



Ing. Piet van Duijnen
GeoTec Solutions



Dr. Oliver Detert
HUESKER Synthetic
GmbH, Duitsland



Dr. Arash Lavasan
HUESKER Synthetic
GmbH, Duitsland



Ir. Joris van den Berg
HUESKER Synthetic BV



Dr.-Ing Diethard König
Ruhr-Universität
Bochum, Duitsland



Raoul Hölter, M.Sc.
Ruhr-Universität
Bochum, Duitsland



**Dr. Ir. Suzanne
van Eekelen**
Deltares

GEOGRID-VERANKERDE DAMWANDEN DEEL 2: FULL SCALE TEST

Inleiding

Op de strekdammen en in de omgeving van het sluiscomplex Kramer zijn 34 windturbines gerealiseerd met een ashoogte van 122 m en een rotordiameter van 115,7 m. Dit park was tijdens de realisatie (2018) al goed voor 200.000.000 kWh (200 GWh) aan windenergie en in 2019 is 330 GWh aan energie geleverd. De doelstellingen uit 2016 (zie www.windparkkramer.nl/) dat meer dan 100.000 huishoudens van windenergie worden voorzien is in 2019 volledig waargemaakt.

Windpark Kramer is innovatief. Een beelddetectie-systeem (DTBird) neemt vogels in de omgeving waar. Als een visarend wordt gespot, dan staan de rotors binnen enkele seconden stil. Als bouwend

Nederland kan je natuurlijk niet achterblijven. Een intensieve samenwerking tussen GMB, Voets Gewapende grond, Huesker Synthetic B.V. en GeoTec Solutions (kortweg de bouwers) heeft geleid tot lokale verbreding van de strekdam door middel van een innovatieve bouwmethode. De impact op omgeving, bouwstof- en energieverbruik is geminimaliseerd. Figuur 1 toont het eindresultaat.

Aanbiedingsontwerp van de bouwput

Voor de lokale verbreding zijn damwanden noodzakelijk. Stalen damwanden zijn relatief duur en de milieu impact van staalproductie is hoog. Bij de productie van 1000 kg staal komt b.v. 480 kg CO₂ vrij. De emissie factor op 1 kWh grijze stroom

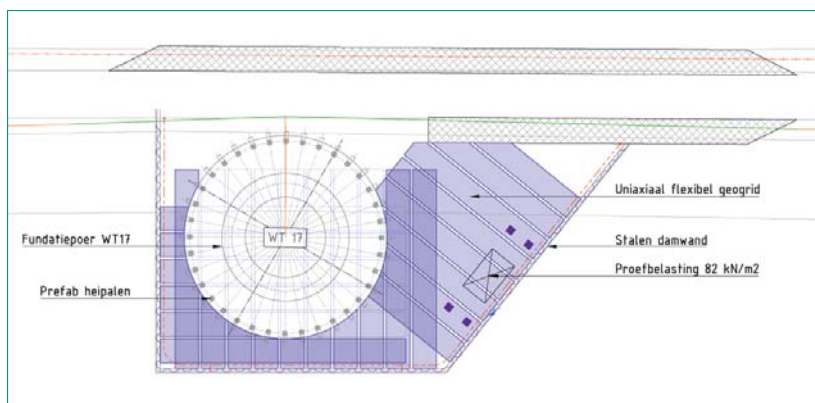
is 0,648 kg CO₂, grofweg komt bij 1 000 kg staalproductie evenveel CO₂ vrij als bij de productie van 750 kWh. Dus elke 1 000 kg minder staal levert een equivalent van 750 kWh aan lagere CO₂ productie op. De gemiddelde energiebehoefte van een gezin in een jaar, geproduceerd met grijze stroom, is equivalent aan de productie van 5000 kg staal, dus circa 40m² stalen damwand.

Een doelstelling in de tenderfase was duidelijk, het verbruik van grondstoffen tot een minimum beperken. De bijdrage van kortere en lichtere damwand profielen is groot. De inbrengdiepte onder de waterbodem is geminimaliseerd. In de fase dat de damwand vrijstaat in het water werden bij geringe waterstandsverschillen al grote horizontale verplaatsingen verwacht. Er is een drainage voorziening getroffen om het waterstandsverschil te beperken. De horizontale stabiliteit in latere fasen is gewaarborgd door de damwanden meervoudig te verankeren met legankers, waarbij het onderste leganker net boven laagwaterniveau is geïnstalleerd. Door de verankering heen is een ring van palen ingeheid voor de fundering van de turbines (zie figuur 2). Er is gekozen voor een damwandverankering van voorgespannen flexibele geogrids. De fundatiepalen werden vorgeboord (gewoeld) tot onderzijde laagste geogrid en vervolgens ingeheid. Ter compensatie van het verlies in doorsnede zijn geogrids toegepast met een hogere treksterkte.

Tijdens de tender is met traditionele damwandberekeningen de haalbaarheid van een met geogrid verankerde damwand onderzocht. De lengte van de geogrids is van onder naar boven ontworpen, waarbij de effectieve ankerlengte (groen in figuur 3) van een bovenliggend anker start aan het einde van het daaronder liggende anker. Het ankerlichaam van het onderste anker was gepositioneerd buiten de actieve wig, welke conservatief loopt tot de onderzijde van de damwand. Deze benadering resulteerde er wel in dat de bovenste verankeringslaag erg lang wordt. Het risico van onderlooptheid bij vallend water (hoogwater => laagwater) is getackeld door de damwand te perforeren, zodat vallend water niet tot een groot waterstandsverschil over de damwand leidt.



Figuur 1 –
Windpark
Kramer
(foto Paul Martens).

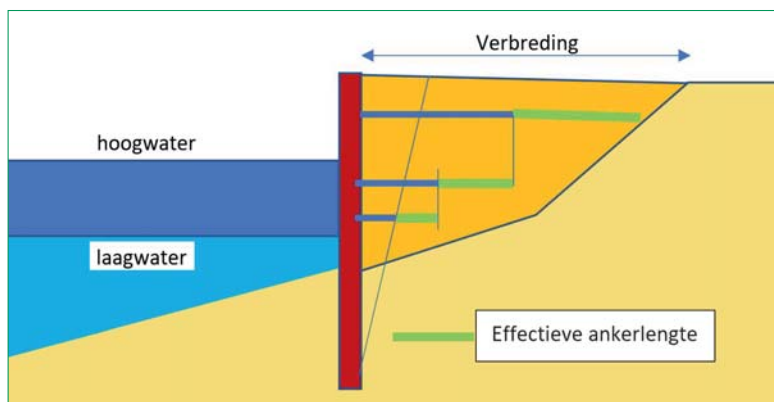


Figuur 2 –
Bovenaanzicht
met de geogrids
welke de damwand
verankering
vormen.

SAMENVATTING

Bij de aanleg van Windpark Krammer zijn de strekwanden rondom het sluisencomplex verbreed door gebruik te maken van met geogrids verankerde damwanden. Ter plaatse van een van de windturbines is een drievoudig met geogrid verankerde damwand proefbelast. De gemeten ankerkrachten in de geogrids en de verplaatsingen van de damwand zijn kleiner dan vooraf werd

verwacht. Naar aanleiding van de metingen worden in het laboratorium van Deltares modelproeven uitgevoerd. In dit artikel wordt de uitgevoerde proef geanalyseerd met een 2D analyse. Op basis daarvan worden handreikingen gegeven over de ontwerpaspecten van een met geogrids verankerde damwand.



Figuur 3 – Schatting benodigde lengte geogrids.

Aanbesteding

Dat dit systeem economisch en qua milieu impact als winnaar uit de bus komt, was te verwachten maar was gezien de concurrentie geen gelopen race. Technisch gezien moest nog een en ander uitgelegd worden voordat Windpark Krammer met Enercon als penvoerder tot opdrachtverlening over is gegaan. De interactie tussen geogrids en palen is intensief geanalyseerd.

Definitief ontwerp van de bouwput

Na de euforie van de winst komt de stress van de aantoonbaarheid. Snel werd duidelijk dat het ontwerpen voor een buitenlandse instantie anders is dan gebruikelijk in Nederland. In Duitsland moet ook voor aanvullend met laboratoriumproeven geotechnische parameters zoals ϕ_{cv} bepaald worden. Bij gunstige waarden voert de opdrachtgever zelf schaduwanalyses uit.

Voor de geotechnische beschouwing van de interactie tussen paalfundering en geogridverankering is een combinatie van 3D en 2D Plaxis EEM analyses uitgevoerd. Een vergelijking tussen de 3D en 2D-analyses, voor een simpele geometrie, gaf een beeld van de modelvereenvoudiging van een 3D probleem naar een 2D-berekeningsmodel. Vervolgens is met een serie 2D Plaxis berekeningen de interactie tussen de geogrids en de paalfundering geanalyseerd.

Nadat het definitief ontwerp was afgerond, is een aanvullende vermoeiingsanalyse van de palen uitgevoerd. De ontwerpanalyses bestonden uit een serie 3D versus 2D analyses voor het bepalen van een correctiefactor voor het 2D-model. Vervolgens zijn voor drie maatgevende situaties Plaxis en D-sheetpiling berekeningen uitgevoerd. De overige bouwputten zijn ontworpen met enkel

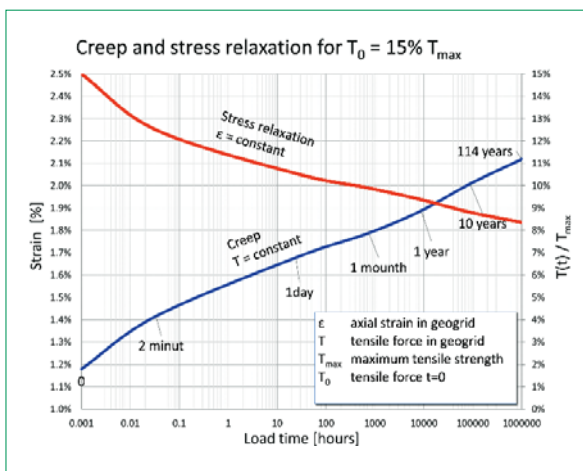


Figuur 5 – Proefbelasting, belastingoppervlak is 3 x 6 m², oppervlakte bigbags = 5 x 8 m².

D-Sheet piling berekeningen. In figuur 2 is het bovenaanzicht van de bouwkuip ter plaatse van de testlocatie gegeven.

Kruip

Geogrids vervaardigd van polymerisch materiaal, zoals polyester, vertonen onder constante belasting kruip. Onder constante belasting verloopt de verlenging logaritmisch, de kruiprek direct na het voorspannen is groot. Figuur 4 geeft de kruiprek weer bij een constante kracht of de afname van de trekkracht bij een constante rek (spanningsrelaxatie). Als een geogrid gedurende 2 minuten wordt voorgespannen op 60 kN/m, is bij constante vervorming (rek) na 1 dag de voorspanning afgenomen tot 50 kN/m. Op een van de damwandkuipen is een proefbelas-



Figuur 4 – Kruip bij constante spanning en spanningsrelaxatie bij opgelegde constante rek.

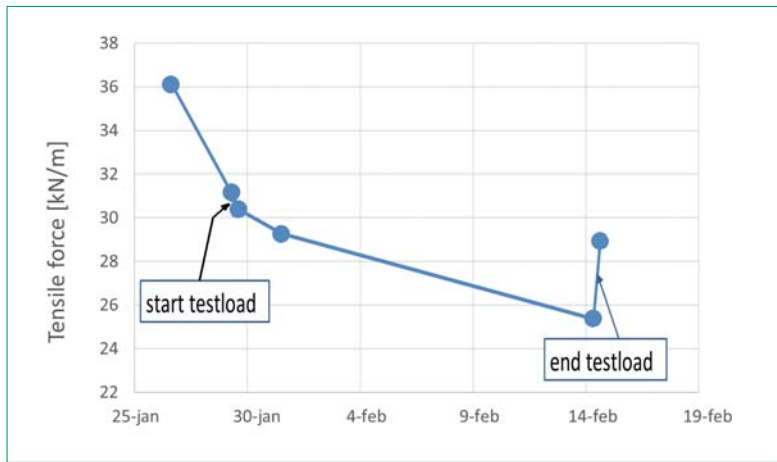
ting uitgevoerd waarbij de rekken in de geogrids, de verplaatsingen van de damwand, de zetting van de proefbelasting en de totale kracht in een ankerlaag zijn gemeten.

Belasting

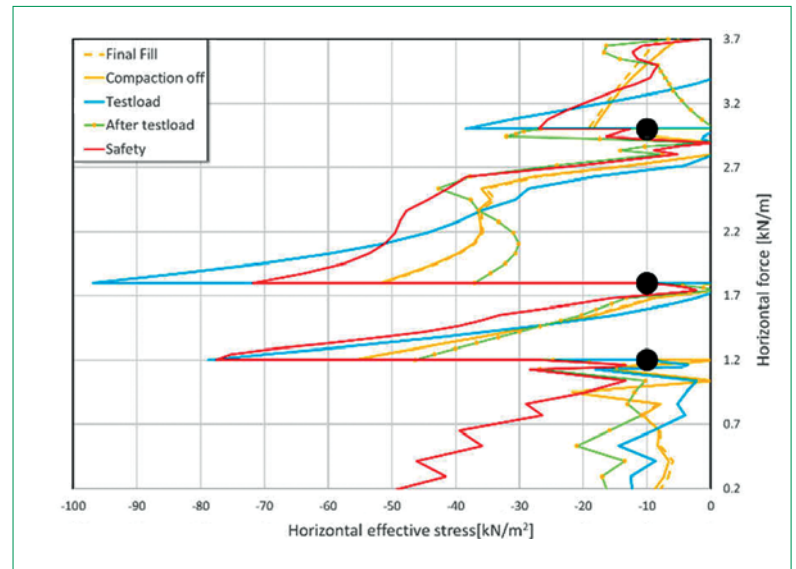
Figuur 5 geeft een overzicht van de belasting. De fundering had een oppervlakte van 3 x 6 m², waarop een belastingsplatform met overstek (8 x 5 m²) is gemaakt. De totale verticale belasting is circa 150 ton, zijnde 82 kN/m².

Meetopstelling

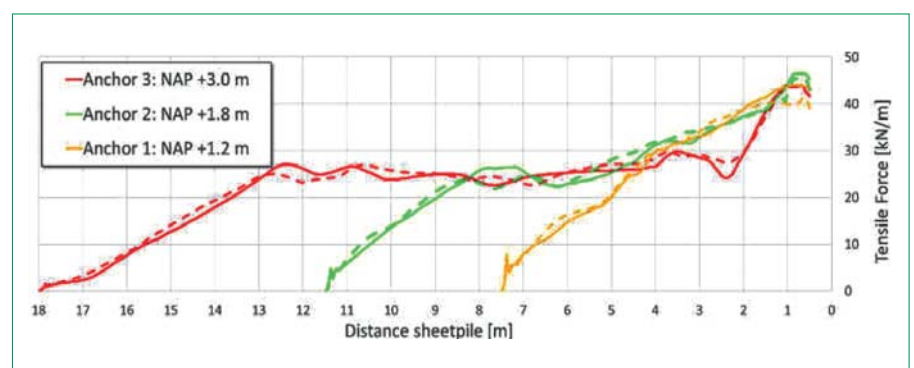
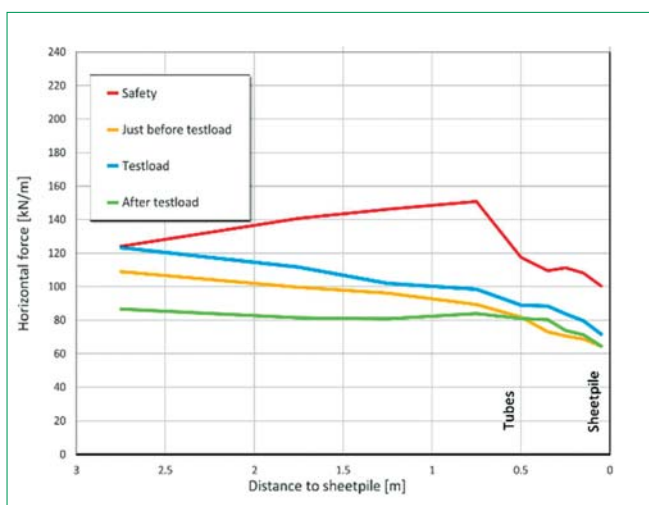
Er is gekozen voor redundantie in de meetopstelling. De lokale rekken in de geogrids zijn gemeten door de verschilverplaatsingen over een korte afstand (Glötzl). De (verandering in) afstand tussen



Figuur 6 – Gemeten ankerkrachten.



Figuur 7 – Horizontale effectieve korrelspanning tegen de damwand.



Figuur 8 – Geïntegreerde horizontale spanningen (maaiveld tot NAP +0,5 m).

Figuur 9 – Trekkraft in de individuele geogrids (stippellijn is bovenste geogrid, getrokken lijn is onderste geogrid) van één anker.

5 gefixeerde punten op het geogrid en de voorzijde van de damwanden zijn gemeten met een systeem van mantelbuizen en trekstangen. Dit meetsysteem werkt qua principe hetzelfde als de versnellingskabel bij een fiets. De verplaatsingen van de damwand zijn gemeten met een total station en spiegels op 2 verschillende niveaus. De totale trekkraft in een anker zijn gemeten met 4 krachtopnemers tussen de verdeelplaat en de damwand. Als laatste zijn de zettingen van het belastingplateau gemeten. De metingen zijn terug te vinden in [Springher]. Figuur 6 geeft de gemeten ankerkrachten. De spanningsrelaxatie in het geogrid is duidelijk waarneembaar (zie ook figuur 4).

Opmerkelijk is de toename in ankerkracht bij het wegnemen van de belastingen. Dit kan alleen als de afstand tussen horizontale buis waarom het geogrids is geslagen en damwand korter wordt. In de Plaxis berekening neemt de trekkraft ook toe van 37 kN/m met testload naar 39 kN/m zonder testload.

Postdictie analyses

De gemeten verplaatsingen van de damwand zijn enkele millimeters. Het aanbrengen van de boven-

belasting had geen enkele invloed op de gemeten ankerkrachten. Op basis van de vooraf uitgevoerde ontwerpberoevingen was wel een verhoging van de ankerkrachten verwacht. Door [Springher] is een proefschrift opgesteld waarbij de metingen zijn geanalyseerd en met een 2D Plaxis EEM-model de resultaten van postdictie analyses zijn gerapporteerd. Dit EEM-model is op enkele punten aangepast. De belangrijkste aanpassingen zijn:

1. In het oorspronkelijke model had de interactie tussen geogrid en aanvulzand een cohesie van circa 5 kN/m². Deze cohesie is verlaagd naar 0 kN/m².
2. In het oorspronkelijke model werd in 1 berekeningstap gelijktijdig een uniforme bovenbelasting (simulatie verdichting) verwijderd en gelijktijdig de testbelasting aangebracht. Hierdoor werd een rotatie van de testbelasting berekend welke afweek van de gemeten zettingen. Er is een extra berekeningsfase toegevoegd waarin eerst de uniforme bovenbelasting is verwijderd en in een volgende berekeningsstap de proefbelasting is aangebracht.
3. De uniforme bovenbelasting voor het simuleren van de verdichting is vervangen door een bovenbelasting van 2 m breed. De positie van deze belasting is gevarieerd, zodat uiteindelijk het hele maaiveld belast is geweest.

In [Detert] zijn 9 onderzoeksvragen gedefinieerd. Enkele van deze onderzoeksvragen zijn ook van toepassing voor Windpark Krammer. Ingegaan wordt op de vragen 4 en 6 en deels op vraag 1.

Vraag 4: Wat is de invloed van de geogrid-ankers op de horizontale belasting op de damwand?

De verankering heeft op 2 manieren invloed op de horizontale belasting tegen de damwand:

- a) De 3 verankeringsniveaus, met in totaal 6 lagen geogrids, doorsnijden de actieve grondwig. Dit beïnvloedt mogelijk de vorm van de actieve wig en daarmee de horizontale belasting op de damwand.
- b) De damwand is via stalen beugels verbonden met een horizontale buis $\varnothing 156$ mm. Om de buis wordt een geogrid dubbel geslagen. De buis neemt een deel van de horizontale belasting op, de achterliggende damwand ligt in de schaduw van de buis. Dit effect wordt mogelijk verstrekt doordat tussen de buizen boogwerking ontstaat.

In figuur 7 is de berekende horizontale korrelspanning op de damwand, voor het verdichten, na

het verdichten, tijdens de proefbelasting en na het verwijderen van de proefbelasting getekend. De rode lijn geeft de horizontale korrelspanning voor de testbelasting met $M_{sf} = 1,87$. Achter de buizen (zwarte stippen) is een duidelijke reductie van de horizontale effectieve spanning te zien.

Om het effect op verschillende afstanden van de damwand te analyseren is de gronddruk uit figuur 7 berekend als functie van de afstand tot de damwand. De horizontale korrelspanningen zijn vervolgens tussen maaiveld tot NAP +0,5 m geïntegreerd tot een horizontale kracht per strekkende meter. Figuur 8 geeft deze horizontale kracht voor verschillende afstanden van de damwand.

Vlak bij de damwand is de totale belasting redelijk constant. Voor en na het aanbrengen van de testbelasting is de horizontale effectieve belasting tussen maaiveld tot NAP +0,5 m circa 65 kN/m. Tijdens de belastingfase neemt de belasting met 10% toe tot 72 kN/m². Eenzelfde figuur is gemaakt voor de horizontale belasting tussen maaiveld tot NAP-1 m. De horizontale belasting voor de proefbelasting is 90 kN/m, tijdens het proefbelasting

118 kN/m (toename 30%) en na het proefbelasten 114 kN/m.

Het mogelijk ontstaan van boogwerking is onderzocht door de richtingen van de hoofdspansingen en het verloop van de te analyseren. Er was geen duidelijk patroon herkenbaar dat gewelfwerking al dan niet bevestigt.

Conclusie: Uit figuur 7 en 8 blijkt duidelijk dat de horizontale buis de horizontale belasting tegen de damwand verlaagt. De grootte van de reductie is niet eenduidig bepaald, daarvoor dienen aanvullende analyses te worden uitgevoerd.

Vraag 6: Welke sterkte moeten de geogrids hebben?

Elk anker bestaat uit twee lagen geogrid die om een buis zijn geslagen. Een subvraag van de benodigde sterkte is de vraag: Werken de twee geogrids samen? In figuur 9 is de berekende trekkracht in de individuele geogrids van de drie ankers weergegeven. Het verloop van de berekende trekkracht in het bovenste geogrid is nagenoeg gelijk aan de trekkracht in het onderste geogrid van een anker.

Conclusie: De twee geogridlagen van één anker werken perfect samen. De treksterkte en stijfheid is de som van de 2 geogrids van 1 ankerniveau.

Vraag 1: Hoe beïnvloedt de lengte van de geogrid de actieve zone?

De geogrid moet lang genoeg zijn om de belasting behoorlijk te kunnen overdragen op de grond, zonder risico van het uit de grond trekken van het geogrid. Hierbij moeten minimaal twee subvragen worden beantwoord:

1a) Waar draagt het geogrid de trekkracht over aan de grond?

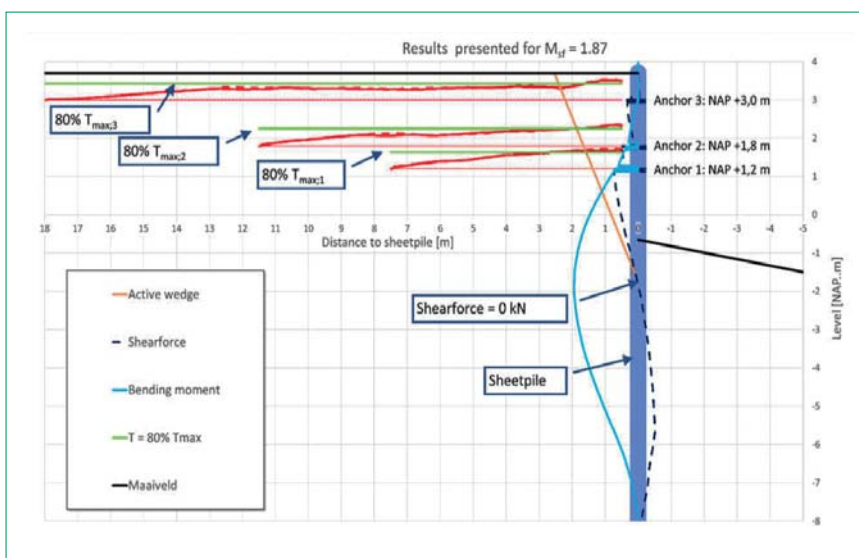
1b) Wordt aan beide zijden of aan één zijde van een geogrid wrijving gemobiliseerd?

Vraag 1a lijkt voor een enkele anker laag eenvoudig te beantwoorden. Het is logisch dat buiten de actieve wig wrijving kan worden gemobiliseerd. Maar hoe zit het met twee of meer ankerniveaus op korte afstand van elkaar? Het ontwerppunt is dat een bovenliggend anker pas effectief kracht overdraagt aan de ondergrond aan het einde van een onderliggend anker, zie figuur 2. In figuur 10 is de berekende trekkracht in de geogrids weergegeven voor de drie ankerniveaus. Figuur 9 geeft het verloop van dezelfde trekkracht weer op een leesbare schaal. De trekkrachten zijn weergegeven na het uitvoeren van een phi-c reductie analyse ($M_{sf}=1,87$). De oorsprong van het actieve glijvlak is aangenomen in de dwarskrachten nulpunt.

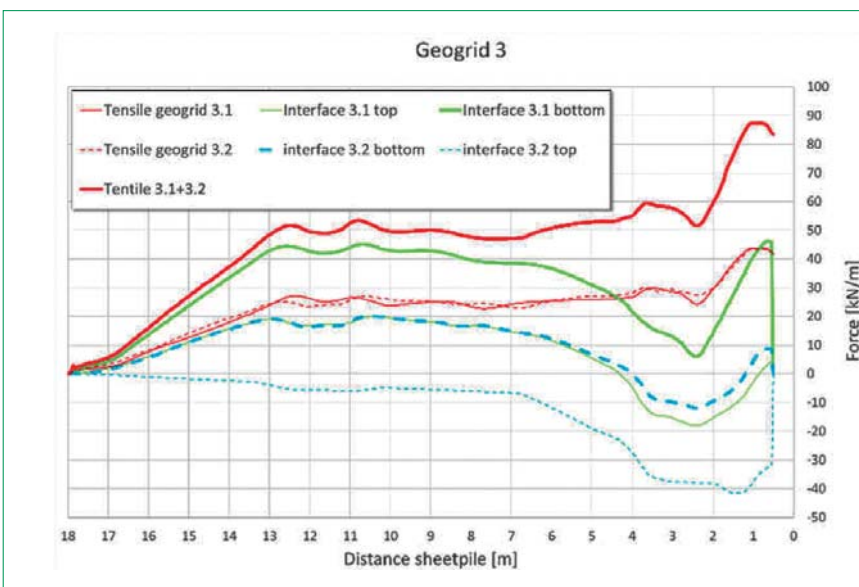
Voor het onderste ankerniveau is de afname van de trekkracht buiten het actieve glijvlak groot. Binnen de actieve wig lijkt de trekkracht redelijk constant. Voor het middelste anker is de afname buiten het actieve glijvlak gering. De afname gaat veel sneller vanaf de achterzijde van het onderliggende anker. Voor het bovenste anker geldt hetzelfde als voor het middelste anker. Tot de achterzijde van het middelste anker is een geringe afname in trekkracht in het bovenste anker beperkt, vanaf de achterzijde van het middelste anker wordt in het bovenste anker de meeste kracht afgedragen. Bij het bovenste anker wordt binnen de actieve glijvlak wel degelijk wrijving gemobiliseerd. Dit is het beste te zien in figuur 9, waarbij op korte afstand van de damwand de trekkracht in een geogrid afneemt van circa 44 kN/m naar circa 30 kN/m op circa 3 m afstand.

Conclusie: De ontwerpaanname voor het onderste anker dat de belasting buiten de actieve glijvlak wordt overgedragen is correct. Dat voor de bovenliggende ankers de belasting pas wordt overgedragen vanaf de achterzijde van een onderliggend anker lijkt deels waar. Een klein deel van de ankerkracht wordt al afgedragen buiten het actieve glijvlak. Waarschijnlijk heeft de onderlinge afstand tussen de ankers en de diepte ten opzichte van maaiveld een grote invloed. Wel lijkt het duidelijk dat het ontwerppunt voor analytische berekeningen een veilige aanname lijkt.

Figuur 10 –
Berekende verloop in de ankerkrachten, $M_{sf} = 1,87$.



Figuur 11 –
Trekkracht en gemobiliseerde wrijving anker 3 van beide geogrids.



Vraag 1b) Wordt aan één of aan twee zijden wrijving gemobiliseerd?

Deze vraag is beantwoord door heel gedetailleerd de wrijving tussen de individuele lagen van het bovenste anker te beschouwen. Figuur 11 geeft de trekkracht weer in de beide individuele geogrid lagen (dunne rode lijnen) en de gesommeerde trekkracht (dikke rode lijn). De dikke groene lijn geeft de gemobiliseerde wrijving weer langs de onderzijde van het onderste geogrid. Vanaf de achterzijde van het anker (18 m vanaf de damwand) tot circa 13 m vanaf de damwand is de gemobiliseerde wrijving aan de onderzijde van het onderste geogrid gelijk aan de totale trekkracht. Ook is de ontwikkelde wrijving aan de onderzijde van het bovenste geogrid gelijk aan de trekkracht in het bovenste geogrid. Verder is de wrijving aan de onderzijde van het bovenste geogrid gelijk aan de wrijving aan de bovenzijde van het onderste geogrid. (dunne groene lijn versus dikke blauw gestippelde lijn). Er wordt dus effectief slechts aan één zijde wrijving ontwikkeld.

Conclusie: Voor de bepaling van de effectieve ankerlengte wordt alleen aan de onderzijde van het anker wrijving gemobiliseerd.

Conclusie

Duidelijk is dat een met geogrid verankerde damwand nog voldoende geheimen met zich

meedraagt en dat het ontwerpen van een dergelijke constructie uitdagend is. Op basis van de beschreven praktijktest en analyses zijn de volgende conclusies te trekken:

1. De geogridverankering lijkt de horizontale belasting tegen de damwand te verlagen. Dit effect is alleen waarneembaar rondom de ankers, achter de horizontale buizen. De horizontale belasting wordt dan door de buizen opgenomen en zo overgebracht op het geogrid. Voor het ontwerp van het geogrid maakt dit dus geen verschil, hooguit voor het ontwerp van de damwand die een iets lagere belasting zou krijgen.
2. Voor de bepaling van de trekkracht en de axiale stijfheid werken beide geogrids samen, $1+1=2$. Indien in een berekeningsmodel een ankerlaag met één geogrid wordt gemodelleerd, is de stijfheid en sterkte gelijk aan de som van beide geogrids.
3. De effectieve ankerlengte van het onderste anker begint net buiten het actieve glijvlak. De effectieve lengte van bovenliggende ankers begint aan de achterkant van een onderliggend geogrid. Ook bij bovenliggende geogrids wordt buiten de het actieve glijvlak al wrijving ontwikkeld. Deze wrijving is echter relatief beperkt en waarschijnlijk sterk afhankelijk van de geometrie en dient bij analytische analyses niet te worden meegenomen.

4. Het grootste deel van de ankerkracht (circa 80%) wordt opgenomen door alleen wrijving aan de onderzijde van een anker. Wrijving aan de bovenzijde is er wel, maar draagt slecht in geringe mate bij. Vooralsnog wordt aanbevolen alleen aan de onderzijde rekening te houden met wrijving.

Dankwoord

De proef te Krammer is mogelijk gemaakt door GmbH, Gebr. De Koning, Voets Gewapende Grond, Huesker Synthetic gmbh, Inpijn en Blokpoel, Ruhr-Universität Bochum en GeoTec Solutions. Bij de analyse van de resultaten is veel werk verzet door Ruhr-Universität Bochum, Duitsland. Extra sponsoring van TKI-PPS (Ministerie van Economische zaken) en Deltares heeft het mogelijk gemaakt in het laboratorium met schaalmodellen het gedrag nader te analyseren.

Referenties

- Detert, Oliver en anderen, GeoGrid-verankerde damwanden Deel 1: Voorbeeld projecten en onderzoeksoepzet. Geotechniek, jaargang 23, nummer 4 november 2019.
- Spingher, Suleiman Modellvalidierung einer mit Geogittern rückverankerten Arbeitsplattform zum Bau von Offshore-Windenergie Anlagen, 28.09.2018, Suleiman Spingher Masterarbeit Ruhr Universität Bochum. ●



STERK, ROBUUST EN KOSTENEFFICIËNT

Secugrid® HS
Geogrid met hoge treksterkte

Toepassingen:

- Ophogingen op slappe ondergrond
- Gewapende matras voor o.a. paalmatrasystemen
- Voorkomen van ongelijkmatige zettingen door aardverschuivingen en ondergrond instabiliteit

Voordelen:

- Kortere bouwtijd door snellere consolidatie
- Kostenbesparend door optimalisering van het paalstramien
- Vergroting van de verkeersveiligheid

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