



ir. Britt Wittekoek
Deltares, TU Delft



dr. ir. Suzanne
J.M. van Eekelen
Deltares



ing. Jarno Terwindt
Deltares



dr. ir. Mandy Korff
Deltares, TU Delft



ing. Piet G. van Duijnen
GeoTec Solutions



dr. Oliver Detert
Huesker Synthetic
GmbH, Duitsland



ir. Joris van den Berg
Huesker Synthetic BV



Raoul Hölter, MSc.
Ruhr-Universität
Bochum, Duitsland



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

GEOGRID-VERANKERDE DAMWANDEN DEEL 3: EXPERIMENTEN EN NUMERIEKE ANALYSE

Inleiding

Dit artikel presenteert een serie schaalproeven en de numerieke simulatie daarvan. De proeven zijn uitgevoerd in het laboratorium van Deltares en zijn eerder beschreven in Wittekoek (2020). Dit artikel is het derde in een serie in Geokunst over geogrid-verankerde damwanden:

- Detert et al. (2019) beschreven voor- en nadelen, voorbeeldprojecten en het onderzoeksprogramma dat deels in dit artikel wordt beschreven.
- Van Duijnen et al. (2020) beschreven monitoring

en numerieke analyse van een full-scale test bij Windpark Krammer.

Een geogrid-verankerde damwand heeft zowel overeenkomsten met gewapende grond met een wandpaneel over de volle hoogte, als met een traditioneel verankerde damwand. Een verschil met een verankerd wandpaneel is de inbedding of inklemming. Het verschil met een traditioneel verankerde damwand is het aantal ankers en het feit dat de geogrids ook actief zijn binnen de

actieve grondwig tijdens vervorming van de damwand.

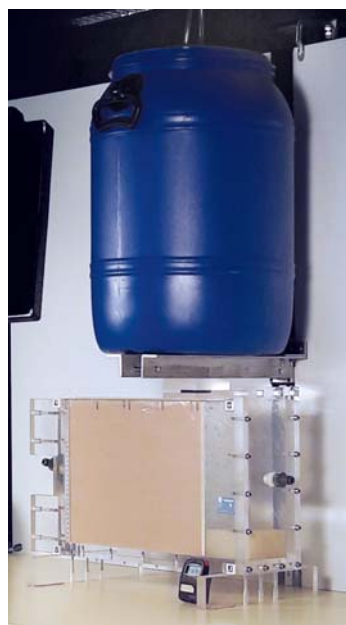
Kleine schaalproeven

Figuur 1 laat de proefopstelling zien van de schaalproeven. De proefbak is vrij smal (10 cm), 52,5 cm lang en 30 cm hoog. In de bak is een 10 mm dikke aluminium model-damwand geplaatst. Deze is al dan niet verankerd met een of twee geogrids, en representeert alleen het bovenste deel van een damwand. Het onderste deel van de damwand wordt verondersteld diep in de draagkrachtige grond te zijn geïnstalleerd. De damwand kan vrij horizontaal bewegen over de bodem van de proefbak.

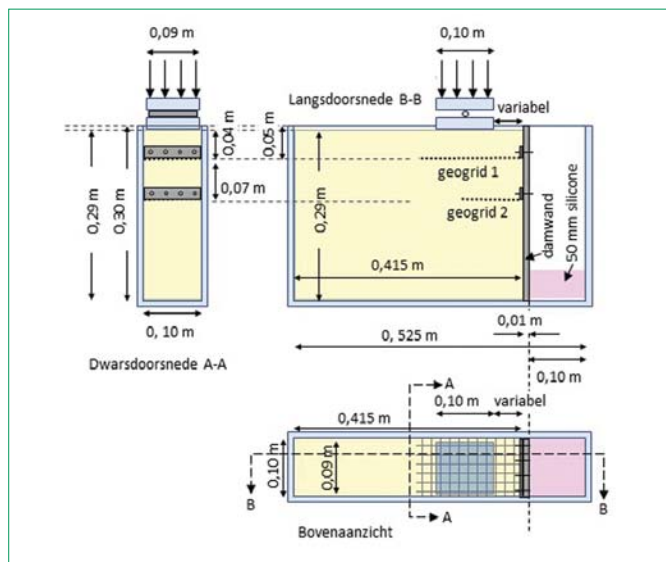
Het model-geogrid heeft een korte-duur stijfheid van 191 kN/m bij 2% axiale rek en een korte-duur treksterkte van 16,2 kN/m bij een maximale rek van 13,5%. Aan de actieve zijde van de damwand is de proefbak gevuld met Baskarp B15 zand. Dit is slecht gegradeerd zand, waarvan de eigenschappen zijn gegeven in Tabel 1. Het zand is verdicht tot een relatieve dichtheid van ongeveer 70%. De passieve zijde is gemodelleerd met een 10 cm breed siliconen blok met een stijfheid van 159 kPa bij een rekniveau tot minstens 8% (8 mm).

Tabel 1 – Eigenschappen van het Baskarp B15 zand gebruikt in de proeven.

Parameter	Symbool	Waarde
Relatieve dichtheid [%]	I_D	63 – 83
Mediaan van de korrelgrootte [mm]	D_{50}	0,137
Uniformiteitscoëfficiënt [-]	D_{60}/D_{10}	1,6
Wrijvingshoek [°]	φ_{sec}^{triax}	45 ¹
Residuele wrijvingshoek [°]	φ_{res}^{triax}	34
Dilatatie hoek [°]	ψ^{triax}	15
Cohesie [kPa]	C	0,6
Secant Young's modulus bij steundruk 100 kPa [MPa]	E_{50}	72,4
Exponent in stijfheidsrelatie [-]	M	0,54
Poisson ratio [-]	ν	0,25



a. Overzicht.



b. Bovenaanzicht en dwarsdoorsneden.



c. Watercontainer op strip als bovenbelasting.



d. Verbinding geogrid-damwand in de proeven.

Figuur 1 – Proefopstelling.

SAMENVATTING

Het is relatief nieuw om geogrids te gebruiken om damwanden te verankeren. Een serie proeven in het laboratorium van Deltares laat zien hoe deze geogrid verankering werkt en hoe deze methodiek zich verhoudt tot CUR166 (CRWC166 damwandconstructies). De proeven zijn gesimuleerd met 2D Plaxis-sommen. We zien hoe de locatie van de bovenbelasting, de lengte van de geogrids en het aantal geogrids bepalend zijn voor de draagkracht van de constructie.

De resultaten geven inzicht in het stabiliserende effect van het geogrid, en de effectieve lengte van het geogrid; dat wil zeggen: langs welke delen van het geogrid wordt de geogrid-grondwrijving gemobiliseerd? Britt Wittekoek studeerde bij Deltares en de TU Delft op af op dit onderzoek en schreef er een journal paper over (Wittekoek et al., 2021). Suzanne van Eekelen schreef op basis hiervan dit artikel.

Achter de damwand is een plexiglas strookbelasting aan gebracht. Deze is 10 cm lang en bijna even breed als de proefbak. Deze wordt belast met een (blauwe) container die langzaam wordt gevuld met water. Geeft de strookbelasting een druk van 10 kPa, dan komt dat overeen met 1 kN per m damwand (1 kN/m). De strookbelasting is zo vormgegeven dat deze de verticale en horizontale vervorming van de grond kan volgen.

De wrijving tussen zand en wand is geminimaliseerd met een doorzichtig siliconen vel met glijmiddel tussen zand en wand. Paragraaf 3.1 gaat in op de invloed van de geringe breedte van de bak en de wandwrijving.

Tabel 2 geeft een overzicht van de proeven. Gedurende de proeven zijn er continu foto's gemaakt om de verplaatsingen te volgen met behulp van PIV (Particle Image Velocimetry). De resultaten met het programma GeoPIV-GR (Stanier et al., 2015) kwamen goed overeen met die van het handmatig volgen van de meetpunten.

Resultaten kleine schaalproeven

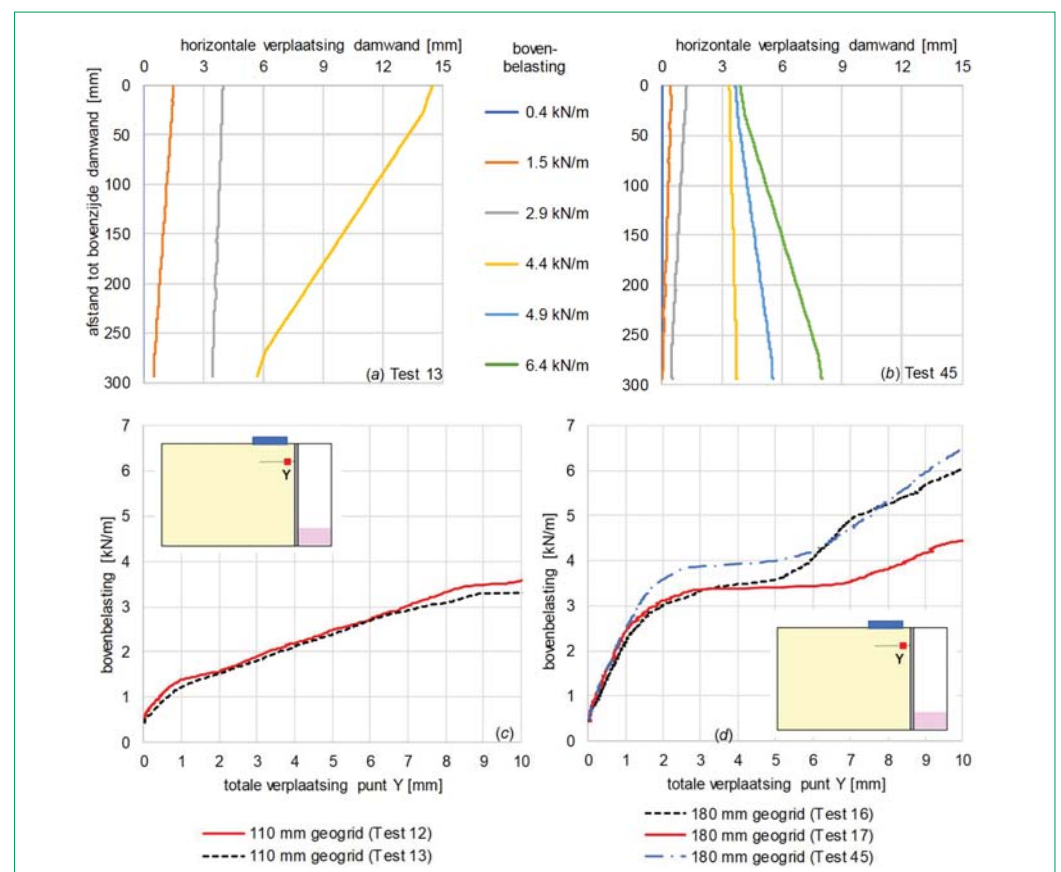
REPRODUCEERBAARHEID EN VALIDATIE VAN DE PROEVEN

In de meeste proeven kantelt de damwand, zoals getoond in figuur 2a. Deze proeven blijken goed reproduceerbaar zoals te zien in figuur 2c. In de proeven met de langste geogrids (180 mm) biedt het geogrid zoveel weerstand dat het bezwijkpatroon verandert. De damwand kantelt niet meer voorover, zoals bijvoorbeeld in Test 13, figuur 2a, maar schuift onderuit (Test 45, figuur 2b). De damwandteen verplaatst daarbij pas bij een bovenbelasting hoger dan 2,9 kN/m over de bodem. Dat geeft meer wrijving, en het stick-slip gedrag heeft dan meer invloed dan bij de kortere geogrids. Hierdoor wordt de reproduceerbaarheid minder. Dat is te zien in figuur 2d.

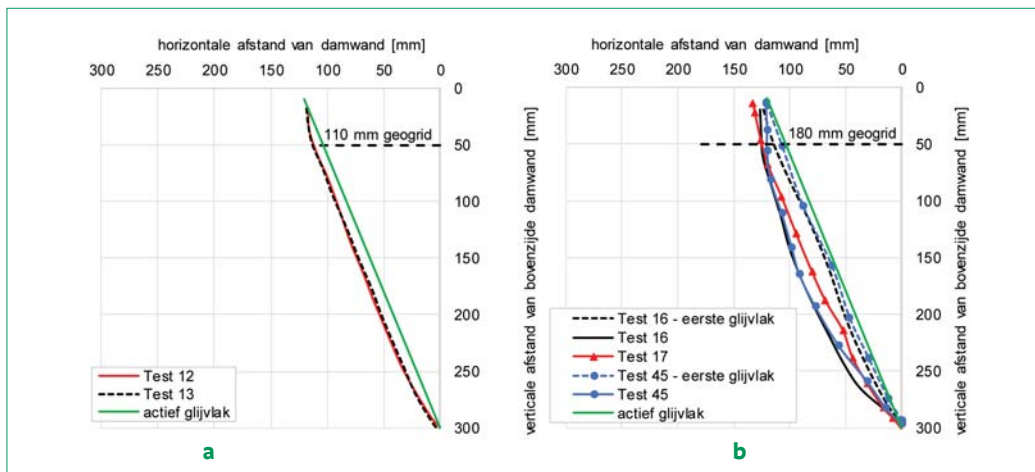
Alle proeven met het 180 mm geogrid in figuur 3 laten eenzelfde gekromd glijvlak zien. Dit glijvlak is langer dan het rechte actieve glijvlak dat zou ontstaan als er geen geogrid anker zou zijn of een korter geogrid, zoals getoond voor de testen 12 en 13 met het geogrid in figuur 3. In twee van de drie proeven met het 180 mm geogrid ontstond bij lage belastingen eerst het rechte, actieve glijvlak. Bij verdere belasting ontstond het bolle glijvlak. De invloed van de wandwrijving in de smalle proefbak

Tabel 2 – Proevenserie

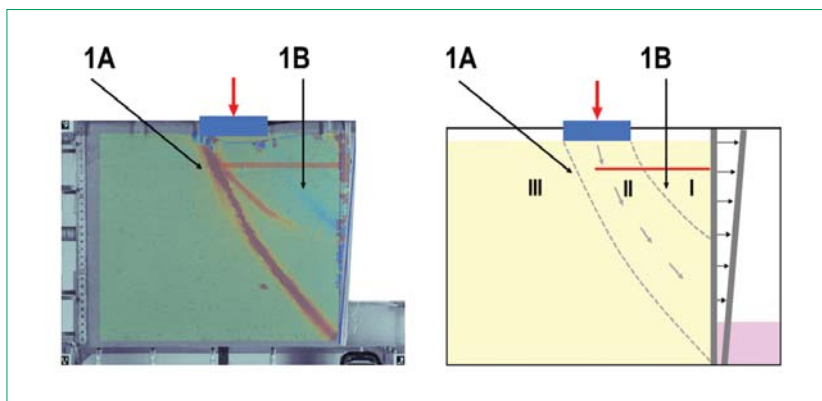
Test ²	Aantal geogrids	Lengte geogrid(s) (mm)	Geogrid bevestigd aan damwand?	Verticale afstand tussen bovenzijde damwand en geogrid (mm)	Afstand tussen strookbelasting en damwand (mm)	Relatieve dichtheid I_D (%) ³
12/13	1	110	Ja	50	30	67 / 71
14/15	1	110	Ja	50	60	73/ 74
16/17/45	1	180	Ja	50	30	68 /74/76
18/19	1	180	Ja	50	130	74 /73
20/21	2	180 (boven) 110 (onder)	Ja	50 en 120	130	71 /64
22/23	2	180 (boven) 110 (onder)	Ja	50 en 120	30	74 /78
28	1	60	Ja	50	30	81
30	1	60	Ja	50	84	78
31	1	60	Nee, los	50	30	68
41/42	1	180	Nee, los	50	30	75/76
43/44	1	110	Nee, los	50	30	69/76
47	0	-	Ja	-	84	75
48	0	-	Ja	-	30	71
51	1	130	Nee, los	50	30	67
52	1	130	Ja	50	30	65



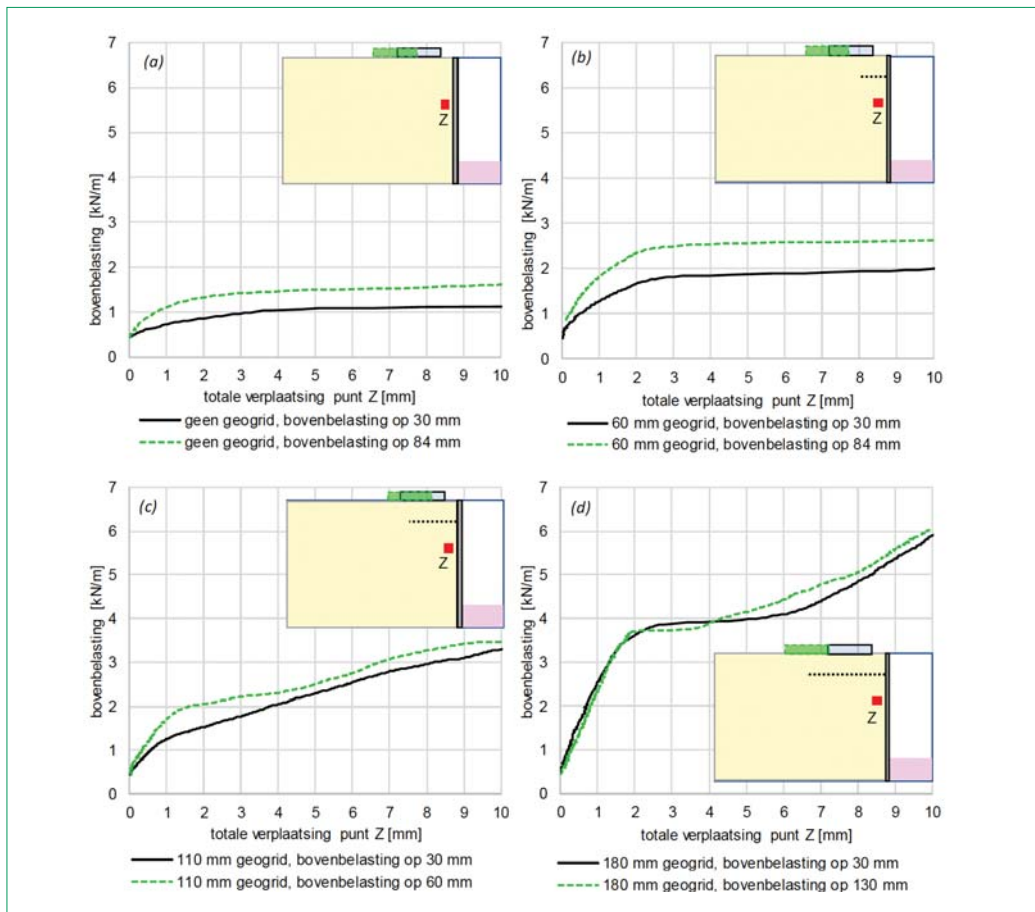
Figuur 2 – Last-ervorming van proeven met (links) 110 mm geogrid en (rechts) 180 mm geogrid. De belasting staat op 30 mm van de damwand. I_D is de relatieve dichtheid van het zand.



Figuur 3 – Glijvlakken van proeven met (a) 110 mm geogrid en (b) 180 mm geogrid. De belasting staat op 30 tot 130 mm van de damwand. (De rechte glijvlakken zijn hier heel goed in overeenstemming met de hoek die bij een actief glijvlak wordt verwacht, $45+\phi/2=67.5$ graden, zie groene lijn).



Figuur 4 – Glijvlakken bij een bovenbelasting van -4 kN/m, dat is op 2/3 van de test. Test 19. 1A: kritisch glijvlak, 1B: secundair glijvlak.



Figuur 5 – Invloed van de locatie van de bovenbelasting. a) zonder geogrid; b) 60 mm geogrid; c) 110 mm geogrid en d) 180 mm geogrid.

kan relatief groot zijn en door de smalle bak kan er boogwerking ontstaan tussen de twee wanden. Wittekoek (2020) en Wittekoek et al. (2021) hebben deze invloed geanalyseerd door de wrijving langs de wand te meten en met analytische berekeningen. Bovendien zijn in Wittekoek et al. (2021) de proefresultaten vergeleken met proeven in een acht keer bredere bak. De vorm van de glijvlakken in beide bakken blijkt gelijk. Daarmee is aangetoond dat de smalle-bakproeven voldoende betrouwbaar zijn om de resultaten kwalitatief te analyseren.

DE LOCATIE VAN DE STROOKBELASTING

De locatie van de strookbelasting bepaalt het bezwijkpatroon. Figuur 4 laat dit zien: de twee glijvlakken beginnen bij de binnen- en buitenteen van de strookbelasting. Zij delen de grondmassa in drie verschillende rekzones:

- Zone I is stabiel en ligt tussen de damwand en het secundaire glijvlak 1B;
- Zone II is de instabiele actieve zone en glijdt over het kritische glijvlak 1A;
- Zone III is stabiel en ligt buiten het kritische glijvlak 1A.

Figuur 4 laat nog een derde glijvlak zien tussen de twee andere glijvlakken. Dit glijvlak ontstond op het laatste moment in slechts één proef. Bij de (identieke) proef 18 is dit derde glijvlak niet waargenomen, zodat hier niet verder op ingegaan wordt. Figuur 5 toont de invloed van de locatie van de strookbelasting. We zien stijver gedrag als de belasting verder van de damwand staat. Dat komt doordat de glijvlakken langer worden. Bovendien kan de belasting beter (dieper) spreiden als de belasting verder van de damwand staat. Het verschil tussen figuur 5a en b is opmerkelijk. Als de belasting op 84 mm van de damwand staat, valt het 6 cm korte geogrid helemaal in zone I. Toch neemt de draagkracht toe in vergelijking met de situatie zonder geogrid. Het geogrid heeft dus een bijdrage. Bij langere geogrids heeft de positie van de bovenbelasting minder invloed, zoals te zien in figuur 5c en d.

GEOGRID-LENGTE

Een langer geogrid geeft meer weerstand en dus een hogere bezwijkbelasting. Figuur 6a laat dat zien. Het langste geogrid, van 180 mm, laat initieel een stijver gedrag zien dan de kortere geogrids. Figuur 6b toont het rechte glijvlak dat bij alle geogrid-lengtes ontstaat. Voor het langste geogrid van 180 mm (Test 45) ontstaat er echter bij hogere belasting een gekromd glijvlak. Alleen bij dit geogrid snijdt het schuifvlak het geogrid. Het initieel rechte glijvlak is daardoor niet het kritische. Het geogrid wordt beter geactiveerd en de oriëntatie van het glijvlak bij de kruising met het geogrid verandert. Het glijvlak wordt daardoor gekromd en langer.

EEN TWEEDE GEOGRID

Figuur 7 vergelijkt de vervormingen die optreden bij één en twee geogrids. Tot een belasting van 3,0 kN/m zijn de vervormingen gelijk. Boven de 4,0 kN/m is de damwand in beide testen instabiel geworden en verschoven langs de bodem. Bij deze hogere belastingen beperkt het tweede geogrid de vervormingen.

We zouden verwachten dat Y meer zakt dan Z, maar dat is niet zo: punt Z zakt meer dan punt Y. Het tweede geogrid maakt dit verschil groter. Blijkbaar belemmeren de geogrids de zetting van de bovengelegen grond. Beide geogrids vergroten dus de globale stabiliteit.

Figuur 8 laat zien dat het tweede geogrid de vorm van het glijvlak verandert. Het wordt wijder en dus langer.

VERBINDING GEOGRID-DAMWAND

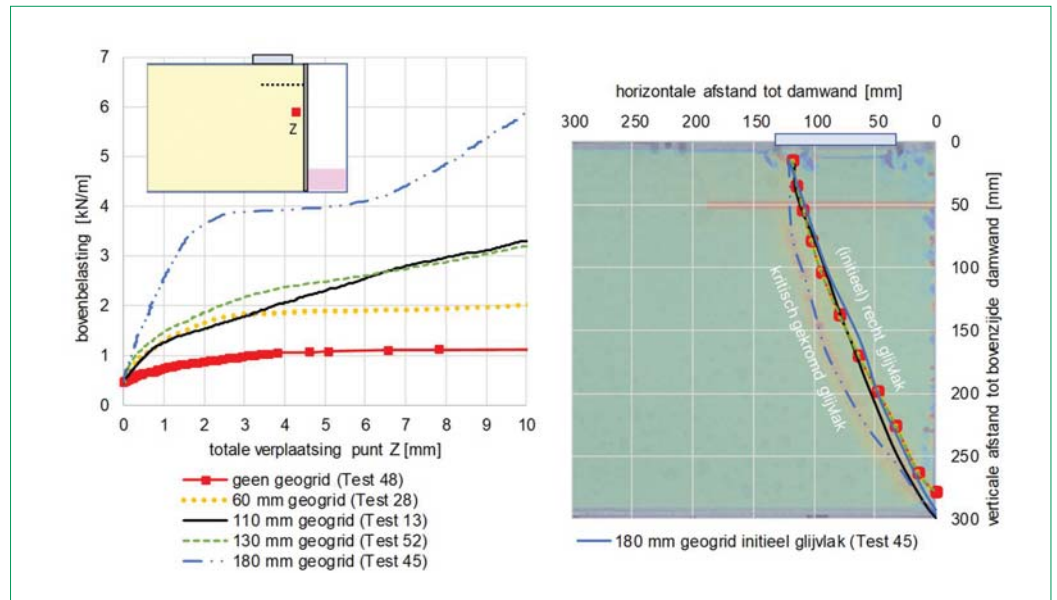
Bij vier proeven is het geogrid niet aan de damwand bevestigd, zie figuur 9. We zien het volgende:

- Het bevestigen van het geogrid aan de damwand vergroot de draagkracht;
- Korte losse geogrids (≤ 130 mm) dragen niet of nauwelijks bij aan de draagkracht;
- Korte verbonden geogrids (≤ 130 mm) vergroten de draagkracht, ondanks het feit dat de geogrids geheel in zones I en II zitten. Zone I en II worden dus alleen geactiveerd als de geogrids vast zitten aan de damwand;
- Korte geogrids (≤ 130 mm) dragen niet bij door de grond te wapenen. Als ze dat wel zouden doen, dan zou de situatie met een kort los geogrid meer draagvermogen hebben dan de situatie zonder geogrid;
- De toegenomen draagkracht door het vastmaken van korte geogrids (≤ 130 mm) aan de damwand duidt op de aanwezigheid van het membraan effect⁴;
- Het losse 180 mm geogrid draagt bij aan de draagkracht, ook al zit het niet aan de damwand vast. De draagkracht ontstaat door de pull-out weerstand in zones I en III;
- De totale weerstand van het geogrid bestaat dus uit bijdragen van het membraan effect (zone I), wrijvingsweerstand (zones I en II) en pull-out weerstand (zones I en III).

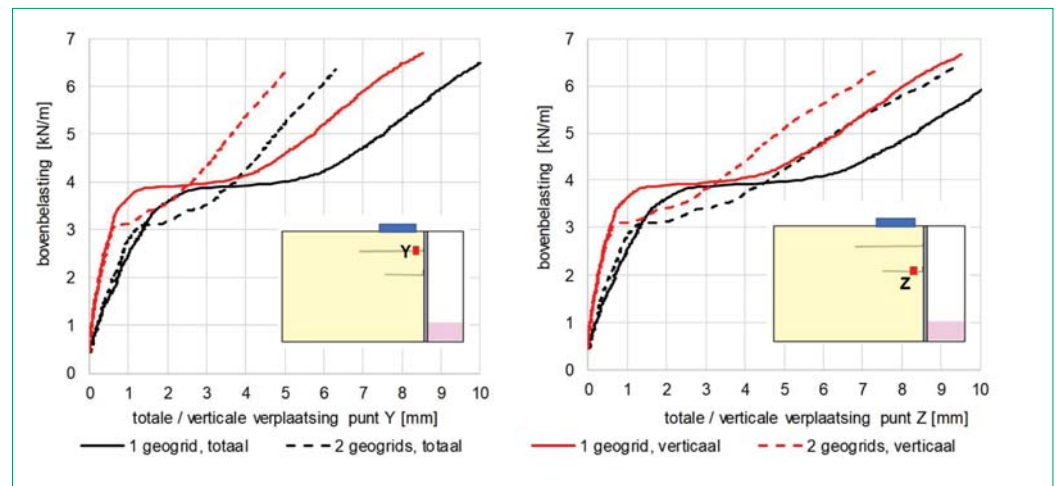
Numerieke simulatie

MODEL

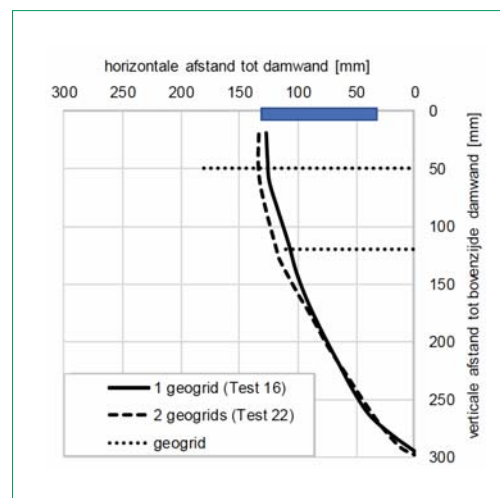
De proeven zijn gesimuleerd met 2D Plaxis (versie 2019), zie figuur 10. Het zand werd beschreven met het Hardening Soil model, het siliconen blok is lineair elastisch. Wittekoek (2020) en Wittekoek et al. (2021) geven de details van het model. Tabel 3 tot en met Tabel 5 geven de berekeningsdetails. Wittekoek et al. (2021) tonen aan dat het model de proeven goed simuleert.



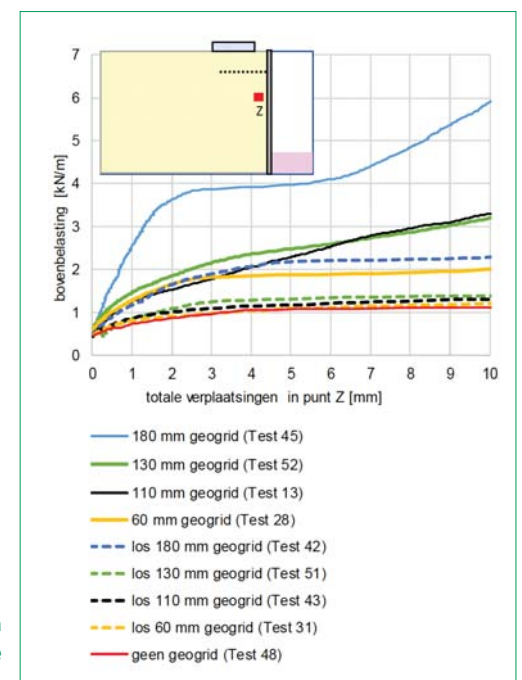
Figuur 6 – Invloed geogrid-lengte. Bovenbelasting op 30 mm. Op de achtergrond van de rechtergrafiek de schuifrekken van Test 45 (180 mm geogrid).



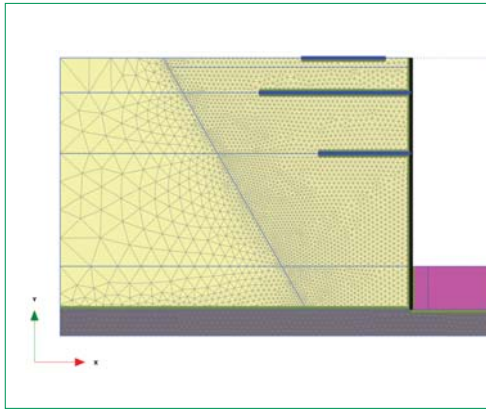
Figuur 7 – Last-verplaatsingsgedrag bij 1 of 2 geogrids, bovenbelasting op 30 mm. Tests 45 en 22. Beide hebben een geogrid van 180 mm op dezelfde hoogte, test 22 heeft een tweede geogrid, 110 mm lang.



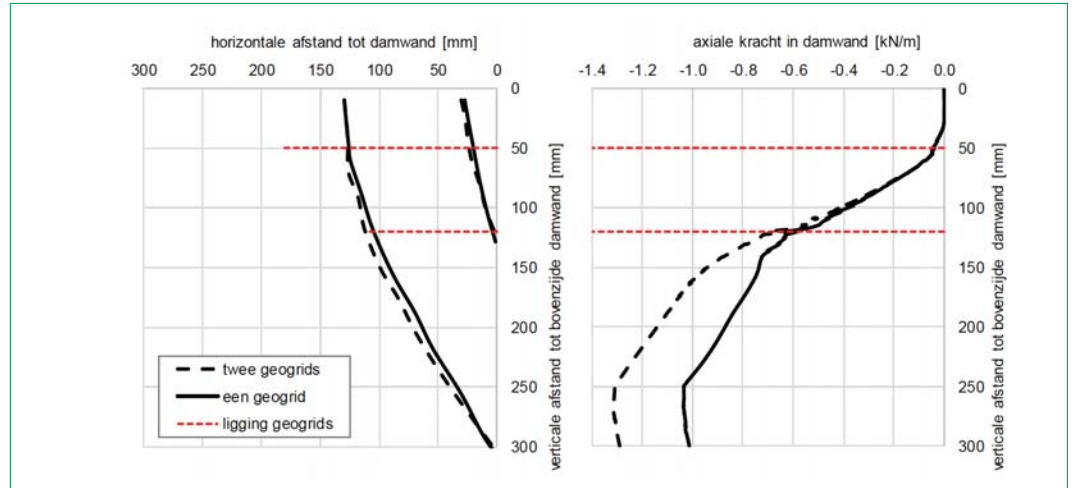
Figuur 8 – Glijvlakken bij 1 of 2 geogrids.



Figuur 9 – Verschil tussen losse geogrids en geogrids die verbonden zijn met de damwand.



Figuur 10 – Model 2D numerieke berekeningen.
De activering van het onderste geogrid en (een gedeelte van) het bovenste geogrid is per testconfiguratie aangepast.



Figuur 11 – Numerieke resultaten; 1 geogrid van 180 mm of 2 geogrids van 180 en 110 mm (a) glijvlakken (b) axiale kracht in de damwand. Bovenbelasting 3 kN/m.

Tabel 3 – Materiaaleigenschappen Baskarp B15 zand numeriek model

Parameter	Symbol	Waarde
Soortelijk gewicht [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$]	γ_{unsat}	16,3
Void ratio [-]	$\theta_{\text{init}}, \theta_{\text{min}}, \theta_{\text{max}}$	0,579; 0,385; 0,8
Secant Young's modulus [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$]	E_{50}^{ref}	$72,4 \cdot 10^3$
Oedometer stijfheid [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$]	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	$85,0 \cdot 10^3$
Belasten/ontlasten stijfheid [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$]	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	$443 \cdot 10^3$
Macht	m	0,54
Effectieve cohesie [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$]	c'	0,6
Effectieve wrijvingshoek [°]	φ'	45
Poisson ratio (belasten/ontlasten) [-]	ν'_{ur}	0,2
Dilatantie hoek [°]	ψ	16,5
Horizontale gronddrukcoëfficiënt [-]	K_0^{NC}	0,5 ⁶

Tabel 4 – Parameters overige onderdelen numeriek model

Materiaal	Parameter	Symbol	Waarde
Support damwand	Axiale stijfheid [kN]	EA	5500
Geogrid	Axiale stijfheid [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$]	EA	191
Damwand	Axiale stijfheid [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$]	EA	$700 \cdot 10^3$
	Buigstijfheid [$\text{kNm}^2\cdot\text{m}^{-1}$]	EI	5,83
Belastingsplaat	Axiale stijfheid [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$]	EA	$73,5 \cdot 10^3$
	Buigstijfheid [$\text{kNm}^2\cdot\text{m}^{-1}$]	EI	5,6
Siliconen blok	Soortelijk gewicht [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$]	γ_{unsat}	10,5
	Void ratio [-]	θ_{init}	0,5
	Young's modulus [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$]	E'	159
	Poisson ratio [-]	ν'_u	0,495

Tabel 5 – Materiaaleigenschappen van de interfaces numeriek model

	Interface reductie-coëfficiënt	Interface cohesie	Interface wrijvingshoek	Interface dilatatiehoek
	R_{int} [-]	c'_{int} [kPa]	δ_{int} [°]	ψ_{int} [°]
Belastingsplaat-zand	0,29	0,17	16,2	0
Geogrid-zand	1	0,6	38,7	10,7
Damwand-zand	0,667	0,4	33,1	0
Damwand-silicone blok	0,5/1 ⁷	-	-	0
Zand- proefbakbodem	0,29	0,17	16,2	0
Damwand-proefbakbodem	0,5	-	-	0
Silicone block-proefbakbodem	0,5	-	-	0

EEN OF TWEE GEOGRIDS

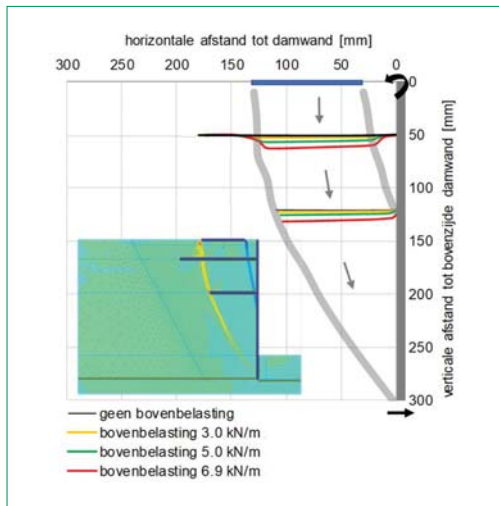
Het kritieke glijvlak in figuur 11a kromt zich op het onderste geogrid en heroriënteert loodrecht op het bovenste geogrid. Ziegler (2010) vond dit ook met experimenten en numerieke berekeningen. Figuur 11b toont dat het membraan-effect van het tweede geogrid de axiale belasting in de damwand met maar liefst 27% verhoogt, bij een bovenbelasting van 3 kN/m. Hierdoor reduceert de verticale druk nabij de damwand, en dus ook de horizontale druk tegen de damwand. Door het tweede orde effect neemt, bij verticale verplaatsing, de horizontale kracht in het geogrid toe, en daarmee ook de ankerkracht. Die ankerkracht moet wel opgenomen kunnen worden. Het membraan-effect ontstaat daarom alleen als het geogrid voldoende lang is.

TREKKRACHT EN WRIJVINGSKRACHT

Figuur 12 toont de berekende deformatie bij twee geogrids. De grijze lijnen zijn de glijvlakken. De damwand glijdt over de bodem en kantelt naar achteren (zoals in figuur 2b). Het bovenste geogrid vervormt als een hangmat. De achterzijde van het onderste geogrid zakt mee met de grond.

Figuur 13 toont dat de trekkracht in het geogrid zich eerst vooral in zone I, dichtbij de damwand, ontwikkelt. Boven de 5 kN/m ontstaan er glijvlakken en dan wordt het geogrid over een grotere lengte geactiveerd; de trekkracht in zone II neemt toe.

Figuur 14 en figuur 15 tonen de ontwikkeling van de wrijving langs de geogrids. In zone II ontwikkelt de wrijving zich vooral langs de onderzijde van beide geogrids. In zone III gebeurt dat vooral langs de bovenzijde van het geogrid. Langs het 180 mm geogrid ontwikkelt 40% van de wrijving zich langs de bovenzijde van het geogrid, en 60% langs de onderzijde. Van Duijnen et al. (2020) constateerden ook dat de wrijving zich langs één zijde tegelijk ontwikkelt, en dat dat vooral de onderzijde is.



Figuur 12 – Numerieke resultaten; deformatiepatroon bij twee geogrids.

Vergelijking met ontwerprichtlijnen

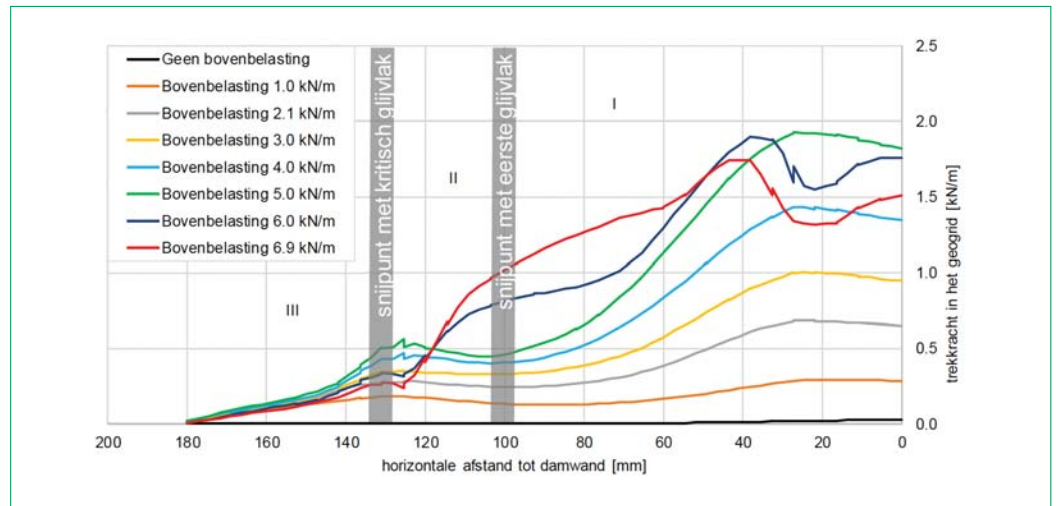
Het onderzoek van dit artikel draagt bij aan het doel om CUR166 (2012) uit te breiden met ontwerpregels voor geogrid-ankers. We vergelijken de conclusies van dit onderzoek met de huidige ontwerprichtlijnen:

- Volgens CUR166 ligt de effectieve ankerlengte achter de actieve zone. De proeven en berekeningen in dit artikel tonen dat dit een conservatieve aanname zou kunnen zijn voor geogrid-ankers onder een strookbelasting.
- Om in de actieve zone weerstand te mobiliseren moet er zakking optreden. Deze treedt alleen op indien, na het aanbrengen van de verankering, aan de passieve zijde wordt ontgraven, of indien er een bovenbelasting wordt aangebracht. Geogrid ankers doorsnijden het actieve glijvlak en daarmee veranderen ze de glijvlakken. Dat is anders bij conventionele ankers. Het geogrid biedt daardoor een stabiliserend effect.
- Het membraan-effect verhoogt de axiale kracht in de damwand (figuur 11). Hierdoor reduceert de verticale druk dichtbij de damwand, en dus ook de horizontale druk tegen de damwand. Hierdoor verbetert de totale stabiliteit van de damwand. De damwand moet worden getoetst op de hogere axiale kracht.
- De numerieke resultaten laten zien dat de wrijving óf langs de bovenzijde, óf langs de onderzijde van het geogrid wordt gemobiliseerd. Dit is in overeenstemming met Van Duijnen et al. (2020) en met CUR198 (2017 en 2021), die de wrijving maar aan één zijde meeneemt.

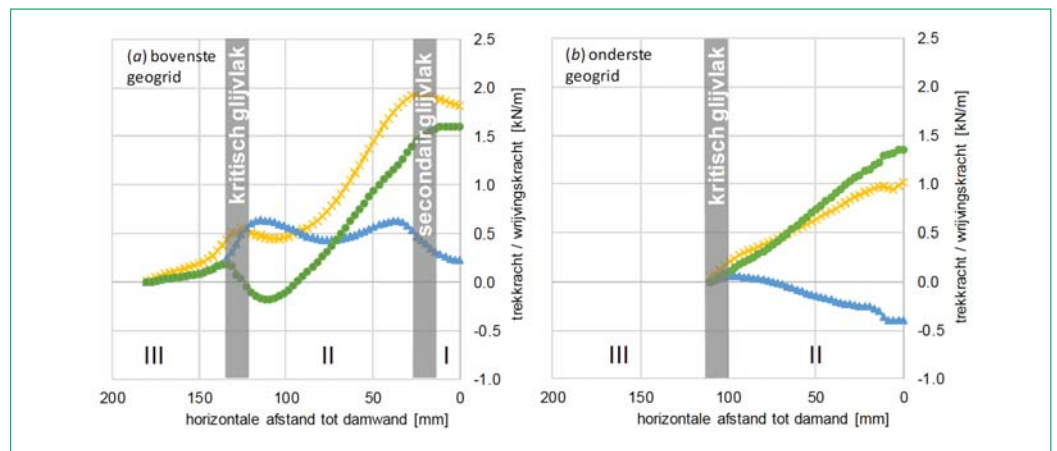
Conclusies

Dit artikel presenteert proeven en de simulatie daarvan over geogrid-verankerde damwanden met een strookbelasting. In aanvulling op de conclusies in het vorige hoofdstuk concluderen we uit de proeven:

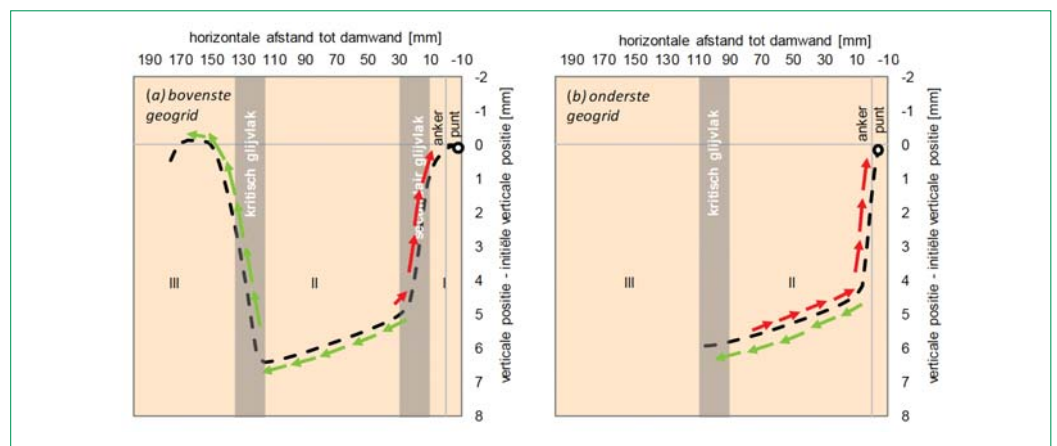
- Er ontstaan twee glijvlakken die de grond in drie



Figuur 13 – Numerieke resultaten; gemobiliseerde trekkraft in het 180 mm bovenste geogrid.



Figuur 14 – Numerieke resultaten; gemobiliseerde wrijvingskracht bij een bovenbelasting van 5 kN/m.



Figuur 15 – Numerieke resultaten; waar wordt wrijving langs het geogrid gemobiliseerd?

zones verdelen (figuur 4): zone I (tussen damwand en zone II), zone II (actieve zone) en zone III (weerstandbiedende zone).

- De glijvlakken beginnen bij de randen van de strookbelasting. De strookbelasting in relatie tot de lengte van de geogrids bepaalt waar weerstand langs het geogrid wordt gemobiliseerd.
- De weerstand langs de geogrids in zones I en II wordt alleen gemobiliseerd als het geogrid vast zit aan de damwand. Deze weerstand is gerelateerd aan het membraan-effect in zone I en

wrijvingsweerstand in zone II en wordt vooral geactiveerd door verticale grondverplaatsing in zone II.

- De weerstand in zone III is het pull-out mechanisme, waarbij het geogrid uit de grond wordt getrokken door de damwand of door glijdende grond in zone II.
- Een langer geogrid geeft meer weerstand. Vooral het deel in zone III is effectief. Een langer geogrid geeft meteen vanaf het begin van een proef een stijver gedrag.

- Een glijvlak verandert als het een geogrid snijdt: daar wordt het glijvlak verticaler en het glijvlak wordt daardoor wijder en langer. Dit vergroot de globale stabiliteit.
- Een tweede geogrid vergroot de globale stabiliteit.

Uit de numerieke simulaties volgen de volgende conclusies:

- Grond onder een geogrid geeft wrijvingsweerstand in zone II.
- Grond boven een geogrid geeft wrijvingsweerstand in zone III, achter de actieve zone II.
- De grond in zone I geeft geen wrijvingsweerstand.
- Heel korte geogrids kunnen wel enige weerstand geven in zone I (figuur 5).

Dank

De auteurs zijn dankbaar voor de financiële en praktische steun van TKI-PPS financiering van het ministerie van Economische Zaken, Deltares, TU Delft, Geotec Solutions, GMB Haven en Industrie, Huesker BV, Huesker GmbH, Ruhr-Universität Bochum Germany en Voets Gewapende Grondconstructies BV.

Bronnen

- CUR 166 (2012) Damwandconstructies, inclusief errata 2014. CRW C166, ISBN 9037600638, CROW, Netherlands.
- CUR 198 (2017). Ontwerprichtlijn kerende constructies van gewapende grond. www.crow.nl/publicaties/kerende-constructies-van-gewapende-grond.
- CUR 198 (2021). Ontwerprichtlijn kerende constructies van gewapende grond, CROW, CRW

C198:2021. Deze versie is in productie en wordt begin 2021 gepubliceerd.

- Detert, O., Lavasan, A., van den Berg, J., van Duijnen, P. König, J.D., Hölter, R. en van Eekelen, S. (2019). Geogrid-verankerde damwanden. Deel 1: voorbeeldprojecten en onderzoeksopzet. *Geokunst, Geotechniek*, November 2019, 60-64.
- Lubking, P. (1997). Soft soil correlaties. *GeoDelft rapport BAGT 569*, voor de combinatie Stichting Speurwerk Baggertechniek.
- Stanier, S.A., Blaber, J., Take, W.A. and White, D.J. (2015). Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications. *Canadian Geotechnical Journal*, doi: 10.1139/cgj-2015-0253.
- Van Duijnen, P.G., Detert, O., Lavasan, A.A., van der Berg, J., Hölter, R., König, D. en van Eekelen, S.J.M. (2021). Geogrid-anchored sheet pile walls: field test and numerical analyses. *Proceedings van de 7th European Geosynthetics Conference (EuroGeo7)*. Warsaw, Polen.
- Van Duijnen, P.G., Detert, O., Lavasan, A.A., van der Berg, J., R., König, D. Hölter, en van Eekelen, S.J.M. (2020). Geogrid-verankerde damwanden. Deel 2: full-scale test. *Geokunst, Geotechniek*, Maart 2020, 53-57.
- Wittekoek, B. (2020). Analysis of the behaviour of geogrid-anchored sheet pile walls. Small-scale experiments and 2D Plaxis analysis. MSc thesis TU Delft. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A94cf64cc-ff09-4fbc-bde8-42d914b3c7d0>.
- Wittekoek, B. van Eekelen, S.J.M., Terwindt, J., Korff, M., van Duijnen, P.G., Detert, O. (2021). Geogrid-anchored sheet pile walls subjected to

strip footing surcharge load. *Geosynthetics International*. Onder review.

- Ziegler, M. (2010). Investigation of the Confining Effect of Geogrid Reinforced Soil with Plane Strain Model Wall Tests. Aachen, Germany: Rheinische Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH).

Noten

- ¹ Dit is de plane strain waarde (11/9 x triaxiaalwaarde), waarbij de triaxiaalwaarde is bepaald uit triaxiaalproeven met een vergelijkbare dichtheid (59-93%), en een vergelijkbare verticale rek (0,5-1,8%) en spanningsniveau (ca 20-60 kPa) als gevonden in de proeven.
- ² Dit artikel geeft resultaten van de proeven met de vetgedrukte nummers. De niet-vetgedrukte proeven bevestigden ofwel de observaties uit proeven met eenzelfde configuratie, of zijn niet gebruikt voor het trekken van een van de hierin opgenomen conclusies. De ontbrekende testnummers zijn proeven geweest, waarvan de I_D te hoog was om mee te nemen voor verdere analyse.
- ³ Deze waarden van de relatieve dichtheid I_D komen overeen met een verdichtingsgraad V_{gr} tussen de 96 en 100% van de maximale standaard Proctor dichtheid, met een gemiddelde van 98,3%, want $V_{gr} = 84/(100 \cdot 0.2 \cdot I_D)$ (Lubking, 1997).
- ⁴ Het mechanisme, waarbij het geogrid-anker met de grond mee naar beneden wordt getrokken door een bovenbelasting, wordt aangeduid als het 'membraan-effect'. Deze term beschrijft het gedrag van het geogrid dat krachten opneemt door vervorming van het geogrid zelf en deze overdraagt op de damwand.
- ⁵ Referentiedruk 100 kPa.
- ⁶ Een relatief hoge waarde voor K_0 om de verdichting in rekening te brengen.
- ⁷ Interface reductie coëfficiënt damwand - silicone blok: Kleine schaalproeven: 0,5 en voor de brede proeven (Wittekoek et al., 2021): 1 omdat de damwand aan het silicone blok is gelijmd. Deze parameter blijkt geen invloed te hebben. ●

Kwast Consult beschikt over specialistische geotechnische kennis van:

- Lichte ophoogmaterialen infrastructuur en sportaccommodaties: toepassing van Bims, Argex, EPS, Schuimbeton, e.d.
- Risicoanalyse en omgevingsbeïnvloeding: trillingsanalyses en grondvervormingen met Plaxis.
- Spoorinfrastructuur: geotechnisch ontwerp spoorbanen, onderdoorgangen en bovenleiding volgens OVS/RLN.
- Geokunststoffen infrastructuur: ontwerp folieconstructies, stabiliteits- en funderingswapening, e.d.



Kwast Consult
Geotechnische advisering en innovaties

Contact **Kwast Consult te Houten**
06 - 29 27 28 01 info@kwastconsult.nl www.kwastconsult.nl