

Title:	Resultaten geocontaineronderzoek (Results of geocontainer research)		
Author:	Ir. M.B. de Groot	Institute:	GeoDelft
Author:	Ir. M. Klein Breteler	Institute:	WL Delft Hydraulics
Author:	Ir. A. Bezuijen	Institute:	GeoDelft
			June 2003
Number of pages	:	47	
Keywords (3-5)	:	geocontainers, geotextiles, wave loading, sliding stability	
DC-Publication-number	:	DC1-321-11	
Institute Publication-number (optional)	:	730201/107	GeoDelft
Report Type	:	<input type="checkbox"/>	Intermediary report or study
	:	<input checked="" type="checkbox"/>	Final projectreport
DUP-publication Type	:	<input checked="" type="checkbox"/>	DUP Standard
			DUP-Science

Acknowledgement

This research has been sponsored by the Dutch Government through the ICES-2 programme. The research is part of the Research programme of Delft Cluster.

Conditions of (re-)use of this publication

The full-text of this report may be re-used under the condition of an acknowledgement and a correct reference to this publication.

Other Research project sponsor(s):

--	--	--	--	--	--

Abstract

Research on the behaviour of geocontainers and other geosystems has been performed in the framework of the WIS-project "Knowledge development Geo-sand elements" and the Delft Cluster project "Construction of large scale sand bodies". Model tests have been performed in several model facilities of WL | Delft Hydraulics and GeoDelft. Field measurements have been performed in and around geocontainers dumped into the Kandiadam. Existing theories have been verified and new ones have been developed. The research results are summarised in this report.

In view of the feasibility of geocontainers applied at sea, the research mainly focussed on the following questions:

- How is the behaviour of the sand-geotextile combination of a geocontainer during dumping?
- How accurate can geocontainers be placed in still water and in water with current and waves?
- How large is the geotextile loading during the dumping of a geocontainer out of a split barge?
- What is the geotechnical stability of a wave loaded pile of geo-sand elements?

Finally some attention is paid to:

- How stable are individual geo-sand elements when loaded by current and waves?

The understanding of the processes most responsible for the result of the dumping process has increased such that reasonably reliable predictions can be made with respect to the results of geocontainers applied in still water or in water with current and waves. Calculation models based on this understanding have been developed enabling reliable estimates of the influence of many design- and boundary variables in practical circumstances. A reliable advise based on application of these models requires large knowledge of the backgrounds at the moment. More experience in practice is needed before these calculation models can be presented as general "recipies".

The aspects considered here allow for the conclusion that application of geocontainers of ca 300 m³ along the Dutch North Sea coast is feasible for the construction of bunds or other heaps of geocontainers with a slope of ca 1 : 3 in 15 m to 20 m deep water.

PROJECT NAME:	Bouw van grootschalige zandlichamen	PROJECT CODE:	03.02.01
BASEPROJECT NAME:	Waterbouwkunde en Geotechniek	BASEPROJECT CODE:	03.02
THEME NAME:	Kust en Rivier	THEME CODE:	03

Executive Summary

Research on the behaviour of geocontainers and other geosystems has been performed in the framework of the WIS-project "Knowledge development Geo-sand elements" and the Delft Cluster project "Construction of large scale sand bodies". Model tests have been performed in several model facilities of WL | Delft Hydraulics and GeoDelft. Field measurements have been performed in and around geocontainers dumped into the Kandiadam. Existing theories have been verified and new ones have been developed. The research results are summarised in this report.

In view of the feasibility of geocontainers applied at sea, the research mainly focussed on the following questions:

- How is the behaviour of the sand-geotextile combination of a geocontainer during dumping?
- How accurate can geocontainers be placed in still water and in water with current and waves?
- How large is the geotextile loading during the dumping of a geocontainer out of a split barge?
- What is the geotechnical stability of a wave loaded pile of geo-sand elements?

Finally some attention is paid to:

- How stable are individual geo-sand elements when loaded by current and waves?

The understanding of the processes most responsible for the result of the dumping process has increased such that reasonably reliable predictions can be made with respect to the results of geocontainers applied in still water or in water with current and waves. Calculation models based on this understanding have been developed enabling reliable estimates of the influence of many design- and boundary variables in practical circumstances. A reliable advise based on application of these models requires large knowledge of the backgrounds at the moment. More experience in practice is needed before these calculation models can be presented as general "recipies".

The aspects considered here allow for the conclusion that application of geocontainers of ca 300 m³ along the Dutch North Sea coast is feasible for the construction of bunds or other heaps of geocontainers with a slope of ca 1 : 3 in 15 m to 20 m deep water.

PROJECT NAAM:	Bouw van grootschalige zandlichamen	PROJECT CODE:	03.02.01
BASISPROJECT NAAM:	Waterbouwkunde en geotechniek	BASISPROJECT CODE:	03.02
THEMA NAAM:	Kust en Rivier	THEMA CODE:	03

General Appendix: Delft Cluster Research Programme Information

This publication is a result of the Delft Cluster research-program 1999-2002 (ICES-KIS-II), that consists of 7 research themes:

- ▶ Soil and structures, ▶ Risks due to flooding, ▶ Coast and river , ▶ Urban infrastructure,
- ▶ Subsurface management, ▶ Integrated water resources management, ▶ Knowledge management.

This publication is part of:

Research Theme	:	Kust en Rivier (Coast and River)		
Baseproject name	:	Waterbouwkunde en geotechniek (Hydraulic and geotechnical engineering)		
Project name	:	Bouw van grootschalige zandlichamen (Construction of large sand bodies)		
Projectleader/Institute		ir M.B. de Groot	GeoDelft	
Project number	:	03.02.01		
Projectduration	:	2000-09-01	-	2003-06-30
Financial sponsor(s)	:	Delft Cluster		
		RWS-Bouwdienst en DWW (WIS)		
		RWS-RIKZ		
		GeoDelft		
		WL Delft Hydraulics		
Projectparticipants	:	GeoDelft		
		WL Delft Hydraulics		
		TNO-NITG		
Total Project-budget	:	€700.000		
Number of involved PhD-students	:	0		
Number of involved PostDocs	:	0		

Delft Cluster is an open knowledge network of five Delft-based institutes for long-term fundamental strategic research focussed on the sustainable development of densely populated delta areas.



Keverling Buismanweg 4
Postbus 69
2600 AB [Delft](#)
The Netherlands

Tel: +31-15-269 37 93
Fax: +31-15-269 37 99
info@delftcluster.nl
www.delftcluster.nl

Theme Managementteam: Coast and River

Name	Organisation
Prof. Dr. Ir. M.J.F. Stive	TUD
Dr. C. Laban	TNO-NITG
Dr. Ir. J van de Graaff	TUD
Ir. M.B. de Groot	GeoDelft
Ir. N. Villars	WL Delft Hydraulics
Dr. P. van Hofwegen	IHE

Projectgroep

During the execution of the project the researchteam included:

Name	Organisation
1 Ir. M.B. de Groot	GeoDelft
2 Ir. M. Klein Breteler	WL Delft Hydraulics
3 Ir. A. Bezuijen	GeoDelft
4 Dr. S. van Heteren	TNO-NITG
5 Ir. D.R. Mastbergen	WL Delft Hydraulics

Other Involved personnel

The realisation of this report involved:

Name	Organisation
1 Ir E. Berendsen	Rijkswaterstaat, Waterbouw Innovatie Steunpunt (BWD, DWW)
2 Ir. M.B. de Groot	GeoDelft
3 Ir. M. Klein Breteler	WL Delft Hydraulics
4 Ir. A. Bezuijen	GeoDelft

Samenvatting

Titel	Resultaten geocontainer onderzoek
Auteurs	ir. M.B. de Groot, ir. M. Klein Breteler en ir. A. Bezuijen
Datum	juni 2003
Project nummer	03.02.01
Rapport nummer	11

Onderzoek aan geocontainers is uitgevoerd in het kader van het WIS project “Kennisonwikkeling Geo-zandelementen” en het Delft-Clusterproject “Bouw van grootschalige zandlichamen”. Modelproeven zijn uitgevoerd in verscheidene modelfaciliteiten van WL | Delft Hydraulics en GeoDelft. Veldmetingen zijn uitgevoerd aan geocontainers die gestort zijn in de Kandiadam. Bestaande theoretische modellen zijn geverifiëerd en nieuwe zijn ontwikkeld. In dit rapport worden de resultaten van deze onderzoeken samengevat.

Met het oog op de haalbaarheid van toepassing van geocontainers op zee, was het onderzoek voornamelijk gericht op de volgende vragen:

- Hoe is het gedrag van de zand-geotextiel combinatie van een geocontainer tijdens het storten?
- Hoe nauwkeurig zijn geocontainers te plaatsen in stilstaand water en in water met stroming en golven?
- Hoe groot is de belasting op het geotextiel tijdens het storten van een container uit de splijtbak?
- Wat is de geotechnische stabiliteit van een stapeling van geo-zandelementen belast door golven?

Tenslotte is enige aandacht besteed aan

- Hoe stabiel zijn individuele geo-zandelementen onder invloed van stroom en golf.

Het inzicht in de processen die bepalend zijn voor het resultaat van het stortproces is zodanig verbeterd dat redelijk betrouwbare voorspellingen gedaan kunnen worden m.b.t. het resultaat van de toepassing van geocontainers in stilstaand water en in omstandigheden met stroom en golf. Dit inzicht is vastgelegd in rekenmodellen, waarmee de invloed van vele ontwerp- en omgevingsvariabelen voor praktijksituaties kan worden afgeschat. Overigens vergt een betrouwbaar advies op basis van de toepassing van die rekenmodellen thans nog grote kennis van de achtergronden en is er nog meer praktijkervaring noodzakelijk voordat de rekenmodellen in een “kookboekvorm” kunnen worden gepresenteerd.

Uit het oogpunt van de hier beschouwde aspecten kan geconcludeerd worden dat de toepassing van geocontainers van ca 300 m³ aan de Noordzeekust haalbaar is voor het maken van klapkades of andere stapelingen met een helling van ca 1:3 tot een waterdiepte van 15 m tot 20 m.

Inhoud

1	Inleiding	4
2	Beschrijving deelonderzoeken	6
2.1	Storten geocontainers in de Brutusbak	6
2.2	Storten geocontainers in stroming en golven in Venetiëfaciliteit	7
2.3	Numerieke simulatie van het storten van geocontainers	9
2.4	Veldmetingen aan geocontainers gestort in de Kandiadam	10
2.5	Opbouw dam met geocontainers in Cornelis Douwes kanaal te Amsterdam	11
2.6	Geotechnische stabiliteit bij golfbelasting in Venetiëfaciliteit ...	12
3	Plaatsingsnauwkeurigheid.....	15
3.1	Waargenomen fenomenen.....	15
3.1.1	Afwijking in dwarsrichting bij vlakke bodem en grote waterdiepte	15
3.1.2	Afwijking in dwarsrichting bij vlakke bodem en kleine waterdiepte	16
3.1.3	Afwijking in dwarsrichting bij storten op een stapeling	17
3.1.4	Afwijking in langsrichting	17
3.2	Verklaring en modellering	17
3.3	Conclusies over plaatsingsnauwkeurigheid	19
4	Belasting geotextiel bij storten uit splijtbak	21
4.1	Belasting tijdens het openen van de splijtbak	21
4.2	Belasting bij vallen op de bodem	22
4.2.1	Algemeen	22
4.2.2	Valsnelheid bij de bodem, v_b	22
4.2.3	Valenergie	23
4.2.4	Energiedissipatie in het algemeen	23
4.2.5	Energiedissipatie door het geotextiel	24
4.2.6	Energiedissipatie door het zand in de container	24
4.2.7	Belasting op eerder geplaatste geocontainer	26
4.3	Conclusies over belasting geotextiel bij storten uit splijtbak	26
5	Geotechnische stabiliteit stapeling onder golfaanval	27
5.1	Waargenomen fenomenen	27
5.2	Verklaring en modellering	28
5.2.1	Stijghoogteverschil	28
5.2.2	Dilatantie effect	29
5.2.3	Instabiliteit	30
5.3	Conclusies pver geotechnische stabiliteit van stapeling onder golfaanval	30
6	Stabiliteit individuele elementen bij golf en stroming	32
6.1	Stabiliteit bij golfbelasting	32

6.2	Stabiliteit bij stromingsbelasting	33
6.3	Instabiliteit door verweking veroorzaakt door golfbelasting	34
6.4	Conclusies over stabiliteit individuele elementen bij golf en stroming	35
7	Schaaleffecten en andere modeffecten.....	36
8	Conclusies voor de praktijk	37
9	Aanbevelingen	39
Referenties	40	

1 Inleiding

Zand is een goedkoop bouw materiaal, vooral aan zandige kusten. Daarom is het aantrekkelijk om bij grootschalige werken voornamelijk zand te gebruiken in plaats van breuksteen of andere steenachtige materialen. De toepassing van zand in water, bijvoorbeeld bij de bouw van grootschalige zandlichamen, brengt echter een aantal specifieke problemen met zich mee, vooral in zee. Een aantal van die problemen zijn onderwerp van studie in het Delft Cluster project “Bouw van Grootschalige zandlichamen” [de Groot 2000]. Het probleem van de zeer flauwe hellingen die ontstaan bij het storten van zand onder water kan in principe worden ondervangen door toepassing van geocontainers of geotubes.

Geocontainers en geotubes worden alle vele jaren toegepast, vooral als klap- of spuitkade voor de opbouw van zandlichamen onder water. De toepassingen in Nederland beperken zich voornamelijk tot stilstaand water. De plannen voor Maasvlakte 2 hebben de vraag doen rijzen of geo-zandelementen, met name containers niet eveneens op zee toegepast kunnen worden als vervanger van steenachtige materialen als mijnsteen, grind of kleine breuksteen. Gedacht kan worden aan toepassing als kern van een verder breukstenen golfbreker, als verhoging van de bodem onder een golfbreker, als opsluiting van de vooroever van een strandsuppletie of als klap- of spuitkade bij de opbouw van een zeekering. Daarom heeft het Waterbouw Innovatie Steunpunt (samenwerkingsverband van Bouwdienst en DWW) van Rijkswaterstaat het onderzoeksproject ‘Kennisonwikkeling geo-zandelementen’ opgezet [Berendsen 2000].

Daarin wordt gesteld dat de haalbaarheid van geocontainers voor toepassing op zee meer kennis vereist over de volgende 9 onderwerpen, met name die met prioriteit 1:

nr.	Onderzoeksvraag/onderwerp	prioriteit
1.	Positionering en gedrag geocontainers tijdens storten	1
2.	Lange termijn gedrag en risico falen geocontainers	1
3.	Geotechnische stabiliteit geocontainers in stapeling	1
4.	Weerstand tegen het gebruik van geocontainers	1
5.	Overbelasten geocontainers tijdens storten op diep water	2
6.	Instabiliteit bovenste elementen door stroming en golven	2
7.	Migratie van zand in geocontainer door stroming (rupsen)	2
8.	Verdichting pakking van het zand en verweking door golven	3
9.	Schaalvergroting en alternatieve uitvoeringsmethoden	3

Met uitzondering van de onderwerpen 2, 4 en de uitvoeringsmethoden genoemd onder 9, leken deze onderwerpen bij uitstek geschikt voor onderzoek op wetenschappelijke grondslag. Met een beperkte hoeveelheid onderzoek moest het mogelijk zijn de kennis over deze onderwerpen significant te vergroten. Die onderwerpen, en dan met name de onderwerpen 1, 3 en 5, zijn daarom uitgekozen als onderwerpen van onderzoek voor een gezamenlijk Rijkswaterstaat/Delft Cluster onderzoeksproject. Het onderzoeksproject is eind 2000 gestart en is thans voltooid. De belangrijkste resultaten worden in dit rapport vastgelegd.

Na een korte beschrijving van alle deelonderzoeken (hoofdstuk 2) worden in de daarop volgende hoofdstukken de 4 belangrijkste vraagclusters besproken: de plaatsingsnauwkeurigheid, de belasting op het geotextiel, de geotechnische stabiliteit van een stapeling onder golfaanval en de stabiliteit van individuele of bovenste geozandelementen bij golf en stroming, inclusief de daaraan gerelateerde vraag over migratie van zand in de geocontainer en de vraag betreffende verdichting en verweking.

Aan het eind van elk van deze hoofdstukken zijn de conclusies over de betreffende onderwerpen geformuleerd. Meer algemene conclusies volgen daarna: conclusies over de schaalregels en conclusies over de toepassing van geocontainers (en andere geozandelementen) voor de praktijk. Het rapport wordt afgerond met enige aanbevelingen.

Veel van de resultaten zijn ook vastgelegd in Engelstalige publicaties: [Bezuijen e.a. 2000], [Bezuijen e.a. 2002a], [Bezuijen e.a. 2002b] en [de Groot e.a. 2000].

Dankbetuiging

Bij dit onderzoek, uitgevoerd in opdracht van RWS en Delft Cluster, is dankbaar gebruik gemaakt van de adviezen van Ten Cate Nicolon BV, adviesbureau G.J. Schaap en de firma Fernhout BV.

Om onderscheid te maken tussen de twee meest toegepaste methoden om geo-zandelementen te produceren en op hun plaats te brengen is hier gebruik gemaakt van de termen 'geotubes' en 'geocontainers'. Men dient zich echter te realiseren dat dit eigenlijk merknamen zijn: Geotubes® en Geocontainers® zijn geregistreerde handelsmerken van Ten Cate Nicolon BV

2 Beschrijving deelonderzoeken

2.1 Storten geocontainers in de Brutusbak

Kleine geocontainers die beschouwd kunnen worden als een 1 : 20 schaalmodel van een geocontainer met een dwarsdoorsnede van 8 m², werden gestort in de 'Brutusbak' van GeoDelft bij een prototype waterdiepte van 16m. Sommige containers bevatten droog zand. Enkele daarvan werden droog gehouden door een waterdicht folie. Andere containers werden verzadigd voordat ze werden gestort. De meeste geocontainers werden gestort op een vlakke bodem; enkele op een stapeling van 2 eerder gestorte containers. Zie de foto in figuur 1

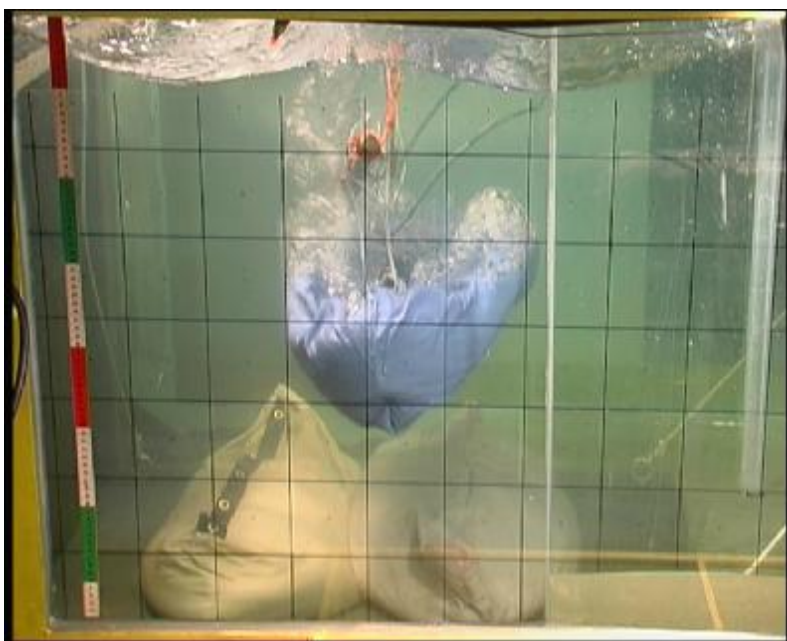
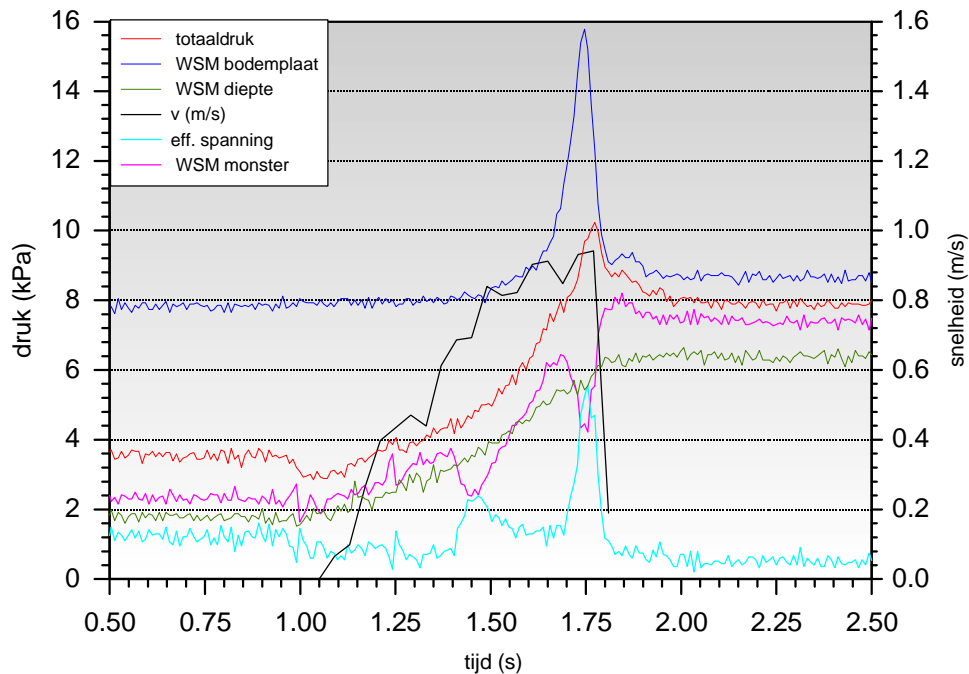


Fig.1 Geocontainer gedumpt op een 'stapeling' van 2 eerder gestorte containers

Deze proeven waren vooral gericht op de bestudering van de krachten en vervormingen in een geocontainer tijdens het vallen en neerkomen, alsmede het daaruit resulterende gedrag van de geocontainer. Dit in verband met de positionerings-nauwkeurigheid en de belasting op het geotextiel.

Waterspanningen, totaalspanningen en versnellingen zijn gemeten middenin de geocontainer. Waterspanningen zijn ook gemeten aan de buitenkant van de container en op de bodem van de bak. Een voorbeeld van de registraties is weergegeven in figuur 2. De meetresultaten zijn vergeleken met de resultaten van video-opnamen. Verder zijn de resultaten vergeleken met de resultaten van eerder ontwikkelde rekenregels voor krachten en vervormingen [Bezuijen and den Adel 1999] en [de Groot and Bezuijen 1999] en door WL | Delft Hydraulics uitgevoerde numerieke berekeningen, besproken in paragraaf 2.3.



3c

Fig.2 Voorbeeld van meetresultaten tijdens een van de proeven (proef 3c).

Tenslotte is de proefopstelling gebruikt om de stabiliteit tegen afschuiven te meten van eerder gedumpte containers op een hellende ondergrond, bestaande uit prototype geotextiel.

De belangrijkste resultaten zijn weergegeven in de hoofdstukken 3 en 4. Een gedetailleerde rapportage van deze proeven is te vinden in [Bezuijen en Oung 2000]; de analyse in [Bezuijen 2001].

2.2 Storten geocontainers in stroming en golven in Venetiëfaciliteit

Het onderzoek naar de plaatsingsnauwkeurigheid van geocontainers onder invloed van stroming en golven heeft plaatsgevonden in de Venetiëfaciliteit van WL | Delft Hydraulics. Het doel van deze proeven was:

- De plaatsingsnauwkeurigheid onderzoeken, als functie van de stroomsnelheid en golfhoogte
- Onderzoeken hoe steil een dam kan worden opgebouwd onder invloed van stroming en golven

Uitgaande van geocontainers met ieder een inhoud van ca 250 m³ (29m lang, dwarsdoorsnede ca 8 m²) zijn de proeven uitgevoerd op een schaal van 1:20 onder diverse hydraulische omstandigheden (golven en/of stroming). De waterdiepte kwam steeds overeen met 16 m.

In het schaalmodel was een slijtbak gemaakt die automatisch geopend kon worden met een in te stellen snelheid (zie figuur 3). De invloed van het slingeren van de slijtbak is niet onderzocht omdat dit in het model moeilijk te realiseren was. Daarom stond de slijtbak met pootjes op de bodem. De vorm van de slijtbak kwam precies overeen met slijtbakken uit het prototype met een beunlengte van 28,8 m.

Tijdens een groot aantal inleidende proeven zijn de modelopstelling en de geocontainers verder geoptimaliseerd. Uiteindelijk is gekozen voor geocontainers gemaakt van Geolon 15 volgens

het naaipatroon van Ten Cate Nicolon, die gevuld werden met zand met een korrelgrootte $D_{50} = 210 \mu\text{m}$.



Fig.3 Proefstort in het model zonder water

Voor het positioneren van geocontainers is het met name van belang te weten welke uiteindelijke horizontale verplaatsing en rotatie (om de verticale as) de geocontainer verkrijgt, ten opzichte van de locatie en richting van de splijtbak. Tijdens de proeven is gebleken dat de verplaatsing van de eerste geocontainer, die gestort wordt voor het opbouwen van een stapeling, bepalend is voor de locatie van de stapeling. Daarom is het onderzoek voornamelijk gericht op deze verplaatsing op een vlakke bodem, V, en rotatie, R, in relatie tot de golfhoogte en stroomsnelheid. Tenslotte is drie keer een stapeling van geocontainers gemaakt (figuur 4).

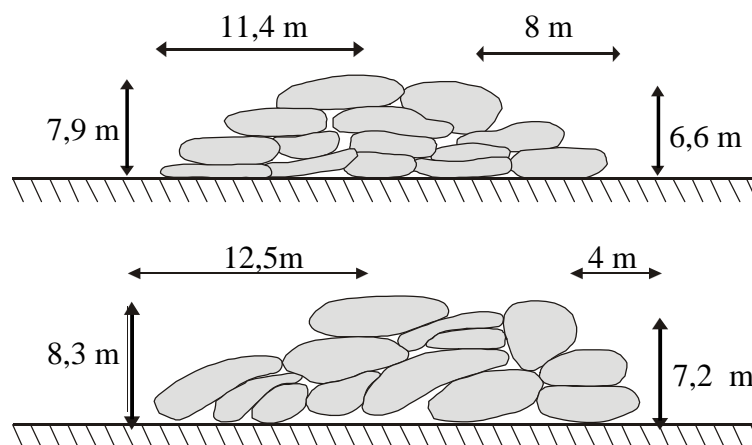


Fig.4 Twee dwarsdoorsneden van een stapeling geocontainers (ter plaatse van beide koppen van de geocontainers)

In een aantal proevenseries is de invloed van de golfhoogten en de stroomsnelheid op de plaats waar de geocontainer tot rust komt onderzocht. Steeds zijn vijf geocontainers onder bepaalde omstandigheden gestort, waardoor het mogelijk was om een gemiddelde en standaardafwijking voor elk van de onderzochte omstandigheden vast te stellen. De val van de geocontainers zijn vastgelegd met behulp van twee videocamera's onder water: één in langsrichting en één dwars op de geocontainer.

De belangrijkste resultaten van de proevenseries zijn weergegeven in paragraaf 3.1. De gedetailleerde rapportage van deze proeven en de analyse zijn te vinden in [Klein Breteler e.a. 2001].

2.3 Numerieke simulatie van het storten van geocontainers

Na de modelproeven in de Venetiëfaciliteit van WL en de Brutusbak van GD is ook een meer theoretische analyse uitgevoerd. Daartoe is het krachtenspel op vallende geocontainers op basis van de elementaire vloeistofmechanica gekwantificeerd. Omdat de resulterende formules te gecompliceerd waren om analytisch op te lossen, is dit numeriek gedaan, hetgeen een computerprogramma heeft opgeleverd dat de baan van de vallende geocontainer beschrijft. Het is vooral gelukt om het eerste deel van het valproces numeriek te simuleren. Net als geconstateerd is tijdens de modelproeven blijkt er volgens de numerieke resultaten een grote horizontale snelheid te zijn ontstaan als de geocontainer bij de bodem is aangekomen. In stromend water is deze horizontale snelheid aanzienlijk groter dan de stroomsnelheid. De grootte van deze berekende snelheid is wat aan de lage kant in vergelijking met de in modelonderzoek gemeten snelheden, maar wel van de juiste orde grootte.

Ook het tweede deel van het valproces, namelijk het schuiven over de bodem op een dunne waterlaag, wordt in het rekenmodel kwalitatief goed weergegeven. Net als bleek uit de metingen neemt de horizontale snelheid slechts weinig af tijdens het schuiven. Echter, na verloop van tijd moet de geocontainer ook in het rekenmodel door het dunne waterlaagje heenzakken en worden afgeremd door wrijving met de bodem. Dit laatste deel van het proces wordt nog niet goed door het rekenmodel weergegeven. Voor dit laatste deel van de valbeweging zijn al wel goede ideeën geformuleerd, maar deze zijn nog niet uitgewerkt in een goed werkende numerieke simulatie. Aanbevolen wordt dit in een vervolgstudie nader aandacht te geven.

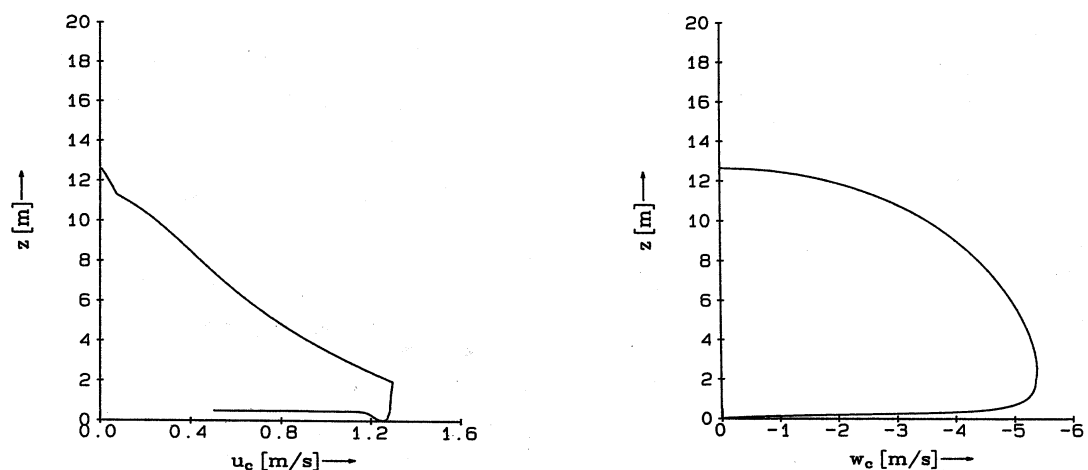


Fig.5 Voorbeeld van resultaat van numerieke simulatie (z = hoogte van de geocontainer boven de bodem; u_c = horizontale snelheid van de geocontainer; w_c = verticale snelheid van de geocontainer)

Een voorbeeld van de resultaten van een numerieke simulatie zijn gegeven in figuur 5. Enige belangrijke berekeningsresultaten zijn besproken in hoofdstuk 3. Het model en de resultaten zijn gedetailleerd gerapporteerd in [Klein Breteler e.a. 2001]. De invloed van de soortelijke massa is gerapporteerd in [Klein Breteler e.a. 2002].

2.4 Veldmetingen aan geocontainers gestort in de Kandiadam

In de periode september-november 2001 zijn veldmetingen uitgevoerd aan geocontainers die werden geplaatst in de Kandiadam. De metingen zijn uitgevoerd in samenwerking met aannemersbedrijf Fernhout. De 'Kandiadam' is een zandlichaam dat aangebracht is in een oude zandwininput in de uiterwaarden van het Pannerdenskanaal in de buurt van het dorp Kandia. Het zandlichaam was nodig om het boren van de tunnels onder het Pannerdenskanaal voor de Betuweroute mogelijk te maken.

Ook deze metingen waren gericht op de bestudering van het gedrag van de geocontainer tijdens het storten en de consequenties voor positioneringsnauwkeurigheid en belasting van het geotextiel. De bedoeling was om nu op schaal 1:1 de verschijnselen tijdens het vallen en neerkomen te bestuderen, die eerder waren bestudeerd bij de Brutusbakproeven en in de Venetiëfaciliteit.

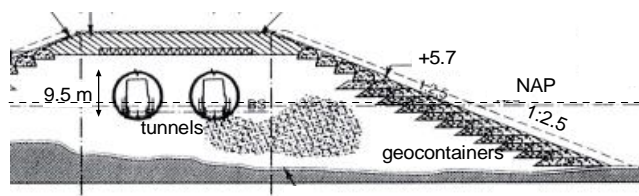


Fig.6 Gedeelte van de te bouwen Kandia dam volgens oorspronkelijk ontwerp. Aan de andere kant van de dam bevindt zich een vergelijkbaar talud.

Een schematische dwarsdoorsnede van de te bouwen constructie volgens het oorspronkelijk plan is weergegeven in figuur 6. Alhoewel gedurende de uitvoering van het project besloten is om de dam zonder geocontainers af te bouwen, zijn de metingen nog uitgevoerd in de periode dat het oorspronkelijk plan in grote lijnen gevolgd werd.

De veldmetingen bestonden uit de volgende onderdelen:

- Twee keer werden waterspanningsmeters, totaalspanningsmeters en rekmeters aangebracht in een geocontainer voor en tijdens het vullen met zand. Metingen werden uitgevoerd tijdens het dumpen van de betreffende container.
- Bij één van geïnstrumenteerde geocontainers is ook gemeten wat de belasting was toen er bij het storten van een volgende laag containers een container op de daarvoor gestorte geïnstrumenteerde container werd gestort.
- Van orde 80 containers is vastgelegd waar deze zijn neergekomen na plaatsing.

De waterspanningsmeters en totaalspanningsmeters hebben goed gewerkt en hebben veel waardevolle informatie opgeleverd, zoals uiteengezet in hoofdstuk 3 en 4. De rekmeters daarentegen bezweken voortijdig ondanks het speciale fabrikaat, geschikt voor het opnemen van extreem grote rekken, en ondanks de zorgvuldige montage en afscherming (bij de eerste proef met geotextiel en bij de 2de proef ook nog met een stuk PVC). Zie paragraaf 2.2 en de bijlagen 1 en 2 van [Schrijver en Peters 2002]



Fig.7 Videobeeld proef met ongelijkmatig beladen geocontainer juist voor het vallen uit de splijtbak

Tenslotte leverden de waterspannings- en totaalspanningsmeters een beeld op dat sterk leek op dat in de Brutusbakproeven. Het gunstige effect van luchtgehalte in vrij droog zand ('Bezuijzen-effect') en het gunstige effect van dilatantie in verzadigd zand, zijn beide waargenomen.

De belangrijkste resultaten zijn weergegeven in de hoofdstukken 3 en 4. Een gedetailleerde rapportage van deze proeven is te vinden in [Schrijver en Peters 2002]; de analyse in [Bezuijzen 2002].

2.5 Opbouw dam met geocontainers in Cornelis Douwes kanaal te Amsterdam

Ter afsluiting van het oude havenbekken, genaamd Cornelis Douwes kanaal, te Amsterdam is in 2001 een zanddam opgebouwd met aan weerszijden geocontainers als klappkades. De situatie is vergelijkbaar met die van de Kandiadam. Het buitentalud (IJ-zijde) is opgebouwd met steeds twee containers naast elkaar onder een helling van 1:3; de binnenzijde met steeds één container onder een helling 1:1. Aan de IJ-zijde bedroeg de waterdiepte 16 m; aan de binnenzijde 10 m.

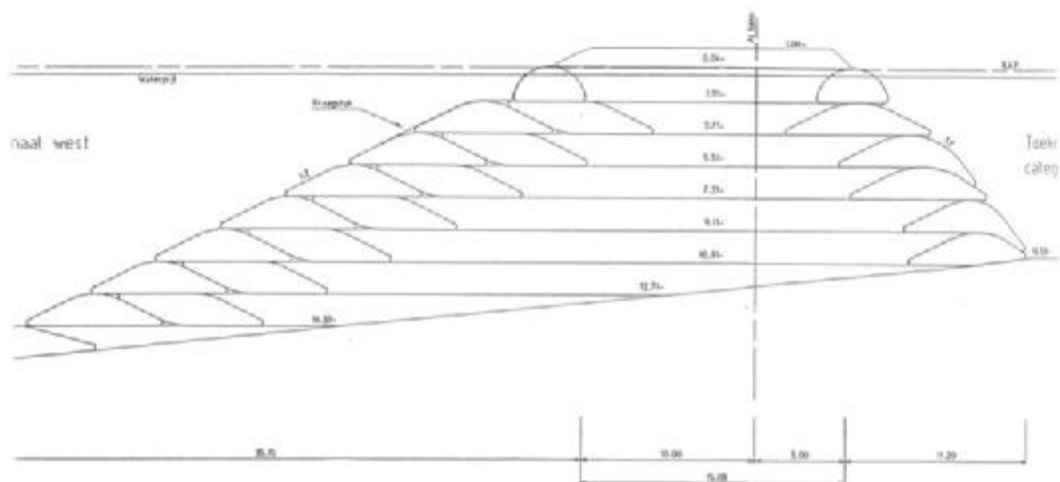


Fig.8 Dwarsprofiel dam in Cornelis Douwes kanaal in Amsterdam

Er is gebruik gemaakt van een splijtbak die identiek was aan die gebruikt bij de Kandiadam (beuninhoud 315 m^3). Anders dan bij Kandia, werden glijdoeken gebruikt. Die moesten geregeld vernieuwd worden omdat de wrijvingscoëfficiënt gaandeweg steeds groter werd. Ook hier werd polypropreen geotextiel gebruikt, geconfectioneerd in dezelfde fabriek. De overlengte werd zoveel mogelijk onderin de beun gelegd.

Het zand betrof ontzilt zeezand met $D_{50} = 230 \mu\text{m}$. Het zand werd droog aangebracht in lagen van 0,5 m door een hydraulische kraan met grijper en uitgevlakt met de schop. Een groot deel van de lucht uit de porieën kwam in de periode na het storten vrij en verzamelde zich aanvankelijk onder het doek, dat als een ballon boven het zand bleef hangen om gedurende een etmaal te ontsnappen.

2.6 Geotechnische stabiliteit bij golfbelasting in Venetiëfaciliteit

De geotechnische stabiliteit van een stapeling geocontainers is voor het eerst bestudeerd in het kader van het project Maasvlakte 2. In de rapportage 'haalbaarheid van de toepassing van gezandelementen, dec '99' [Berendsen 1999] is een analytische methodiek gepresenteerd. De uitgevoerde berekeningen waren gebaseerd op een zeer eenvoudige en conservatieve aanname over de druktransmissie door de stapeling geocontainers. Die aanname leidt er wellicht toe dat de resultaten conservatief zijn.

Om de resultaten van geotechnische stabiliteitsanalyse te verbeteren was het noodzakelijk om een beter model voor de druktransmissie door de stapeling te verkrijgen. Helaas is in de literatuur geen onderzoek te vinden waarin de druk in een stapeling geocontainers is gemeten. Daarom zijn modelproeven uitgevoerd waarin deze druktransmissie in een stapeling geocontainers is gemeten. De proeven waren erop gericht de geotechnische stabiliteit te bestuderen van een stapeling geocontainers aan het eind van de uitvoeringsfase die nog niet versterkt is met een toplaag en waar nog geen zand achter gestort is ten behoeve van een landaanwinning.

De proeven zijn uitgevoerd in de Venetië-faciliteit van WL | Delft Hydraulics met een geïdealiseerde stapeling Net als bij de stortproeven zijn ook deze proeven uitgevoerd op een schaal van 1:20. De geocontainers zijn vervaardigd van katoenen lakenstof, dat eerst ingewassen is om het goed doorlatend te maken.

Tijdens de proeven zijn een tweetal stapelingen van de geocontainers getest onder verschillende hydraulische omstandigheden. Beide bestonden uit een 5-4-3-2 stapeling, waarbij in elke volgende laag de geocontainers in halfsteensverband op de vorige laag werden gelegd. De eerste stapeling geocontainers was opgebouwd uit relatief dunne geocontainers met een prototype hoogte van gemiddeld 1,2 m, breedte van 7,4 m en een gemiddelde massa van 392 ton (droog), prototype maten. In de tweede stapeling waren de geocontainers dikker en zwaarder: 1,86 m dik, 6,4 m breed en een droog gewicht van 600 ton.

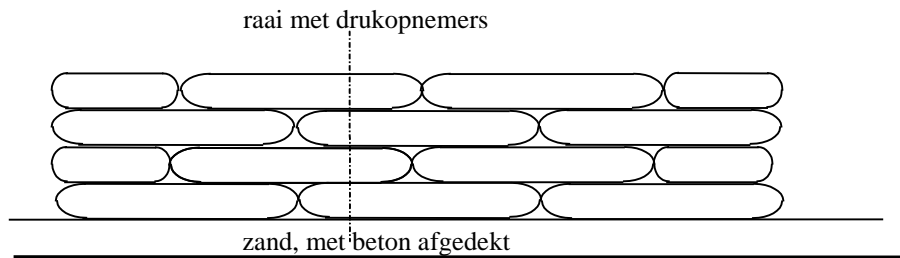


Fig.9a Vooraanzicht van de geocontainerstapeling (schematisch)

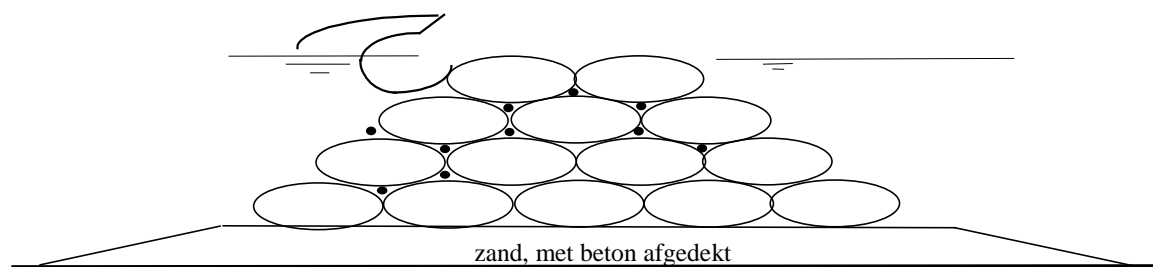


Fig.9b Dwarsdoorsnede van de geocontainerstapeling met locatie van de drukopnemers (schematisch)

De drukfluctuaties als gevolg van de golven is door middel van 10 drukopnemers gemeten. De locaties van deze drukopnemers was gelijk in beide stapelingen en zijn aangegeven in figuur 9. Eén van de drukopnemers was aan de buitenzijde van de stapeling geplaatst en heeft de externe drukfluctuaties geregistreerd. Die drukopnemer heeft als referentie gediend om de naar buiten gerichte drukkrachten te kunnen kwantificeren die de aandrijvende kracht vormen voor de geotechnische instabiliteit.

Het proevenprogramma met de bijbehorende maten en golfkarakteristieken op prototypeschaal was als volgt (proef 1 tot en met 4 is uitgevoerd met de eerste stapeling en proef 5 tot en met 8 met de tweede stapeling):

proefnummer	waterstand	regelmatige golven		onregelmatige golven	
		H (m)	T (s)	H _s (m)	T _s (s)
1	1,6m boven kruin	2.9	7.2	3.0	7.2
2	1,6m boven kruin	4.5	8.0	3.7	8.3
3	1,6m boven kruin	4.4	9.8	4.2	9.9
4	op kruinhoogte	3.1	9.8	3.4	10.0
5	1,6m boven kruin	2.8	7.2	3.2	7.3
6	1,6m boven kruin	3.8	8.0	4.1	8.2
7	op kruinhoogte	3.4	7.2	3.3	7.3
8	op kruinhoogte	5.0	8.0	4.2	8.2
bezwijkproeven	1,6m boven kruin	5 à 6	9.8, 7.2 & 11.2	-	-

Tabel 3.1 Gemeten golfcondities tijdens de proeven

De hoek van inwendige wrijving werd bepaald door een stapeling van drie geocontainers (2 onder 1 boven) op een horizontaal vlak te leggen, waarna dit vlak langzaam onder een helling werd ingesteld. Met een opstande rand werd verhinderd dat de onderste twee gingen glijden. Uit deze opstelling bleek dat de bovenste geocontainer pas bij een hoek van 45° ging verschuiven.

Deze hoek kan beschouwd worden als de som van de wrijvingshoek φ tussen de geotextielen en een dilatatiehoek ψ in verband met de geaccidenteerde ondergrond. Dus de totale wrijvingshoek $\varphi + \psi = 45^\circ$.

Onder de golfcondities die tijdens de uitgevoerde proeven werden ingesteld is geen instabiliteit opgetreden van de stapeling geocontainers. Om die reden is aan het einde van de serie proeven getracht instabiliteit op te laten treden in de tweede stapeling geocontainers. Er zijn drie bezwijkproeven uitgevoerd met een golfhoogte van 25 à 30 cm en golfperiode van achtereenvolgens 2,2, 1,6 en 2,5 s. Ondanks de hoge golven en de lange golfperioden trad er geen instabiliteit op, waardoor het bezwijkgedrag helaas niet bestudeerd kon worden. De resultaten worden besproken in de hoofdstukken 5 en 6.

De drukmetingen tijdens de proeven met regelmatige golven zijn nader uitgewerkt en geanalyseerd in hoofdstuk 5.

De gedetailleerde rapportage van deze proeven is te vinden in [Lambeek e.a. 2002].

3 Plaatsingsnauwkeurigheid

3.1 Waargenomen fenomenen

3.1.1 Afwijking in dwarsrichting bij vlakke bodem en grote waterdiepte

De bepalende factor voor de positionering van een geocontainer op een relatief vlakke bodem is het afzeilgedrag tijdens het storten uit een splijtbak. De geocontainer blijkt niet altijd recht naar beneden te vallen om vervolgens onder de splijtbak tot stilstand te komen. Uit het onderzoek op kleine schaal (in de Venetiëfaciliteit) is gebleken dat bij aanwezigheid van stroming en/of golven geocontainers bij het storten op ca. 16 m waterdiepte eerst recht naar beneden vallen, maar in de buurt van de bodem hun grote verticale snelheid kunnen omzetten naar een horizontale snelheid (zie figuur 10).

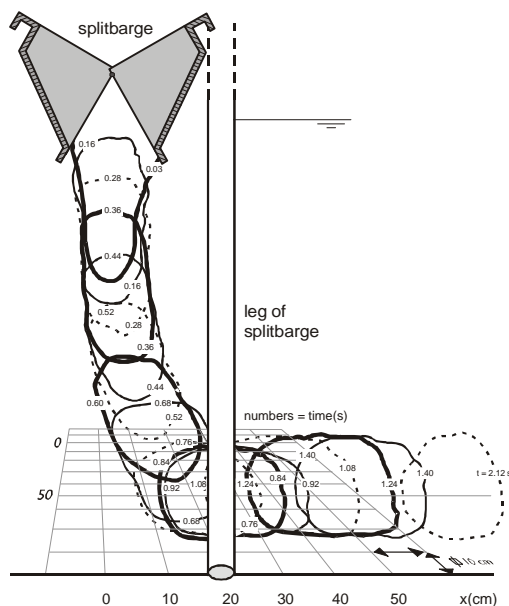


Fig.10 Baan van vallen de geocontainer tijdens een proef met stroming (op basis van video-opnamen)

Het resultaat is dat de geocontainer niet recht onder de splijtbak tot stilstand komt, maar tot vele meters daarvandaan, zoals blijkt uit het overzicht van de belangrijkste resultaten van de proevenseries, waarbij de geocontainer op een vlakke bodem is gestort. Deze zijn weergegeven in onderstaande tabel:

GEOLON 15	Verplaatsing dwars op lengterichting (m)				Rotatie (°)			
	Gemiddelde		Spreiding		Gemiddelde		spreiding	
	H = 0 m	H = 1.2 m T = 5,8 s	H = 0 m	H = 1.2 m T = 5,8 s	H = 0 m	H = 1.2 m T = 5,8 s	H = 0 m	H = 1.2 m T = 5,8 s
u = 0 m/s	0.8	4.6	0.8	4.0	0	0	3	9
u = 0.5 m/s	10.6	16.6	6.4	7.0	-10	2	12	10
u = 1.0 m/s	22.6	24.6	3.6	1.2	-2	-5	17	20

Tabel 8 Overzicht van belangrijkste proefresultaten storten in Venetiëfaciliteit (prototypematen uitgaande van schaal 1:20)

In deze tabel is gebruik gemaakt van de volgende symbolen:

H = golfhogte (regelmatige golven, haaks op de lengte-as van de splijtbak) (m)

T = golfteriode (s)

u = stroomsnelheid (gemiddeld over de verticaal, haaks op de lengte-as van de splijtbak) (m/s)

Tijdens de proeven is er geen relatie gevonden tussen het al dan niet scheef vallen van de geocontainer (met de ene kop lager dan de andere) en de mate van afzeilen.

Ook in het kleinschalige modelonderzoek in de relatief kleine Brutusbak is bij één van de proeven geconstateerd dat de geocontainer de neiging had om af te zeilen (zonder golven of stroming).

Bij het storten van geocontainers in het prototype (vooral bij de Kandiadam) zijn horizontale afwijkingen ook veelvuldig geconstateerd, terwijl daar geen golven of stroming aanwezig waren. Afhankelijk van de diepte werd bij de containers gestort ten behoeve van de Kandiadam een standaardafwijking van 3,5 m tot ruim 6 m gevonden voor de horizontale verplaatsingen loodrecht op de as van de container. Dit is aanzienlijk meer dan is waargenomen in de kleinschalige proeven in de Venetiëfaciliteit zonder golf. Het is echter van belang te vermelden dat de afwijkingen daar veel groter waren in het allereerste begin toen het nog niet gelukt was om de modelcontainertjes gelijkmatig te vullen. De bij Kandia gevonden standaardafwijking is, qua orde van grootte, gelijk aan het resultaat van de modelproeven in de Venetiëfaciliteit bij golf en/of een stroom. Die grote standaardafwijking hangt wellicht samen met de ongelijkmatige vulling van de container, zoals in paragraaf 3.2 uiteengezet zal worden.

Uit de (niet erg precieze) peilingen in het Cornelis Douwes kanaal werd geconcludeerd dat de plaatsingsnauwkeurigheid daar slechts 1 m tot 2 m bedroeg. Er zijn weinig geocontainers buiten het profiel terechtgekomen.

3.1.2 Afwijking in dwarsrichting bij vlakke bodem en kleine waterdiepte

De situatie wordt beduidend gunstiger als de waterdiepte geringer is. Bij het storten van geocontainers op relatief ondiep water in Australië (waterdiepte van 5 à 10 m) werd een goede plaatsingsnauwkeurigheid gerealiseerd. Hetzelfde is geconstateerd in Duitsland bij Krautsand en Elbe project (500 geocontainers). Dit is in overeenstemming met onderstaande figuur.

De invloed van de waterdiepte op de mate van afzeilen komt ook duidelijk tot uiting bij de geocontainers van de Kandiadam, die in dit onderzoek nader geanalyseerd zijn. Er zijn gegevens beschikbaar van de plaatsingsnauwkeurigheid bij een waterdiepte van 15 tot 22 m. In figuur 11 is te zien dat de plaatsingsnauwkeurigheid (standaardafwijking van de uiteindelijke locatie) sterk afneemt als de waterdiepte minder wordt.

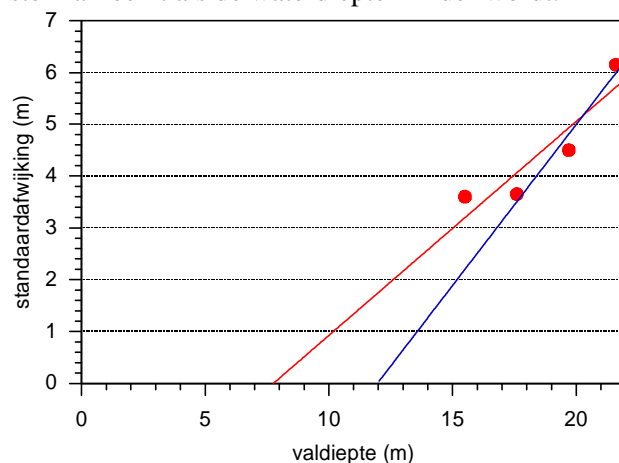


Fig.11 Standaardafwijking van positie geocontainers als functie van de valdiepte met 2 mogelijke regressielijnen

3.1.3 Afwijking in dwarsrichting bij storten op een stapeling

Het afzeilen maakt het uitermate moeilijk om op een grote waterdiepte de geocontainers precies op de gewenste plaats op de bodem te krijgen. De situatie wordt beduidend gunstiger als er reeds geocontainers op de bodem liggen (waardoor het bodemoppervlak niet meer vlak is). Tijdens het modelonderzoek in de Venetiëfaciliteit is dit duidelijk geconstateerd. Zodra er een laag geocontainers op de bodem ligt, bleek het bij vrij grote stroomsnelheid en golven (prototypewaarden: $u = 0,5$ m/s en $H = 1,2$ m) goed mogelijk om een vrij steile dam op te bouwen met taluds tot 1:1,5. De gestorte geocontainers kwamen daarbij goed op de gewenste positie terecht (zie figuur 4).

Een groot deel van de geocontainers bij de Kandiadam is eveneens op de reeds eerder gestorte geocontainers gestort. Voor die geocontainers was de bodem niet meer vlak, al moet vermeld worden dat aan de zijde van de toekomstige dam steeds snel zand is aangebracht tegen de juist gestorte geocontainers aan.

Verder zou de relatief kleine openingsnelheid van de splijtbak van invloed kunnen zijn (ca 70 s bij Kandiadam, in vergelijking tot ca 20 s in modelonderzoek (omgerekend naar prototype)). Tijdens de modelproeven in de Venetiëfaciliteit is vastgesteld dat het langzamer openen van de splijtbak het afzeilen versterkt (grotere plaatsingsnauwkeurigheid)

3.1.4 Afwijking in langsrichting

Bij vrijwel alle proeven in de Venetiëfaciliteit beperkte het probleem van de plaatsingsnauwkeurigheid zich tot een ongewenste verplaatsing in de richting haaks op de lengte-as van de splijtbak.

Uit de metingen aan 4 geocontainers van de Kandiadam bleek de plaatsingsnauwkeurigheid in de langsrichting ongeveer even groot als die in dwarsrichting. Mogelijk hangt dat samen met het verschijnsel dat bij de eerste geïnstrumenteerde container werd waargenomen, namelijk dat voor- en achterzijde niet gelijk loskwamen uit de splijtbak (zie figuur 7), waardoor de container al een flinke scheefstand had bij het begin van de val. Het kan ook samenhangen met het verschijnsel dat bij de derde geïnstrumenteerde proef werd waargenomen. De betreffende geocontainer kwam wel horizontaal uit de splijtbak, maar ontwikkelde tijdens de val toch ook enige scheefstand. Beide afwijkingen hangen wellicht samen met de ongelijkmatige vulling van de container of ongelijkmatige verdeling van de lucht. Daarover meer in de volgende paragraaf.

3.2 Verklaring en modellering

Tijdens de proeven in de Venetiëfaciliteit is duidelijk naar voren gekomen dat de geocontainers soms recht onder de splijtbak op de bodem terecht komen, maar dikwijls ook op een grote afstand daarvandaan. Bij de nadere analyse van de video-opnamen, die tijdens de proeven zijn gemaakt, is gebleken dat de geocontainers tijdens het vallen vaak een kleine rotatie ondergaan om hun lengte-as. Wellicht ontstaat dit al bij het verlaten van het beun, als de stroming nog alleen aangrijpt op de onderste helft van de geocontainer. Maar ook door een kleine asymmetrie in de geocontainer kan tijdens het vallen een rotatie om de lengte-as ontstaan.

Deze rotatie om hun lengte-as lijkt de aanleiding te zijn voor het ontstaan van een asymmetrie in de door het vallen veroorzaakte stromingsdruk tegen de geocontainers. Die asymmetrie zorgt er voor dat er een horizontale kracht op de geocontainer werkt die een steeds grotere horizontale snelheid veroorzaakt. Hierdoor kan de verticale snelheid in feite worden omgezet in een horizontale beweging (zie figuur 10). Zodra de vallende geocontainer de bodem nadert, wordt al

het water tussen de geocontainer en de bodem weggeperst. Dit gaat gepaard met een grote drukverhoging lokaal onder de geocontainer, die ook sterk bijdraagt aan het afremmen van de verticale snelheid van de geocontainer. Als de geocontainer eenmaal bij de bodem aankomt, zal deze nog geruime tijd vooruitschuiven over de bodem.

Er zijn twee proeven uitgevoerd waarbij de geocontainer gestort is op een bodem die ruwer was gemaakt door er kippengaas op te monteren (ruw, maar vlak). Het blijkt dat de verplaatsing tijdens deze proeven niet anders was dan bij de proeven met een gladde bodem. Dit resultaat sluit aan op de veronderstelling dat het grootste deel van de horizontale verplaatsing plaatsvindt als de geocontainer met 'aqua planing' op een vrij dun waterlaagje over de bodem scheert, zonder daarmee in direct contact te zijn.

De numerieke simulatie van het valproces laat dezelfde processen zien als geconstateerd zijn op basis van de video-opnamen van de modelproeven (zie figuur 10). Hierdoor is het mogelijk om het numerieke model te gebruiken om de invloed van bepaalde parameters te onderzoeken. Helaas is het nog niet gelukt om ook het tweede deel van het valproces, namelijk het in aqua planing over de bodem scheren en vervolgens tot stilstand komen, goed in de simulatie te verwerken. Daardoor zal de invloed van de parameters eerder afgeleid moeten worden uit de invloed die deze parameters volgens de numerieke simulatie hebben op de horizontale snelheid op het moment dat de geocontainer bij de bodem aankomt dan uit de invloed op de uiteindelijk plaats.

Er is niet alleen van een vallende geocontainer in het schaalmodel een numerieke simulatie gemaakt, maar ook van een grote geocontainer in het prototype. De resultaten van deze berekening zijn ongeveer gelijk aan de volgens Froude verschaalde resultaten uit het schaalmodel, hetgeen de veronderstelling ondersteunt dat extrapolatie volgens de Froudeschaal gerechtvaardigd is.

Desondanks is er een groot verschil gebleken in de mate van afzeilen in het schaalmodel en bij de Kandiadam. Bij een waterdiepte van 15 à 20 m zonder stroming en golven is volgens het modelonderzoek een gemiddelde verplaatsing als gevolg van het afzeilen van ongeveer 0,5 a 1 m te verwachten, terwijl dat bij de Kandiadam 2 à 5 m was. Er is geen sluitende verklaring gevonden voor dit grote verschil. Mogelijke bijdragen aan het verschil zijn:

- De vulling in het prototype zou wat minder gelijkmatig kunnen zijn dan in het schaalmodel. De studie naar het proces van het loskomen uit de splijtbak laat zien dat dit proces erg gevoelig is voor parameters als de dichtheid, de vullingsgraad en de wrijving langs de wand. Zie deel 4 van [Klein Breteler e.a. 2002]. Dat impliceert dat een niet volledig gelijkmatig gevulde container ongelijkmatig, dus asymmetrisch loskomt uit de splijtbak (rotatie om de lengte-as). Een vergelijkbare asymmetrie zal ontstaan bij golven of stroom. Naarmate de asymmetrie meteen al bij het begin van het valproces sterker is, zal de container verder afzeilen, althans volgens het rekenmodel. Overigens zijn dergelijke details moeilijk aan de hand van de video-waarnemingen in de Venetiëfaciliteit te bevestigen.
- De geocontainers in Kandia werden gestort op de rand van een ophoging, waardoor sommige wellicht van het onderwatertalud zijn afgegleden.
- De relatief kleine openingsnelheid van de splijtbak.

Behalve een rotatie om de langsas van de container, is bij Kandia ook vaak een andere rotatie geconstateerd: het vooreinde kwam eerder of later los uit de splijtbak dan het achtereinde. Zie figuur 7. Ook als de geocontainer nog horizontaal was bij het loskomen van de splijtbak, kon hij scheef op de bodem terecht komen. Dat bleek uit de derde veldmeting. Tijdens het modelonderzoek is verder vastgesteld dat er geen relatie is tussen deze rotatie en de mate van afzeilen. Zie deel 1 van [Klein Breteler e.a. 2002].

Dat het vooreinde eerder of later loskwam kan goed verklaard worden uit een ongelijkmatige vulling van de container, met name ongelijkmatige volume verdeling of ongelijkmatig

verdeelde schuifsterkte door dichtheidsverschillen. Zie de studie naar het proces van loskomen uit de splijtbak in deel 4 van [Klein Breteler e.a. 2002]. Zie ook paragraaf 4.1.

Ongelijkmatige vulling, en met name ongelijkmatig volumeverdeling soortelijke massa van het zand door ongelijkmatige verdeling van de lucht en/of het poriëngehalte, kan ook de rotatie om diezelfde as verklaren in de gevallen dat de rotatie begon nadat de container losgekomen was van de splijtbak. Uit berekeningen blijkt namelijk dat de voorkant veel sneller valt dan de achterkant als de soortelijke massa iets groter is:

Ten einde de invloed van de soortelijke massa van de geocontainer (verband houdend met het luchtgehalte) te onderzoeken zijn enige simulaties uitgevoerd met een steeds andere soortelijke massa, namelijk respectievelijk 2100 kg/m^3 , 1800 kg/m^3 en 1500 kg/m^3 . Zie deel 2 van [Klein Breteler e.a. 2002]. Volgens de berekeningen bleek dat de verticale snelheid vlak bij de bodem bij 2100 kg/m^3 ongeveer 20% groter was dan bij 1800 kg/m^3 , terwijl die bijna 20% lager was bij 1500 kg/m^3 . Dat was te verwachten en komt redelijk overeen met de formule voor de valsnelheid die in het verleden door den Adel was afgeleid. Zie paragraaf 6.3.1.1 van [Pilarczyk 2000] en nog iets beter met de aangepaste versie die weergegeven is in [Bezuijen 2001].

Uit de berekeningen is echter ook gebleken dat, ten opzichte van de geocontainer met $\rho_b = 1800 \text{ kg/m}^3$, de zware geocontainer een 5% *kleinere* horizontale snelheid krijgt bij het aankomen bij de bodem en de lichte geocontainer een 9% *grotere* horizontale snelheid. Op grond hiervan kan aangenomen worden dat een grote soortelijke massa een iets kleinere verplaatsing te zien zal geven, maar de verschillen zijn waarschijnlijk niet zo groot.

3.3 Conclusies over plaatsingsnauwkeurigheid

Aan de hand van de resultaten van het modelonderzoek en het onderzoek bij het storten in het prototype is gebleken dat geocontainers de neiging kunnen hebben om af te zeilen tijdens het storten. De mate van afzeilen neemt toe bij toenemende waterdiepte en bij toenemende stroomsnelheid en golfhoogte. Als derhalve de nauwkeurigheid van de positionering belangrijk is, dan moeten er beperkingen gesteld worden ten aanzien van de waterdiepte, stroomsnelheid en golfhoogte.

De volgende conclusies kunnen uit het onderzoek worden getrokken:

- (a) Tot een waterdiepte van ongeveer 10 m is bij het storten van geocontainers van ca 300 m^3 een hoge plaatsingsnauwkeurigheid mogelijk. Dan is ook bij een stroming van 0,5 m/s en golven van $H_s = 1,2 \text{ m}$ een steile stapeling met hoogte van vier geocontainers mogelijk met taluds van ongeveer 1:1,5.
- (b) Stroming heeft een grotere invloed op de plaatsingsnauwkeurigheid dan golven.
- (c) Bij een vlakke bodem met een waterdiepte van 15 à 20 m zonder stroming en golven is, als gevolg van het afzeilen, een horizontale verplaatsing met een standaardafwijking van ongeveer 1 tot 3 m te verwachten, mits de geocontainer mooi gelijkmatig is gevuld. Als de geocontainer gestort wordt op de niet vlakke ondergrond van andere geocontainers, is een beduidend grotere nauwkeurigheid mogelijk. Het wordt goed mogelijk geacht om een talud van 1:2 onder deze omstandigheden op te bouwen, hoewel sommige geocontainers mogelijk buiten het beoogde profiel terecht zullen komen. Als de geocontainer niet zeer gelijkmatig gevuld is, is een standaardafwijking van ca 5 m te verwachten.
- (d) Bij een stroomsnelheid van 0,5 m/s en golven tot $H_s = 1,2 \text{ m}$ op een waterdiepte van ca 15 m moet rekening gehouden worden met het aanzienlijk afzeilen van de geocontainers op een vlakke bodem. De gemiddelde verplaatsing tijdens het storten kan bij een combinatie van deze stroming en golven oplopen tot ongeveer 25 m, met een standaardafwijking van ca 20 m. De mate van het afzeilen is voornamelijk een gevolg van de stroming haaks op de lengte-as van de splijtbak, en minder als gevolg van de golven. Het wordt goed mogelijk geacht

om een talud van 1:3 onder deze omstandigheden op te bouwen, hoewel sommige geocontainers mogelijk buiten het beoogde profiel terecht zullen komen.

- (e) Een uitgekiende stortstrategie op basis van de ervaring van de betreffende aannemer kan aanzienlijk bijdragen aan de kwaliteit van het eindresultaat. Bij het bouwen van een dam zijn vooral de geocontainers in de eerste laag op de bodem het moeilijkste nauwkeurig te plaatsen. Uit de proeven is gebleken dat de verplaatsingen van de geocontainers in de tweede en volgende laag, ondanks de aanwezigheid van stroming en golven, de helft tot een kwart is van de verplaatsingen tijdens het storten van de eerste laag op de bodem.
- (f) Vergeleken bij het 'standaardgeval' van een geocontainer met een dwarsdoorsnede van ca 10 m² gestort op 16 m waterdiepte, neemt de plaatsingsnauwkeurigheid toe als:
 - de waterdiepte kleiner is,
 - de golfhoogte of stroomsnelheid kleiner is,
 - de container en de splijtbak een grotere dwarsdoorsnede hebben,
 - de soortelijke massa van de geocontainer groter is.
 - de geocontainer gelijkmatiger wordt gevuld (met homogeen zand, qua korrelverdeling en watergehalte, en dit gelijkmatig laag voor laag aanbrengen),
 - de splijtbak sneller wordt geopend
 - het oppervlak van de bodem minder vlak is.

4 Belasting geotextiel bij storten uit splijtbak

4.1 Belasting tijdens het openen van de splijtbak

Van de 3 Kandiadam-containers waarbij de meetploeg aanwezig was, scheurden er 2 bij het plaatsen. Eén daarvan betrof een geïnstrumenteerde geocontainer. Het scheuren trad daar al op tijdens het openen van de splijtbak. Vermoedelijk hangt dat samen met het feit dat er een flink tijdsverschil zat (bijna 2 s) tussen het moment waarop de geocontainer loskwam aan de ene zijde van de splijtbak en het moment waarop hij loskwam aan de andere zijde. Dat verschil is waarschijnlijk veroorzaakt door ongelijkmatige belading van de geocontainer.

Ook bij het Cornelis Douwes kanaal project werd in het begin een paar keer geconstateerd dat één uiteinde van de geocontainer eerder los kwam van de splijtbak dan het andere. Het stortproces werd duidelijk beter nadat de vulling werd gereduceerd van 280 tot 250 m³ en door de middensectie iets minder te beladen.

Als de geocontainer vlak voor het volledig loskomen van de splijtbak nog even blijft hangen aan die bak dan moet het geotextiel het hele (onder water) gewicht opvangen (of nog meer als de container ook nog vertraagd). Met een dwarsdoorsnede van 10 m² en een onder water soortelijke gewicht van 9 kN/m³, gaat het om 90 kN/m. Bij gelijkmatige belasting zou het geotextiel belast worden met 45 kN/m.

Bij het vallen op de bodem zal de belasting op het geotextiel in het algemeen hoger zijn dan die tijdens het vallen uit de splijtbak. Maar als de container vlak voor het loskomen van de splijtbak nog even blijft hangen aan één zijde, zal de belasting verre van gelijkmatig zijn en kan daardoor lokaal veel hoger worden.

In deel 4 van [Klein Breteler e.a. 2002] zijn de videobeelden van dit proces bij één van de proeven geanalyseerd. De resultaten zijn vergeleken met de resultaten van het rekenmodel dat beschreven is in hoofdstuk 5 van [de Groot en Bezuijn 1999/2000]. De overeenkomst was redelijk. Daardoor lijkt het rekenmodel voldoende betrouwbaar om conclusies te trekken uit de resultaten van een aantal berekeningen waarbij de invoerparameters werden gevarieerd. Die berekeningen laten zien dat het moment waarop de geocontainer loskomt van de splijtbak, dat wil zeggen de opening waarbij de geocontainer zover uit het beun gezakt is dat geen evenwicht meer gevonden kan worden, wordt vrij sterk beïnvloed door de volgende factoren:

- wrijvingscoëfficiënt tussen beunwand en geotextiel
- de 'overlengte' van geotextiel onderin de splijtbak
- de vullingsgraad van de geocontainer
- de schuifsterkte van het zand van de geocontainer.

De soortelijke massa van het zand blijkt geen significante directe invloed te hebben op dat moment. Dat wil echter niet zeggen dat de factoren die de soortelijke massa grotendeels bepalen, te weten verzadigingsgraad, korrelverdeling en relatieve dichtheid, geen invloed zouden hebben. De sterkte van het zand wordt namelijk in hoge mate door diezelfde parameters bepaald.

4.2 Belasting bij vallen op de bodem

4.2.1 Algemeen

Bij geen van de modelproeven is waargenomen dat het geotextiel bezweek. Dat was ook niet te verwachten, omdat de sterkte op schaal relatief veel groter is dan in prototype.

De belasting op het geotextiel bij het vallen op de bodem in de Brutusbak, zoals afgeleid uit de daar gemeten drukpieken en de geschatte kleinste kromtestraal, bedroeg, teruggerekend naar prototype, 40 tot 70 kN/m. Dat komt overeen met de halve treksterkte van een veel toegepast geotextiel en bijna de gehele treksterkte van de gebruikelijk toegepaste naden. Het is dus op basis van deze resultaten niet verbazingwekkend dat er regelmatig schade aan een geocontainer ontstaat tijdens het vallen op de bodem.

Bij Kandia zijn drukpieken van dezelfde orde van grootte gemeten, al is aannemelijk dat die grotendeels zijn opgevangen door schuifspanningen in het korrelskelet.

4.2.2 Valsnelheid bij de bodem, v_b

De snelheid waarmee een geocontainer met een dwarsdoorsnede $A_f \approx 10 \text{ m}^2$ met praktisch verzadigd zand (soortelijke massa $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$) op de bodem komt bij een waterdiepte van 16 m, bedraagt $v_b \approx 5,5 \text{ m/s}$. Overeenkomstig de formules die den Adel heeft afgeleid, vermeld in paragraaf 6.3.1 van [Pilarczyk 2000], is die snelheid ongeveer recht evenredig met de wortel uit het produkt van de diameter van de geocontainer en het soortelijk gewicht onder water, althans bij gelijk blijvende waterdiepte. Die valsnelheid is bijna gelijk aan de valsnelheid bij oneindig grote waterdiepte, v_∞ .

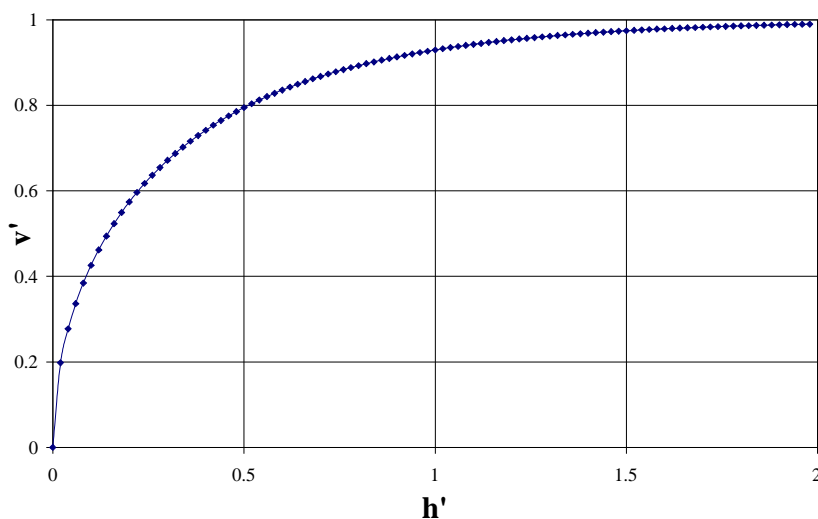


Fig.12 Invloed van dimensieloze waterdiepte op dimensieloze snelheid bij vallen naar de bodem

Pas bij veel kleinere waterdiepte neemt de valsnelheid flink af. De invloed van de waterdiepte wordt bepaald door de dimensieloze waterdiepte h' , die het quotient is van de effectieve bodemdpte en een karakteristieke lengtemaat ($v_\infty \tau$). De effectieve bodemdpte is de diepte van de bodem onder de onderkant van de geocontainer op het moment van loskomen uit de splijtbak, dus ongeveer de waterdiepte minus éénmaal de wortel uit de dwarsdoorsnede, hier ongeveer $16 \text{ m} - 3 \text{ m} = 13 \text{ m}$. De karakteristieke lengtemaat bedraagt voor geocontainers met $A_f = 10 \text{ m}^2$ en $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ ongeveer 10 m en is rechtevenredig met het product van diameter en soortelijke massa.

De invloed van de waterdiepte is geïllustreerd in figuur 12, overgenomen uit paragraaf 6.3.1 van [Pilarczyk 2000]. Deze grafiek kan nog iets verbeterd worden als voor de karakteristieke tijd τ

formule (3.2) uit [Bezuijen 2001] wordt toegepast. Als $h' > 0,5$, dan is de invloed van de waterdiepte gering: bij grotere waterdiepte wordt de snelheid hoogstens 5% of 10% groter. Pas als $h' < 0,5$ is van een duidelijk invloed sprake: met $h' \approx 0,2$ (voor bovengenoemde geocontainer is dat bij een waterdiepte van $3\text{m} + 0,2 \cdot 10\text{m} = 5\text{m}$) volgt een valsnelheid die ruim de helft bedraagt (voor bovengenoemde container $v_b \approx 0,5 \cdot 5,5 \text{ m/s} \approx 3 \text{ m/s}$); met $h' \approx 0,3$ is die snelheid ca $2/3$.

De bruikbaarheid van deze voorspelling van de valsnelheid is bevestigd door de metingen in de beide schaalmodellen, de metingen in Kandia en het numerieke rekenmodel. Zo bleek bij de Kandia-proef dat de valsnelheid bij de bodem met vrij droog zand ($\rho \ll 1800 \text{ kg/m}^3$) aanzienlijk kleiner was dan met verzadigd zand ($\rho \approx 1800 \text{ kg/m}^3$).

4.2.3 Valenergie

Uit de valsnelheid en de massa van de geocontainer volgt de kinetische energie van de vallende container ofwel de valenergie. Zoals uiteengezet in paragraaf 6.3.2.2 van [Pilarczyk 2000] bedraagt deze per eenheid van lengte:

$$E_{\text{val}} = 0,5\rho A_f v_b^2$$

waarin:

- A_f : oppervlak van de dwarsdoorsnede [m^2]
- E_{val} : valenergie per eenheid van lengte [J/m]
- ρ : soortelijke massa van de geocontainer [kg/m^3]

In het voorbeeld van $A_f = 10 \text{ m}^2$, $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ en $v_b = 5,5 \text{ m/s}$ geldt: $E_{\text{val}} = 272 \text{ kJ/m}$

4.2.4 Energiedissipatie in het algemeen

Uit berekeningen gerapporteerd in de paragrafen 5.8.3 en 7.3 van [de Groot en Bezuijen 1999/2000] volgt dat die energie gewoonlijk op twee manieren gedissipeerd wordt: enerzijds door de rek van het geotextiel, anderzijds door de deformatie van het zand in de container. Als de bodem uit zeer slappe klei of veen bestaat, zal een significant deel van de valenergie ook nog gedissipeerd worden door een derde component: de deformatie van de bodem. Zo'n bodem wordt hier niet verder beschouwd.

Energiedissipatie door vervorming van het zand, begint zodra de container de bodem raakt en begint te vervormen. Aangezien de container op dat moment meestal een grotere hoogte heeft dan breedte, begint de energiedissipatie door rek van het geotextiel iets later, namelijk zodra de breedte van de container door het afplatten van het zandlichaam zo groot wordt dat de omtrek van het zandlichaam groter wordt dan de omtrek van het geotextiel, *S*. Volgens een veilige benadering kan men echter stellen dat beide componenten min of meer gelijktijdig optreden en gelijktijdig hun maximum bereiken, bijvoorbeeld als de geocontainer een zodanige vervorming heeft ondergaan dat de gemiddelde breedte $2x$ de hoogte is. Is de valenergie al bij een kleinere vervorming volledig gedissipeerd dan bereiken beide componenten een fractie van het maximum. Dus:

$$\text{frac} \cdot E_{d_{\text{contsoil}}} + \text{frac} \cdot E_{d_{\text{geotextile}}} = E_{d_{\text{val}}}$$

Geen falen als:

$$\text{frac} < 1$$

waarin:

- $E_{d_{\text{contsoil}}}$: maximum door de containergrond te dissiperen energie
- $E_{d_{\text{geotextile}}}$: maximum door het geotextiel te dissiperen energie
- frac : verhouding van de valenergie tot het maximum van de door beide componenten samen te dissiperen energie

Al de componenten worden hier uitgedrukt in energie per eenheid van lengte. Dat is geen probleem als de geocontainer praktisch vlak op de bodem terecht komt. Vaak botst een

container echter eerst met de voor- of achterkant op de bodem. Daardoor moet een groot deel van de valenergie van de gehele container gedissipeerd worden door het geotextiel en het zand in een deel van de container. De per eenheid van lengte te dissiperen energie wordt dan al gauw tweemaal zo groot.

4.2.5 Energiedissipatie door het geotextiel

De grootte van deze component is te berekenen met de formules gepresenteerd in paragraaf 6.3.2.2 van [Pilarzcyk 2000] en in paragraaf 5.8.3 van [de Groot en Bezuijen 1999/2000]:

$$Ed_{\text{geotextiele}} = 0,5 \cdot S \cdot T_m \cdot \epsilon_m$$

waarin

$Ed_{\text{geotextiele}}$: maximaal door geotextiel te dissiperen energie per eenheid van lengte [kJ/m]

S : omtrek van de geocontainer [m]

T_m : de maximale trekkracht van het geotextiel [kN/m]

ϵ_m : de maximale rek van het geotextiel [-]

T_m en ϵ_m zijn de maximale waarden van trekkracht en rek die acceptabel zijn. Zij zijn in ieder geval kleiner dan de waarden bij breuk. Maatgevend zijn echter veelal de naainaden en sluiting. Als de treksterkte van de naden de helft is van die van het eigenlijke geotextiel, is ϵ_m veelal ook de helft van de waarde voor het hele geotextiel en de dissipeerbare energie dus een kwart.

Bij het geotextiel dat toegepast werd bij Kandia, bedroeg de treksterkte ca 120 kN/m. De bijbehorende rek was $\epsilon_m \approx 0,14$. Wellicht was de waarde van $T_m \approx 60$ kN/m. De bijbehorende rek was $\epsilon_m \approx 0,07$. De omtrek bedroeg $S = 17$ m. Zodoende bedroeg $Ed_{\text{geot}} \approx 36$ kJ/m. Dat is ongeveer 15% van de valenergie. Als de grond in de container geen energie had kunnen dissiperen, zoals indien de grond uit slib had bestaan (met gelijk onder water gewicht), dan was het geotextiel zeker bezwaken.

Er is in Nederland praktisch alleen ervaring met de toepassing van geweven geotextielen. ‘Non-wovens’ hebben het voordeel dat ze veel meer rekken voordat ze scheuren. Aan de andere kant is de treksterkte in het algemeen veel minder. Maatgevend is het product van beide, de waarde van $T_m \cdot \epsilon_m$. Bij een non-woven van dezelfde zwaarte (400 tot 500 gr/m²), zijn non-wovens met een treksterkte van ca 15 kN/m en een rek van 110% en non-wovens met een treksterkte van ca 30 kN/m en een rek van 60%. Als ook hier de naainaden slechts de helft van de treksterkte kunnen opnemen en de rek dan ook de helft is, volgt voor beide non-wovens praktisch dezelfde waarde van Ed_{geot} als voor het geweven geotextiel.

4.2.6 Energiedissipatie door het zand in de container

Uit globale berekeningen volgens paragraaf 3.2.2 van [Bezuijen 1999] volgt dat de valenergie al snel te groot is om volledig geabsorbeerd te worden door rek in het geotextiel. Gelukkig bereikt de component voor energiedissipatie Ed_{contsoil} veelal een flinke waarde. De grootte van die component is te berekenen met de formules gepresenteerd in paragraaf 5.8.3 van [de Groot en Bezuijen 1999/2000]:

$$Ed_{\text{contsoil}} \approx 2 \cdot \sigma'_i \cdot \tan \phi \cdot \sqrt{A_f} (\sqrt{A_f} - h_e)$$

waarin

A_f : oppervlak van de dwarsdoorsnede [m²]

Ed_{contsoil} : maximaal door zand in container geabsorbeerde energie per eenheid van lengte [kJ/m]

h_e : uiteindelijke hoogte van de container als deze op de bodem ligt [m]

h_w : waterdiepte [m]

ρ_w : soortelijke massa van het water [kg/m³]

σ'_i : gemiddelde korrelspanning in het zand in de container [N/m²]

ϕ : hoek van interne wrijving van het zand in de container [-].

De grootte van deze component is alleen significant bij een hoge waarde van de korrelspanning σ'_i en de wrijving die dan tussen de zandkorrels optreedt. Uit de metingen in de Brutusbak en bij de Kandiadam-geocontainers volgt dat de korrelspanning onder bepaalde omstandigheden flink kan toenemen tijdens de val, waardoor het vermogen van het zand om een significant deel van de valenergie te absorberen groot is. Twee omstandigheden kunnen worden onderscheiden: een situatie waarbij het zand min of meer volledig verzadigd is, en één waarbij nog veel lucht aanwezig is in de poriën.

In het geval dat het poriënwater (praktisch) verzadigd is, kan er een korrelspanning ontstaan met de orde van grootte van $\sigma'_i \approx 30$ tot 100 kN/m^2 . Die wordt veroorzaakt door dilatantie, de neiging van het korrelskelet in volume toe te nemen bij flinke vervorming en de daarbij behorende neiging water aan te zuigen. Door de snelheid van vervorming en de onmogelijkheid snel water in de poriën te laten stromen, ontstaat er een onderspanning in het water. Voorwaarde voor dilatantie is een voldoende vaste pakking van het zand. Het is niet helemaal duidelijk of dat altijd het geval zal zijn. De kans hierop is het grootst is als het zand weinig fijne deeltjes bevat: percentage kleiner dan $63 \mu\text{m}$ kleiner dan 20%.

Bij de Brutusbakproef waarbij dit fenomeen kon optreden, was deze energiedissipatie component zo groot dat de belasting op het geotextiel, teruggerekend naar prototype, overeen kwam met de halve treksterkte van een geotextiel van de gebruikelijke zwaarte. Zonder deze component was dat geotextiel zonder twijfel bezweken. De waterspannings- en totaalspanningsmeters bij de eerste Kandiadamproef, die met praktisch verzadigd zand, leverden een beeld op dat sterk leek op dat in de overeenkomstige Brutusbakproeven. Ook daar een significante piek in de korrelspanningen op het moment van vallen op de bodem.

Als er daarentegen lucht in de poriën zit (onverzadigd zand), zal σ'_i ook een significante grote waarde bereiken, dank zij het 'Bezuijen effect'. Dit effect kan als volgt worden samengevat. Met overal in het poriënwater tenminste enige procenten lucht, geldt bij benadering: $\sigma'_i \approx \rho_w g h_w$. Zie formule (5.35) in [de Groot en Bezuijen 1999/2000]. Tijdens het vallen naar de bodem neemt de buitenwaterdruk toe. Die toegenomen druk heerst dan ook in het zand. De toename zal gedeeltelijk bestaan uit een toename van de korrelspanning en gedeeltelijk uit een toename van de poriënwaterdruk. Bij 1% of meer lucht in de poriën is het poriënwater veel minder stijf dan het korrelskelet, zelfs als dat een losse pakking heeft. Daardoor neemt de korrelspanning bijna evenveel toe als de externe waterdruk en blijft de poriënwaterdruk binnenin de geocontainer praktisch gelijk.

Dat is duidelijk geconstateerd bij de Brutusbakproef met een in ondoorlatend plastic ingepakte modelgeocontainer. Dit was echter een tamelijk kunstmatige situatie. De afmetingen van de geocontainer waren te klein om te bewijzen dat het 'Bezuijen-effect' ook plaats vindt bij een geocontainer van normale grootte.

Maar gezien de schaalregels die gelden voor doorlatendheid en valsnelheid, mag verwacht worden dat de buitenste decimeters zand in een geocontainer van normale grootte ongeveer hetzelfde effect hebben als het ondoorlatend plastic bij de modelcontainer: er zal op prototypeschaal wel water de poriën instromen door het grote verschil tussen buitenwaterdruk en poriënwaterdruk binnenin. Maar die hoeveelheid blijft beperkt, dank zij de hoge valsnelheid, de beperkte doorlatendheid van het zand en de grote afmetingen van de container.

Dat lijkt bevestigd te zijn bij Kandia. Want de waterspannings- en totaalspanningsmeters bij de derde Kandiadamproef, die met relatief veel lucht in het zand, leverden een beeld op dat sterk leek op dat in de Brutusbakproef met ondoorlatend plastic.

In het voorbeeld van $A_f = 10 \text{ m}^2$, $h_e = 0,6\sqrt{A_f} = 1,9 \text{ m}$, $\phi = 30^\circ$ en $\sigma'_i = \rho_w g h_w = 10 \text{ kN/m}^3 \cdot 1,9 \text{ m} = 19 \text{ kN/m}^2$, geldt: $E_{d_{\text{contsoil}}} = 740 \text{ kJ/m}$. Dat is op zich al meer dan de valenergie, zodat $\text{frac} <$

1, de geocontainer minder zal vervormen dan nodig voor de maximale energieabsorptie en het zand meer energie zal absorberen dan het geotextiel.

Het effect vereist de toepassing van droog zand. Bij het laden van de splijtbak zal het onderste deel van het zand echter zo goed als verzadigd raken. Toepassing van droog zand heeft ook het voordeel dat het onder water gewicht van de geocontainer kleiner is, waardoor valsnelheid en valenergie kleiner zijn dan bij toepassing van verzadigd zand.

4.2.7 Belasting op eerder geplaatste geocontainer

Bij de tweede Kandiaproef werd een nieuwe container gestort op de reeds eerder geplaatste, beïnstroomde container. Overeenkomstig de verwachting bleek de belasting die de reeds eerder geplaatste geocontainer ondervond toen de volgende container erbovenop werd gestort, veel lager te zijn dan de belasting die de container had ondervonden toen hij zelf gestort werd.

4.3 Conclusies over belasting geotextiel bij storten uit splijtbak

- (a) In het verleden was aangetoond dat de zware belasting van het geotextiel geen belemmering hoeft te zijn voor een economische constructie. Daarom had dit probleemgebied een lagere onderzoeksprioiteit gekregen. De recente praktijkervaringen laten echter zien dit onder bepaalde omstandigheden nog steeds een serieus probleem kan zijn.
- (b) Het uitgevoerde experimentele onderzoek heeft, aansluitend op de daarvoor ontwikkelde theorieën, een belangrijke bijdrage geleverd aan het inzicht in het vermogen van het zand om energie te absorberen bij het vallen op de bodem en daarmee het overbelasten van het geotextiel te voorkomen.
- (c) Er zijn nu redelijk betrouwbare rekenmodellen beschikbaar om het hele proces te kwantificeren en daarmee de invloed van allerlei omgevings- en ontwerpparameters op de belasting te voorspellen.
- (d) Met geocontainers van ca 300 m³, geotextiel met een nominale treksterkte van 120 kN/m en een waterdiepte van ca 15 m, zou het geotextiel bij zorgvuldige uitvoering niet behoeven te bezwijken, mits het zand een laag gehalte aan fijne deeltjes heeft (minder dan 20% deeltjes kleiner dan 63 µm).
- (e) Bij grotere waterdiepte neemt de valenergie slechts in geringe mate toe, waardoor waarschijnlijk dezelfde conclusie getrokken kan worden als voor 15 m.
- (f) Pas bij een waterdiepte kleiner dan ca 8 m treedt voor containers van ca 300 m³ een significante reductie van de valenergie op (zie paragraaf 4.2.2).
- (g) Een grotere veiligheid tegen dit soort overbelasting wordt nog verkregen als het zand grotendeels droog is op het moment dat de splijtbak wordt geopend, waardoor de valsnelheid en de te absorberen val-energie sterk worden gereduceerd.
- (h) Ook bij het loskomen uit de splijtbak kan overbelasting van het geotextiel optreden. Waarschijnlijk kan dat worden tegengegaan als homogeen zand (korrelverdeling en watergehalte) gebruikt wordt en dit gelijkmatig (laag voor laag) wordt aangebracht. Die veronderstelling wordt ondersteund door de analyse van de waarnemingen van het storten van een geocontainer bij Kandia. Uit die analyse bleek dat het moment waarop de container loskomt van de splijtbak vrij gevoelig is voor de wrijvingscoëfficiënt tussen beunwand en geotextiel, de 'overlengte' onderin de geocontainer, de vullingsgraad van de geocontainer en de schuifsterkte van de grond, die op zijn beurt sterk beïnvloed wordt door het gehalte aan fijne deeltjes, de verzadigingsgraad en de relatieve dichtheid.
- (i) Non-wovens kunnen veel meer rek opnemen, maar minder trekkracht dan geweven geotextielen. De zware uitvoeringen van beide types geotextiel kunnen veel energie absorberen.

5 Geotechnische stabiliteit stapeling onder golfaanval

5.1 Waargenomen fenomenen

Geocontainers of geotubes kunnen vrij steil opgestapeld worden tot een dam. Tijdens golfaanval ontstaat een drukverschil tussen de waterdruk in de stapeling en de buitenwaterdruk. Daardoor kan een deel van de stapeling afglijden en kan geotechnische instabiliteit een serieuze bedreiging zijn. Er zijn helaas geen gegevens uit het prototype over de geotechnische stabiliteit van stapelingen.

Met kleinschalige modelproeven (paragraaf 2.6) is onderzocht bij welke golfcondities dit mechanisme gaat optreden. Het onderzoek is uitgevoerd met normaal gevulde geocontainers en extra gevulde geocontainers op een schaal 20. De taludhelling van de stapelingen was respectievelijk 1:3,1 en 1:1,7. Omgerekend naar prototype-omstandigheden zijn de proeven uitgevoerd met een golfhoogte tot 6 m, maar ondanks deze zware belasting is de stapeling niet bezwaken.

Voorts zijn waterdrukmetingen uitgevoerd. Het drukverschil over de buitenste laag geocontainers aan de zeezijde blijkt vooral afhankelijk te zijn van de golfhoogte en van het niveau ten opzichte van de kruin van de stapeling. Het proces dat hierbij belangrijk is, vindt plaats op het moment dat er een golfdal aan de zeezijde van de stapeling zit. Op dat moment is er een lage druk aan de zeezijde, en een hoge druk aan de achterzijde van de stapeling. Dit leidt tot een drukverhang in de stapeling dat groter is naarmate de breedte van de stapeling kleiner is. Juist bovenin is deze breedte klein (slechts twee geocontainers breed) terwijl dit onderin veel groter is (in dit geval ter hoogte van de onderste drukopnemers: vier geocontainers breed). Dit komt ook tot uiting in de volgende empirische relatie die is opgesteld op basis van de proefresultaten:

$$\frac{\Phi}{H} = 0,24 \cdot \ln \left(\frac{D_t}{B_{\text{tot}}} + 0,04 \right) + 0,77 \quad \text{mits } B/D \approx 6$$

B_{tot} = totale horizontale breedte van de stapeling op het beschouwde bepaald niveau (m)

D_t = hoogte van laag geocontainers die zou kunnen afschuiven = haakste afstand van drukopnemer tot taludoppervlak (m)

Φ = verwachtingswaarde van de stijghoogteverschil over buitenste laag geocontainers (m)

H = golfhoogte, bij regelmatige golf (m)

B = breedte van een geocontainer (m)

D = hoogte van een geocontainer (m)

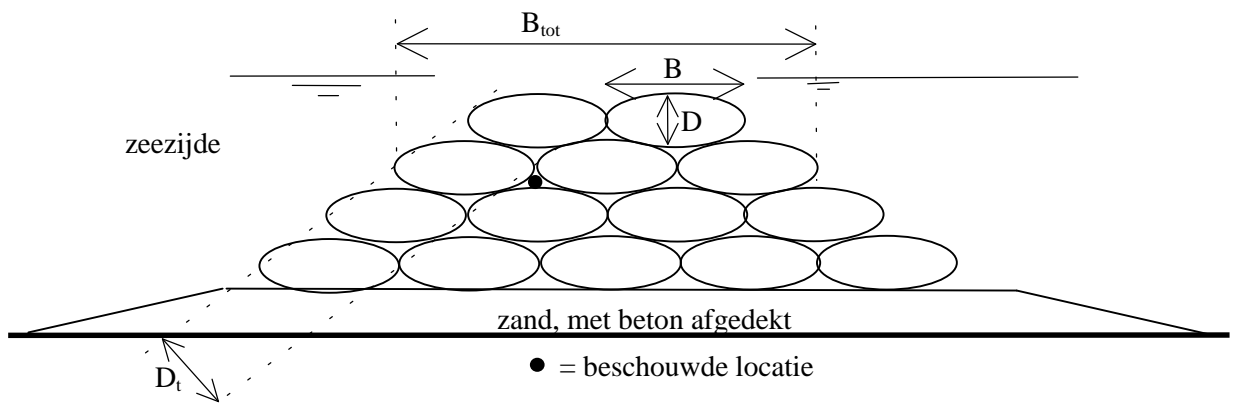


Fig.13 Definitieschets geotechnische stabiliteit

Tijdens de proeven met de tweede stapeling zijn er dikkere geocontainers gebruikt ($B/D \approx 3,5$). Bij deze stapeling bleken de stijghoogteverschillen over de buitenste laag geocontainers aanzienlijk groter te zijn: in de bovenstaande formule dient 0,24 vervangen te worden door 0,31 en 0,77 door 1,00. Met de grotere waarde D_v/B_{tot} leidt dat gemiddeld tot 1,6 maal zo hoge stijghoogteverschillen.

5.2 Verklaring en modellering

5.2.1 Stijghoogteverschil

De uitgevoerde proeven en de in 5.1 gepresenteerde formule geven een indruk van de maximale waarden van het stijghoogteverschil over de buitenste laag geozandelementen als functie van de golfhoogte en de verhouding tussen de dikte van de laag en de breedte van de stapeling. De vraag is hoe representatief die zijn. Daarbij moeten de volgende factoren worden beschouwd:

- het betreft een dammetje van geocontainers zonder zandaanvulling aan de achterzijde
- de kruin van het dammetje reikt tot het stilwaterniveau of daar vlak onder
- de modelstapeling was een veel nettere stapeling dan in de praktijk gerealiseerd kan worden
- de situatie beperkte zich tot één waterdiepte, namelijk, namelijk een waterdiepte van 5 tot 9 m voor geocontainers met een dwarsdoorsnede van respectievelijk 9 m^2 en 12 m^2
- het betrof proeven met regelmatige golven
- het aangegeven stijghoogteverschil betreft de verwachtingswaarde; bij meerdere golven van dezelfde hoogte kunnen ook hogere stijghoogteverschillen optreden
- het betreft schaalproeven, waarbij het zand niet geschaald is.

Ad (a)

Situaties met een zandaanvulling er achter zijn wellicht gunstiger. Die kunnen beschouwd worden als situaties waarvoor $D_v/B_{\text{tot}} = 0$. Volgens de formule geldt daarvoor dat $\Phi/H = 0$.

Ad (b)

Situaties met de kruin op ander niveau zijn vermoedelijk gunstiger. Bij een veel lagere kruin zijn de drukverschillen tussen beide zijden van het dammetje geringer doordat de golf zich meer als een over de dam lopende golf gaat gedragen. Bij veel hogere kruin zijn die drukverschillen nauwelijks groter (belasting), terwijl de dam gedeeltelijk boven water komt, waardoor een gedeelte van het talud onbelast blijft en de stabiliserende werking van het eigen gewicht toeneemt (sterkte).

Ad (c)

Bij een onregelmatige stapeling zullen de stijghoogteverschillen ruimtelijk veel meer verschillen. Er zullen punten zijn waar het stijghoogteverschil veel groter is, maar ook waar die veel lager is. Vermoedelijk zal het gemiddelde over een potentiëel afschuifvlak niet significant verschillen. Opmerking: de gemiddelde doorlatendheid bij een onregelmatige pakking zou wel eens groter kunnen zijn. De invloed van de doorlatendheid lijkt echter gering, doordat het proces in de dam een semi-stationair karakter heeft.

Ad (d)

Bij geringere waterdiepte gaan de golven breken en kunnen daardoor niet zo groot worden in vergelijking tot de maximale golfhoogte tijdens de uitgevoerde proeven van ca 6 m. Bij grotere waterdiepte zal een golf met dezelfde golfhoogte en periode wel iets anders reflecteren en breken, maar de invloed daarvan is waarschijnlijk marginaal.

Ad (e) en (f)

Vertaling naar onregelmatige golven lijkt mogelijk door er van uit te gaan dat het maximale stijghoogteverschil tijdens een storm overeenkomt met de verwachtingswaarde die thuishoort bij de hoogste individuele golf uit een onregelmatig golfveld. Bij relatief diep water ($h/H_s > 4$)

en een Rayleighverdeling zou men dan $H \approx 1,8 \cdot H_s$ moeten invullen. In relatief ondiep water (flauw voorland en $h/H_s \approx 2$) zullen echter juist de grote golven breken en kan men gebruik maken van: $H \approx 1,2 \cdot H_s$. Daartussenin geldt: $H \approx (1,2 \text{ à } 1,8) \cdot H_s$.

Ad (g)

Er zijn nauwelijks schaaleffecten te verwachten, uitgaande van de schaling volgens Froude. Immers, de golfdrukken aan de buitenzijden van het dammetje schalen volgens Froude. De stroming in het relatief ondoorlatende zand speelt geen rol. En de stroming in de 'poriën' tussen de geocontainers zal grotendeels turbulent zijn en dus ook bij benadering volgens Froude verschalen.

5.2.2 Dilatantie effect

Het niet bezwijken van de stapeling geozandelementen ondanks de vrij steile taludhelling en zware golfbelasting, hangt waarschijnlijk mede samen met het feit dat de buitenste geozandelementen niet evenwijdig aan het talud naar beneden kunnen schuiven. Dit is een gevolg van de halfsteens stapeling. Dat geldt vooral voor geozandelementen met een lage vullingsgraad (zoals normaal gevulde geocontainers), en wat minder voor geotubes die normaal veel voller gedaan worden.

Dit effect treedt niet alleen op bij zuiver halfsteensverband, maar altijd als de bovenste of buitenste containers gelegen zijn in de holtes tussen twee geocontainers eronder. Hetzelfde effect treedt ook op bij stenen of zandkorrels en wordt daar 'dilatantie' genoemd. Ook hier kunnen we van dilatantie spreken. De hoek waaronder de geocontainers wegschuiven ten opzichte van de het talud wordt hier dan ook aangeduid met de dilatantiehoek ψ . In het algemeen kan de hoek waaronder een geocontainer die ligt op een laag andere containers wegschuift van het vlak van die laag de dilatantiehoek ψ genoemd worden. De verhouding tussen de langskracht (kracht evenwijdig aan dat vlak) die nodig is om die geocontainer weg te laten schuiven en de normaalkracht, kan de tangens van de 'totale wrijvingshoek' genoemd worden. Die hoek is de som van de wrijvingshoek ϕ tussen de geotextielen en de dilatantiehoek ψ .

Uit de proeven in de Brutusbak (paragraaf 2.1) en elders gerapporteerde proeven volgt dat $\phi \approx 30^\circ$ tot 35° . Uit de proef bij de Venetiëbakproeven (paragraaf 2.6) volgde voor de extra gevulde geocontainers (tweede stapeling) dat de totale wrijvingshoek $\phi + \psi = 45^\circ$, zodat daar waarschijnlijk gold: $\psi \approx 10^\circ$ à 15° . Bij een halfsteens stapeling zijn de holtes, dat wil zeggen de afwijkingen van een vlak talud, nog sterker, zodat $\psi \approx 20^\circ$ daar mogelijk lijkt.

In het rekenmodel van Koehorst dat gerapporteerd is in [Berendsen 1999] wordt dit effect expliciet in rekening gebracht met de hoek β t.o.v. de horizon, waaronder de geocontainers kunnen wegschuiven van het talud. Uit de definitie volgt: $\beta = \alpha - \psi$, als α de taludhelling is.

In de hier beproefde, geïdealiseerde stapeling met normaal gevulde containers lijkt het redelijk aan te nemen dat de geocontainers alleen praktisch horizontaal kunnen wegschuiven, dus $\beta = 0$ ofwel $\psi = 18^\circ$, gegeven de taludhelling van $\alpha = \text{bgtan}(1/3,1) = 18^\circ$. Dat is in de analyse, gerapporteerd in deel 2 van [Klein Breteler e.a. 2002] ook aangenomen. Ook bij de meer gevulde containers is ter vereenvoudiging aangenomen $\beta = 0$ ofwel $\psi = 30^\circ$, gegeven de taludhelling van $\alpha = \text{bgtan}(1/1,7) = 30^\circ$. Dat lijkt niet gerechtvaardigd, maar zou wel de grote stabiliteit kunnen verklaren.

Ook bij andere, meer willekeurige stapelingen van geocontainers zal dit effect optreden. Bij de normale, lage vullingsgraad lijkt de veronderstelling $\beta = 0$ gerechtvaardigd.

5.2.3 Instabiliteit

Het rekenmodel van Koehorst, gerapporteerd in [Berendsen 1999], gaat bij $\beta = 0$ over in de volgende formule:

$$f = \frac{G - F \cos \alpha}{F \sin \alpha} \quad \text{met} \quad F = \frac{\rho_w \cdot g \cdot \Phi \cdot h}{\sin \alpha}$$

waarin:

- f: de gemobiliseerde wrijvingshoek tussen de geotextielen
- F: de kracht door het stijghoogteverschil loodrecht op het talud naar buiten p.e.v. lengte
- G: onderwatergewicht van de laag geocontainers p.e.v. lengte
- h: hoogte van de stapeling
- α : taludhelling

Met de eerder gevonden waarde van de wrijvingshoek tussen de geotextielen geldt dan als stabiliteitseis:

$$f > \tan 30^\circ \text{ à } \tan 35^\circ$$

De in 5.1 gepresenteerde relatie voor het stijghoogteverschil over de buitenste laag geocontainers is toegepast op de formules voor de geotechnische stabiliteit, die waren afgeleid in het kader van het Maasvlakte-onderzoek. Zie [Klein Breteler e.a. 2002]. Hieruit is gebleken dat ook volgens deze formules de modelopstelling met normaal gevulde geocontainers stabiel had moeten blijven, maar die met sterk gevulde geocontainers juist instabiel had moeten worden.

Daaruit volgt dat de combinatie van de formules voor stijghoogteverschil en instabiliteit waarschijnlijk conservatief is. Maar helaas kan de nauwkeurigheid van de formules nog niet vastgesteld worden, omdat tijdens de proeven het niet gelukt is de stapeling te laten afschuiven. Aanbevolen wordt om in de toekomst aanvullende proeven te doen met grotere golven, die wel kunnen leiden tot geotechnische instabiliteit, ter verificatie van de nu verbeterde formules.

Tijdens het modelonderzoek is bij de stapeling met normaal gevulde containers onder een taludhelling van 1:3,1 is een bezwijkgolffhoogte berekend van 5 m, terwijl in het modelonderzoek tot een golffhoogte van 4,5 m nog geen instabiliteit optrad. Voor de stapeling met sterk gevulde geocontainers onder een taludhelling van 1:1,7 is een bezwijkgolffhoogte berekend van 4,4 m, terwijl in het modelonderzoek tot een golffhoogte van 6 m nog geen instabiliteit optrad.

Vertaald naar significante golffhoogtes, kan men stellen dat bij $H_s \leq 2,5$ m geen geotechnische instabiliteit te verwachten is.

5.3 Conclusies pver geotechnische stabiliteit van stapeling onder golfaanval

- (a) Ondanks de vele beperkingen (zie 5.2.2) inherent aan de uitgevoerde proeven, kan de in 5.1 gegeven formule goed gebruikt worden om een schatting te maken van het maximale stijghoogteverschil over de buitenste laag geocontainers van een stapeling, als functie van de maximale golffhoogte in een storm en als functie van de verhouding tussen de breedte van de geocontainers en de totale breedte van de stapeling.
- (b) Het door Koehorst afgeleide stabiliteitsmodel lijkt betrouwbaar. Voor normaal gevulde geocontainers en een helling van 1 : 3 of flauwer, kan aangenomen worden dat de buitenste laag alleen horizontaal kan wegschuiven ($\beta = 0$), waardoor het model overgaat in de formule gepresenteerd in 5.2.3.
- (c) Geotechnische instabiliteit van een stapeling geo-elementen met een dwarsdoorsnede van ca 10 m² belast door golven kan alleen optreden:
 - bij hellingen steiler dan 1:3

- als het om een stapeling geocontainers gaat zonder zandaanvulling
- bij een significante golfhoogte groter dan $H_s > 2,5$ m indien de kruin dicht bij het stilwater niveau ligt (niveauverschil tussen kruin en waterstand is minder dan een halve golfhoogte). Als de kruin hoger (boven SWL) of lager (ver onder SWL) ligt dan treedt geotechnische instabiliteit zelfs pas bij een nog grotere golfhoogte op.

6 Stabiliteit individuele elementen bij golf en stroming

6.1 Stabiliteit bij golfbelasting

Behalve de geotechnische instabiliteit, waarbij een aantal geocontainers tegelijk van de stapeling schuift, is het mogelijk dat afzonderlijke geocontainers door de golfbelasting verplaatst worden.

Dit bezwijkmechanisme is tijdens de kleinschalige proeven in de Venetiëfaciliteit niet geconstateerd, ondanks de vrij hoge golfbelasting (golfhoogte tot ca. 6 meter), hoewel soms bij een grote golf tijdens de eerste vier proeven (met de dunne geocontainers) de voorste geocontainer een minimale beweging liet zien, zonder netto verplaatsing. Dat geen bezwijken is geconstateerd sluit niet zondermeer aan bij eerdere bevindingen.

In paragraaf 5.6.2 van [Pilarczyk 2000] zijn twee formules gepresenteerd voor de golfhoogte waarbij instabiliteit ontstaat voor een goed gevulde geotube op de top van een stapeling als deze zich op het niveau van de waterspiegel bevindt:

Formule (5.59) $[H/\Delta b]_{\text{kritiek}} = 1,0$
met $\Delta = (1 - n)(\rho_k - \rho)/\rho$ en
b: (maximale) breedte van de geotube

Formule (5.62) $[H/\Delta d]_{\text{kritiek}} = 1,0$
met d: (maximale) hoogte van de geotube

In paragraaf 6.5.2 van [Pilarczyk 2000] is een met formule 5.62 vergelijkbare formule gepresenteerd, nu met H_s in plaats van H:

Formule (6.62) $[H_s/\Delta d]_{\text{kritiek}} \leq 1,0$

Toepassing van de formules (5.59) en (5.62) op de resultaten van de proeven in de Venetiëfaciliteit leidt tot de volgende resultaten, aangenomen dat $\Delta \approx 1$, gegeven de breedte en hoogte (prototype waarden) van respectievelijk 7,4 m x 1,2 m en 6,4 m x 1,9 m en gegeven de grootste golfhoogte van respectievelijk $H_{\text{max}} = 4,4$ m en 6,0 m:

$$[H/\Delta b]_{\text{kritiek}} \geq 0,60, \text{ respectievelijk } 0,94$$

$$[H/\Delta d]_{\text{kritiek}} \geq 3,7, \text{ respectievelijk } 3,2.$$

Volgens formule (5.62) van Pilarczyk zou er bij deze omstandigheden al lang instabiliteit zijn opgetreden, terwijl dat niet is gebeurd. Kennelijk sluit deze formule niet aan op deze proeven. Formule (5.59) zou wel goed kunnen zijn.

Het resultaat van de huidige proeven is ook verrassend in vergelijking tot de resultaten van het modelonderzoek op schaal 20 van Klein Breteler et al (1994), zoals samengevat in paragraaf 5.4.11 van [Pilarczyk 2000]. Bij die proeven was het talud steil: ongeveer 1:1. Toen is vastgesteld dat geocontainers met een dwarsdoorsnede van 3,8 m x 2,2 m (prototypematen) bij een golfhoogte van 3,1 m van de stapeling verplaatst raakten, zodat daarvoor gold:

$$[H/\Delta b]_{\text{kritiek}} = 0,82$$

$$[H/\Delta d]_{\text{kritiek}} = 1,4$$

Verder is vastgesteld dat geocontainers met een dwarsdoorsnede van 8,4 m x 1,8 m bij een golfhoogte van 4,2 m van de stapeling verplaatst raakten, zodat daarvoor gold:

$$[H/\Delta b]_{\text{kritiek}} = 0,50$$

$$[H/\Delta d]_{\text{kritiek}} = 2,3.$$

De hierbij behorende breedte/hoogte verhouding ligt in tussen de twee gebruikt in de Venetiëfaciliteit. Daarom is het opmerkelijk dat de bij de proeven in de Venetiëfaciliteit nog geen instabiliteit gevonden is bij verhoudingen die ongeveer 1,5 maal zo groot waren.

Als het onderzoek van [Klein Breteler et al 1994] met formule (5.59) uit [Pilarczyk 2000] worden nagerekend, krijgen we een bezwijkgolffoogte van 3,8 m voor de geocontainer van 3,8 m breed en 8,4 m voor de geocontainer van 8,4 m breed. Gezien het feit dat tijdens de modelproeven instabiliteit optrad bij een golffoogte van respectievelijk 3,1 m en 4,2 m moet geconcludeerd worden dat er hier sprake is van een discrepantie, die vooral groot is voor de geocontainer met grote breedte/hoogte verhouding.

Totdat hier een goede verklaring voor wordt gevonden, wordt geadviseerd formule (5.59) uit [Pilarczyk 2000] met grote voorzichtigheid te hanteren, vooral als het talud steil is. Formule (5.62) lijkt daarentegen erg conservatief.

Een verklaring voor het verschil tussen de hier gevonden resultaten en de formules van Pilarczyk moet wellicht gezocht worden in de andere taludhelling of een andere breedte/hoogte verhouding. De formules die Pilarczyk presenteert zijn vooral bedoeld voor goed gevulde geotubes, eventueel verstijfd m.b.v. cement. Hier gaat het om een veel lagere vullingsgraad, samenhangend met het proces van aanbrengen: alleen met een lage vullingsgraad kunnen geocontainers met splijtbakken gestort worden.

Voor de stabiliteit van individuele elementen is ook het verschil tussen schuiven en rollen van belang. Bij schuiven gedragen geocontainers zich net zo als met beton gevulde zakken of andere onvervormbare elementen met dezelfde vorm, volumegewicht en wrijvingscoëfficiënt.

Bij rollen daarentegen zal het zand lokaal in de container afschuiven en binnen de geocontainer verplaatsen (ook wel rupsen genoemd). Op basis van een door Bezuijen ontwikkelde theorie is het moment dat weerstand biedt tegen rollen afgeleid in paragraaf 9.3 van [de Groot en Bezuijen 1999/2000]. In paragraaf 9.4 van dat rapport is het mechanisme geschematiseerd en zijn daarmee eenvoudige formules afgeleid waarmee kan worden nagegaan of schuiven, dan wel rollen maatgevend is.

Er zijn op basis van de theorie aanwijzingen dat rollen maatgevend is als de vullingsgraad f kleiner is dan 0,5 à 0,6, of als het een grote waarde heeft: $f > 0,9$. De definitie van f luidt: $f = 4\pi A_f / S^2$, waarbij S de omtrek is van het geotextiel en A_f het oppervlak van de dwarsdoorsnede. Bij de proeven in de Venetiëfaciliteit was $S \approx \pi d + 2(b-d) = 15,5$ m. Bij de minst gevulde containers was $A_f \approx \pi d^2/4 + d(d-b) = 8,6$ m², zodat $f = 0,41$. Het rollen zou dus nog net maatgevend zijn. Voor de dikkere geldt: $f = 0,64$. Daarvoor zou het schuiven maatgevend zijn. Voor de proeven uit 1994 geldt $f = 0,90$ en 0,51, waardoor mogelijk het rollen maatgevend was.

6.2 Stabiliteit bij stromingsbelasting

De stabiliteit onder stromingsbelasting is in het huidig onderzoek niet onderzocht. Er wordt geadviseerd de resultaten van [Klein Breteler et al 1994] te hanteren. Die gelden voor een stroming loodrecht op de as van een stapeling geocontainers:

1. situatie 1: 6 m hoog 4-3-2 stapeling met kruin op 0,56 m onder water: instabiliteit bij een stroomsnelheid van 0,57 m/s vóór de constructie.
2. situatie 2: 5 m hoog 4-3-2 stapeling met kruin op 3,50 m onder water: instabiliteit bij een stroomsnelheid van 1,42 m/s vóór de constructie.
3. situatie 3: 5 m hoog 4-3-2 stapeling met kruin op 4,70 m onder water: instabiliteit bij een stroomsnelheid van 1,70 m/s vóór de constructie.
4. situatie 4: 5 m hoog 3-2-1 stapeling met kruin op 3,50 m onder water: instabiliteit bij een stroomsnelheid van 1,34 m/s vóór de constructie.

De stroomsnelheid boven de stapeling was niet gemeten, maar is geschat op respectievelijk $u_{cr} = 8,3$ m/s, 4,0 m/s, 4,1 m/s en 3,8 m/s. De dimensieloze belasting wordt hiermee voor deze proeven geschat op respectievelijk: $u_{cr}/\sqrt{(g\Delta d)} = 1,8; 1,0; 1,0$ en 0,90. Dit sluit goed aan op de formule (5.67) uit [Pilarczyk 2000]:

$$u_{cr}/\sqrt{(g\Delta d)} = 0,5 \text{ à } 1,0$$

met: u_{cr} : maximaal toelaatbare snelheid op de kruin loodrecht op de as (m/s)

Bij stroming parallel aan de as van een stapeling zijn veel hogere stroomsnelheden toelaatbaar. Als een stapeling geocontainers van een bepaalde lengte wordt opgebouwd in zee of in een rivier of estuarium, zal de stroming afgebogen worden. Om de stabiliteit te beoordelen zal men een voorspelling moeten doen voor de stroomsnelheidscomponent loodrecht op de stapeling bovenstrooms en/of boven de kruin. De bovenstroomse waarden kunnen worden vergeleken met de kritieke waarden uit [Klein Breteler 1994]; de waarden boven de kruin met formule (5.67) uit [Pilarczyk 2000].

6.3 Instabiliteit door verweking veroorzaakt door golfbelasting

Bij cyclische belasting heeft losgepakt zand de neiging te verdichten. Als de poriën praktisch verzadigd zijn met water, zoals bij geocontainers onder water al snel het geval is, wordt enig water uit de poriën gedreven tijdens deze verdichting. De poriënwaterstroming die daarvoor nodig is vereist een poriënwaterdrukverschil tussen binnen in de geocontainer en daarbuiten. Bij cyclische belasting van geocontainers met losgepakte verzadigd zand ontstaan dus een wateroverspanning. Onder bepaalde voorwaarden kan die wateroverspanning zelfs gelijk worden aan het gewicht van de bovenliggende grond. Dan heerst er complete verweking.

Na de afstroming van een zekere hoeveelheid poriënwater zal het zand enigszins verdicht zijn, waardoor de gevoeligheid voor verdere verdichting en dus ook verdere generatie van wateroverspanning minder wordt. Op den duur is het zand zo vastgepakt dat er geen wateroverspanning meer wordt gegenereerd.

De belangrijkste voorwaarde voor verweking en significante wateroverspanning, is een geringe doorlatendheid van het zand. Bij toepassing van zand met minder dan 20% deeltjes kleiner dan $63 \mu\text{m}$ is die voorwaarde praktisch uitgesloten, zoals blijkt uit enige globale berekeningen. Daarvoor kan gebruik gemaakt worden van de formules voor verweking van een zandige zeebodem, zoals beschreven in hoofdstuk 7 uit [de Groot 2002].

De situatie wordt beschouwd waarbij de geocontainer voor het eerst door een storm met golven belast wordt. Aangenomen wordt dat het zand zeer losgepakt is, een zeer conservatieve aanname, zoals blijkt uit de metingen in model en prototype. Bij die storm zullen de golven geleidelijk hun maximum bereiken, bijvoorbeeld in de loop van 6 uur. In de berekening is nagegaan of het zand in de geocontainer in de loop van die tijd voldoende verdicht om nooit meer dan enige procenten wateroverspanning te genereren.

Dat is het geval als de karakteristieke drainage periode $T_{char, drain}$ veel korter is dan een periode van min of meer constante golfbelasting, bijvoorbeeld de periode van 100 golven, en als de karakteristieke periode voor het verdichtingsproces T_n veel korter is dan de periode karakteristiek voor de golfgroei, bijvoorbeeld één of enkele uren. Dus geen verwekingsprobleem als:

$$T_{char, drain} \ll 300 \text{ s}$$

$$T_n \ll 3000 \text{ s}$$

Er geldt:

$$T_{char, drain} = d^2/c_v = \rho_w g d^2 \alpha / k$$

$$T_n = \Delta n / \{(1-n)\alpha\psi_0\}$$

met	d:	drainage afstand \approx hoogte container [m]
	c_v :	consolidatie coëfficiënt voor het korrelskelet bij ontlasting [m^2/s]
	k:	doorlatendheid zand [m/s]
	n:	poriëngehalte [-]
	Δn :	afname poriëngehalte gedurende een min of meer constante golfbelasting [-]
	α :	ééndimensionale compressibiliteit van het korrelskelet bij ontlasting [m^2/kN]
	Ψ_0 :	generatie van wateroverspanning bij ongedraineerde belasting [kN/m^2s]

Hier mag het volgende worden aangenomen voor geocontainers met een dwarsdoorsnede van 10 m^2 bij toepassing van zand met juist 20% deeltjes fijner dan $63\text{ }\mu\text{m}$, dus $D_{20} = 63\text{ }\mu\text{m}$:

$$d = 2\text{ m}$$

$$k = 10^{-5}\text{ m/s}$$

$$n = 0,4$$

$$\Delta n = 0,01$$

$$\alpha = 3 \cdot 10^{-8}\text{ m}^2/\text{N}$$

$$\Psi_0 = \text{gemiddelde initiële verticale korrelspanning/tijd nodig voor aantal golven tot verweking bij ongedraineerd belasten} \approx \rho g d / (30T) \approx 10000\text{ N/m}^2 / (30 \cdot 3\text{ s}) = 100\text{ N/m}^2\text{ s}.$$

Zodoende geldt hier:

$$T_{\text{char, drain}} \ll 300\text{ s}$$

$$T_n \ll 3000\text{ s}$$

en is er dus geen verwekingsprobleem.

6.4 Conclusies over stabiliteit individuele elementen bij golf en stroming

- als geen nadere gegevens bekend zijn kan voor de kritieke golfhoogte voor een stapeling met kruin rond het stilwaterniveau de erg conservatieve formule (5.62) of formule (6.62) uit [Pilarczyk 2000] toegepast worden; dat impliceert voor containers met de dwarsdoorsnede oppervlak van 10 m^2 een kritieke golfhoogte van ca 3 m
- voor specifieke situaties kan de kritieke golfhoogte significantgroter zijn en kan het daarom de moeite waard zijn om modelproeven uit te voeren op Froudeschaal
- aanbevolen wordt de invloed van de vullingsgraad nader te onderzoeken middels modelproeven en numerieke geotechnische rekenmodellen en daarbij de theorieën uit [de Groot en Bezuijen 1999/2000] te verifiëren
- Voor stabiliteit in stroming wordt geadviseerd de formules beschreven in 6.2 toe te passen
- De kans op verweking is verwaarloosbaar voor containers met de dwarsdoorsnede oppervlak van 10 m^2 mits zand wordt toegepast met een gehalte aan fijne deeltjes kleiner dan 20%

7 Schaaleardeffecten en andere modeldeffecten

Omdat diverse aspecten van geocontainers moeilijk in prototype kunnen worden onderzocht, is het van belang te onderzoeken in hoeverre de resultaten van de modelproeven overeenkomen met die in het prototype. Dit is niet voor alle aspecten mogelijk, omdat de video opnamen (onder water of door een glasruit), die juist zo waardevol bleken bij het modelonderzoek, niet konden worden uitgevoerd bij het prototype onderzoek.

De volgende aspecten kwamen naar voren bij vergelijking van de resultaten:

– ***Valsnelheid***

Het blijkt dat zowel in de modelproeven als in de veldmetingen de valsnelheid redelijk overeen komt met de daarvoor afgeleide formules en geschaald kan worden volgens Froude. De onzekerheid bij toepassing van de formules voor de valsnelheid zit in de dichtheid van het vulmateriaal in de container en de vorm van de container. De veldmetingen bevestigen in elk geval de bevindingen van de modelmetingen, dat de valsnelheid en dus de belasting sterk beïnvloed worden door het al of niet nat zijn van het vulmateriaal.

– ***Plaatsingsnauwkeurigheid***

De statistische analyse uitgevoerd op de bij Kandia gestorte containers laat een standaardafwijking zien die significant groter is dan die gevonden bij de schaalproeven in de Venetiëfaciliteit in stil water. Vermoedelijk is hier niet sprake van een schaaleardeffect; mogelijk wel van een modeldeffect. Zo was de modelbodem vlak, anders dan die in de zandput. Ook de vullingsgraad en de vochtigheid van het zand verschilden wellicht. Dat gold zeker ook voor de gelijkmatigheid van de vulling in de container. De bij de eerste geïnstrumenteerde Kandia-proef gevonden afwijking, niet dwars op de as van de container maar langs die as, is niet gevonden bij de modelproeven. Dit is veroorzaakt door de ongelijkmatige vulling van de container bij de eerste proef. Dit geeft natuurlijk wel aan dat in een ‘net’ uitgevoerde modelproef, soms elementen ontbreken die dan wel te voorschijn komen in de wat weerbarstiger werkelijkheid.

– ***Bezuijen effect***

Het was bekend dat de schaling van de modelproeven niet voldeed voor een complete weergave van het Bezuijen effect, inclusief het stromen van water door het zand van de geocontainer. Het vulmateriaal van de modelcontainer was daarvoor, geschaald, veel te doorlatend. Dit is voor het eigenlijke valproces redelijk te ondervangen door toepassing van ondoorlatend folie in het model.

Men dient er echter op bedacht te wezen, dat ook al wordt een geocontainer gevuld met droog zand dit zand aan de onderkant toch verzadigd raakt, doordat water door de onderkant van de splijtbak in het zand komt en daardoor naarmate de splijtbak meer gevuld is, ook de freatische lijn in het vulmateriaal omhoog komt. Dit is moeilijk op schaal weer te geven.

– ***Dilatantie***

Negatieve waterspanning door dilatantie is gevonden in zowel de modelproeven als in de prototype proeven. In beide gevallen duurt het proces zo kort dat de grond als ongedraineerd beschouwd mag worden. Modelproeven kunnen het prototype goed simuleren, mits gezorgd wordt voor gelijke relatieve dichtheid van het zand.

– ***Overbelasten geotextiel***

Tijdens de veldmetingen is het geotextiel 2 keer beschadigd tijdens het plaatsen van een geocontainer. Dit is bij de modelproeven niet gebeurd. Dit bevestigt dat het geotextiel in de proeven relatief sterker was dan bij de veldproeven.

– ***Geotechnische stabiliteit stapel geozandelementen onder golfbelasting***

Er zijn geen schaaleardeffecten te verwachten als, ook in het model, de ‘poriën’ (de ruimtes tussen de elementen) van een stapel geozandelementen zo groot zijn dat de turbulente stromingsweerstand overheerst over de laminaire weerstand. Modeldeffecten kunnen wel optreden als de stapeling in het model netter is dan in prototype.

8 Conclusies voor de praktijk

De specifieke conclusies over de 4 onderwerpen plaatsingsnauwkeurigheid, belasting op het geotextiel, geotechnische stabiliteit en stabiliteit van individuele elementen, zijn geformuleerd respectievelijk in de paragrafen 3.3, 4.3, 5.3 en 6.4. Deze conclusies worden hier niet herhaald. Wel worden ze gebruikt om hier conclusies te formuleren over de toepassing van geocontainers en andere geozandelementen in de praktijk.

- 1 ***Toepasbaarheid op grote diepte i.v.m. plaatsingsnauwkeurigheid*** (zie ook paragraaf 3.3). Ondanks de beperkte nauwkeurigheid waarmee geocontainers geplaatst kunnen worden, is in het algemeen haalbaar om bij een waterdiepte van ca 20 m een stapeling op te bouwen met een helling van ca 1: 2 in stil water en 1: 3 onder Noordzee condities met stroming en golven. Dat geldt voor geocontainers met een volume van ca 300 m³. Aanvaard moet worden dat een aantal geocontainers buiten het profiel terecht zal komen. Het aanbrengen van de eerste containers van een stapel zal het moeilijkste zijn. De andere in de eerste laag kunnen daar waarschijnlijk tegenaan gestort worden. Vervolgens kunnen de geocontainers van de tweede en volgende lagen vrij nauwkeurig gestort worden, zelfs als er een aanzijnlijke stroming en/of golven zijn. Ervaring van het uitvoerende personeel met het materieel, het gebruikte zand en de lokale omstandigheden zal een belangrijke bijdrage leveren aan het bereiken van de genoemde hellingen.
- 2 ***Toepasbaarheid op geringe diepte i.v.m. plaatsingsnauwkeurigheid***. Bij een waterdiepte kleiner dan 10 m zal de haalbare nauwkeurigheid flink toenemen, zodat hellingen van 1:1,5 in stil water, respectievelijk 1:2 tijdens stroming en/of golven, haalbaar zijn.
- 3 ***Vergroting van de dwarsdoorsnede van geocontainers*** heeft een gunstig effect op de plaatsingsnauwkeurigheid, althans uitgaande van geocontainers met een dwarsdoorsnedeoppervlak van ca 10 m² bij een min of meer vlakke bodem op een waterdiepte van ca 20 m. Bij een verdubbeling van het dwarsdoorsnedeoppervlak zal de standaardafwijking van de plaatsingsnauwkeurigheid wellicht enige tientallen procenten lager zijn.
- 4 ***Verkleining van de dwarsdoorsnede van geocontainers*** heeft omgekeerd een ongunstig effect. Toch zal de onnauwkeurigheid niet onbeperkt toenemen als de afmetingen afnemen. Dus toepassing van zeer kleine geocontainers ('zandzakken') is evenzeer mogelijk als men rekening houdt met een standaardafwijking van bijvoorbeeld een half maal de waterdiepte.
- 5 ***Wijziging van de lengte van geocontainers*** heeft vermoedelijk geen grote invloed op de plaatsingsnauwkeurigheid, uitgaande van de veronderstelling het tijdsverschil tussen het loskomen uit de spijtbak van het ene eind van de container t.o.v. het andere eind niet meer is dan een fractie van een seconde. Mocht dat laatste niet het geval zijn, dan zou een significant kortere container dat tijdsverschil wellicht flink kunnen reduceren en daarmee de onnauwkeurigheid van de plaatsing in langsrichting.
- 6 ***De kans op overbelasten van het geotextiel*** bij toepassing van geocontainers van ca 300 m³ is, zelfs bij waterdieptes van 20 m of meer, beperkt te houden door toepassing van zand zonder veel kleine deeltjes en een zeer gelijkmatige vulling van de geocontainer (paragraaf 4.3). In hoeverre bij grotere afmetingen zwaarder geotextiel nodig is, kan worden voorspeld met de rekenmodellen in paragraaf 4.2.
- 7 ***Toepassing van droog zand*** is voordelig waar het gaat om de kans op ***overbelasten*** van de geocontainer bij het vallen op de bodem. De te absorberen valenergie bedraagt orde 60 % van die bij volledig verzadigd zand. Voorts neemt het vermogen van het zand om energie te absorberen toe. Wel neemt de plaatsingsnauwkeurigheid waarschijnlijk iets af (orde 10%).
- 8 ***Wijziging van de vullingsgraad*** heeft geen grote invloed op de plaatsingsnauwkeurigheid. De vullingsgraad heeft vermoedelijk wel invloed op de stabiliteit bij golfaanval van de geocontainers/geotubes op de top van een stapel dicht bij het stil water niveau.
- 9 ***De toepassing van een non-woven*** in plaats van een geweven geotextiel, zal de kans op ***overbelasten*** van het geotextiel alleen doen afnemen als de te absorberen energie door rek

bij plotselinge trekbelasting tot breuk, meer bedraagt. Die energie is ongeveer evenredig aan het product van breukrek en treksterkte (trekbelasting tot breuk). Non-wovens hebben in het algemeen een veel lagere treksterkte en een veel hogere breukrek, waardoor het product gelijk kan zijn, maar ook nog of lager. Dat hangt af van welke twee geotextielen met elkaar vergeleken worden.

- 10 ***Geotechnische stabiliteit van een talud met geocontainers onder golfaanval*** (met een dwarsdoorsnede van ca 5 tot 15 m², belast door golven) kan een probleem zijn bij taludhellingen van 1:3 of steiler, bij golven met $H_s > 2,5$ m of als het om een stapeling geocontainers zonder daarachter een zandaanvulling. In die gevallen kan de stabiliteit beoordeeld worden met de conservatieve maar goed bruikbare formules uit hoofdstuk 5.
- 11 ***Stabiliteit individuele geocontainers onder golfaanval***. Met geo-zandelementen van orde 300 m³ is er geen gevaar voor instabiliteit van de elementen in de buurt van de waterlijn bij een stroming zoals die op de Noordzee kan voorkomen en een golf met $H_s < 3$ m. Dieper liggende elementen kunnen een veel hogere golf weerstaan. De kans op verweking is verwaarloosbaar voor containers met de dwarsdoorsnede oppervlak van 10 m² mits zand wordt toegepast met een gehalte aan fijne deeltjes kleiner dan 20%

9 Aanbevelingen

- In bijna iedere concrete praktijksituatie waarin de toepassing van geocontainers wordt overwogen, is optimalisatie mogelijk m.b.t. het geometrie-ontwerp, de afmetingen van de containers, de vullingsgraad, het gebruikte zand, de manier van vullen, de stortstrategie e.d.. De thans beschikbare rekenmodellen kunnen een belangrijk hulpmiddel zijn bij die optimalisatie. Aanbevolen wordt van die modellen gebruik te maken.
- Ten aanzien van de plaatsingsnauwkeurigheid bij de opbouw van een talud of dam voor een bepaald project, wordt aanbevolen modelonderzoek te overwegen als ondersteuning bij de voorbereidingen.
- Overal waar geocontainers worden gestort, wordt aanbevolen om de karakteristieken van ontwerp en uitvoering (zoals afmetingen van geotextiel en slijtbak, vullingsgraad, korrelverdeling, manier van vullen) goed vast te leggen en om gegevens te verzamelen over de omstandigheden (waterdiepte, bodemhelling, stroming, golf), de plaatsingsnauwkeurigheid, het aantal beschadigingen.
- Aanbevolen wordt een praktijkproef te doen met het storten van geocontainers op volle zee en daarbij een stapeling op te bouwen. Doel: haalbaarheid toepassing op zee, m.b.t. plaatsingsnauwkeurigheid en overbelasten geotextielen. Daarbij variatie van de waterdiepte en eventueel de afmetingen van de containers.
- Gezien de geconstateerde discrepanties tussen de proefresultaten en de formules wordt aanbevolen om nader onderzoek naar de stabiliteit van individuele elementen onder golfaanval, in het bijzonder de invloed van de vullingsgraad en het verschil tussen rollen (rupsen) en schuiven (hoofdstuk 6).
- Aanbevolen wordt om de haalbaarheid te bestuderen van alternatieve methoden om grote geozandelementen op de zeebodem te krijgen. Aantrekkelijk lijkt de mogelijkheid om heel grote geocontainers in een speciale slijtbakachtige bak te maken, waarbij het slijtgedeelte van de bak met daarin de geocontainer afgevoerd wordt vanaf het drijfgedeelte en de geocontainer vlak boven de bodem wordt gelost.

Referenties

[Berendsen, 1999]

Berendsen E., 1999: Project Maasvlakte 2. Haalbaarheid van de toepassing van geozandelementen. Waterbouw Innovatie Steunpunt.

[Berendsen 2000]

Berendsen E.

Kennisontwikkeling Geo-zandelementen, nadere invulling onderzoeksproject voor 2001. RWS, Bouwdienst, WB1700, GZE-P00005.

[Bezuijen 1999]

Bezuijen A.

Geosystems

GeoDelft report CO-383990/8, februari 1999

Praktisch volledig opgenomen als hoofdstuk 6 in [Pilarczyk 1999]

[Bezuijen e.a. 2000]

Bezuijen A., Adel H. den, Groot M.B. de, Pilarczyk K.W. (2000)

Research on geocontainers and its application in practice

Proc. 27th ICCE, Sydney.

[Bezuijen en Oung 2000]

Bezuijen, A., Oung, O. en de Groot, M.B.

Geocontainers - Kleinschalige proeven in de Brutusbak

Delft Cluster rapport 03.02.01-03, GeoDelft CO-730201/15, december 2000.

[Bezuijen 2001]

Bezuijen A.

Geocontainers - Analyse resultaten Brutusbakproeven

Delft Cluster rapport 03.02.01-04, GeoDelft CO-730201/87, november 2001.

[Bezuijen 2002]

Bezuijen A.

Grootschalige zandlichamen - Analyse veldmetingen Kandiadam

Delft Cluster rapport 03.02.01-08, oktober 2002.

[Bezuijen e.a. 2002a]

Bezuijen, A. Oung, O., Klein Breteler, M., Berendsen, E. & Pilarczyk, K.W. (2002)

Model tests on geocontainers, placing accuracy and geotechnical aspects

Proc. 7th Int. Conf. on Geosynthetics, Nice.

[Bezuijen e.a. 2002b]

Bezuijen A, Schrijver R.R., Klein Breteler M., Berendsen E. & Pilarczyk K.W. (2002)

Field tests on geocontainers

Proc. 7th Int. Conf. on Geosynthetics, Nice.

Groot M.B. de, Bezuijen A., Pilarczyk K.W. (2000)

Forces in Geocontainer geotextile during dumping from barge

Proc. Eurogeo 2, Bologna.

[de Groot en Lindenberg 1995]

Groot M.B. de, Lindenberg J.

Pore Pressures in Riprap Structures due to Non-Stationary Loads

'River, Coastal and Shoreline Protection: Erosion Control Using Riprap and Armourstone' C.R. Thorne e.a. eds., John Wiley & Sons Ltd, Chapter 24, pp 395-404

[de Groot en Bezuijen 1999/2000]

Groot M.B. de, Bezuijen A.

Designing with geocontainers – Inventory for future research

GeoDelft report, CO-391960/8, December 1999 together with: Errata & example of sand-filled geocontainer, 2000-07-28

[de Groot 2000]

Groot M.B. de

Bouw van grootschalige zandlichamen – projectplan Delft Cluster, thema 3 'Kust en Rivier', basisproject 2 'Waterbouwkunde en geotechniek'

GeoDelft, CO-730201/3, juni 2002

[de Groot e.a. 2000]

Groot M.B. de, Bezuijen A., Pilarczyk K.W. (2000)

Forces in Geocontainer geotextile during dumping from barge

Proc. Eurogeo 2, Bologna.

[de Groot 2002]

Groot M.B. de

Slope instability and liquefaction in sandy soils.

Uit: 'Lecture notes Offshore Soil Mechanics' (Molenkamp ed)

TU Delft, Civiele Techniek, december 2002

[Klein Breteler, 1994]

Klein Breteler M. et al (1994),

Stability of geotubes and geocontainers, WL | Delft Hydraulics report H2029.

[Klein Breteler 2000]

Klein Breteler M.

Kennisontwikkeling geo-zandelementen, Modelonderzoek naar het storten van geocontainers

WL | Delft Hydraulics rapport H3679, december 2000

[Klein Breteler e.a. 2001]

Klein Breteler M., Uittenbogaard R.E., Eysink W.D. en de Groot M.B.

Storten van geocontainers in stroming en golven - Modelonderzoek en numerieke simulatie

Delft Cluster rapport 03.02.01-05, WL | Delft Hydraulics H3679.10/H3820, november 2001

[Klein Breteler e.a. 2002]

Klein Breteler M., Stolker C. en de Groot M.B.

Afrondende studies geocontaineronderzoek

Delft Cluster rapport 03.02.01-12, december 2002

[Lambeek e.a. 2002]

Lambeek, J.J.P., Klein Breteler, M. en de Groot, M.B.

Geotechnische stabiliteit geocontainers – analyse van modelonderzoek in Venetiëfaciliteit.

Delft Cluster Rapport 03.02.01-07, WL | Delft Hydraulics H3820, december 2001

[Pilarczyk 2000]

Pilarczyk K.W., Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering,

A.A. Balkema, Rotterdam (balkema@balkema.nl).

[Schrijver en Peters 2002]

Schrijver, R.R. en Peters, A.J.M. (september 2002).

Veldmetingen storten geocontainers in Kandiadam
Delft Cluster Rapport 03.02.01–06, september 2002.