JAAR<mark>GANG 25 NUMMER 1 MA</mark>ART 2021

ONAFHANKELIJK VAKBLAD VOOR GEBRUIKERS VAN GEOKUNSTSTOFFEN

GEOGRID-VERANKERDE DAMWANDEN. DEEL 3: EXPERIMENTEN EN NUMERIEKE ANALYSE

CUR 198 ONTWERPRICHTLIJN KERENDE CONSTRUCTIES VAN GEWAPENDE GROND DEEL I: ERVARINGEN MET DE ANALYTISCHE ONTWERPREGELS

GEOKUNST WORDT MEDE MOGELIJK GEMAAKT DOOR:

Sub-Sponsors



Low & Bonar Westervoortsedijk 73 6827 AV Arnhem Tel. +31 (0) 85 744 1300 Fax +31 (0) 85 744 1310 info@lowandbonar.com www.lowandbonar.com



TenCate Geosynthetics Netherlands BV Europalaan 206 7559 SC Hengelo service.nl@tencategeo.com www.tencategeo.eu



NAUE GmbH & Co. KG Gewerbestr. 2 32339 Espelkamp – Germany Tel. +49 5743 41-0 Fax +49 5743 41-240 info@naue.com www.naue.com

Mede-ondersteuners



Enviro Quality Control B.V. Daalseweg 1-B 3611 AA Oud-Zuilen Tel. +31 (0)30 244 1404 mail@enviro-quality-control.nl www.eqc.nu

De collectieve leden van de NGO zijn:

CDR International BV, Rijssen Cofra B.V., Amsterdam Deltares, Delft Enviro Quality Control BV, Maarssen Fugro NL Land B.V., Leidschendam Genap BV, 's Heerenberg Geopex Products (Europe) BV, Gouderak GeoTec Solutions BV, Culemborg GID Milieutechniek, Velddriel Huesker Synthetic BV, Rosmalen



Strukton Civiel Regio West Scharwoude 9 1634 EA Scharwoude Tel. +31 (0)229 54 77 00 info@struktonciviel.com www.strukton.com

InfraDelft BV, Delft Juta Holland BV, Oldenmarkt Kiwa NV, Rijswijk Kwast Consult, Houten Low & Bonar, Arnhem Movares Nederland BV, Utrecht Naue GmbH & Co. KG, Espelkamp Prosé Geotechniek BV, Leeuwarden Quality Services BV, Bennekom Robusta BV, Genemuiden Rijkswaterstaat, Utrecht S&P Clever Reinforcement Company Benelux, Aalsmeer Strukton Civiel, Scharwoude Stybenex, Nijmegen T&F Handelsonderneming BV, Oosteind Ten Cate Geosynthetics Netherlands BV, Nijverdal Tensar International, 's-Hertogenbosch Terre Armee BV, Waddinxveen Witteveen + Bos, Deventer

Enka® Solutions

EnkaGrid[®]

Voor een stabiele fundering van wegen en kraanopstelplaatsen bij windmolens





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



VAN DE REDACTIE

BESTE GEOKUNST LEZERS,

Een nieuw jaar en de eerste uitgave van Geokunst in 2021. We maken met elkaar weer een nieuwe start en we kunnen 2020 (gelukkig) achter ons laten. Het begin van dit nieuwe jaar is echter nog vol onzekerheden. We zitten in Nederland momenteel met een lockdown tot in februari en hoe de periode hierna eruit komt te zien blijft moeilijk voorspelbaar. Het is positief om te zien met hoeveel inzet iedereen zijn steentje probeert bij te dragen om processen en projecten doorgang te laten vinden. Inmiddels is iedereen een meester geworden in thuiswerken, Cloud-service, Skypen en video-conferences. We blijven positief en zijn zeer benieuwd wat het nieuwe jaar ons gaat brengen!

Op 19 november 2020 heeft de NGO haar jaarlijkse algemene ledenvergadering gehouden. Voor het eerst in haar 37-jarige bestaan gebeurde dit online via een video conference. Voorafgaand aan de vergadering waren er twee interessante lezingen: over het Innovatieloket van Rijkswaterstaat om innovaties in en vanuit de markt te stimuleren, en vanuit de Provincie Friesland over het



programma 'Grip op grond' met hierin de mogelijkheden voor circulaire innovatie bij infraprojecten ten aanzien van grondstromen en materiaalgebruik. De presentaties zijn terug te zien op www.ngo.nl onder het kopje 'agenda'. Met alle deelnemers achter het scherm, mogelijkheden voor 'handjes omhoog' bij vragen en andere interactie zoals een online poll, kunnen we terugkijken op een geslaagde middag en goede discussies. Het mag duidelijk zijn dat we er ondanks de moeilijke omstandigheden samen iets van maken!

Een heuglijk feit voor 2021 is het 25-jarige bestaan voor de vakbladen Geotechniek-Geokunst. Het is de bedoeling om in dit jaar vanuit de NGO een of meer artikelen te schrijven waarin we terugblikken op enkele hoogtepunten uit 25 jaar Geokunst. Het NGO-bestuur feliciteert uitgeverij Educom van harte met de mooie mijlpaal voor dit hoogkwalitatieve vakblad. Robert Diederiks willen we hierbij in het bijzonder bedanken voor de langdurige samenwerking met de NGO en de inspanning om elke editie weer interessant te maken voor de lezers. Ook in deze editie van Geokunst vinden jullie weer boeiende artikelen, ditmaal over geogrids. Het eerste artikel gaat in op een uitgebreid afstudeeronderzoek van Britt Wittekoek over met geogrid verankerde damwanden, inclusief experimenteel onderzoek in het laboratorium van Deltares en numerieke analyses in Plaxis. Dit is in Geokunst het derde artikel van een reeks over dit onderwerp. Het volgende artikel, door Piet van Duijnen, Marco Peters en Suzanne van Eekelen, gaat over ervaringen met de analytische ontwerpregels van de CUR198 Kerende Constructies van Gewapende Grond.

Ik wens je het allerbeste voor 2021, een goede gezondheid en heel veel leesplezier toe. En mocht je zelf ideeën hebben over onderwerpen die interessant kunnen zijn voor de lezers van Geokunst, neem dan zeker eens contact met ons op!

Rijk Gerritsen Eindredacteur GeoKunst

Geokunst wordt uitgegeven door de Nederlandse Geotextielorganisatie. Het is bedoeld voor beleidsmakers, opdrachtgevers, ontwerpers, aannemers en uitvoerders van werken in de grond-, weg- en waterbouw en de milieutechniek. Geokunst verschijnt vier maal per jaar en wordt op aanvraag toegezonden.

COLOFON

Eindredactie Tekstredactie Redactieraad

Productie

R. Gerritsen J. van Deen A. Bezuijen P. van Duijnen M. Duškov S. van Eekelen P. ter Horst Uitgeverij Educom Een abonnement kan worden aangevraagd bij: Nederlandse Geotextielorganisatie (NGO) info@ngo.nl www.ngo.nl



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 geogridverankerde 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 [°]	$arphi_{sec}^{triax}$	45 ¹
Residuele wrijvingshoek [°]	$\varphi_{\it res}^{\it triax}$	34
Dilatantie hoek [°]	$\psi^{ extsf{triax}}$	15
Cohesie [kPa]	С	0,6
Secant Young's modulus bij steundruk 100 kPa [MPa]	E ₅₀	72,4
Exponent in stijfheidsrelatie [-]	М	0,54
Poisson ratio [-]	ν	0,25





a Overzicht



Figuur 1 – Proefopstelling.

- en dwarsdoorsneden.
- c. Watercontainer op strip als bovenbelasting.
 - d. Verbinding geogrid-damwand in de proeven.



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 (CRW C166 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 en 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-vervorming 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).





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.

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.



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 8 – Glijvlakken bij 1 of 2 geogrids.







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	Symbool	Waarde
Soortelijk gewicht [kN·m ⁻³]	γ_{unsat}	16,3
Void ratio [-]	e _{init} , e _{min} , e _{max}	0,579; 0,385; 0,8
Secant Young's modulus [kN·m-2]	E ^{ref 5}	72,4·10 ³
Oedometer stijfheid [kN·m ⁻²]	E ^{ref} _{oed}	85,0·10 ³
Belasten/ontlasten stijfheid [kN·m ⁻²]	Eref	443·10 ³
Macht	т	0,54
Effectieve cohesie [kN·m ⁻²]	c′	0,6
Effectieve wrijvingshoek [°]	φ'	45
Poisson ratio (belasten/ontlasten) [-]	ν'_{ur}	0,2
Dilatantie hoek [°]	ψ	16,5
Horizontale gronddrukcoëfficient [-]	K _o ^{NC}	0,5 6

Tabel 4 – Parameters overige onderdelen numeriek model

Materiaal	Parameter	Symbool	Waarde
Support damwand	Axiale stijfheid [kN]	EA	5500
Geogrid	Axiale stijfheid [kN·m ⁻¹]	EA	191
Damwand	Axiale stijfheid [kN·m ⁻¹]	EA	700·10 ³
	Buigstijfheid [kNm²·m ⁻¹]	El	5,83
Belastingsplaat	Axiale stijfheid [kN·m ⁻¹]	EA	73,5·10 ³
	Buigstijfheid [kNm ² ·m ⁻¹]	EI	5,6
Siliconen blok	Soortelijk gewicht [kN·m ⁻³]	γ_{unsat}	10,5
	Void ratio [-]	e _{init}	0,5
	Young's modulus [kN·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 dilatantiehoek
	R _{int} [-]	<i>c´_{int}</i> [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 om 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 membraaneffect 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 trekkracht 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-gewapendegrond.

- 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/ cgi-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-ff09-4fbe-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 $\rm I_D$ komen overeen met een verdichtingsgraad $\rm V_{gr}$ tussen de 96 en 100% van de maximale standaard Proctor dichtheid, met een gemiddelde van 98,3%, want $\rm V_{gr}$ = 84/(100-0.2*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 'membraaneffect'. 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.

 $^{\rm 6}$ 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







CUR 198 ONTWERPRICHTLIJN KERENDE CONSTRUCTIES VAN GEWAPENDE GROND DEEL I: ERVARINGEN MET DE ANALYTISCHE ONTWERPREGELS

Inleiding

In 2017 is de eerste druk van CUR 198 (2000) 'Kerende constructies van gewapende grond' vervangen door een geheel herziene versie. Van Eekelen en Peters (2017) gaan in op deze herziene versie. Voor deze versie is de rekenmethodiek compleet doorgelicht, aangepast en Eurocodeproof gemaakt. De nieuwe ontwerprichtlijn is geschikt voor complexere geometrieën dan voorheen, de rekenprocedure is verduidelijkt en de stabiliteitsanalyse en de veiligheidsbenadering zijn uitgebreid. In 2021 komt onder auspiciën van CROW een nieuwe versie uit, waarin een aantal errata en opmerkingen vanuit de markt zijn verwerkt.



Figuur 1 – Rekenstappen ontwerpproces CUR 198 (Bron: CUR 198; Van Eekelen en Peters, 2017).

Alles wat in dit artikel wordt beschreven geldt zowel voor de 2017 als de 2021 versie van CUR 198. Specifieke voorbeelden van wijzigingen in CUR 198:2017 en CUR 198:2021 ten opzichte van de eerste druk uit 2000 zijn:

- Het rekenen met partiële factoren is vereenvoudigd, waarbij voor iedere parameter één materiaalfactor is bepaald voor alle toetsingen. Voor grondeigenschappen die zowel gunstig als ongunstig werken (zoals het volume gewicht) is een materiaal factor van 1,0 vastgesteld, net als in CUR 166 'Damwandconstructies'.
- Enkele fouten zijn gecorrigeerd. Een voorbeeld is dat we nu, bij de controle van de uittrekkracht, de wrijving eenzijdig in plaats van tweezijdig in rekening brengen (zie formule 3.61 in CUR 198).
- Er is meer aansluiting gezocht bij de berekeningsmethode voor damwanden. Naast de Tie back wedge methode voor geogrids en de Coherent gravity methode voor stijve wapening zoals staal, is de Active Culmann wedges methode geïntroduceerd die gebruik maakt van de actieve gronddrukwiggen volgens Culmann. Het gebruik van deze methode maakt de ontwerprichtlijn geschikt voor complexere geometrieën, in plaats van alleen min of meer rechthoekige constructies met horizontale maaivelden en een wand die als verticaal wordt benaderd.

Sinds 2017 hebben ProRail en Rijkswaterstaat in aanvulling op de herziene CUR 198 hun eigen

specifieke regels ontwikkeld om het ontwerp en de toepassing van gewapende-grondconstructies binnen de specifieke omstandigheden van spoorbanen of rijkswegen nader te reguleren.

Dit artikel gaat in op enkele specifieke aspecten van de analytische ontwerpregels van gewapendegrondconstructies, gebaseerd op ontwerpervaringen in diverse projecten. Deze ervaringen zijn inzichtelijk gemaakt met behulp van software van GeoTec Solutions, waarbij uit is gegaan van de geometrie van rekenvoorbeeld 1 van CUR 198.

Rekenstappen

Figuur 1 geeft de acht rekenstappen van CUR 198, die moeten worden gevolgd in het ontwerpproces. CUR 198 geeft ook vier rekenvoorbeelden waarin deze stappen worden gevolgd. Rekenstap 4, de uitwendige stabiliteit, toetst of het blok van gewapende grond groot genoeg is en diep genoeg is ingebed gelet op de verticale en horizontale draagkracht en totale stabiliteit. Rekenstap 6 toetst de inwendige stabiliteit en daarmee de gewapende grond zelf: zijn de wapening en de aansluitingen sterk genoeg? Is er voldoende interactie tussen wapening en de grond? Worden er voldoende wapeningslagen toegepast? In deze stap wordt gekeken naar zowel de lokale inwendige stabiliteit (stap 6.1) als de globale inwendige stabiliteit (stap 6.2). Bij de lokale stabiliteit toetsen we of één wapeningslaag voldoende



Figuur 2 – Krachtenevenwicht volgens de Active Culmann wedges methode die is gebaseerd op het Culmann wiggenmodel (1875) (bron: CUR 198, figuur 3.28).

SAMENVATTING

Kerende constructies van gewapende grond bestaan uit een grondlichaam met daarin een wapening en aan de voorzijde een bekleding die al dan niet bijdraagt aan de kerende functie. De wapening bestaat uit lagen of strippen van geokunststof of staal.

In 2017 verscheen een geheel herziene versie van CUR 198: "Kerende Constructies van Gewapende Grond". De ontwerprichtlijn geeft een ontwerpprocedure

die bestaat uit acht rekenstappen. Dit artikel behandelt enkele ervaringen met de analytische berekeningen en ontwerpregels. Een volgend artikel gaat in op numerieke berekeningen. Dit artikel is gebaseerd op ontwerpervaringen in diverse projecten, waarbij de ervaringen inzichtelijk zijn gemaakt uitgaande van de geometrie van rekenvoorbeeld 1 van CUR 198. De auteurs maken deel uit van de Commissie CUR 198 maar schrijven dit artikel op persoonlijke titel.

stabiel is, bij de globale stabiliteit kijken we naar alle wapeningslagen die worden doorsneden door een maatgevend glijvlak. In rekenstap 8 worden tenslotte de vervormingen getoetst. Dit artikel gaat vooral in op rekenstappen 6 en 8. Het tweede artikel van deze serie zal ingaan op numerieke berekeningen.

LOKALE INWENDIGE STABILITEIT (STAP 6.1)

Met het beschouwen van de lokale inwendige stabiliteit (stap 6.1) wordt de trekkracht per wapeningslaag bepaald. Hiervoor beschouwen we telkens een grondlaag met in het midden wapeningslaag i. De horizontale grondspanning in deze grondlaag kan worden berekend met verschillende methoden: de Tie back wedge methode, de Coherent gravity methode (voor stalen wapening) en sinds de CUR 198 versie van 2017 ook met de Active Culmann wedges methode. Deze is gebaseerd op Culmann (1875) en varieert glijvlakken teneinde boven en onder iedere wapeningslaag de maatgevende glijvlakken te vinden. De glijvlakken beginnen daarbij halverwege tussen iedere twee wapeningslagen. De horizontale grondspanning wordt berekend ter plaatse van de facing, voor telkens twee maatgevende glijvlakken: één snijdt de facing aan de bovenzijde van de grondlaag, het andere aan de onderzijde. We rekenen met effectieve spanningen waarbij de waterspanningen als belasting worden meegenomen. Het verschil in de horizontale kracht op het bovenste en het onderste maatgevende glijvlak is de trekkracht die door de betreffende wapeningslaag moet worden opgenomen. Figuur 2 laat de methode zien voor de vijfde grondlaag (i = 5). Dit artikel laat in figuren 3, 5 en 7 rekenvoorbeelden zien voor deze stap 6.1 (lokale inwendige stabiliteit).

GLOBALE INWENDIGE STABILITEIT (STAP 6.2)

Bij het beschouwen van de globale inwendige





stabiliteit (stap 6.2) wordt voor iedere wapeningslaag de totale trekkracht bepaald in alle bovenliggende wapeningslagen tezamen. Bij deze toets worden voor iedere wapeningslaag glijvlakken gevarieerd om het maatgevende glijvlak te vinden. CUR 198 geeft hiervoor verschillende methoden. waarbij zowel rechte, geknikte als willekeurige glijvlakken een rol kunnen spelen. Dit artikel geeft rekenresultaten voor stap 6.2 in figuren 4, 6 en 8. We zien dat de glijvlakken bij de facing telkens beginnen bij de beschouwde wapeningslaag. Het bovenste glijvlak grijpt aan bij de tweede wapeningslaag en bepaalt de trekkracht in de bovenste wapeningslaag. Het tweede glijvlak van boven grijpt aan op het niveau van de derde wapeningslaag en geeft de totale horizontale belasting werkend op de bovenste twee wapeningslagen. Dit gaat zo door tot de onderste laag.

GLOBALE STABILITEIT (STAP 4.3)

Diepere glijvlakken door de ondergrond, die al dan niet wapeningslagen snijden, moeten ook worden getoetst voor de globale stabiliteit, maar worden in dit artikel buiten beschouwing gelaten. Als het glijvlak een of meer wapeningslagen snijdt, dan noemen we dit compound stabiliteit.

GRILLIGE BOVENBELASTING

De praktijk leert dat de Culmann methode voor stap 6.1 en de glijvlakmethoden voor stap 6.2 goede methoden zijn voor "rechte, verticale wanden". De methoden kunnen ook meer grillige vormen van het maaiveld, strooklasten, of horizontale belastingen eenvoudig meenemen. Zeer lokale discontinuïteiten zoals een grote horizontale of verticale lijnlast, moeten echter worden vermeden. Het is beter deze te vervangen door een strookbelasting¹. Bij een lijnlast is het uittredepunt van het maatgevende glijvlak vrijwel altijd de positie van de lijnlast. In dat geval telt de lijnlast altijd volledig mee in de aandrijvende kracht. Bij een strookbelasting echter is het afhankelijk van de grootte van de wig hoeveel er mee wordt geteld van de strookbelasting. Dit wordt geïllustreerd in figuur 3 voor stap 6.1 en in figuur 4 voor stap 6.2. In beide figuren staan links een lijnlast van 120 kN/m, en rechts een strookbelasting van 120 kN/m² over een breedte van 1 m (waarvan de resultante op dezelfde positie als de lijnlast ligt).

In beide figuren zijn de maatgevende glijvlakken aangegeven met zwarte lijnen. Deze zijn verkregen door veel glijvlakken te proberen. We zien dat het uittredepunt aan maaiveld van de maatgevende glijvlakken links gelijk is aan de positie van de lijnlast (uitgezonderd het bovenste glijvlak in figuur 3). Bij de strookbelasting varieert het uittredepunt van de glijvlakken meer. We zien dat het verschil tussen lijnlast of strookbelasting een geringe invloed heeft op de lokale inwendige stabiliteit (figuur 3) en een grote invloed op de globale inwendige stabiliteit (figuur 4).

WAND MET NEUSJE

Bij een wand met uitstekende lagen, of een getrapte wand, wordt de uitdaging groter voor het bepalen van de inwendige stabiliteit (stap 6.1). Dit is relevant omdat bij veel gewapende grondwanden de onderste laag 0,5 tot 1,0 m uitsteekt, het zogenaamde neusje. Figuur 3.22 van CUR 198 (2017) geeft aan dat dit neusje in de Tie back wedge berekening moet worden genegeerd. Dit is noodzakelijk omdat het neusje niet kan worden meegenomen in de Tie back wedge berekening. Ook in de Culmann wedges methode met uitsluitend rechte glijvlakken kan het neusje niet worden meegenomen. Maatgevende rechte glijvlakken onder een wapeningslaag zouden dan het maatgevende glijvlak boven de laag snijden. Door het introduceren van een knikpunt in het rechte glijvlak wordt het wel mogelijk om het neusje mee te nemen in de Culmann wedges methode. Nadeel van een knikpunt is dat een fijn raster van glijvlakken geanalyseerd moet worden. Hoe grover het raster (minder glijvlakken), hoe groter de kans dat het maatgevende glijvlak onder een laag het maatgevende glijvlak boven dezelfde laag doorsnijdt. We zien in figuur 5 dat het wel of niet toepassen van een knik in de Culmann wedges methode ter plaatse van het neusje in dit voorbeeld uiteraard alleen invloed heeft op de onderste twee wapeningslagen.

KNIKPUNTEN IN DE GLIJVLAKKEN BINNEN HET GEWAPENDE MASSIEF

CUR 198 neemt voor de globale inwendige stabiliteit (stap 6.2) rechte glijvlakken mee, en glijvlakken met knikpunten aan de achterzijde van het gewapende massief (de Two part wedge methode). CUR 198 noemt voor stap 6.2 echter ook glijvlakken met knikpunten in het gewapende massief (inwendige knikpunten, zie CUR 198 paragraaf 3.5.6, laatste alinea). Voor bepaalde situaties schrijft de CUR 198 (vanaf versie 2021) deze inwendige knikpunten zelfs voor (in dezelfde laatste alinea van paragraaf 3.5.6). Dat is bijvoorbeeld het geval in de situatie met een strookbelasting zoals bij een landhoofd. In dat geval moet dus het maatgevende glijvlak voor stap 6.2 worden gezocht door rechte en geknikte glijvlakken te proberen, waarbij het knikpunt zowel aan de achterzijde van het gewapende massief als in het gewapende massief (inwendig knikpunt) mag liggen. En dan blijkt dat in deze situatie de maatgevende glijvlakken een inwendig knikpunt hebben.







Figuur 6 – Strookbelasting (globale inwendige stabiliteit, stap 6.2) a. met knikpunten uitsluitend op de achterzijde van het gewapende-grondmassief en b. met inwendige knikpunten (in het gewapende grondmassief).

Als de strookbelasting relatief groot is, dan hebben inwendige knikpunten een grote invloed op de berekende veiligheid. Figuur 6 vergelijkt de situatie waarbij alleen rechte glijvlakken en glijvlakken met knikpunten aan de achterzijde van het gewapende massief zijn toegestaan (figuur 6a) met de situatie waarbij ook knikpunten in het gewapende massief, ofwel inwendige knikpunten, zijn meegenomen. Hierbij lag in onze berekeningen het knikpunt op verschillende verticalen, telkens 0,5 m verder (figuur 6b). Bij alleen knikpunten aan de achterzijde of rechte glijvlakken blijkt een recht glijvlak zonder knikpunten maatgevend (figuur 6a). De berekende trekkracht in de wapeningslagen blijkt bij inwendige knikpunten veel groter (figuur 6b). Knikpunten langs de verticaal die snijdt met de voorzijde van de strookbelasting blijken maatgevend. Knikpunten langs deze verticaal waren voor dit soort gevallen al opgenomen in CUR 198 in paragraaf 3.5.6, laatste alinea. Het is belangrijk deze voorgeschreven inwendige knikpunten niet te negeren, want dat kan gevolgen hebben voor de berekende globale inwendige stabiliteit (stap 6.2), bij bijvoorbeeld bij een landhoofd op gewapende grond.

De auteurs hebben aanvullende analyses uitgevoerd om te zien of het toepassen van een inwendig knikpunt ook maatgevend kan zijn voor de lokale inwendige stabiliteit (stap 6.1). Figuur 7 laat het resultaat zien, waarbij de maatgevende glijvlakken weer zijn aangegeven met zwarte lijnen. Links zijn alleen rechte glijvlakken geprobeerd om de maatgevende glijvlakken te vinden, en rechts zijn zowel rechte glijvlakken als geknikte glijvlakken geprobeerd. Zeker als de strookbelasting wat verder naar achteren ligt, blijken geknikte glijvlakken maatgevend bij het bepalen van de maatgevende lokale inwendige stabiliteit. De berekeningen van figuur 7 laten zien dat vooral bovenin sterkere wapening nodig is als geknikte glijvlakken worden meegenomen bij de lokale stabiliteit (stap 6.1).

Onderin, in de diepere lagen, geeft de lokale stabiliteit (stap 6.1) met geknikte glijvlakken in het algemeen een iets lagere trekkracht dan rechte glijvlakken. Figuur 7 laat dat zien: de diepere trekkrachten zijn in figuur 7b lager dan in figuur 7a, behalve bij de onderste wapeningslaag. Dit komt doordat, zoals uitgelegd in de paragraaf over inwendige stabiliteit (stap 6.1) op blz. 74, de trekkracht in laag i wordt berekend als het verschil tussen de horizontale grondkracht uit een wig boven en onder de betreffende grondlaag. Voor de diepere lagen gaat het maatgevende geknikte glijvlak steeds meer op een recht glijvlak lijken, zoals figuur 7b laat zien. Hierdoor wordt het verschil tussen twee boven elkaar liggende glijvlakken kleiner en de trekkracht in de betreffende laag dus ook.

SCHAAKBORDBELASTING

Bij veranderlijke belastingen (verkeer) varieert de positie van de belasting. Rekenvoorbeeld 1 van CUR 198 geeft twee uitwerkingen, waarbij in de tweede uitwerking alleen het negatieve effect van de variabele belasting wordt meegenomen. Dit is gedaan door bij de bepaling van de maximale trekkracht in de wapening de bovenbelasting wel in rekening te brengen, maar bij de toetsing van de aanhechtingssterkte tussen grond en wapening (de trekweerstand) de bovenbelasting niet mee te nemen. Figuur 8 geeft de maatgevende geknikte glijvlakken voor de volgende drie situaties, waarvan de eerste twee als onder- en bovengrensbenaderingen in CUR 198 zijn opgenomen. De derde valt daar tussenin:

a. inclusief positieve effect bovenbelasting op aanhechtingssterkte (zie ook tabel 7.6a CUR 198)

b. exclusief positieve effect bovenbelasting op aanhechtingssterkte (zie ook tabel 7.6b CUR 198)
c. schaakbordbelasting met positieve effect bovenbelasting op de aanhechtingssterkte.

Opgemerkt wordt dat in alle drie de figuren van figuur 8 knikpunten in het gewapende grondmassief zijn toegepast. Volgens CUR 198 zou dat alleen voor de strookbelasting nodig zijn geweest (dus figuur 8c). Hierdoor wijken de berekende unity checks van figuren 8a en b enigszins af van de waarden in tabel 7.6a en 7.6b uit CUR 198.

De methode in CUR 198 waarbij het negatieve effect van een veranderlijke belasting wel, en het positieve effect niet wordt meegenomen (figuur 8b) is maatgevend. De schematisatie met schaakbordbelasting leidt tot gunstigere resultaten. De verklaring is dat bij een schaakbordbelasting een klein deel van de belasting buiten het maatgevende glijvlak ligt en de aanhechtsterkte vergroot.

Bij een landhoofd gefundeerd op gewapende grond ligt achter het landhoofd meestal voldoende dekking om de bovenbelasting voor de aanhechting te kunnen garanderen. Alleen de mogelijkheid van een grote ontgraving achter het landhoofd (bijvoorbeeld bij de vervanging van de overgangsconstructie), gecombineerd met een belast brugdek kan aanleiding zijn om de bovenbelasting op de aanhechting niet mee te nemen. Dit onderstreept het belang om alle relevante belastingscombinaties mee te nemen.

Stap 8: Controle vervorming gewapende grond

REKKEN IN DE WAPENING

Tabel 4.5 van CUR 198 geeft de toelaatbare rekken na oplevering van de gewapende-grondconstructie: 0,5 % voor landhoofden met een hooggeplaatste fundering en 1,0 % voor overige keermuren. Paragraaf 4.4 van CUR 198 geeft de analytische berekeningsmethode. Deze analytische methode is gericht op het berekenen van de extra rek na oplevering tot einde levensduur. De methode neemt aan dat de trekkracht in de wapening gedurende de levensduur constant is.

De berekende rekken zijn dus de rekken die optreden ten gevolge van het kruipgedrag van de wapening. Vreemd is dat getoetst wordt op rekken en niet op vervormingen. Bij lange wapeningslagen, waarbij over een grote lengte trekkracht wordt gemobiliseerd, zijn bij een zelfde rek de horizontale vervormingen tijdens de levensduur groter dan bij kortere wapening.

BELASTING

Bij welke belasting moeten de rekken nu eigenlijk bepaald worden? CUR 198 geeft aan dat het de momentane belasting betreft, terwijl bij grondkeringen vaak de maximale karakteristieke waarde wordt genomen. Bij kunststof wapening is de axiale stijfheid bij een korte-duurbelasting circa 1,5 keer groter dan bij een lange-duurbelasting. Ook na een aantal jaren kruip reageert kunststof wapening bij een belastingverhoging stijver. Het is daarom onlogisch om de vervormingen te berekenen bij de maximale belasting die gedurende de levensduur zelden (of nooit) aanwezig is.

De auteurs van dit artikel vinden het logischer om, conform CUR 198, voor de rekberekening de momentane belasting toe te passen, en niet de maximale belasting. In OVS00056-7.1, art 4.5.4 is een momentane factor voor spoorverkeer opgenomen van 0,25. In analogie daarmee, lijkt het logisch om bij spoorbereden constructies de rekken te toetsen bij de karakteristieke (SLS) waarde van de permanente belasting verhoogd met 25% van de veranderlijke belasting. Dit is dus conform CUR 198.

Bij het bepalen van de rek kunnen we er het beste vanuit gaan dat de belasting bij oplevering gelijk



Figuur 8 – Uniforme belasting (a) met en (b) zonder het positieve effect van de bovenbelasting op de aanhechtingssterkte versus (c) met positief effect schaakbordbelasting op de aanhechtingssterkte (unity check stap 6.2)



is aan de permanente belasting (zonder gebruiksbelasting) en dat gedurende de hele levensduur de belasting met 25% van de veranderlijke belasting toeneemt. Deze benadering is beter dan er vanuit gaan dat de gebruiksbelasting al bij de oplevering aanwezig is, tenzij tijdens de realisatie er voldoende lang een overhoogte is aangebracht van minimaal 25% van de veranderlijke belasting.

VERLOOP TREKKRACHT IN WAPENING

CUR 198 geeft verschillende aanwijzingen van hoe rek verloopt in de wapening:

- Figuur 4.3 van CUR 198 geeft het K_a-model waarmee het verloop van de axiale kracht in de wapening moet worden berekend.
- Figuur 7.7 van CUR 198 vergelijkt de rekken berekend met bovengenoemd K_a-model en de Active Culmann wedge methode. Beide modellen geven geen rekken in de onderste wapeningslaag, wat zou betekenen dat deze wapeningslaag overbodig is. In deze figuur zijn overigens alleen rechte glijvlakken beschouwd vanuit de oorsprong.

Niet voor niets is daarom voorgeschreven dat voor veiligheidsklasse RC3 naast een analytische berekening ook een EEM-berekening vereist is. Het tweede deel van deze serie artikelen over CUR 198 zal ingaan op EEM-berekeningen.

De berekening van het verloop van de trekkrachten, en dus de rekken in de wapening op basis van glijvlakken is erg logisch. De methode is als volgt: bereken voor elk glijvlak de unity check voor horizontaal evenwicht en het snijpunt tussen wapening en maatgevend glijvlak. De trekkracht in dat snijpunt is dan minimaal gelijk aan (unity check) maal (het minimum van aanhechting en langeduur-treksterkte). Figuur 9 geeft het resultaat hiervan voor alle maatgevende glijvlakken uit de inwendige stabiliteit, stap 6.1 en stap 6.2 voor de doorsnede uit figuur 8a. In de grafieken geven de markers de gemobiliseerde trekkracht weer voor een glijvlak, de stippellijn de maximale capaciteit, dus het minimum van de aanhechting en de treksterkte. Nog beter zou het zijn om ook de compound stabiliteit mee te nemen in de analyse. De compound stabiliteit berekenen wil zeggen: rekenen met elk willekeurig glijvlak dat minimaal één wapeningslaag snijdt, dus ook cirkelvormige of logspiraalvormige glijvlakken. De gemobiliseerde trekkracht in de wapeningslaag is dan de kracht die noodzakelijk is om een stabiliteitsfactor van precies 1,0 te verkrijgen. Bij rekenvoorbeeld 1 uit CUR 198 heeft dat door de relatief goede ondergrond geen meerwaarde, maar bij constructies op slappere ondergrond geeft dit wel een beter verloop in de optredende trekkrachten in de geogrids.

De berekende maximale trekkrachten in figuur 9 laten zien dat voor een gelijkmatig verdeelde uniforme belasting een aanvullende beschouwing



Figuur 9 – Rekenvoorbeeld 1 van CUR 198 met gemobiliseerde axiale trekkrachten in acht wapeningslagen op basis van de snijpunten van de wapeningslagen en de maatgevende glijvlakken die volgen uit de berekeningen voor rekenstappen 6.1 en 6.2 (ULS). Situatie met uniforme bovenbelasting van 36 kN/m² uit figuur 8a.

met interne knikpunten overbodig is, aangezien de trekkrachten berekend met en zonder inwendige knikpunten niet significant verschillen.

In het tweede artikel van deze serie volgt een vergelijkbare analyse voor strookbelastingen.

Conclusies en aanbevelingen

Met de herziening van CUR 198 is een grote stap gezet naar eenduidigheid. Aanvullend geeft de Active Culmann wedges methode, gebaseerd op Culmann (1875) de ontwerper de mogelijkheid om complexere geometrieën te analyseren.

Bij geometrieën met enigszins uniforme bovenbelasting volstaat de Active Culmann wedges methode met alleen een knikpunt aan de achterzijde van het gewapende grondmassief. Bij strookbelastingen heeft de mate van concentratie en spreiding van de belasting invloed op de trekkrachten, vooral bovenin het gewapende massief. In deze gevallen is het wenselijk om voor de globale inwendige stabiliteit het knikpunt van de wig ook binnen het gewapende massief te variëren en veel combinaties voor het geknikte verloop te analyseren. Aandachtpunten voor de toetsing van de lokale en globale inwendige stabiliteit zijn:

- Grote discontinuïteiten zoals lijnlasten moeten worden vermeden in de berekening, en worden vervangen door strookbelastingen met een oppervlak;
- Bij strookbelastingen moeten bij de inwendige stabiliteit (zowel lokaal als globaal (stap 6.1 en 6.2)) ook knikpunten in de gewapende grond worden beschouwd. Voor stap 6.2 is dat al voor-

geschreven door CUR 198, voor stap 6.1 is dat een aanbeveling van de auteurs van dit artikel.

Aandachtspunten voor het controleren van de vervormingen van de gewapende grond zijn het verschil in belasting bij oplevering en einde levensduur.

Bronnen

– Culmann, Karl, 1875. Die graphische Statik. 2nd edition. Zürich: Meyer and Zeller.

– CUR 198 (2017). Ontwerprichtlijn kerende constructies van gewapende grond.

www.crow.nl/publicaties/kerende-constructiesvan-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.

– OVS00056-7.1 versie 004 (2016). Ontwerpvoorschrift Baanlichaam en Geotechniek. ProRail.

– Van Eekelen, S.J.M., Peters, M.G.J.M., 2017. Herziening Ontwerprichtlijn CUR 198 Kerende constructies van gewapende grond. Geotechniek, december 2017, 65-69.

Noten

1 In CUR 198 (paragraaf 3.5.3, zowel 2017 als 2021) staat aangegeven hoe we lijnlasten in analogie met de Tie back wedge methode kunnen spreiden over de diepte. De auteurs van dit artikel vinden echter dat lijnlasten in de praktijk over een bepaald oppervlak aangrijpen en dat die lasten als een verdeelde belasting op een bepaald oppervlak van het maaiveld direct in de Culmann methode meegenomen moeten worden. ●



Enka Solutions Samen bouwen aan oplossingen met geokunststoffen

Als wereldwijd en toonaangevend producent van technische textielen en geokunststoffen heeft Low & Bonar een historie om trots op te zijn. De hoogwaardige producten staan zelfs aan de oorsprong van civieltechnische toepassingen met geokunststoffen.

Deze historie begint in de jaren vijftig van de vorige eeuw. Destijds zijn uit hoge sterkte weefsel gefabriceerde grote zandzakken toegepast bij de eerste Deltawerken in Zeeland. Van daaruit zijn toepassingen in de civiele sector verder ontwikkeld. Dit heeft geleid tot een breed portfolio van oplossingsgerichte geokunststoffen, specialistische kennis en steeds nieuwe innovatieve toepassingen die door Low & Bonar zijn samengebracht in Enka Solutions. Met productielocaties in Nederland, Duitsland, de Verenigde Staten en China is Low & Bonar met recht een mondiale speler. Sinds medio 2020 is het bedrijf onderdeel van Freudenberg Performance Materials.

Geocomposieten voor drainage

Bij veel civiele technische projecten is het verkrijgen van een goede waterhuishouding een grote uitdaging. Geokunststof

drainagematten kunnen hier een belangrijke functionele bijdrage leveren. Ontwerpen zijn verder te optimaliseren en de waterhuishouding is beter te managen. Tevens kan er worden bespaard op het gebruik van grondstoffen, bouwtijd, bouwkosten, CO_a, en beperkt het omgevingshinder.

Drainagematten zijn kunststof composiet materialen bestaande uit een drie-dimensionale kern, aan een of twee zijden voorzien van filtervliezen. Met de toepassing kunnen verschillende functies als drainage, filtratie, bescherming en/of vibratiedemping worden ingevuld én gecombineerd. De geokunststof composieten worden zowel horizontaal als verticaal toegepast. Enka Solutions biedt een breed portfolio van drainerende geocomposieten aan onder de naam EnkaDrain.

EnkaDrain wordt verticaal aangebracht bij kerende constructies zoals betonconstructies (kelderwanden, L-wanden, tunnels) of grondkerende constructies (damwanden, boorpalen, mixed-in-place wanden). Een speciale EnkaDrain betreft CK20, voorzien van een dicht PVC-folie aan één zijde en een doorlatend filtervlies aan de andere zijde. De folie voorkomt dat cementmelk in de drainerende laag kan vloeien en deze verstopt. Hiermee kan de CK20 bijvoorbeeld worden toegepast als verloren bekisting bij het storten van wanden, zoals momenteel grootschalig gebeurt bij de constructie van de sluishoofden in het project Nieuwe Sluis Terneuzen. Andere toepassingen van EnkaDrain zijn op de bovenzijde van ondergrondse parkeergarages of kelderconstructies, brugdekken, taluds, stortplaatsen, viaducten en ecoducten.

Capillaire breeklaag

Een andere toepassing is het gebruik van EnkaBreak onder wegconstructies, spoorbanen en grondterpen. Deze toepassing voorkomt capillaire opstijging van grondwater in het grondlichaam en vervangt de traditionele granulaire capillaire laag. Constructies kunnen hiermee sneller, goedkoper en ecologischer worden gebouwd, met in veel gevallen minder onderhoud en een langere levensduur tot gevolg.

Vibratiedemping

Composietmatten zijn ook goed toepasbaar om trillingen en geluid te reduceren. Overlast hiervan is een veelvoorkomend probleem bij weg- en spoorverbindingen in druk bevolkte gebieden. Op basis van berekeningen en metingen is aangetoond dat trillingen tot 70% gereduceerd kunnen worden, wanneer Enka geocomposiet op de juiste wijze wordt geïmplementeerd.

Erosiebescherming bij waterkeringen en taluds

Door (extreme) regenval, wisselende waterstanden, stroomsnelheden of golfslag treedt erosie van grondtaluds of afslag van oevers op. Met zijn kenmerkende drie-dimensionale structuur verbetert EnkaMat in hoge mate de grondretentie op droge taluds en voorziet in een gewapende graszode die verder bijdraagt aan langdurige erosiebescherming. Voor







Beeld links: EnkaDrain CK in een van de sluishoofden van Nieuwe Sluis Terneuzen (fotografie: Jane van Raaphorst)

EnkaMat op droog talud ter voorkoming van erosie.

Overzicht	Product	Omschrijving	Functie	Toepassing
geokunststof producten	EnkaDrain®	Geocomposiet met een unieke v-vormige kern of 3D draadstructuur, voorzien van 1 of 2 non-woven (filter)vliezen.	Drainage, vibratiedemping, dilataties (spacer).	Landhoofden, keerwanden, parkeergarages, bouwputten, grondconstructies, dijken, stortplaatsen, bermdrainage, wegconstructies, spoorbanen, verhardingen.
	Enka [®] Break	Geocomposiet als vervanging granulaire breeklaag.	Voorkomen capillaire stijging grondwater tevens 'salt barrier'.	Wegen, spoor, platformen, grondlichamen.
	EnkaMat®	Erosiemat met 3-dimensionale draadstructuur voor grondretentie.	Erosiebescherming, versteviging van de wortelzone.	Grondtaluds, oevers, kanalen, dijken, watergangen.
	EnkaGrid®	Geokunststof wapening met voorgespannen kunststof strips.	Wapening, stabilisatie.	Steile taluds, grondkerende constructies, funderingswapening, wegen, spoorbanen, paalmatrassen, kraanopstelplaatsen, platforms.
	Colbonddrain®	Verticale drainage als strip-drain voor versnelde consolidatie en zettingsproces bij grondophogingen.	Versnellen consolidatieproces bij slappe grond- (afvoer van overspannen water).	Grond- en wegconstructies, dijken, spoorlijnen, bedrijventerreinen, landaanwinningsprojecten.

zwaardere condities in den natte bestaat EnkaMat A20: een permanente erosiebescherming voor begroeide oevers die onderhevig zijn aan wisselende waterstanden en hoge stroomsnelheden tot 2.5 m/s direct na aanleg. Met een gewicht van 20 kg/m² en meer dan 35 jaar aan referenties in Nederland is een lange functionele levensduur gewaarborgd.

Funderingswapening

EnkaGrid omvat een uitgebreide reeks van uni-axiale en bi-axiale geogrids. Door gebruik te maken van voorgespannen strips, onderscheiden EnkaGrid MAX en PRO zich met hoogwaardige prestaties zoals hogere treksterktes en stijfheden welke reeds bij zeer geringe rek worden behaald. EnkaGrid TRC is een uniek geocomposiet met een drie-ineen-oplossing: filtering, scheiding én wapening. Voor projecten waar grondwapening of grondstabilisatie zijn vereist, zoals wegen, terminals en bijvoorbeeld kraanopstelplaatsen bij windmolenparken, biedt EnkaGrid adequate oplossingen voor het reduceren van laagdiktes, vergroten van de draagkracht of het verzekeren van de grondstabiliteit.

Grondconsolidatie

Voor een versnelde consolidatie bij het aanbrengen van grondophogingen in infrastructurele projecten op slappe ondergronden, wordt regelmatig Colbonddrain toegepast. Colbonddrain is een verticale drainagecomposiet bestaand uit een 10 cm brede en 5 mm dikke kern, met aan beide zijden een filtervlies. Uniek aan Colbonddrain is het gebruik van gerecycled PP-materiaal als kernmateriaal. Colbonddrain wordt meestal in een driehoekig stramien en over de hoogte van het slappe lagen pakket van bijvoorbeeld klei/veen ingebracht. Momenteel worden er bij het project Groene Boog te Rotterdam (A13/A16) miljoenen meters Colbonddrain geïnstalleerd om het consolidatieproces te versnellen en zettingen te beheersen.

Enka Solutions

Het uitgebreide portfolio is gebundeld onder Enka Solutions. Van hieruit worden totaaloplossingen geboden voor toepassingen in de civiele-, en bouwtechnische sector. En omdat elk project anders is en de verschillende applicaties om specifieke kennis vragen, biedt Enka Solutions ook gespecialiseerde technische ondersteuning zoals ontwerpberekeningen en ontwerpvoorstellen. In samenspraak met ingenieursbureaus, aannemers en opdrachtgevers wordt de meest optimale oplossing bepaald om aan de projecteisen en behoeften te voldoen. Kernwaarden hierbij zijn kwaliteit, kennis, betrouwbaarheid en samenwerking. En met korte communicatielijnen en een 'no nonsens'-aanpak maakt Enka Solutions hiermee het verschil. Werkt u aan een civiel project en heeft u behoefte aan een slimme oplossing? Enka Solutions denkt graag mee!

Voor updates over toepassingen in civiele projecten en meer, volg ons op LinkedIn: Enka Solutions





Low & Bonar

+31 (0)85 744 1300 info@enkasolutions.com / www.enkasolutions.com



- I.G.G. SCHROEFPALEN TYPE DPA, HEK, BETONSCHROEF EN BUISSCHROEF I.G.G. VIBROPALEN EN VIBRO-SD PALEN
- PREFAB BETONPALEN
- PREFAB BETONBOUW

CONTACT: T. 0299409500 E. info@vroom.nl

VROOM.NL



UW SPECIALIST IN PRAKTIJK

Zettingen en stabiliteit | Funderingen en ondergrondse constructies | Bouwkuipen en grondkerende constructies | Geohydrologie | Kunstwerken | Leidingen en sleufloze technieken | Waterbouwkundige constructies | Projectmanagement en directievoering



enviro QUALITY CONTROL ™

Kwaliteit met zekerheid

Geaccrediteerd sinds 2005 door de Raad voor Accreditatie als type A onafhankelijke inspectie-instelling op basis van de NEN-ISO/IEC 17020, RvA registratie I188 voor het uitvoeren van inspecties bij:

- Aanleg van onder- en bovenafdichtingen van stortplaatsen
- Aanleg van een werk waarin IBC-bouwstof wordt toegepast voor protocol AS6901
- Tijdens de gebruiksfase van een IBC-werk voor protocol AS6902
- · Levensduuronderzoek op kunststoffolie en lasverbindingen







spectie in het werk

www.eqc.nl

+31 30 244 1404

44 1404



OOMS-VOEG

Toepassing van de Ooms-voeg bij bruggen, viaducten en tunnels heeft voordelen voor beheerder, gebruiker en omwonende. De eerste voeg is toegepast in 2003 op de A50 en de techniek heeft zich bewezen op tal van andere plaatsen in Nederland.







• Reductie van geluid en trillingen geeft comfort en minder omgevingshinder

- Geen spoorvorming maakt het wegdek veilig
- Hoge kosteneffectiviteit doordat onderhoud niet nodig is

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

Évenweg van *bits en bites*...



We leven in digitale tijden, maar velen willen gewoon papier in handen hebben. Een **relatiemagazine** is zeer effectief als marketinginstrument. Het ultieme visitekaartje voor uw onderneming. U wekt vertrouwen en claimt autoriteit binnen uw vakgebied. U creëert bedrijfsherkenning, loyaliteit en binding bij al uw relaties.

Als uitgever van gerenommeerde tijdschriften (als Geotechniek/Geokunst) zijn wij dé partij om mee in zee te gaan. **Uitgeverij Educom** regelt van idee tot en met verspreiding. Biedt uw magazine digitaal aan en plaats het op uw website. Informeer naar de mogelijkheden via: info@uitgeverijeducom.nl



www.uitgeverijeducom.nl

NEDERLAND ZONDER WINDMOLENS IS ALS DIJKEN ZONDER NAUE

Waterbouw met geokunststoffen voor een veilige dijk.



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

GEOKUNST 81 MAART 2020