

build

ONAFHANKELIJK VAKBLAD VOOR
GEBRUIKERS VAN GEOTEXTIELEN



**GRONDWATER IN PAALMATRASSEN
3D EXPERIMENTEN IN BAD**

GEOBUID WORDT MEDE
MOGELIJK GEMAAKT DOOR:

HOOFDSPONSORS



Westervoortsedijk 73
6827 AV Arnhem
Tel. +31 (0) 85 744 1300
www.enkasolutions.com



TenCate Geosynthetics Netherlands BV
Europalaan 206, 7559 SC Hengelo
www.tencategeo.eu



Naue GmbH & Co. KG
Gewerbestr. 2
32339 Espelkamp – Germany
Tel. +49 5743 410 www.naue.com

DE GEZAMENLIJKE LEDEN VAN DE NGO ZIJN:



Ampèreweg 4, 3752 LR Bunschoten
Tel. 0031 (0)35 528 03 40
www.bonneveld.nl



Grafietstraat 11, 8472 EB Wolvega
Tel. 0031(0)561 613 114 www.juta-holland.nl



Phantom 3, 5126 RJ Gilze
Tel. 0031 (0)162 455 515 www.tefab.nl



Industriestraat 39, 9240 Zele – Belgium
Tel. 0032 52 457 411
www.bontexgeo.com



Cascademuur 38, 3991 VP Houten
Tel. 0031 (0)6 29 27 28 01
www.kwastconsult.nl



TenCate Geosynthetics Netherlands B.V.
Europalaan 206, 7559 SC Hengelo
Tel. 0031(0) 546 544811 www.tencategeo.eu



Westervoortsedijk 73, 6827 AV Arnhem
Tel. 0031(0) 85 744 13 00
www.enkasolutions.com



Naue Nederland B.V.
Goorsestraat 1, 7041 GA 's-Heerenberg
Tel. 0031(0) 6 19581068 www.naue.com



Tensar International B.V.
Helftheuvelweg 11, 5222 AV 's-Hertogenbosch
Tel. 0031(0) 73 624 1916 www.tensar.nl



Goorsestraat 1, 7041 GA 's-Heerenberg
Tel. 0031 (0)466 16 44 www.genap.nl



Mosweg 21, 7556 PG Hengelo
Tel. 0031 (0)74 763 0490 www.nepocon.nl



Trisoplast Mineral Liners
Oude Weistraat 17, 5334 LK Velddriel
Tel. 0031(0) 418 63 6030 www.trisoplast.com



Middelblok 154, 2831 BR Gouderak
Tel. 0031(0)182 37 73 27
www.geopex.com



Kierkamperweg 33, 6721 TE Bennekom
Tel. 0031 (0)88 166 2000
www.normecqs.com



Veilingweg 24, 6681 LA Bommel
www.joostenkunststoffen.nl



Industriestraat 15, 8281 BN Genemuiden
Tel. +31 (0)38 385 48 66 www.robusta.nl

CDR International BV, Rijssen

Deltares, Delft

Cofra B.V., Amsterdam

Fugro, Leidschendam

Kiwa NV, Rijswijk

Rijkswaterstaat, Utrecht

Stybenex, Geldermalsen

Enviro Quality Control BV, Maarssen

Huesker Synthetic BV, Rosmalen

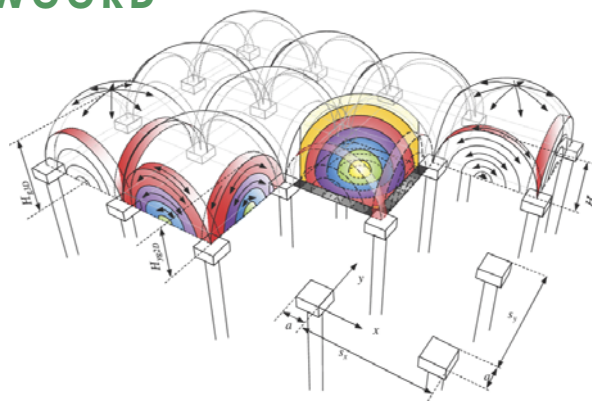
Witteveen + Bos, Deventer

Beste lezers,

Fundamenteel onderzoek is hard nodig voor het toekomstbestendig maken van onze infrastructuur. De uitdagingen voor onze infrastructuur zijn groot en worden steeds groter. Deltares heeft eerder dit jaar Deltascenario's voor Nederland opgesteld met hierin de wateropgaven tot 2050 en 2100 (van der Brugge en de Winter, 2024). Voor alle scenario's geldt dat de wateropgaven flink toenemen. Knelpunten met betrekking tot wateroverlast, waterveiligheid én watertekort stapelen zich op. De stapeling van opgaven maakt de aanpak complex en dit raakt heel Nederland.

Voor de veranderende omstandigheden door klimaatverandering is het implementeren van veerkrachtige en adaptieve oplossingen belangrijk. Klimaat-adaptieve en duurzame oplossingen zijn mede mogelijk door het gebruik van hoogwaardige geo-bouwmaterialen. Hierbij kan gedacht worden aan duurzame infrastructuuroplösungen (zettingssarme of -vrije constructies met bijvoorbeeld een paalmatras), het verbeteren van waterkeringen, wateropslag voor periodes van intense droogte en wateropvangsystemen voor extreme regenval.

Het artikel in dit GEObuild magazine sluit goed aan bij onze wateropgave. Het gaat over de invloed van grondwater bij paalmatrasen met geotextiel wapening. Het artikel is geschreven door Suzanne van Eekelen, Rob Zwaan, Adam Bezuijen en Alain Nancey. Voor dit onderzoek bij Deltares is in een 3D-paalmatras-proefopstelling het waterniveau verschillende keren omhoog en omlaag gebracht. Met drukcellen, waterspanningsmeters en rekopnemers zijn daarbij uitgebreide metingen gedaan. De experimenten laten zien dat de



Het Concentric Arches model van Van Eekelen, 2015, opgenomen in CUR226, 2016.

opwaartse kracht van het grondwater de belastingen vermindert. De boogwerking in de paalmatras vermindert ook enigszins, maar deze herstelt zich snel als het grondwater weer zakt. Het Concentric Arches model (van Eekelen, 2015) biedt daarbij de meest nauwkeurige overeenkomst in vergelijking met andere analytische rekenmodellen. Dit model is opgenomen in de ontwerprichtlijn voor paalmatrasen met geokunststof wapening (CUR 226, 2016).

We wensen jullie veel inspiratie en leesplezier.

Rijk Gerritsen

Eindredacteur GEObuild

- Van der Brugge, R., R.C. de Winter (2024), Deltascenario's 2024 - Zicht op Water in Nederland. Deltares 11209219-000-ZKS-0004.
- Suzanne J.M. van Eekelen (2015), Basal Reinforced Piled Embankments, Proefschrift TU Delft.

De oplettende lezer zal opvallen dat de titel is veranderd van GEOkunst naar GEObuild. Er zijn hiervoor meerdere redenen. De ontwikkeling in geotextielen gaat snel, waarbij het niet meer vanzelfsprekend is dat geotextielen worden gemaakt van kunststof materialen. Er worden steeds vaker biobased en biodegradeerbare geotextielen ingezet, gebaseerd op bijvoorbeeld natuurvezels (hennep, jute, kokos), biopolymeren, etc. Deze trend met streven naar duurzamere geotextielen zal zich naar verwachting doorzetten. Om alle geobouwstoffen te

omvatten is een term als 'Geo-building materials' dan zeer toepasselijk. In Duitsland wordt voor geotextielen een vergelijkbare term gebruikt.

Hiernaast wordt ons werkveld steeds internationaler, wat we terugzien in Engelstalige artikelen of zelfs speciale uitgaves van ons vakblad volledig in het Engels. Op basis hiervan is door het bestuur van de Nederlandse Geotextiel Organisatie gekozen voor een internationaal herkenbare bladtitel: GEObuild. We zijn klaar voor de toekomst!

COLOFON

Eindredactie **Rijk Gerritsen**
 Tekstredactie **Jurjen van Deen**
 Redactieraad **Adam Bezuijen, Piet van Duijnen,**
Suzanne van Eekelen,
Paul ter Horst,
Tara van der Peet



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



Productie Uitgeverij Educom
www.uitgeverijeducom.nl
www.vakbladgeotechniek.nl

GEObuild wordt uitgegeven door de Nederlandse Geotextiel Organisatie (NGO). Het vaktijdschrift verschijnt vier keer per jaar en wordt toegezonden aan abonnees of op verzoek. De NGO is de officiële Nederlandse afdeling van de International Geotextile Society (IGS). De NGO is een vereniging zonder winstoogmerk bestaande uit kennisinstututen, laboratoria, inspectie- en certificatieinstellingen, ingenieursbureaus, aannemers, overheidsinstanties, producenten en leveranciers. De NGO stimuleert kennis over duurzaam ontwerpen, verantwoord gebruik en bouwen met hoogwaardige geokunststoffen met vele toepassingen in de civiele techniek, waterbouw, milieu en bouw.

Disclaimer GEObuild betreft een onafhankelijke vaktijdschrift. Ondanks constante zorg en aandacht die wordt besteed aan de samenstelling van het vaktijdschrift kan de Nederlandse Geotextiel Organisatie (NGO) of redactieraad niet instaan voor de volledigheid, juistheid of voortdurende actualiteit van gepubliceerde gegevens. De NGO of betrokken leden aanvaarden dan ook geen aansprakelijkheid voor enigerlei directe of indirecte schade, van welke aard ook, die voortvloeit uit of in enig opzicht verband houdt met gepubliceerde gegevens of het gebruik daarvan. De inhoud van artikelen wordt opgesteld door de betreffende auteur(s) en niet (noodzakelijkerwijs) door de NGO. Bij artikelen zijn auteurs, met uitsluiting van NGO, verantwoordelijk voor correcte inhoud en uitingen. De NGO kan dan ook op geen enkele manier verantwoordelijk worden gehouden voor de inhoud en is niet aansprakelijk voor enigerlei directe of indirecte schade die mogelijk voortvloeit uit betreffende inhoud of uitingen.

Versterking Markermeerdijken met filterconstructie van Naue beschermt 1,2 miljoen mensen

Door de Alliantie Markermeerdijken wordt hard gewerkt aan de dijkversterking tussen Hoorn en Amsterdam. Voor het beschermen van 1,2 miljoen mensen en 25 miljard economische waarde worden de Markermeerdijken versterkt. De Alliantie Markermeerdijken betreft een samenwerking tussen Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, Boskalis en VolkerWessels ondernemingen KWS en Van Hattum en Blankevoort. Hierin wordt samengewerkt met Cofra en Naue.

MARKERMEERDIJKEN

De Markermeerdijken zijn een belangrijk onderdeel van het watersysteem IJsselmeer en Markermeer. In het Markermeer kan een hoge waterstand ontstaan door regenwater en water dat wordt afgevoerd door de gemalen. Bij extreme weersomstandigheden kan het waterpeil zowel in het IJsselmeer als het Markermeer fors stijgen. In deze omstandigheden kunnen de Noord-Hollandse dijken verzadigd raken met water, afschuiven en bezwijken onder de waterdruk. Om dit te voorkomen worden de Markermeerdijken grootschalig versterkt. De dijkversterking wordt uitgevoerd over een lengte van circa 33 kilometer. De Markermeerdijken zijn een primaire waterkering en de dijken worden versterkt volgens de nieuwe normen voor waterveiligheid uit de Waterwet. De dijkversterking is een onderdeel van het landelijke Hoogwaterbeschermingsprogramma en is hiermee een belangrijk HWBP-project.

FILTERCONSTRUCTIE

Onderdeel van de dijkversterking van de Markermeerdijken is het aanbrengen van een robuust filtersysteem geleverd vanuit Naue. Op de taluds van de dijk worden daarbij nonwoven geotextielen geïnstalleerd als hoogwaardige filter onder de steenbekleding. In deze toepassing is de robuustheid van de vliezen van groot belang, als ook de technische en functionele levensduur. Door toepassing van de vliezen kan door de Alliantie Markermeerdijken zeer efficiënt een filterconstructie worden opgebouwd. Dit scheelt bouwtijd, grondverzet en aanvoer van filterstenen. De filterlaag met geotextiel bespaart aanzienlijke CO₂-uitstoot ten opzichte van de opbouw met een volledig granulair filter. Hiermee draagt deze oplossing bij aan een duurzame en slimme uitvoeringsmethodiek bij hoogwaterbeschermingsprojecten.

DUURZAME OPLOSSINGEN

Naue heeft jarenlange ervaring met duurzame bouwmaterialen en oplossingen bij dijkversterkingen. Rijk Gerritsen, Manager Geotechnical and Hydraulic Engineering bij Naue Nederland B.V., vertelt enthousiast: "We dragen actief bij aan duurzame oplossingen bij dijkversterkingen of waterbouwkundige projecten. Met onze materialen worden duurzame constructies gebouwd. Zelfs in zeer uitdagende omstandigheden, zoals slappe ondergrond (klei/veen), extreme belastingen of beperkte werkruimte". Door het toepassen van geo-bouwmaterialen kan er bij dijkversterkingen slimmer worden gebouwd. "Het beperkt bouwrisico's, vermindert materiaaltransport, verlaagt de bouwkosten en ook de uitvoering verloopt sneller. Een groot voordeel is de vermindering van primaire grondstoffen zoals zand, grind of klei. Deze grondstoffen worden met de jaren steeds schaarser. Niet alleen is er veel minder CO₂-uitstoot, ook de druk op de omgeving neemt af. Omwonenden ondervinden veel minder overlast van één vrachtwagen met vervoer van filterdoeken ten opzichte van vele dumpers met zand en grind. Met andere woorden: goed voor mens, omgeving en milieu."

THINK - ACT - GREEN

"Met Naue lopen we voorop in duurzame projectbenadering en de ontwikkeling van nieuwe materialen en ontwerpen. Hiervoor is de website gelanceerd: 'Think. Act. Green.' Op deze website wordt ingegaan op drie bouwstenen voor duurzaam projectsucces. We richten ons op materialen met een duurzame basis. We zijn bijvoorbeeld de enige leverancier van een volledig biobased en biologisch afbreekbaar vlies. Dit materiaal bevat geen kunststof en wordt onder natuurlijke omstandigheden afgebroken zonder enige verontreiniging voor het milieu. Dit kan bij specifieke projecten van grote meerwaarde zijn."



Dijkversterking Markermeerdijken met installatie van een hoogwaardig filtersysteem met Naue Secutex op de taluds van de waterkering. Hier bovenop wordt een steenbekleding aangebracht met stortsteen en zetsteen.

‘Een slimme oplossing met een duurzaam geotextiel filtersysteem kan de CO₂-uitstoot met circa 50% verminderen’



NAUE TOEGEVOEGDE WAARDE

Talrijke toepassingen en voordelen met geo-bouwmaterialen in grondwerken, civiele en waterbouwkundige projecten:

- Toepassingen bij dijken, kustbescherming, wegen, werkplatforms, kraanopstelplaatsen, tunnels, spoorwegen, kanalen en watergangen, wateropslag bekken, grondwaterbescherming en stortplaatsen.
- Innovatieve en duurzame oplossingen met bentonietmatten (GCL) en folieconstructies (afdichtingssystemen), zandgevulde geotextiele containers (geobags), geogrids (grond- en funderingswapening), nonwoven geotextiel (filtratie, scheiding en bescherming), erosiebescherming en drainagematten.
- Bewezen oplossingen die kunnen worden aangepast aan uitdagende project omstandigheden.
- Ondersteuning vanaf de eerste haalbaarheid, ontwerp met berekeningen en tekeningen, levering van materialen en installatie.

INI Naue

Naue Nederland B.V.

Goorsestraat 1
7041 GA 's-Heerenberg
info.nl@naue.com
Naue.com.nl • thinkactgreen.eu



Schematisch overzicht toepassing geo-bouwmaterialen bij waterkeringen met bentonietmatten, grondwapening, nonwoven geotextiel voor filtratie/scheiding en erosiebescherming op de taluds.

Beeld luchtfoto: OutSight Media in opdracht van Alliantie Markermeerdijken. Overige beelden: Alliantie Markermeerdijken // Naue



Suzanne J.M. van Eekelen
Deltares



Rob A. Zwaan
Deltares



Adam Bezuijen
Deltares



Alain Nancey
Solmax, Parijs, Frankrijk

GRONDWATER IN PAALMATRASSEN 3D EXPERIMENTEN IN BAD

Het rekenmodel in de CUR226 (2016) ontwerp-richtlijn voor paalmatrasen met geokunststof wapening is alleen gevalideerd voor matrassen die boven het grondwater liggen. Het grondwaterniveau staat daarbij ter hoogte van de paaldeksels of lager. Dat beperkt de toepassing omdat tijdens en vooral ook na hevige regenval onze infrastructuur bruikbaar moet zijn. Bovendien willen we het wegdek liefst niet ver boven het maaiveld aanleggen. Daardoor komt de aardebaan van een paalmatras vaak voor een deel onder het grondwaterniveau te liggen. Inzicht in de invloed van grondwater op het gedrag van paalmatrasen is daarom van belang.

Verschiede mechanismen kunnen een rol spelen wanneer het grondwater in een paalmatras stijgt:

- De toename van de opwaartse krachten geeft een afname van de effectieve spanning. Dit

artikel kijkt of dit invloed heeft op de boogwerking, de vervormingen en de trekspanningen in de geokunststof wapening (verder aangeduid als GR, Geosynthetic Reinforcement).

- Zwel van de ondergrond onder de wapening. Dergelijke zwel is in de praktijk waargenomen in een paalmatras bij Woerden (Van Eekelen et al., 2020). Zwel van de ondergrond vermindert de rek in de wapening en de belasting op de palen. Dit artikel gaat niet in op deze situatie.
- Verweking. Het is belangrijk dat het zand, of het menggranulaat in de aardebaan niet kan verweken. Ook dit wordt in dit artikel buiten beschouwing gelaten.

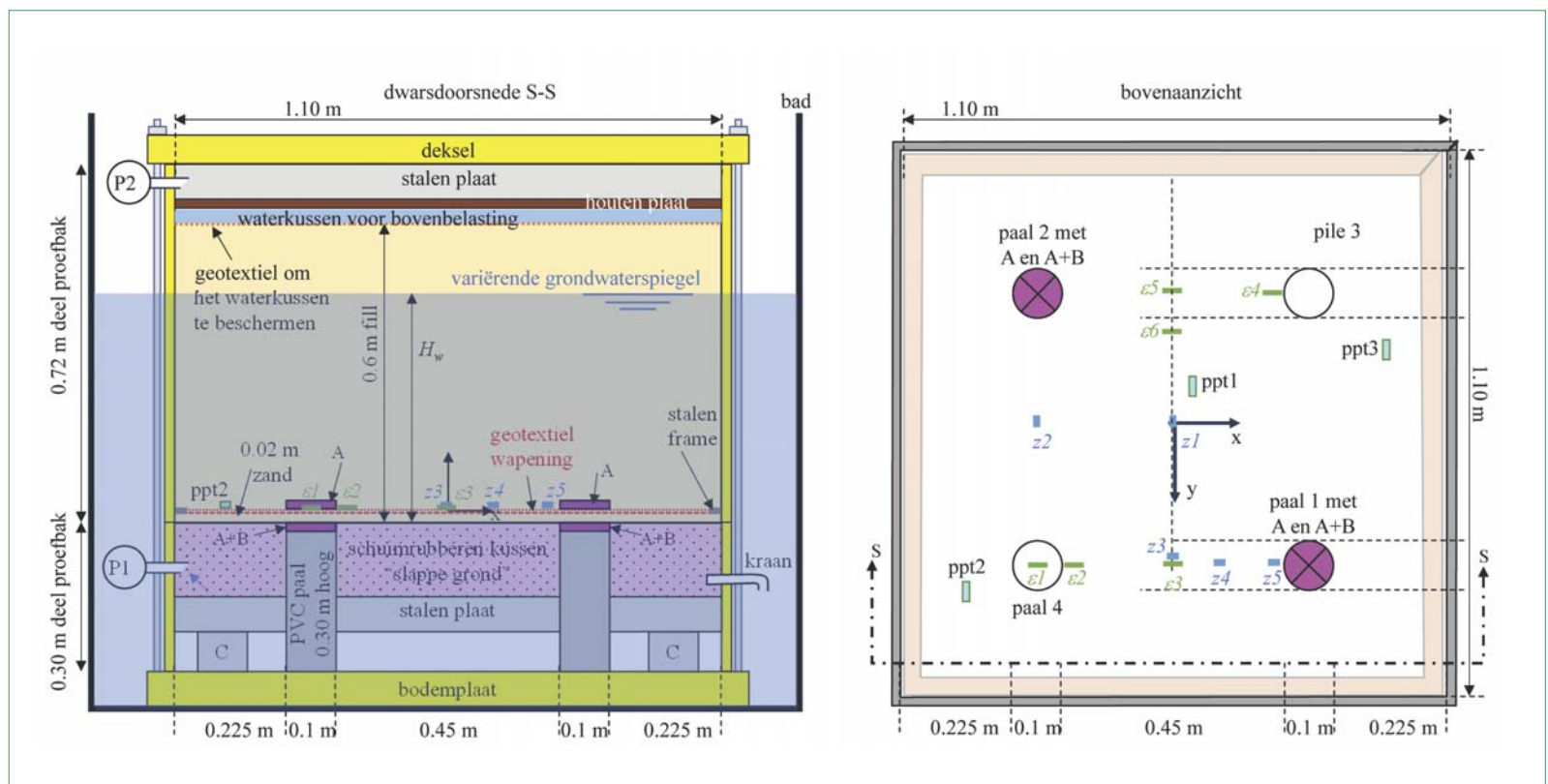
Het onderzoek dat we in dit artikel beschrijven heeft als doel de invloed te bepalen van een veranderende grondwaterspiegel in de aardebaan van een paalmatras op de boogwerking, de vervormingen en de GR-rekken. Hiervoor

presenteren we 3D-laboratoriumexperimenten, analyseren we de resultaten en vergelijken we die met analytische berekeningen.

Schaalproeven

Figuur 1 toont de proefopstelling (van Eekelen et al., 2012a, 2024a). Een stalen plaat ondersteunt een schuimrubberen kussen. Het kussen is waterdicht en verzadigd met water. Het kussen heeft een kraantje, dat drainage van het kussen mogelijk maakt. Zo simuleren we consolidatie van de ondergrond. Vier PVC-palen met een diameter van 0,1 m steken door de stalen plaat en het schuimrubberen kussen.

Twee lagen Geolon 100-50 geweven geotextiel van Solmax zijn loodrecht op elkaar, en direct op elkaar, aan een stijf stalen frame bevestigd. De twee geotextielen hebben in beide richtingen (xeny)samen een treksterkte van 100+50=150 kN/m.



Figuur 1 – Proefopstelling paalmatras ‘in bad’ om de invloed te bepalen van water in een paalmatras. A en A+B zijn drukcellen, C is een krachtopnemer, ppt = pore pressure transducer = waterspanningsopnemer

SAMENVATTING

Dit artikel kijkt naar de invloed van grondwater in paalmatrasen met geotextiel-wapening. Hiervoor is de 3D-paalmatras-proefopstelling van Deltares 'in bad' gezet, waarna het waterniveau verschillende keren omhoog en omlaag is gebracht. De experimenten laten zien dat de opwaartse kracht van grondwater de belastingen vermindert. De boogwerking in de paalmatras vermindert

ook enigszins, maar deze herstelt zich snel als het grondwater weer zakt. Het Concentric Arches (CA) model (opgenomen in CUR226, 2016) biedt de meest nauwkeurige overeenkomst in vergelijking met andere analytische rekenmodellen. We zien geen significante correlatie tussen de hoogte van het grondwater en rek in de geotextiel wapening.

Met een waterkussen brengen we een gelijkmatig verdeelde bovenbelasting op de aardebaan aan. Drukcellen meten de belastingsverdeling in de matras. Waterspanningsopnemers in een slang gevuld met water en verbonden met een referentiebak met water meten de deflectie (doorhanging) van de GR. De rek van de geotextiel wapening wordt gemeten met kabels.

Er zijn twee soorten gemengd granulaat gebruikt: één met een fijne fractie ($d/D = 0/31,5$ mm) en één zonder fijne fractie ($d/D = 4/31,5$ mm), waarbij d en D de kleinste en grootste zeefgrootte zijn (EN13242, 2015). Tabel 1 geeft een overzicht van de drie uitgevoerde proeven. De waarden van $\varphi'_{15\%}$ werden verkregen uit vier gedraineerde grote-diameter triaxiaalproeven met een monsterdiameter van 0,45 m.

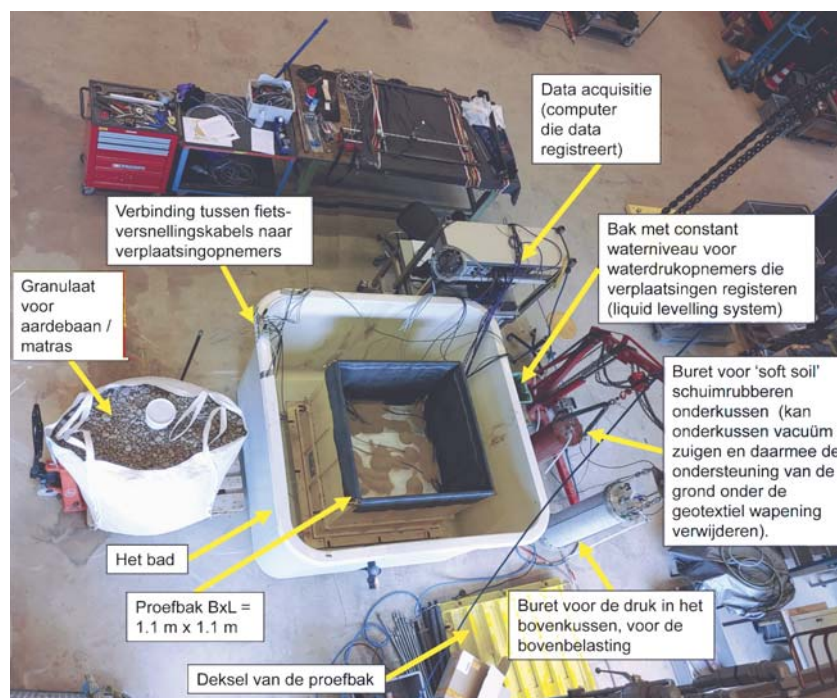
Na opbouw van de proefopstelling is deze in een bad geplaatst (figuur 1). Als eerste werd de ondersteuning van de wapening door de ondergrond tussen de palen verwijderd door het schuimrubber kussen vacuüm te zuigen. Daarna werd langzaam het bad gevuld tot net boven het 'maaiveld'. De grondwaterspiegel in de matras volgde het waterniveau in het bad ogenblikkelijk. Daarna (in proeven 2 en 3) werd de grondwaterspiegel weer verlaagd. Daarna werd de bovenbelasting in stappen verhoogd. Na elke belastingstap volgde weer een grondwatercyclus. In Proef 1 werd de freatische lijn constant hoog gehouden terwijl de bovenbelasting stapsgewijs werd verhoogd. Van Eekelen et al. (2024a en b) beschrijven de proeven uitgebreider.

Berekeningen

De drie belangrijkste Europese ontwerpmethoden voor geokunststof wapening in een paalmatras zijn:

- het Concentric Arches (CA) model van Van Eekelen et al., (2013, 2015, overgenomen in CUR226, 2016);
- het model van Zaeske (2001), overgenomen in de Duitse EBGEO (2011);
- het model van Hewlett en Randolph (1988) dat is overgenomen in zowel de Franse ASIRI (2012) als de Britse norm (BS8006, 2010).

Deze modellen verdelen in de eerste rekenstap de verticale belasting in twee delen (inzet in



Figuur 2 –
De proefopstelling van boven gezien.

Tabel 1 – Gegevens van de drie proeven.

Test nummer	1	2	3
Dikte aardebaan ('vulling') boven de palen (m)	0,65	0,60	0,60
Vulling d/D (mm/mm)	4/31,5	0/31,5	4/31,5
D_{50} vulmateriaal (mm)	18,8	7,0	18,8
Droog volumegewicht vulling γ_d (kN/m ³)	13,19	14,60	13,20
Verzadigd volumegewicht vulling γ_s (kN/m ³)	18,11	19,00	18,12
Initiële volumegewicht vulling γ_i (kN/m ³)	13,90	15,39	13,91
Porositeit n ($V_{poriën} / V_{totaal}$)	0,50	0,45	0,50
Wrijvingshoek droge vulling φ'_{cv} (°)	41,0	39,4	41,0
Wrijvingshoek verzadigde vulling φ'_{cv} (°)	40,5	39,6	40,5



Figuur 3 – Hoogwater in de proefopstelling.

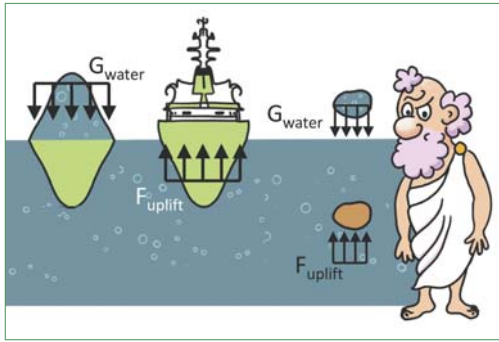


Figure 4 – Archimedes' principe: $F_{uplift} = G_{water}$ = het gewicht van het verplaatste water.

figuur 5). Deel A (kN/paal) wordt direct overgebracht op de palen en is relatief groot, ten gevolge van de boogwerking. De restbelasting, B+C (kN/paal) wordt gedragen door de ondergrond tussen de palen. De tweede rekenstap berekent de GR-rek, en verdeelt impliciet ook B+C verder in B en C. Bij de proeven in dit artikel werd het schuimrubber kussen onder het geotextiel vacuüm gezogen, zodat voor alle testen de ondersteuning van de ondergrond gedurende de hele test nul was, dus $C = 0$.

INVOERPARAMETERS

Figuur 1 geeft de geometrie van de proefopstelling. Tabel 1 geeft de eigenschappen van het granulaat van de aardebaan. De grondwaterpiegel H_w wordt afgeleid uit de gemeten waterspanningen (ppt 1, 2 en 3). In vergelijkingen (2) tot en met (5) wordt met een volumiek gewicht γ gerekend. De waarden daarvoor zijn gewogen gemiddelde waarden, afgeleid van:

- γ_d onder het grondwaterniveau, gecombineerd met de oplift van Archimedes voor de korrels, dit wordt verderop in het artikel verder uitgelegd,
- γ_i boven het grondwaterniveau. Parameter γ_i is het initiële volumiek gewicht van het zand, dat ook in rekening gebracht wordt voor het zand boven de freatische lijn.

De wand-grondwrijving R was 20-25% van de totale belasting en is afgeleid door de gemeten A+B+C (waarbij $C=0$ tijdens het experiment) af te trekken van de totale effectieve belasting. In de berekeningen is R meegenomen door de bovenbelasting te verlagen. Er is geen ondersteuning van de ondergrond, dus de reactie van de ondergrond $C = 0$ kN/paal, ofwel de beddingsconstante $k = 0$ kN/m³. De trekstijfheid van het geotextiel, $J_{2\%}$, is gekozen in overeenstemming met de duur van de test: $J_{2\%} = 1106$ kN/m.

WATER IN DE BEREKENINGEN

Het principe van Archimedes (ca. 250 BC) stelt dat een lichaam dat in een vloeistof is ondergedompeld een opwaartse kracht ondervindt

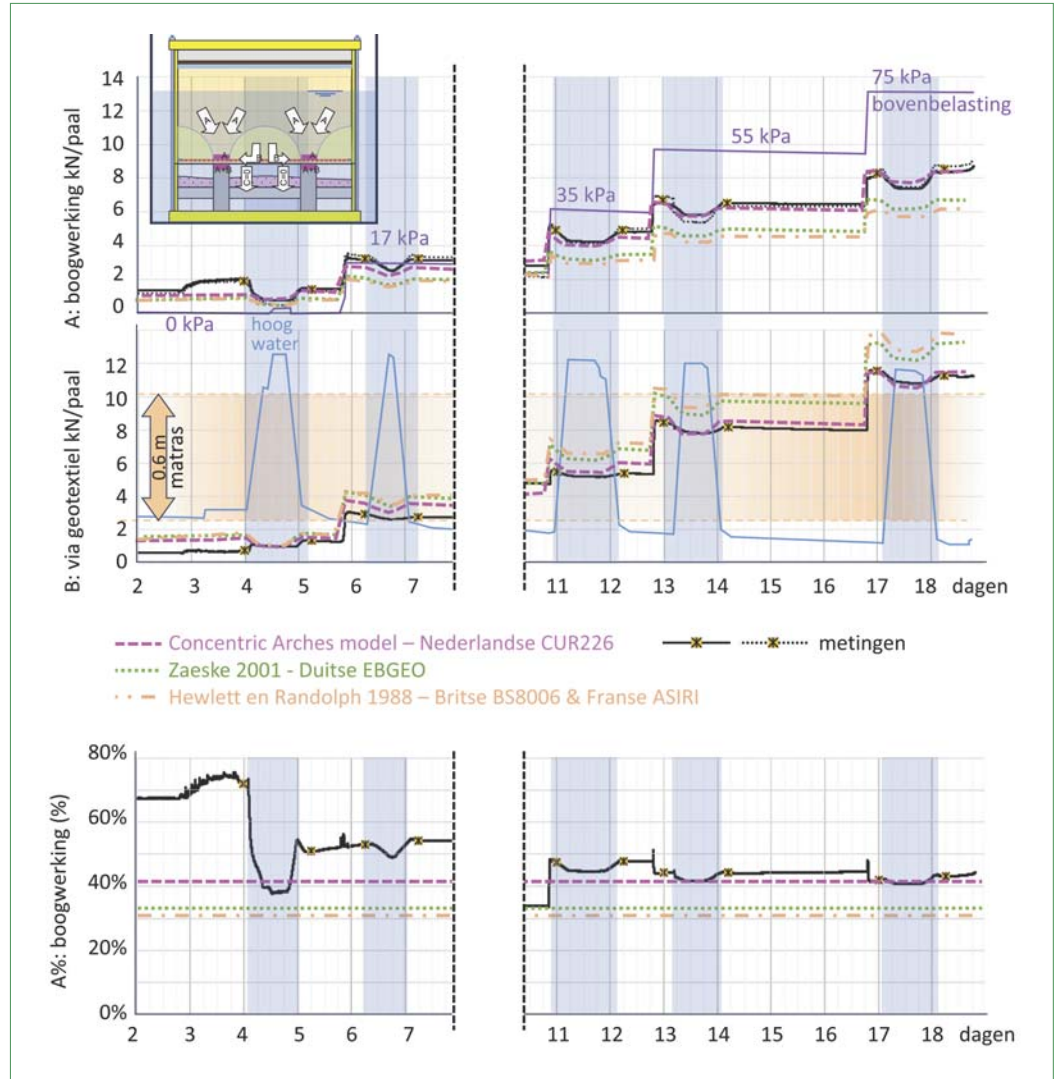


Figure 5 – Vergelijking gemeten en berekende belastingsverdeling voor Proef 2. a. Boogwerking (belastingsdeel A). b. Belastingsdeel B. c. Belastingsdeel A in % van de totale belasting. De 'gemeten' waarde van B is het verschil tussen de gemiddelde gemeten waarden van A+B en A. Tussen dag 8 en 11 lekte het kussen van de bovenbelasting.

die gelijk is aan het gewicht van de verplaatste vloeistof (figuur 4). Dit principe komt overeen met Terzaghi's effectieve spanning (1925), die het verschil is tussen de totale spanning en de waterdruk.

In dit document wordt de opwaartse druk van Archimedes (p_{uplift}) gebruikt om het water in de matras in rekening te brengen. Deze opwaartse druk wordt gedefinieerd als:

$$p_{uplift} = (1-n) \cdot H_w \cdot \gamma_w \quad (1)$$

waarin n (-) de porositeit is, H_w (m) de grondwaterpiegel boven de palen en γ_w het volumiek gewicht van water (9,81 kN/m³). Deze p_{uplift} is geïntegreerd in de CA berekeningen door de bovenbelasting p te verminderen met p_{uplift} . Theoretisch komt dit overeen met de berekening van Terzaghi's effectieve spanning. Het gebruik van de effectieve spanningen van Terzaghi is echter niet mogelijk voor het CA-model. De reden hiervoor is de volgende: (van Eekelen et al.,

2013). Het CA-model berekent eerst de belastingverdeling A% en (B+C)% zonder de bovenbelasting mee te nemen ($p = 0$). Dit geeft $A_{p=0}$ en $(B+C)_{p=0}$. Hierbij gebruikt het CA model alleen het grondgewicht boven de bogen (naast geometrie en materiaaleigenschappen). Daarom zou het gebruik van de effectieve spanningen van Terzaghi alleen invloed hebben op de berekening voor het deel van de aardebaan boven de bogen. Vervolgens brengt het CA-model de bovenbelasting in rekening:

$$A_{p>0} = \frac{\gamma H + p}{\gamma H} \cdot A_{p=0} \quad (2)$$

$$(B + C)_{p>0} = \frac{\gamma H + p}{\gamma H} \cdot (B + C)_{p=0} \quad (3)$$

In deze studie houden we rekening met het grondwater door de vergelijkingen als volgt aan te passen:

$$A_{p>0} = \frac{\gamma H + p - p_{uplift}}{\gamma H} \cdot A_{p=0} \quad (4)$$

$$(B + C)_{p>0} = \frac{\gamma H + p - p_{uplift}}{\gamma H} \cdot (B + C)_{p=0} \quad (5)$$

Invloed grondwater

INVLOED GRONDWATER OP DE BOOGWERKING

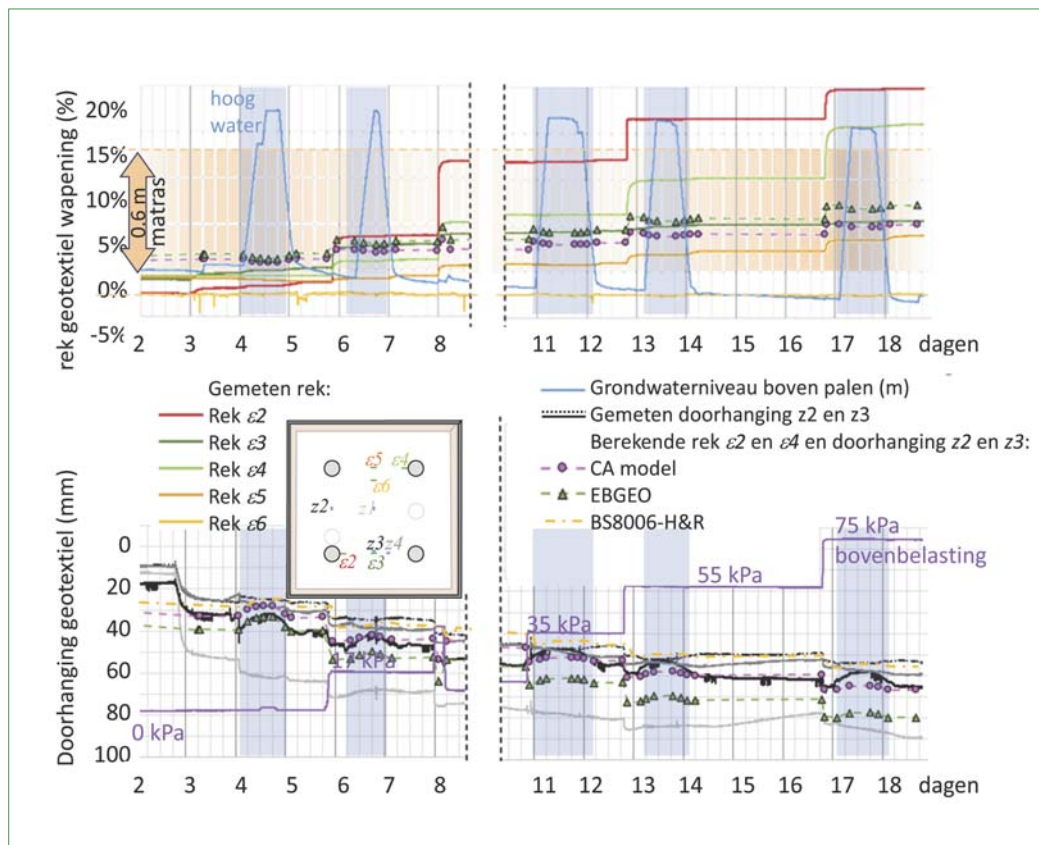
In figuur 5a en b vergelijken we de gemeten en berekende boogwerking voor Test 2. We zien het volgende:

- Een stijgend grondwaterpeil geeft een beperkte afname van zowel A als B.
- Een aanzienlijk deel van deze afname wordt toegeschreven aan de opwaartse krachten volgens Archimedes. Dit zien we aan de CA-berekeningen. Deze komen goed overeen met de metingen. De berekeningen nemen de Archimedes opwaartse kracht mee, maar verminderen de boogwerking niet bij een stijgend grondwaterpeil.
- Figuur 5c toont de boogwerking als percentage van de totale belasting (A%). We zien dat het grondwater een lichte afname geeft van A%. Het is duidelijk dat de boogwerking enigszins afneemt. De opwaartse kracht van Archimedes heeft echter meer invloed.
- De boogwerking herstelt zich bijna onmiddellijk als de freatische lijn weer daalt. De boogwerking (A) verandert minder dan 3,5% door grondwatercycli, zowel naar boven als naar beneden. De enige uitzondering is de eerste grondwatercyclus die de boogwerking met 26% doet afnemen. Op dat moment heeft de boogwerking nog geen evenwicht gevonden.
- Het CA-model komt beter overeen met de metingen dan de andere twee rekenmodellen. Zowel EBGEO (2011) als Hewlett en Randolph (1988) onderschatten de boogwerking.

INVLOED GRONDWATER OP DE REKKEN IN HET GEOKUNSTSTOF (GR)

Rekkabels ('strain' of ϵ' in figuur 1), gemaakt van fietsremkabels, werden met tie-wraps aan het geotextiel bevestigd. De staaldraad die door een buitenmantel loopt, werd ongeveer 10 mm naar buiten getrokken en aan het geotextiel bevestigd. Een verplaatsingsopnemer registreert het verschil tussen de verplaatsing van de staaldraad en de buitenmantel. Dit systeem geeft alleen een

kwalitatief resultaat: veel gemeten waarden zijn onrealistisch groot. Toch zijn de metingen in figuur 6a en tabel 2 conform onze verwachtingen: de hoogste geotextielrekken werden gemeten in de strips tussen aangrenzende palen. Hoe dicht bij de paal, hoe hoger de rek. Buiten de geotextiel strips tussen aangrenzende palen (ϵ_6) zien we veel lagere rek, meestal rond de nul. De geotextielrek vertoont geen significante respons op veranderingen in de grondwaterspiegel.



Figuur 6 – Gemeten en berekende rek en vervorming. a. GR rek ϵ ; b. GR doorbuiging z voor Proef 2.

Tabel 2 – Vergelijkende metingen en berekeningen voor Tests 1, 2 en 3.

Test	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Tijd (dag)	7,00	7,90	10,83	8,50	6,80	11,75	N.V.T.	16,00	17,75	10,18	13,42	19,00	
Waterpeil (m boven paal)	0,00	0,00	0,00	0,65	0,60	0,55	N.V.T.	0,00	0,00	0,65	0,60	0,60	
Bovenbelasting (kPa)	17,0	16,7	17,7	17,1	16,8	17,2	N.V.T.	54,5	56,7	54,5	55,0	56,6	
A (kN/paal)	Gemeten	4,9	3,2	4,6	3,7	2,5	3,7	N.V.T.	6,4	9,1	7,7	5,6	8,5
	CA-model (CUR226)	2,7	2,5	2,7	2,4	2,2	2,2	N.V.T.	6,1	6,6	7,0	5,7	6,1
	Zaeske (EBGEO)	2,3	2,0	2,2	2,0	1,7	1,8	N.V.T.	4,9	5,3	5,8	4,6	4,9
	Hewlett & Randolph 1988	2,2	1,9	2,0	1,9	1,6	1,6	N.V.T.	4,5	4,9	5,6	4,2	4,5
GR doorhanging tussen twee palen (mm)	Gemeten ¹	-43	-40	-37	-51	-38	-37	N.V.T.	-55	-51	-67	-53	-52
	CA-model (CUR226)	-44	-44	-44	-42	-42	-41	N.V.T.	-60	-60	-61	-58	-58
	Zaeske (EBGEO)	-52	-52	-52	-50	-50	-49	N.V.T.	-71	-72	-72	-70	-70
GR rek tussen twee palen (mm)	Gemeten ²	-	2,6%	1,6%	-	2,4%	1,6%	N.V.T.	5,9%	3,0%	-	5,6%	3,1%
	CA-model (CUR226)	2,1%	2,1%	2,1%	1,9%	1,9%	1,8%	N.V.T.	4,1%	4,1%	4,2%	3,9%	3,9%
	Zaeske (EBGEO)	3,1%	3,1%	3,1%	2,8%	2,8%	2,7%	N.V.T.	5,8%	5,8%	5,9%	5,5%	5,5%

¹ Test 1: z4, Tests 2 en 3: gemiddelde van z1, z2 en z3.

² Duidelijk foutief gemeten rekwaarden zijn uitgesloten (negatieve rekwaarden en > 10%).

Dit komt overeen met de bevindingen van Van Eekelen et al., 2023. Hun veldmetingen lieten ook geen duidelijke correlatie zien tussen water en de rekken in het geotextiel.

INVLOED GRONDWATER OP DEFORMATIES

Figuur 6b vergelijkt de gemeten en berekende doorhangings van het geotextiel in het midden tussen twee palen. De berekeningen zijn gedaan voor dezelfde plek. De CA berekeningen komen goed overeen met de gemeten doorbuiging. Sommige zettingsopnemers vertonen zakkingen als gevolg van stijgend grondwater, met name opnemer z2. De berekeningen tonen dit effect ook, zij het in mindere mate.

Materiaal matras: met of zonder fijne fractie

Tabel 2 vergelijkt de gemeten en berekende waarden voor proeven 1, 2 en 3, voor twee bovenbelastingen (- 17 en 55 kPa) en met en zonder grondwater.

De belastingspatronen van proeven 2 en 3 zijn vergelijkbaar (na elke belasting-stap een grondwatercyclus), terwijl Test 1 belasting-stappen had tijdens één hoogwaterperiode.

De vervormingen van test 2 en 3 komen goed overeen, zowel met elkaar als met de CA-berekeningen. Het verschillende materiaal in de aardebaan lijkt geen invloed te hebben.

De gemeten waarden van belastingsdeel A lijken echter te hoog in de vulling zonder fijne deeltjes van proeven 1 en 3. Dit verschil komt niet overeen met de gemeten GR-deflectie. Mogelijk spelen de problemen die zich voordeden tijdens proeven 1 en 3 een rol, zoals lekkages en slecht functionerende sensoren en drukvaten. Deze hoge waarden van A in proeven 1 en 3 zijn niet verklaarbaar.

Zoals uitgelegd in de voorgaande paragraaf beschouwen we de gemeten rekken alleen kwalitatief. Ze zijn te groot, soms zelfs groter dan de breukrek. In de gemiddelde waarden van tabel 2 zijn duidelijk foutieve waarden niet meegenomen.

Alle testen reageren vergelijkbaar op grondwaterstijging: een vermindering in belasting en GR deflectie, met een snel herstel na de hoogwaterperiode. De CA-berekeningen komen goed overeen met de invloed van grondwater, als we rekening houden met de opwaartse krachten.

Conclusies

Dit artikel presenteert experimenten om de invloed van grondwater in een paalmatras te onderzoeken. We trekken de volgende conclusies:

- Grondwater vermindert de belasting door de opwaartse kracht.

- Deze belastingvermindering is goed te beschrijven met het principe van Archimedes, wat overeenkomt met het principe van effectieve spanning van Terzaghi (1925).
- De vermindering van belastingdeel A, dat de boogwerking beschrijft, wordt grotendeels veroorzaakt door de opwaartse krachten, maar een grondwaterstijging leidt ook tot een lichte vermindering van de grondboogvorming.
- De boogwerking herstelt zich onmiddellijk wanneer het grondwaterpeil weer daalt.
- Het Concentric Arches (CA)-model geeft een betere match met de metingen dan de andere twee beschouwde rekenmodellen (EBGEO, 2011) en Hewlett en Randolph (1988)), die beide de boogwerking onderschatten. Dat geldt zowel voor de situatie met als zonder hoogwater.
- De respons op grondwaterstijging is vergelijkbaar voor beide matrasvullingen, granulaat met en zonder fijne fractie.
- Een stijging van het grondwater geeft enige 'heave' van de geotextiel wapening door de opwaartse krachten: het geotextiel komt een beetje omhoog. Deze heave verdwijnt als het grondwater weer daalt.
- In de gepresenteerde proeven tonen de rekken in het geotextiel geen significante respons op veranderingen in het grondwater. Dit komt overeen met de bevindingen van Van Eekelen et al., 2023. Zij vinden een correlatie tussen grondtemperatuur en geotextiel rek, en niet tussen de grondwaterspiegel en geotextiel rek. Sommige auteurs, zoals Briançon en Simon (2012) en van Eekelen et al. (2020), rapporteren echter veranderingen in vervorming en belastingverdeling na zware regenval. Het is mogelijk dat temperatuurveranderingen als gevolg van zulke zware regenbuien in die gevallen een rol speelden, of door zwel van de ondergrond als gevolg van de toename van het watergehalte.

Met dank aan

De auteurs zijn dankbaar voor de steun van Solmax-TenCate, zowel financieel als praktisch, en de steun van de TKI-PPS-financiering van het Nederlandse Ministerie van Economische Zaken.

Referenties

- Archimedes. (circa 250 BC). Archimedes' principe.
- ASIRI (2013). Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusions ground improvements (Franse versie is van 2012).
- Briançon, L. and Simon, B. (2012). Performance of Pile-Supported Embankment over Soft Soil: Full-Scale Experiment, J. of Geotech. and Geoenviron. Eng., 138: 551-561.
- BS8006-1 (2010). Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. British Standards Institution, UK.

- CUR226 (2016). Zie: van Eekelen and Brugman (2016).
- EBGEO (2011). Recommendations for Design and Analysis for Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements. De Duitstalige versie is van 2010.
- Hewlett, W.J. and Randolph, M.F. (1988). Analysis of piled embankments. Ground Eng. 21(3): 12-18.
- NEN-EN 13242 (2015) Hydraulisch gebonden en ongebonden granulaten.
- Song, J., Chen, K., Li, P., Zhang, Y. and Sun, C. (2018). Soil arching in unsaturated soil with different water table. Granular Matter, 20: 78.
- van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A., Lodder, H.J. and 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. van Tol, A.F., (2013). An analytical model for arching in piled embankments. Geotextiles and Geomembranes 39: 78-102.
- van Eekelen, S.J.M., Nancey, A., Bezuijen, A. (2012b). Influence of fill material and type of geosynthetic reinforcement in a piled embankment, model experiments. In: Proc. Eur. Geosynthetic Congress., Valencie, Spanje, Vol 5, 167-171.
- van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A. and Van Tol, A.F. (2015). Validation of analytical models for the design of basal reinforced piled embankments. Geotextiles and Geomembranes, 43(1): 56 - 81.
- van Eekelen, S.J.M. and Brugman, M.H.A., Eds. (2016). Design Guideline Basal Reinforced Piled Embankments (CUR226). CRC Press, Delft, Netherlands.
- van Eekelen, S.J.M., Venmans, A.A.M., Bezuijen, A. and van Tol, A.F. (2020). Long term measurements in the Woerden geosynthetic-reinforced pile-supported embankment. Geosynthetics International, 27(2): 142-156.
- van Eekelen, S.J.M., Zwaan, R.A., Nancey, A., Hazenkamp, M. and Jung, Y.H. (2023). Four years field measurements in a partly submerged woven geotextile-reinforced pile-supported embankments. Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet, 1072-1077.
- van Eekelen, S.J.M., Wittekoek, B., Zwaan, R.A., Bezuijen, A., Nancey, A. (2024). 3D Experiments in bath: groundwater in geosynthetics-reinforced pile-supported embankments. In: Proc. ECPMG 2024, Delft.
- Wang, H.-L., Chen, R.-P., Cheng, W., Qi, S. and Cui, Y.-J. (2018). Full-scale model study on variations of soil stress in geosynthetic-reinforced pile-supported track bed with water level change and cyclic loading. Can. Geot. J. 56(1): 60-68.
- Zaeske, D. (2001), Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen. Schriftenreihe Geotechnik, Uni Kassel, Heft 10, Februari 2001. ●



TENCATE
Geolon® HMi

**ALLES-IN-ÉÉN OPLOSSING:
STERKE KWALITEIT DIE JE ZIET!**

Een onmiskenbaar design gecombineerd
met de hoogste technische prestaties



Tel: + 31 (0)546 544 811
nederland@tencategeo.com
www.tencategeo.eu

TENCATE
GEOSYNTHETICS

A Solmax
Company

enka®solutions



ENKAMAT® A20 EROSIEBESCHERMINGSMAT

Versterkt natuurlijke wortelstelsels met groene en langdurig
beschermde oevers als resultaat. Al meer dan 40 jaar bewezen.
www.enkasolutions.com

FREUDENBERG
PERFORMANCE MATERIALS



FREUDENBERG
INNOVATING TOGETHER