de waterstand in de Lek welke getijden kent. Door de geohydroloog op het project is een verband aangetoond met de waterstand in de Lek ter plaatse van meetpunt



Figuur 4 - Detail opbouw funderingspakket en stabiliteitsberm. Paarse lijnen geven de lagen geogrids aan

Bouwkup best.



Figuur 5 - maatgevende glijcirkel stabiliteit transportbaan Kazemat Schalkwijkse Wetering

“Hagestein beneden” van Rijkswaterstaat en de peilbuis ter plaatse van transportbaan Schalkwijkse Wetering. De stijghoogte in het eerste watervoerende pakket is aangehouden op NAP +0,2 m, hiermee zijn opbarstberekningen uitgevoerd.

Tijdens de ontgravingen is de stijghoogte d.m.v. een peilbuis dagelijks gemonitord. Tevens is de waterstand bij Hagestein beneden gemonitord via de site van Rijkswaterstaat om een eventuele hoogwatergolf (en daarmee een toegenomen stijghoogte) twee dagen van te voren te zien aankomen.

Ontwerp

Op de nieuwe locatie van de kazemat is eerst de bestaande waterpartij gedempt met zand om zodoende een ondergrond te creëren voor de transportbaan.

Voor de belasting vanuit de SPMT's is een representatieve grondruk gehanteerd van 10,0 ton/m². Deze heeft per “trein” een afmeting van ca. 5,33 x 30,8 m. Bij het transport zijn twee van deze “treinen” ingezet. Het ontgravingniveau/aanlegniveau van het funderingspakket bedraagt NAP -0,55 m. Hierop is het funderingspakket van 1,7 m dikte aangebracht, zodat de transportbaan het ontwerpniveau van NAP +1,15 m behaalt.

De benodigde dikte van het toegepaste funderingspakket is bepaald op 1,7 m, bestaande uit 5 lagen geogrids en menggranulaat (0/31,5 mm). De pakketdikte is bepaald met het programma D-Foundations om de draagkracht van de ondergrond te berekenen. De onderste twee lagen geogrid zijn bedekt met 0,4 m menggranulaat. De bovenste drie lagen geogrid



Figuur 6 - Het laagsgewijs aanbrengen van het geotextiel (wit onderop) en geogrids (zwart) met menggranulaat. De geotextielen zijn haaks op de rijrichting geplaatst. Op die manier wordt de hoge treksterkte aangesproken bij het intreden van zijwaartse afschuiving.

zijn bedekt met 0,3 m menggranulaat. Onder het funderingspakket van 1,7 meter dikte is ten behoeve van de stabiliteit een hoge sterkte geotextiel aangelegd. Zie figuur 4 voor een detail van de opbouw.

De benodigde sterkte van het hoge sterkte geotextiel onder het funderingspakket is bepaald met het programma D-Geo Stability van Deltares. Het gebruikte geotextiel is de TenCate Geolon PET 800, met een karakteristieke treksterkte van 800 kN/m. De rekenwaarde van de treksterkte bedraagt ca. 415 kN/m met in acht name van de partiële veiligheidsfactoren, hiermee is voldaan aan de minimale benodigde treksterkte van 360 kN/m. Het geotextiel is op het ontgravingsniveau aangebracht. Ten behoeve van de stabiliteit is daarnaast een stabiliteitsberm aangebracht rondom de transportbaan. Zie onderstaande

figuur 5 met daarin de maatgevende glijcirkel. Het funderingspakket bestaat uit menggranulaat en meerdere lagen van Tensar TX170 geogrids. Samen vormen deze materialen een mechanisch gestabiliseerde laag (MSL) welke de belasting spreidt onder een hoek van 45° of 1:1. Deze lastspreiding is mogelijk omdat het toegepaste geogrid valt onder de "gestrekte geogrids uit geponste plaat". Dit type geogrids hebben hoge ribben en vormvaste knooppunten, waarbij de korrels in het menggranulaat op hun plek opgesloten worden en een hoge mate van weerstand tegen vervorming ervaren.

De overlap van de geogrids en grondwapening is minimaal 0,30 m. Bovenop het funderingspakket zijn rijplaten geplaatst om de vlakheid van de baan te bevorderen zodat de wielen van de SPMT ook op hun plek konden draaien. De rijplaten leverden geen actieve sterkte bijdrage.

Uitvoering

Voor uitvoering is bij transport van de eerste kazemat de transportbaan getest door middel van een proefbelasting. Hierbij is een kleine SPMT met een gronddruk van 14,1 ton/m² ingezet, welke qua grootte de rekenwaarde van de belasting benaderde. Voor en na de proefbelasting zijn meetpunten vlak naast de transportbaan ingemeten. Hierna is geconcludeerd dat de transportbaan op een paar locaties enkele millimeters is vervormd. Deze minimale vervorming duidde erop dat geen afschuiving of verlies van draagvermogen van de ondergrond optrad. Dit gaf het vertrouwen het transport uit te voeren. Ondertussen zijn alle kazematten en andere objecten van de Hollandse Waterlinie verplaatst, zodat de nieuwe Beatrixsluis gerealiseerd kan worden.



Figuur 7 - Het transport van één van de kazematten (Vreeswijk Oost)

Hoe geogrids de prestaties van wegen verbeteren (deel 1)

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



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



Grondbeginselen: Funderingslagen onder verkeerslasten

Bij de spoor- en wegenbouw worden de ongebonden lagen van de bovenbouw blootgesteld aan hoge verkeersbelastingen. In de wegenbouw liggen de verticale spanningen onder de asfaltlagen tussen de 70 en 400 kPa. De hoge waarden treden vooral op bij dunne asfaltlagen. De funderingslagen in lagere-orde wegen, zoals bijvoorbeeld in de bebouwde kom, worden dan ook veel zwaarder belast dan die in snelwegen.

Zijdelingse gerichte horizontale spanningen voorkomen dat een ongebonden fundering horizontaal vervormt onder de verticale belasting. Deze horizontale spanningen liggen doorgaans tussen 5 en 200 kPa en zijn veel kleiner dan de verticale spanningen (Numrich, 2003). De verhouding tussen de verticale en de

horizontale spanning ligt gewoonlijk in de orde van 2 tot 15.

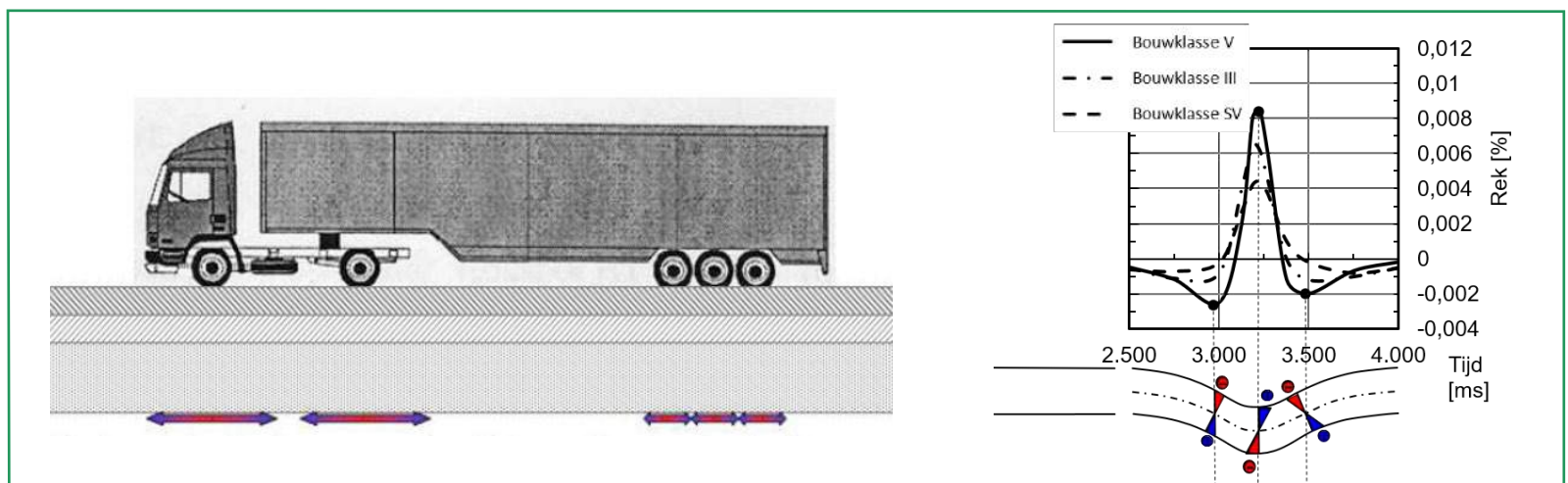
Onder een zeer hoge verticale belasting is meestal slechts een geringe horizontale steundruk aanwezig. Omdat de hoofdspanningen in de fundering onder een voorbij rijdende wielbelasting voortdurend veranderen en roteren vervormt het korrelskelet in alle richtingen. Deze vervormingen hebben een overwegend zijdelingse verschuiving van het korrelskelet tot gevolg. Dit is duidelijk herkenbaar bij bouwwegen (spoorvorming), omdat die niet op een lange levensduur zijn gedimensioneerd. Maar ook bij normale wegen treedt dit effect op; het aantal aslasten, dat nodig is tot de vervormingen zichtbaar worden, is dan echter groter.

Alle verkeerswegen worden door de

verkeersbelasting op buiging belast. Figuur 1 toont het kwalitatieve verloop van spanningen aan de onderzijde van een funderingslaag van de modelstraat van de Bundesanstalt für Strassenwesen (BAST) (Zander, 2007). De absolute waarden van de rekken zijn afhankelijk van de grootte van de aslasten en de laagdikte en stijfheid van de wegconstructie.

De vervorming onder een wielbelasting neemt toe met afnemende stijfheid van de funderingslagen en afnemende draagkracht van de ondergrond. Het voertuig beweegt zich praktisch in zijn eigen spoorvorming, die wordt veroorzaakt door het elastische deel van de vervorming. De funderingslaag wordt daarmee continu vervormd.

De aan de onderzijde van een asfaltlaag gemeten rek (0,01 %, Figuur 1) is van dezelfde orde als



Figuur 1 - Buigrek en -druk aan de onderzijde van een funderingslaag naar Zander (2007). Klasse V = 0,1 – 0,3 miljoen 100 kN aslasten; Klasse III = 1 – 3 miljoen 100 kN aslasten; Klasse SV meer dan 32 miljoen 100 kN aslasten.

Samenvatting

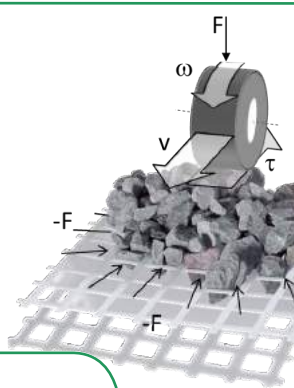
Verkeer kan hoge cyclisch-dynamische belastingen uitoefenen op een wegconstructie. Omdat ongebonden wegfunderingen geen trekkrachten kunnen opnemen, kunnen deze constructielagen worden verbeterd door het aanbrengen van een geogrid (funderingswapening). Een belangrijke vraag bij het ontwerpen is bij welke vervormingen de geogrids gaan functioneren. Zijn grote vervormingen nodig om het geogrid een voorspanning te geven? Of werken ze al bij zeer kleine rekken? De afgelopen 10 jaar is een uitgebreid testprogramma uitgevoerd om antwoord te vinden op deze vragen. Daarvoor zijn veldmetingen uitgevoerd op asfaltwegen en straatsteenverhardingen. Tevens zijn systematische grootschalige proeven op wegen zonder deklaag en cyclische triaxiaalproeven uitgevoerd.

Het onderzoek bestond uit 3 fasen. In fase I werd in een proefvak de ideale opbouw van de wegconstructie onderzocht met bepaling van de laagdikte en stijfheid van de fundering en de draagkracht van de ondergrond. In fase II zijn metingen uitgevoerd op wegen met een verharding van asfalt of straatstenen. Hiermee werden de relevante spanningen en rekken in het versterkte gebied vastgesteld. In de laatste fase III zijn met de nieuw verkregen inzichten op systematische wijze laboratoriumproeven uitgevoerd. In een volgend artikel (deel 2) zullen de resultaten van fase II en III worden gepubliceerd.

De conclusie uit fase I is dat geogrids de funderingslagen al stabiliseren bij zeer geringe rekken, ruim lager dan 1%. De geogrids werken daarbij als trekwapening wat een hoge stijfheid vereist om optimaal te werken.

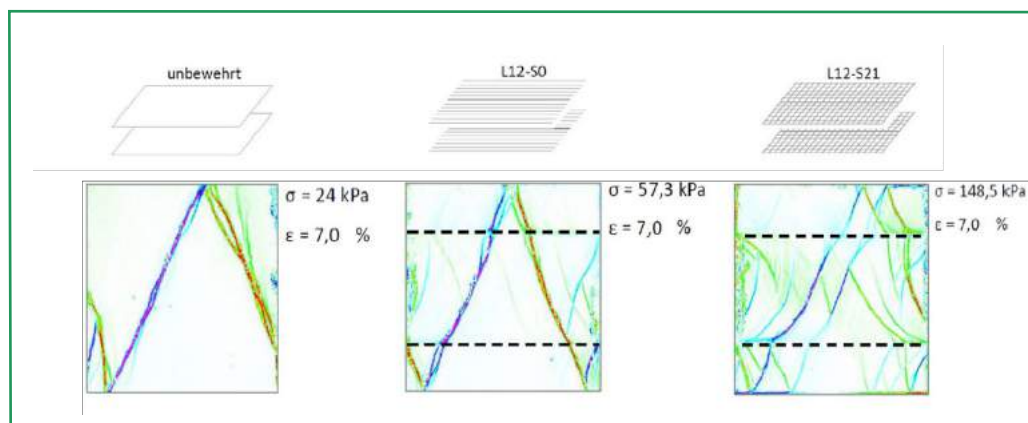


Figuur 2 - Stabilisering door interlocking en wapening van de funderingslaag door in een mineraal aggregaat aangebracht stijf geogrid.



De door de dwarsribben gemobiliseerde weerstand leidt tot een significante verandering van de spanningscondities in het korrelskelet. Onderzoek op geogrid wapening van geëxtrudeerde en gelast staven met gestructureerd oppervlak toont aan dat de dwarsribben tot 80% aan de gezamenlijke weerstand bijdragen (Jacobs, 2016).

Figuur 3 toont drie proefstukken met grote verschillen in mate van wapening die door een verticale, gelijkmatig verdeelde belasting een gelijke vervorming ondergaan. Voor een betere visualisering is hiervoor een relatief grote rek van $\epsilon = 7\%$ gekozen. Bij ongewapende of in één laag gewapend mineraal aggregaat concentreren de maximale schuifspanningen zich op een doorgaand afschuivingsvlak (figuur 3, links). Bij meerdere gewapende lagen mineraal aggregaat, waarbij de wapening bestaat uit uni-axiaal geogrid, zien we vertakte afschuifvlakken optreden (Figuur 3, midden). Als de wapening ook dwarsribben heeft, zoals in figuur 3, rechts, dan ontstaat een duidelijk sterkere verbinding van de korrels onderling. De schuif- en trekspanningen verdelen zich daardoor beter over de fundering. Dat betekent dat een groter gebied wordt geactiveerd door dilatantie. Daardoor wordt de wapening effectiever, terwijl de benodigde maximale trekkracht in de wapening afneemt.



Figuur 3 - Schuifspanningontwikkeling in een proefstuk (Jacobs, 2015). links: proefstuk zonder wapening, max. verticale belasting 24 kPa; midden: uni-axiaale wapening zonder dwarsribben, max. verticale belasting 57,3 kPa; rechts: geogrid met dwarsribben (uni-axiaale staven met dezelfde stijfheid als in het proefstuk in het midden), max. belasting 148,5 kPa.

de vermoeingsrek van het asfalt bijv. (0,02 % tot 0,5 % in een temperatuurbereik tussen -20°C en $+20^{\circ}\text{C}$ (Mollenhauer, 2008) wat een kritiek aspect in het halen van de levensduur inhoudt.

Mechanische samenwerking tussen funderingsmateriaal en wapening

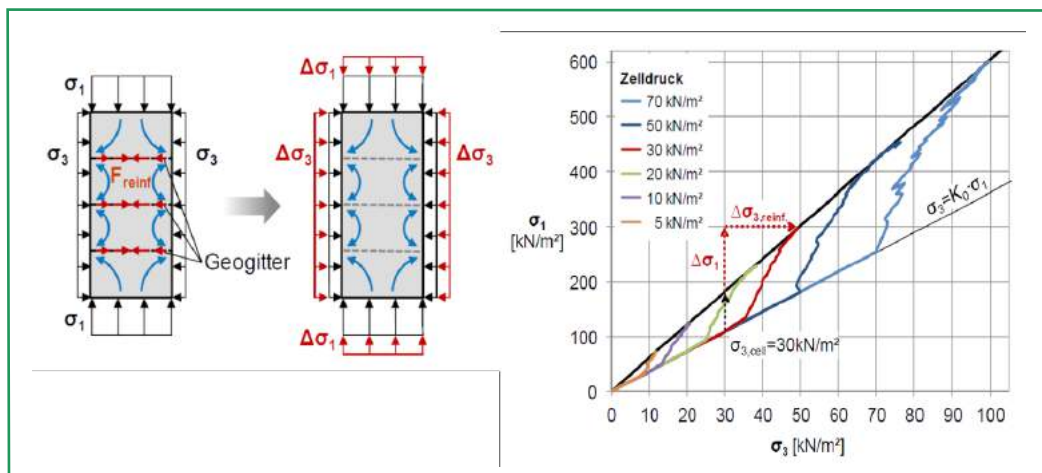
Een geogrid werkt de verschuiving en de permanente vervormingen van de korrels

van het mineraal aggregaat tegen. De korrels worden in de openingen van het geogrid gedrukt en zo geven de langs- en dwarsribben van het geogrid steun aan het korrelskelet van de fundering.

De weerstand die het geogrid tegen vervormingen geeft bestaat uit een wrijvingscomponent en een interlockcomponent.

Opsluitingseffect

De wederzijdse beïnvloeding tussen geogrid en funderingsmateriaal geeft een verhoging van de zijdelingse ondersteuning σ_3 (opsluitingseffect, Ruiken, 2013, Figuur 4). Lees (2014) simuleerde triaxiaalproeven op gewapend menggranulaat met eindige-elementen berekeningen. Hij liet zien dat de cohesie in het wapeningsgebied met gemiddeld 25 kPa tot maximaal 50 kPa moest



Figuur 4 - Opbouw van een zijdelingse steunspanning door meerdere lagen geogridwapening (triaxiaalproef met puin 0/32 mm) [Ruiken & Ziegler, 2009]

worden verhoogd om de gemeten vervormingen in de triaxiaalproeven te benaderen. Deze orde van grootte past goed bij de in figuur 4 voorgestelde bijdrage van de steundruk bij een gewapende menggranulaatproef.

Hoe werkt een wielbelasting?

De belasting van een wiel is zeer plaatselijk en radiaal gericht. Figuur 1 en Figuur 4 laten zien dat een bi-axiaal geogrid door de vulling met menggranulaat ook radiaal werkt, omdat de openingen in het geogrid zich niet kunnen sluiten. Omdat de verhardingsconstructie onder de diverse wielcontactvlakken van een voertuig als een buigende balk vervormt (Figuur 1), zijn ook de absolute stijfheden van de wapening in langs- en dwarsrichting van de weg belangrijk.

Er kunnen tussen verschillende producten grote verschillen in richtingsafhankelijke rekstijfheid J (kN/m) zitten (zie Figuur 5). Voor het wapenende en stabiliserende effect bij kleine vervormingen zijn de absolute waarden van de geogridstijfheid van belang, niet de verhoudingen tussen de kleinste en grootste waarde.

Het wapenende effect is ook bij een horizontale belasting op gewapend mineraal aggregaat via uitvoering van een afschuifproef aantoonbaar. Deze belasting treedt op wanneer een voertuig een punt nadert of er vandaan rijdt, danwel optrekt of remt. Bij een granulaire laag is het wapenende effect merkbaar binnen een afstand $\Delta h \approx 0,2$ m onder en boven de wapening (opsluitingszone) en in een geringere mate

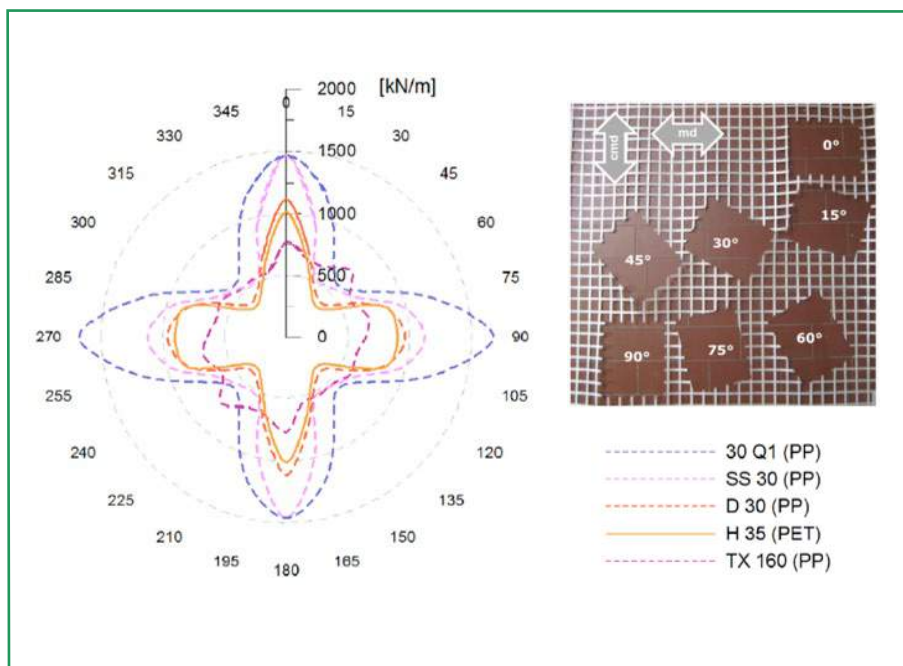
aanwezig op een grotere afstand van $\Delta h \approx 0,20$ tot $0,35$ m (overgangzone) [Cook & Horvat, 2014; Horvat & Klompmaaker, 2014; Lees, 2014]. De maximaal haalbare schuifsterkte ligt bij 20 kN/m², zie figuur 6.

Noodzakelijke onderzoeken

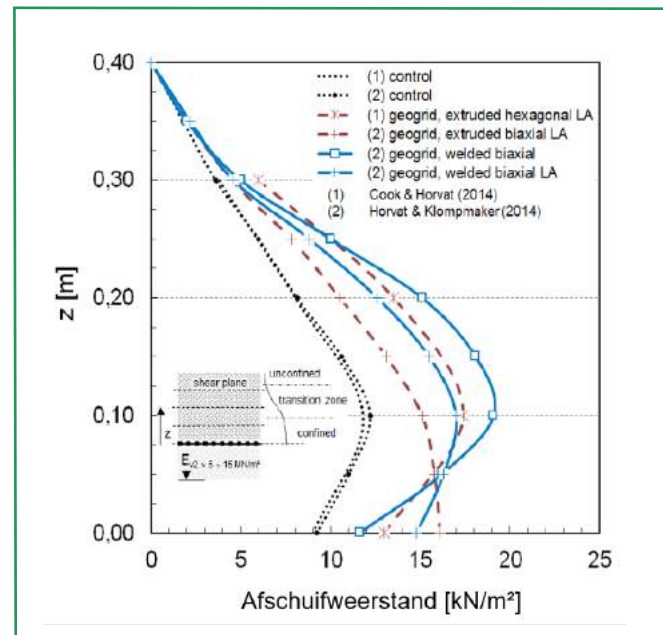
De interactie tussen geogrid en het funderingsmateriaal is in de wegenbouw bekend. Waarom is het dan zo moeilijk om een goed ontwerpmodel vast te stellen om de positieve effecten te kunnen benutten? Het antwoord is dat in de wegconstructie veel mechanismen een rol spelen in een systeem met meerdere stijve asfaltlagen, relatief slappe funderingslagen en een nog slappere ondergrond. Van alles speelt een rol: de korrelstructuur, de interactie met het geogrid, invloeden van poriënwater, invloeden door verdichting, de draagkracht van de ondergrond, de zeer hoge spanningsverschillen door verkeersbelastingen die heel lokaal werken en tot een rotatie van de hoofdspanningsrichtingen leiden. En dan is de opsomming nog niet volledig. Een volledige overzicht in de mechanismen is praktisch onmogelijk. Ieder onderzoek moet dan ook tot doel hebben de randvoorwaarden zo ruim mogelijk te kiezen. Daarvoor is het onderzoek in drie fasen ingedeeld, zie tabel 1.

Fase I –proeven met een rijdend wiel

Voor de in Fase I (tabel 1) ontworpen proeven met een rijdend wiel is een 120 m lange proefbaan in 8 proefvakken verdeeld (figuur 7) en voorzien van meetinstrumenten (figuur 8).



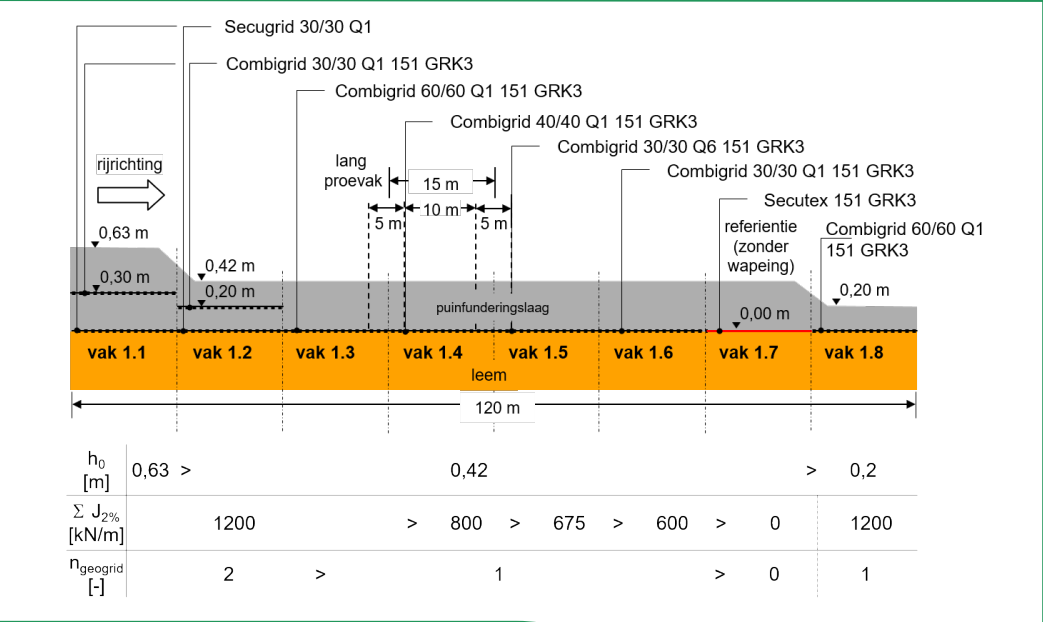
Figuur 5 - Rekstijfheid (J) bij $0,5\%$ rek, opgelegd in radiale richting conform Ingold (1994)



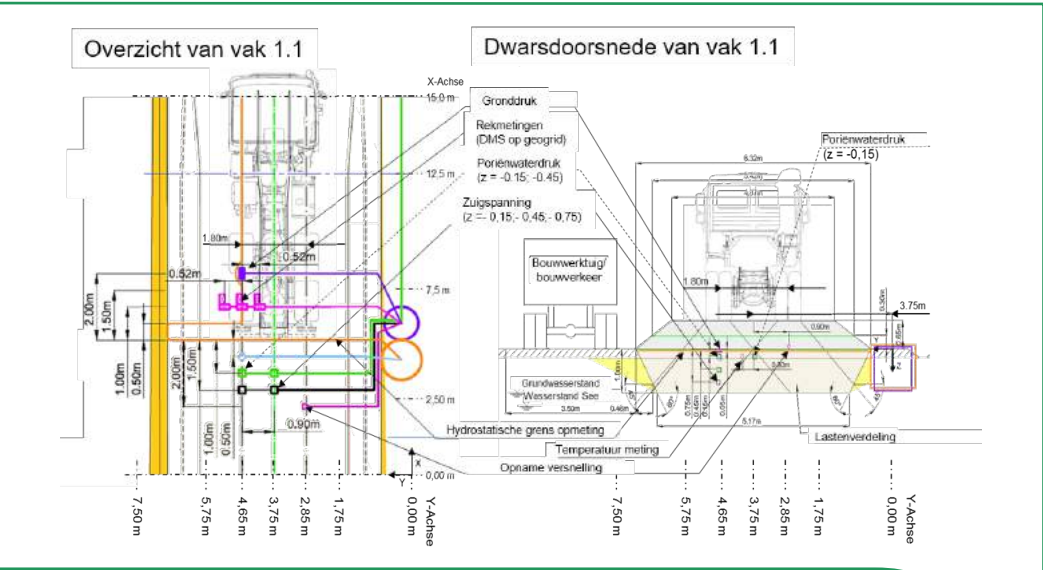
Figuur 6 - Trekvastheid in proeven op horizontaal belaste steenmengsels [Cook & Horvat, 2014; Horvat en Klompmaaker, 2014]

Tabel 1 - Onderzoek en proefvak funderingswapening - Fase I , II en III.

Doel van het onderzoek	Fase I	Fase II	Fase III
	Cyclische belasting door een rijdend wiel	Metingen in het veld	Laboratoriumproeven
Onderzoek naar spoorvorming	Invloed van de - dikte van de funderingslaag h_0 - rekstijfheid J_0 % - ligging wapening (aantal per laag n)		
Rek- en spanningsmetingen bij rijdend wiel	Onverharde constructies	Constructies met deklagen	
Beschrijving van het samengestelde materiaal "geogrid-gewapend mineraal aggregaat" onder cyclische belastingen			- Trekvastheid - Stijfheidsmodulus - Vermindering van de permanente vervorming - Cyclisch-dynamische stabiliteit



Figuur 7 - Lengteprofiel proefvak Tosted I (opgehoogd)



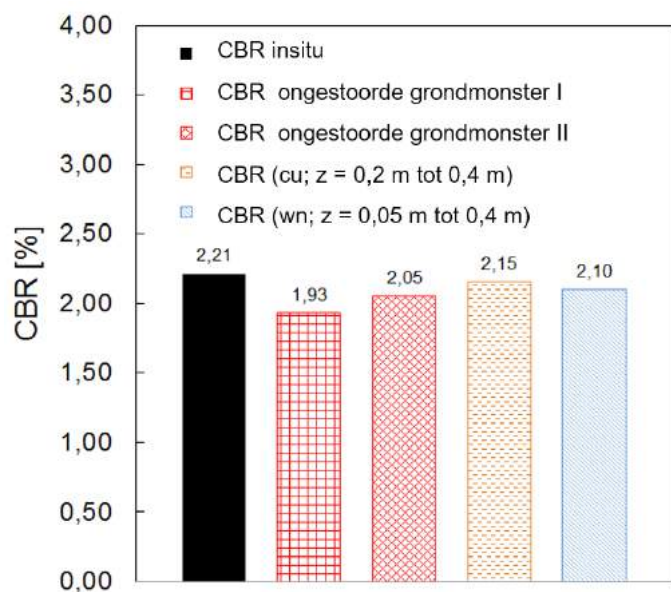
Figuur 8 - Dwarsdoorsnede, afmetingen en instrumentarium als voorbeeld van proefvak 1.1

Er werd een geogrid gekozen voor het wapenen en stabiliseren van de funderingslagen, met in alle proefvakken een gelijksoortig product (geogrid van geëxtrudeerde en gelast staven met gestructureerd oppervlak), zodat de invloed van de stijfheid van het geogrid direct onderzocht kon worden. Aan de onderzijde van alle proefvakken werd een mechanisch versterkt vlies als scheids- en filterlaag ingebouwd. Dit werd direct in het geogrid geïntegreerd (combigrig). Voor de verkeersbelasting werd een 28-tons vrachtauto met 3 aangedreven assen ingezet (figuur 9). De kunstmatig ingebouwde slecht draagkrachtige ondergrond werd uitgebreid beproefd, op CBR waarden, ongedraineerde schuifsterkte (c_u) en watergehalte (w_n), zowel op ongestoorde grondmonsters als ook in situ. Gemiddeld gaven de proefvakken een CBR-waarde van ca. 2,1 % (figuur 10).

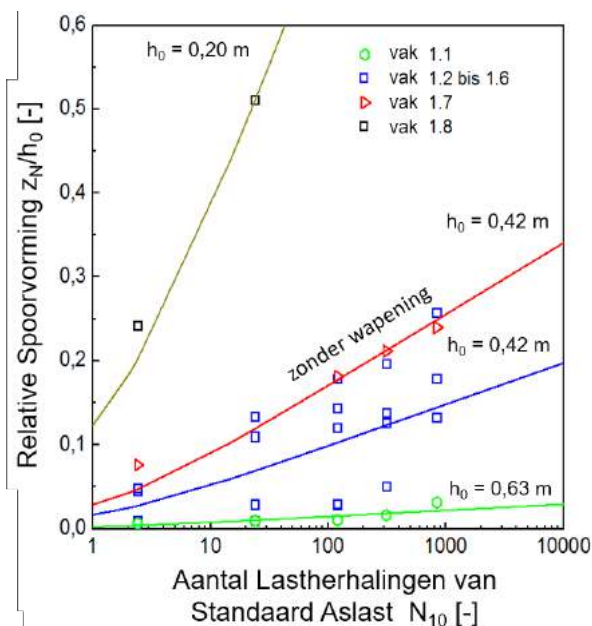
De verhouding van de gemeten spoordiepte Z_N en de initiële waarde van de laagdikte h_0 is de



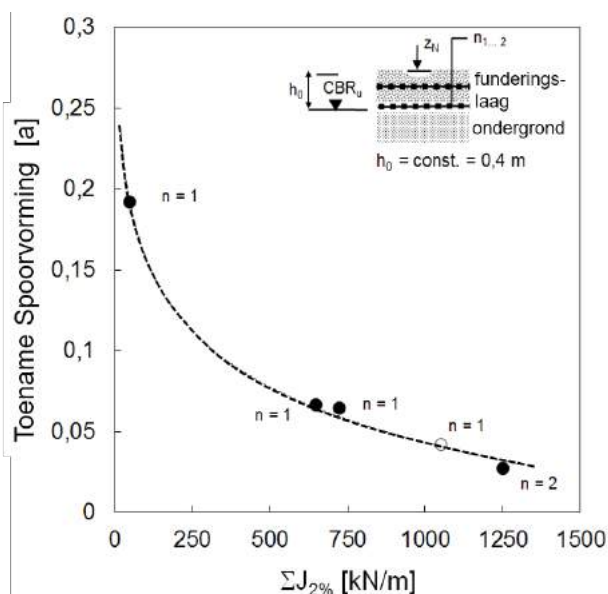
Figuur 9 - Berijden van proefvak Fase I



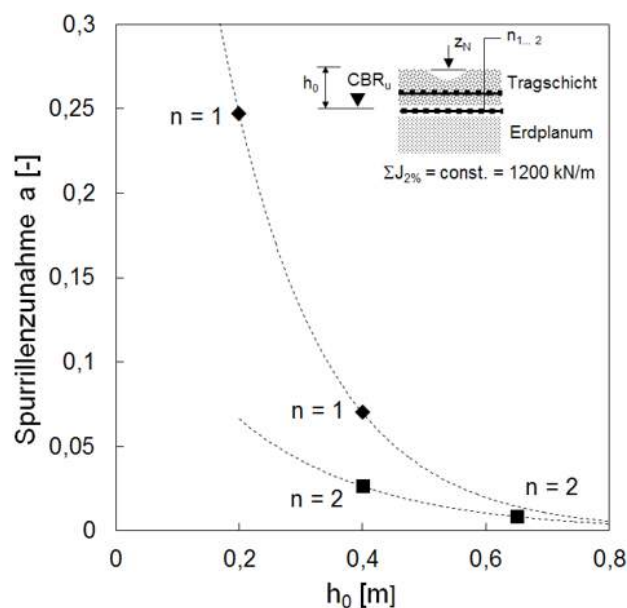
Figuur 10 - Gemiddelde waarde van de CBR-waarden voor verschillende meetmethoden.



Figuur 11 - Ontwikkeling van de gemiddelde spoorvormingen



Figuur 12 - Toename van spoorvorming (genormeerd) als functie van de rekstijfheid bij gelijk aantal lastherhalingen.



Figuur 13 - Toename van spoorvorming (genormeerd) als functie van het aantal gewapende lagen bij gelijk aantal lastherhalingen.

relatieve spoorvormingsdiepte (Figuur 11). Deze parameter is uitgezet tegen de CBR waarden van de ondergrond en het equivalente aantal lastovergangen van een 10-t-aslast (N_{10}) (Figuur 11 en Figuur 12).

De relatieve toename van de spoordiepte blijkt afhankelijk te zijn van de som van de stijfheidsmoduli van de verschillende gewapende lagen (figuur 12). Dit resultaat wordt bevestigd met de onderzoeken van Jacobs et al., 2012 en vele andere auteurs zoals Vollmert, 2016.

Belangrijk voor de bruikbaarheid in de weg is de manier van rangschikking van de wapeningslagen. Bij verdeling van de rekstijfheid over twee wapeningslagen wordt in totaal gezien een flexibelere reactie van de funderingslaag waargenomen dan bij toepassing van één laag wapening aan de onderzijde van de funderingslaag (Figuur 13). Wanneer de funderingslaag als een buigende balk geïnterpreteerd wordt (Figuur 1), dan is deze uitkomst juist, omdat bij lastwisselingen een plaat of balk altijd aan de trekzijde

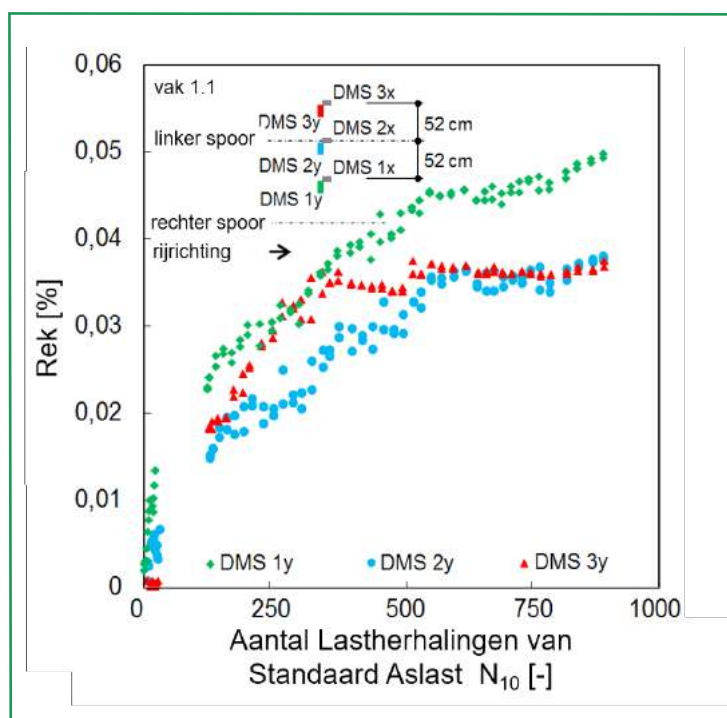
gewapend moet worden.

Zeer duidelijk is in het stijvere vak 1.1 te zien dat de opbouw van de permanente vervorming, na een korte fase van activering, door onderbouwvervormingen en de eerste lastovergangen van belastingen snel stabiliseert. De rek in de wapening neemt dan nauwelijks nog toe (Figuur 14) waardoor snelheid van permanente vervorming sterk vermindert. Omdat het proefvak 1.1 zeer stijf reageerde en bezwijken niet meer verwacht werd, zijn de lastherhalingen hier stopgezet.

Conclusies fase 1

Het inbrengen van geogrids in funderingslagen kan de stijfheid van het samengestelde materiaal verhogen. De toename van de stijfheid werkt daarbij in meerdere richtingen (3D), wanneer de afstand van het mineraal aggregaat tot de diepteligging van de wapening ($< 0,20$ m tot $0,35$ m) niet te groot wordt. Wordt de afschuifstijfheid van het systeem verhoogd en blijft de belasting gelijk, dan neemt de belastinggraad van de constructie af. Het systeem van geogrids en funderingsmateriaal krijgt dan een hogere draagkracht. Deze kan enerzijds benut worden om in bouwwegen zwakke plekken in de constructie te compenseren, of bij wegen voorzien van een verhardingslaag de levensduur te verlengen.

In fase I kon aangetoond worden, dat een wapening die bestaat uit meerdere lagen effectiever werkt dan een éénlaagse wapening, ook als de twee lagen samen dezelfde sterkte en stijfheid hebben. In beide gevallen is de stijfheidsmodulus relevant en voor de effectiviteit bepalend. Er is ook gebleken dat een te dun geconstrueerde wegconstructie niet kan worden opgewaardeerd met een geogrid, ook niet met een zeer stijf geogrid. In dit geval faalt de "drukzone" onder buiging door verkeersbelasting. Een wegconstructie op een slappe ondergrond die goed gedimensioneerd is, zoals aangetoond voor vak 1.1, kan ook met een geringe dikte van de constructielag worden gestabiliseerd. De permanente vervormingen onder de verkeersbelasting blijven dan gering. De vervormingen in de wapening zelf zijn daarbij ook zeer gering.



Figuur 14 - Ontwikkeling van de permanente vervorming in de ondergrond vak 1.1

Bronnen

- Cook, J. & Horvat, F. (2014): Assessment of particle confinement within a mechanically stabilised layer. 10th International Conference on Geosynthetics (10ICG). Berlin, Germany: DGGT, IGS.
- Horvat, F. & Klompaker, J. (2014): Investigation of confinement effect by using the multi-level shear box test. 10th International Conference on Geosynthetics (10ICG). Berlin, Germany: DGGT, IGS.
- Ingold, T. S. (1994): Geotextiles and Geomembranes Manual. Oxford: Elsevier Science Publishers Ltd. 1 85617 198 1.
- Jacobs, F., Ruiken, A. & Ziegler, M. (2012): Experimental Investigation of Geogrid Reinforced Soil under Plane Strain Conditions. Geosynthetics Asia - 5th Asian Regional Conference on Geosynthetics. Bangkok: IGS.
- Jacobs, F. (2015): Verzögerung der Scherfugenbildung im Vorbruchbereich, Auswertung von biaxialen Druckversuchen. Persönliche Kommunikation vom 19.06.2015. Aachen.
- Jacobs, F. (2016): Interaktionsmodell zur Bemessung von Verankerungsgräben mit Geogittern. Dissertation RWTH Aachen, 2016.
- Lees, A. (2014): Measurement of the geogrid confining effect. 10th International Conference on Geosynthetics (10ICG). Berlin, Germany: DGGT, IGS.

DGGT, IGS.

- Mollenhauer, K. (2008): Dimensionierungsrelevante Prognose des Ermüdungs-verhaltens von Asphalt mittels einaxialer Zug-Schwellversuche. Dissertation. Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig.
- Numrich, R. (2003): Modellierung des nichtlinear-elastischen Verformungsverhaltens von Tragschichten ohne Bindemittel. Dissertation. Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Ruiken, A. (2013): Zum Spannungs-Dehnungsverhalten des Verbundbaustoffs "geogitterbewehrter Boden". Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH), Aachen.
- Ruiken, A. & Ziegler, M. (2009): Materialverhalten des Verbundbaustoffs "geogitterbewehrter Boden" aus großen triaxialen Druckversuchen. geotechnik 32 (2009) Nr. 3, 148 - 155.
- Vollmert, L. (2016): Zur Gebrauchstauglichkeit geogitter-bewehrter Tragschichten unter zyklisch-dynamischen Beanspruchungen. Dissertation. TU Clausthal, 2016.
- Zander, U. (2007): Grundlagen einer rechnerischen Dimensionierung des Straßenoberbaus aus Asphalt. Straße und Autobahn, 9.2007, 6.

Kwast Consult

Geotechnische Advisering en Innovaties



Kwast Consult beschikt over specialistische geotechnische kennis van:

- Evenwichtconstructies: wegconstructies met lichte ophoogmaterialen (EPS, Schuimbeton, Bims, e.d.)
- Aardebanen en kunstwerken spoorwegen: ontwerp volgens OVS en beïnvloeding spoorbaan
- Geokunststoffen: ontwerp van folieconstructies, paalmatrasen en grondconstructies met funderings- en stabiliteitswapening
- Omgevingsbeïnvloeding: geotechnische risicoanalyses, trillingsanalyses en grondvervormingen (Plaxis)
- Primaire en regionale waterkeringen: ontwerpen dijkversterkingen volgens ENW-Leidraden

Kwast Consult te Houten | tel: 06 - 29 27 28 01
info@kwastconsult.nl | www.kwastconsult.nl



Voor gedegen
Mixed-In-Place
soilmix oplossingen

Vooraanstaand en betrouwbaar
www.bauernl.nl

BAUER Funderingstechniek
voert de volgende activiteiten uit:

- Mixed-In-Place soilmix
- Groutanker met strengen
- Groutanker (paal) met staven
- GEWI-anker (paal)
- Cement-bentoniet dichtwand
- Groot diameter boorpalen
- Diepwand
- Jet grouten
- Grondverbetering



Funderingstechniek



Cofra B.V.
de specialistische aannemer
grondverbeteringstechnieken
& folieconstructies

building worldwide on our strength

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



ABO-Group is een geheel van consulting, engineering, testing & monitoring bedrijven, actief op vlak van bodem, milieu, geotechniek, energie en afval, en dit zowel in haar drie thuislanden België, Nederland en Frankrijk, als op de internationale markt.



GEOTECHNIEK NEDERLAND

FUNDERINGSADVIES · BODEMONDERZOEK · MONITORING · INJECTIES
BOUWPUTADVIES · BEMALINGEN · MONITORING · SONDERINGEN
BORINGEN EN PEILBUIZEN · BOMDETECTIE · ARCHEOLOGIE · MILIEU



UW GEOTECHNISCHE PARTNER

ALPHEN AAN DEN RIJN · BREDA · GOES
INFO@GEOMET.NL · WWW.ABO-GROUP.EU



**BOUWEN BEGINT IN DE BODEM
MAAK EEN INFORMATIEVE AFSPRAAK**



BODEMBOUW.NL

www.hoeheetdatbedrijftech.nl



Een website is een *must*. Maar een *must* creëert geen **goodwill**. Onderzoek toont aan dat *bedrijfstijdschriften* dit wel voor elkaar krijgen. *Mits in handen van een ervaren partij*. Dan hebben we het over **Educom**.

Met een track-record in redactie, vormgeving en marketing. Educom produceert al 25 jaar *communicatie voor verkoop*. Neem contact op als u goodwill kunt gebruiken.



Educom

Tel. +31 (0)10-425 6544
www.uitgeverijeducom.nl