Titel Document

Contactpersoon	:	ir. M.B. de Groot
Datum	:	februari 2002
Author(s)	:	M.B. de Groot, M. Klein Breteler en A. Bezuijen
Opdrachtgever	:	Bouwdienst RWS, WIS en Delft Cluster
Project naam	:	Grootschalige zandlichamen
Project nummer	:	03.02.01
Aantal pagina's	:	
Aantal tabellen	:	
Aantal figuren	:	
Aantal bijlagen	:	

Delft Cluster

Keverling Buismanweg 4
Postbus 69
2600 AB Delft

015-2693793
015-2693799

info@delftcluster.nl
www.delftcluster.nl

Delft Cluster verricht lange-termijn fundamenteel strategisch onderzoek op het gebied van duurzame inrichting van deltagebieden.

Projectgroep

Tijdens de uitvoering van de analyse bestond de leiding van Delft Cluster thema 3 uit

	Naam	Organisatie
Thema Trekker	M.J.F. Stive	TUD
Thema Duwers	C. Laban	TNO-NITG
	N. Villars	WL | Delft Hydraulics
Thema Leden	M.B. de Groot	GeoDelft
	J. van de Graaf	TUD
	P. van Hofwegen	IHE
	E. Mosselman	WL | Delft Hydraulics

Betrokken personen

Bij de totstandkoming van dit rapport waren betrokken:

Naam	Organisatie
Ed Berendsen	Rijkswaterstaat, Waterbouw Innovatie Steunpunt (BWD, DWW)
Adam Bezuijen	GeoDelft
Maarten de Groot	GeoDelft
Mark Klein Breteler	WL | Delft Hydraulics

Management Summary

Title	Results geocontainer research
Author(s)	ir. M.B. de Groot, ir. M. Klein Breteler and ir. A. Bezuijen
Date	November 2002
Project number	03.02.01
Report number	11

Management samenvatting

Titel	Resultaten geocontainer onderzoek
Auteurs	ir. M.B. de Groot, ir. M. Klein Breteler en ir. A. Bezuijen
Datum	November 2002
Project nummer	03.02.01
Rapport nummer	11

Onderzoek aan geocontainers is uitgevoerd in het kader van het WISproject "Kennisontwikkeling Geo-zandelementen" en het Delft-Clusterproject "Bouw van grootschalige zandlichamen". Modelproeven zijn uitgevoerd in verscheidene modelfacitliteiten 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 onderzoekingen samengevat.

Met het oog op de haalbaarheid van toepassing van geocontainers op zee, was het onderzoek voornamelijk gericht op de volgende vragen:
- Hoe nauwkeurig zijn geocontainers te positioneren?
- Hoe kan worden voorkomen dat het geotextiel scheurt 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.

Geconcludeerd kan worden dat de nauwkeurigheid waarmee geocontainers van ca 300 m^3 gepositioneerd kunnen worden bij een waterdiepte van meer dan 15 m, beperkt is. Dat geldt vooral bij golf en stroom. Het is in het algemeen haalbaar om bij een waterdiepte van ca 20 m een stapeling op te bouwen met een helling van ca 1: 3 in stil water en 1: 5 onder Noordzee condities, mits aanvaard wordt dat een aantal geocontainers buiten het profiel terecht zullen komen. Er is voldoende inzicht in schaalffecten om een redelijke voorspelling te doen van de invloed van afwijkende afmetingen.

Behalve door de toepassing van sterke geotextielen met sterke naainaden, kan het scheuren worden tegengegaan door de geocontainer gelijkmatig te vullen met zand zonder veel fijne deeltjes. Als de geocontainer gevuld wordt met droog of vochtig zand, blijft er enig lucht in de poriën zitten en ontstaat er een matig vaste pakking. Elk van deze beide condities is voldoende om het korrelskelet voldoende schuifsterkte te geven om een groot deel van de val-energie te absorberen bij vallen op de (zee)bodem.

De geotechnische stabiliteit van een stapeling geo-elementen belast door golven kan alleen bij hellingen steiler dan 1:2 een probleem zijn. Proeven zijn gedaan met een stapeling van 4 lagen geo-zandelementen van de zeebodem tot de waterspiegel, die belast wordt met de maximaal bij die waterdiepte horende golf. Het maximale drukverschil tussen de buitenste rij geocontainers en het water voor het talud was, gemiddeld over de waterdiepte, zodanig dat de kracht door dat drukverschil ca 10% bedroeg van het onder water gewicht van de geocontainers. Dit percentage zal ongeveer evenredig zijn met het aantal lagen geo-elementen dat nodig is om de volledige

waterdiepte te bereiken. Bij een stapeling tot boven de waterspiegel of tot onder de waterspiegel zal het percentage kleiner zijn.

Het percentage is groter als alleen gemiddeld wordt over het bovenste geo-zandelement. Daarom zal de stabiliteit van het bovenste geo-element van een stapeling met de kruin rond de waterspiegel eerder maatgevend zijn. Met elementen van orde 300 m^3 is er geen gevaar voor instabiliteit bij een stroming zoals die op de Noordzee kan voorkomen en een golf met $H_s < 2m$. Dieper liggende elementen kunnen een veel hogere golf weerstaan.

Inhoud

1 **Inleiding8**

2 **Beschrijving deelonderzoeken** **8**
2.1 Storten geocontainers in de Brutusbak [Bezuijen en Oung 2000] & [Bezuijen 2001] 8
2.2 Storten geocontainers in stroming en golven in Venetiëfaciliteit [Klein Breteler e.a. 2001] 10
2.3 Numerieke simulatie van het storten van geocontainers 12
2.4 Veldmetingen aan geocontainers gestort in de Kandiadam [Schrijver en Peters 2001] & [Bezuijen 2002] 13
2.5 Opbouw dam met geocontainers in Cornelis Douwes kanaal te Amsterdam 15

3 **Plaatsingsnauwkeurigheid** **19**
3.1 Waargenomen fenomenen 19
3.1 Verklaring en modellering 20
3.2 Conclusies 21

4 **Bezwijken geotextiel bij storten uit splijtbak** **22**
4.1 Bezwijken tijdens het openen van de splijtbak 22
4.2 Bezwijken bij vallen op de bodem 22
4.3 Conclusies 23

5 **Geotechnische stabiliteit stapeling onder golfaanval**Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.

6 **Instabiliteit individuele elementen onder stroom en golf**Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.

7 **Schaaleffecten en andere modeleffecten** **24**

8 **Consequenties voor toepasbaarheid in de praktijk** **27**

9 **Aanbevelingen** **28**

Referenties **28**

1 Inleiding

Zand is een goedkoop bouwmateriaal, vooral aan zandige kusten. Daarom is het aantrekkelijk om bij de aanleg van grootschalige grondlichamen voornamelijk zand te gebruiken. De bouw van grootschalige zandlichamen in water, vooral in zee, brengt echter een aantal specifieke problemen met zich mee. 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 opgelost 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, bijvoorbeeld als kern van een verder breukstenen golfbreker, als opsluiting van de vooroever van een strandsuppletie of als klap- of spuitkade bij de opbouw van een zeewering. Daarom heeft de Bouwdienst van Rijkswaterstaat het onderzoeksproject 'Kennisontwikkeling geo-zandelementen' opgezet [Berendsen 2001].

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.	Bezwijken 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 praktisch voltooid. De belangrijkste resultaten worden in dit rapport vastgelegd.

2 Beschrijving deelonderzoeken

2.1 Storten geocontainers in de Brutusbak [Bezuijen en Oung 2000] & [Bezuijen 2001]

Deze proeven waren vooral gericht op de bestudering van de krachten en vervormingen in een geocontainer tijdens het vallen en neerkomen. Dit in verband met de positionerings-nauwkeurigheid en het eventuele scheuren van het geotextiel.

Containertjes die beschouwd kunnen worden als een 1 : 20 schaalmodel van een geocontainer met een dwarsdoorsnede van 10 m^2, werden gestort in de 'Brutusbak' van GeoDelft bij 16m/20 = 0,8m waterdiepte. Sommige containers werden gestort op een vlakke bodem; enkele op een stapeling van 2 eerder gestorte containers. Zie de foto in figuur 2

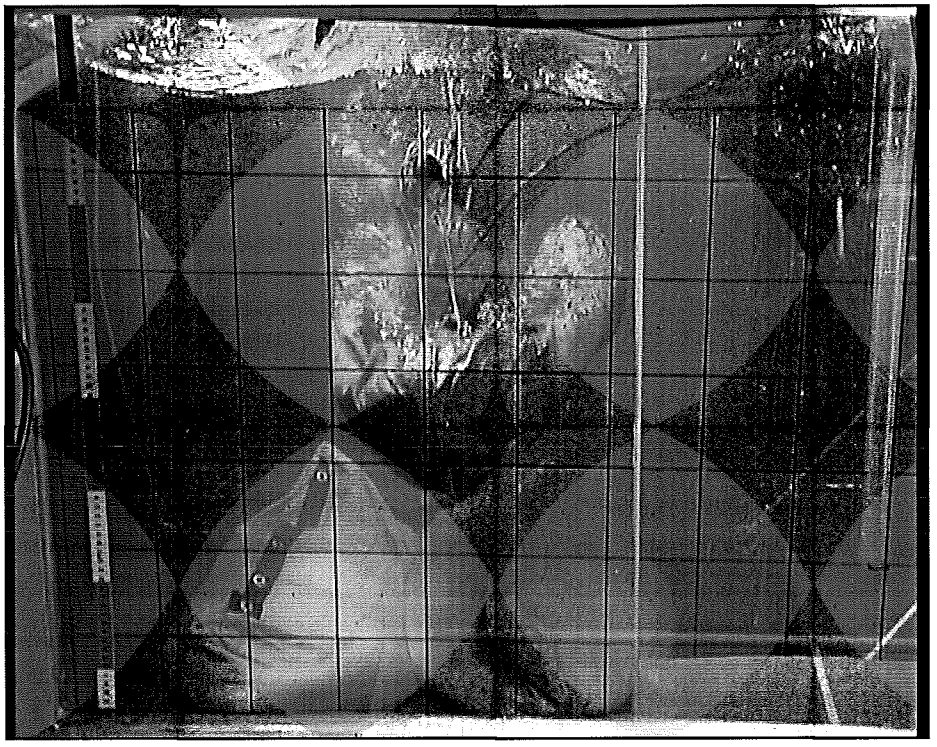


Fig. 2 Geocontainer gedumpt op een 'stapeling' van 2 eerder gestorte containers

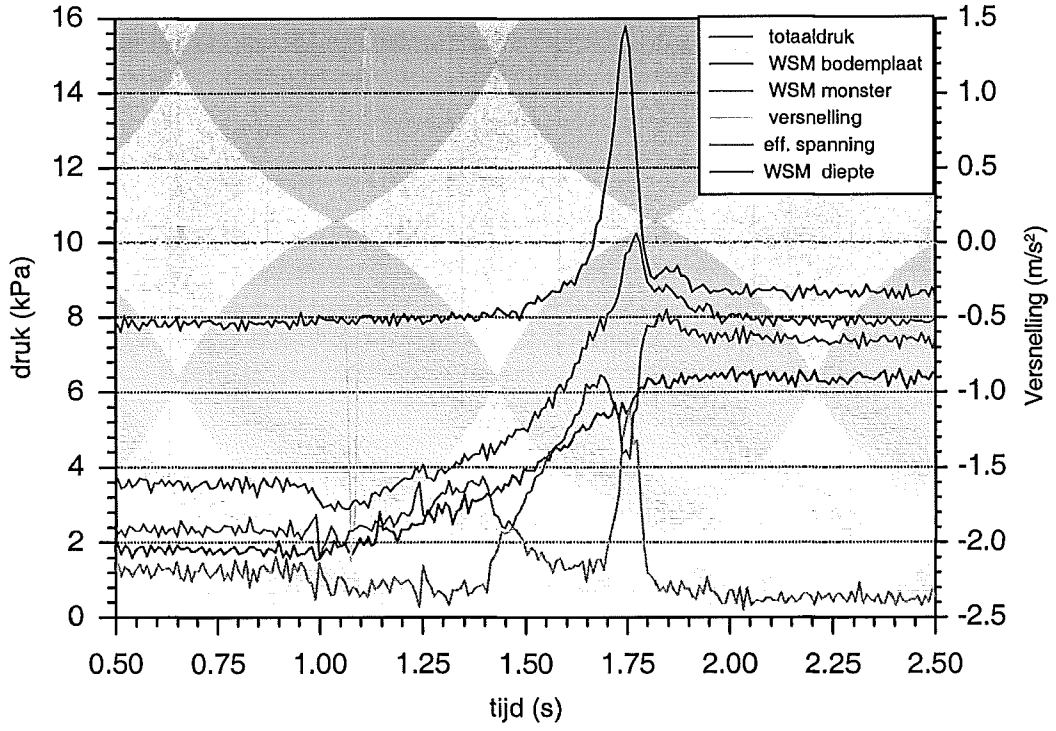


Fig. 3 Meetresultaten tijdens een van de proeven (proef 3c).

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 3. 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.

De modelproeven met verzadigd zand tonen aan dat een deel van de kinetische energie van de val tijdens de impact geabsorbeerd wordt door wrijving tussen de zandkorrels dankzij korrelspanning door wateronderspanning als gevolg van dilatantie. Daardoor wordt de belasting van het geotextiel tijdens impact gedempt. Toch komt de belasting bij impact, teruggerekend in prototype, nog overeen met de halve treksterkte van het geotextiel.

Verder is gebleken dat korrelspanningen in het vulmateriaal de belasting op het geotextiel ook doen afnemen als er lucht in de poriën zit: onverzadigd zand. Het 'Bezuijen effect' (zie paragraaf 4.2) kon worden aangetoond bij een in ondoorlatend plastic ingepakte modelgeocontainer. Dit is 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.

De valsnelheid, berekend met waterspanningsmeters aan de buitenkant van de container, blijkt redelijk overeen te komen met de valsnelheid bepaald uit de videobeelden en de berekende valsnelheden.

Tenslotte is de proefopstelling gebruikt om de stabiliteit van gedumpte containers onder een helling te bepalen. Bij een ruwe ondergrond, bestaande uit prototype geotextiel, bleek de wrijvingshoek 30° tot 35°.

2.2 Storten geocontainers in stroming en golven in Venetiëfaciliteit [Klein Breteler e.a. 2001]

Het onderzoek naar de plaatsingsnauwkeurigheid van geocontainers onder invloed van stroming en golven heeft plaatsgevonden in de Venetiëfaciliteit van WL | Delft Hydraulics. Uitgaande van geocontainers met ieder een inhoud van ca 250 m^3 (29m lang, dwarsdoorsnede ca 8 m^2, zijn de proeven zijn uitgevoerd op een schaal van 1:20.
In het schaalmodel was een splijtbak gemaakt die automatisch geopend kon worden met een in te stellen snelheid (zie figuur 4). De invloed van het slingeren van de splijtbak is niet onderzocht omdat dit in het model moeilijk te realiseren was. Daarom stond de splijtbak met pootjes op de bodem. De vorm van de splijtbak kwam precies overeen met splijtbakken 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 μm.

Onderste foto uit figuur 1 van het onderzoeksrapport

Figuur 4, 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 zijn drie keer een stapeling van geocontainers gemaakt.

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, waarbij de geocontainer op een vlakke bodem is gestort, zijn weergegeven in onderstaande tabel:

GEOLON 15	verplaatsing (m)				Rotatie (°)			
	Gemiddelde		Spreiding		Gemiddelde		spreiding	
	H = 0 m	H = 1.2 m	H = 0 m	H = 1.2 m	H = 0 m	H = 1.2 m	H = 0 m	H = 1.2 m
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 (prototypematen)

In deze tabel is gebruik gemaakt van de volgende symbolen:
H = golfhoogte (regelmatige golven, haaks op de lengte-as van de splijtbak) (m)
T = golfperiode (s)
u = stroomsnelheid (gemiddeld over de verticaal, haaks op de lengte-as van de splijtbak) (m/s)

Alle proeven zijn uitgevoerd bij een waterdiepte van 80 cm, overeenkomend met 16 m in het prototype.

Bij het storten van diverse geocontainers op elkaar, teneinde een zo steil mogelijke dam te krijgen, bleek het verstandig te zijn eerst te zorgen voor drie geocontainers naast elkaar op de bodem. Vervolgens moeten de overige geocontainers gestort worden ter plaatse van de geocontainer uit de eerste laag die het meest stroomopwaarts ligt. Hierdoor was het mogelijk om een taludhelling van ongeveer 1:1,5 te realiseren bij een stroomsnelheid van 11 cm/s en een golfhoogte van 6 cm (prototype: u = 0,5 m/s en H = 1,2 m).

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 het storten van de eerste laag op de bodem.

Figuur 21 uit onderzoeksverslag, zonder bovenaanzicht

Figuur 6, Twee dwarsdoorsneden van een stapeling geocontainers (ter plaatse van beide koppen van de geocontainers)

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 ontstaat als de geocontainer bij de bodem is aangekomen. Deze snelheid is aanzienlijk groter dan de stroomsnelheid. De grootte van deze berekende snelheid is wat aan de lage kant maar wel van de juiste orde grootte.

Het tweede deel van het valproces, namelijk het schuiven over de bodem op een dunne waterlaag, wordt ook in het rekenmodel 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.

Enkele resultaten van de numerieke simulatie zijn gegeven in figuur 7.

Figuur 25 uit onderzoeksverslag, alleen figuur a en figuur b

Figuur 7, Voorbeeld van resultaat van numerieke simulatie (z = hoogte van de geocontainer boven de bodem; x = horizontale coördinaat; u_s = snelheid van het water tussen de geocontainer en de bodem; u_c = horizontale snelheid van de geocontainer)

Ten einde de invloed van de soortelijke massa van de geocontainer (verband houdend met het luchtgehalte) te onderzoeken zijn simulaties uitgevoerd met een soortelijke massa van respectievelijk 2100 kg/m^3, 1800 kg/m^3 en 1500 kg/m^3. Uit de berekeningen is gebleken dat, ten opzichte van de geocontainer met ρ_b = 1800 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.

2.4 Veldmetingen aan geocontainers gestort in de Kandiadam [Schrijver en Peters 2001] & [Bezuijen 2002]

Ook deze metingen waren gericht op positioneringsnauwkeurigheid en het eventuele scheuren 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.

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 zandwinput 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.

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.

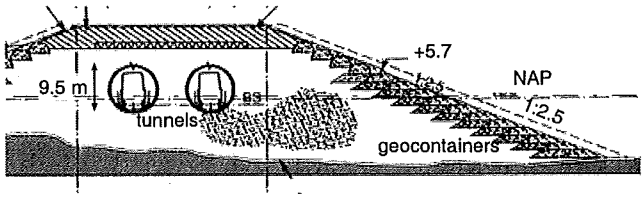


Fig.8 Gedeelte van de te bouwen Kandia dam volgens oorspronkelijk ontwerp. Aan de andere kant van de dam bevindt zich een vergelijkbaar talud.

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.

Gebleken is dat de plaatsingsnauwkeurigheid van de containers beperkt is. Er komen afwijkingen van enkele meters voor bij een valhoogte van 15 tot 17 m: afhankelijk van de diepte werd een standaardafwijking van 3,5 m tot ruim 6 m gevonden voor de horizontale verplaatsingen loodrecht op de as van de container. Dit is zelfs meer dan is waargenomen in de kleinschalige proeven in de Venetiëfaciliteit.

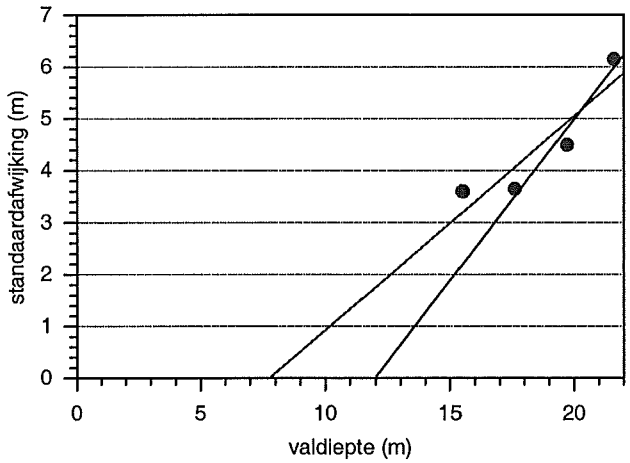


Fig. 8A Standaardafwijking als functie van de valdiepte met 2 mogelijke regressielijnen.

Het vullen van de containers heeft een grote invloed op het resultaat. Conform eerder ontwikkelde theorie bleek de belasting op het geotextiel lager bij een container die gevuld is met droog zand dan die gevuld met nat zand. Nu bleek dat ook een gelijkmatige vulling van belang is voor het horizontaal uit de splijtbak vallen van de container (zie figuur 9). Het horizontaal uit de splijtbak vallen bleek overigens nog geen garantie voor het ook horizontaal neerkomen. Bij één van de containers ontwikkelde zich gedurende de val een scheefstand.

Fig. 9 Videobeeld proef met ongelijkmatig beladen geocontainer juist voor het vallen uit de splijtbak

Overigens bleek de methode voor het plaatsen van de geocontainers zoals bij deze metingen werd toegepast, niet erg betrouwbaar. Van de 3 geocontainers waarbij de meetploeg aanwezig was, scheurden er 2 bij het plaatsen.

Overeenkomstig de verwachting bleek de belasting op de geocontainer het grootst te zijn bij het dumpen. De belastingen die een container ondervindt als er een volgende container bovenop wordt gestort, zijn veel lager.

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 ('Bezuijen-effect') en het gunstige effect van dilatantie in verzadigd zand, zijn beide waargenomen.

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 klapkades. De situatie is vergelijkbaar met die van de Kandiadam. De buitenzijde is opgebouwd met een helling 1:3; de binnenzijde met een helling 1:1.

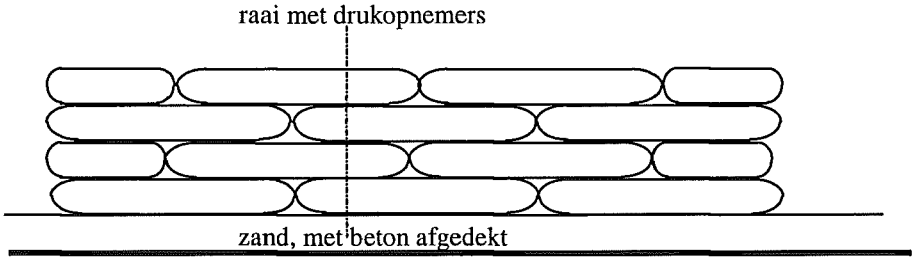
Er is gebruik gemaakt van dezelfde splijtbak als bij de Kandiadam. Ook werd hetzelfde geotextiel gebruikt, geconfectioneerd in dezelfde fabriek. Het zand werd echter geladen in IJmuiden. Tijdens de vaartocht naar Amsterdam werd het zand ontzilt met behulp van een drainage onderin de splijtbak. Volgens zegslieden was het zand droog op het moment van het dumpen. Volgens dezelfde bron was de plaatsingsnauwkeurigheid groot en zijn er weinig geocontainers buiten het profiel terechtgekomen. Kwantitatieve informatie ontbreekt op dit moment nog.

2.6 Geotechnische stabiliteit stapel geocontainers bij golfbelasting in Venetiëfaciliteit [Lambeek e.a. 2002]

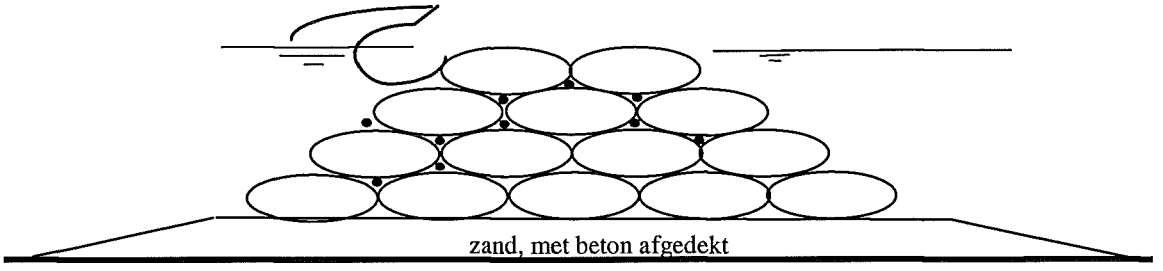
Onderzoek naar de geotechnische stabiliteit van een stapeling geocontainers is voor het eerst uitgevoerd in het kader van het project Maasvlakte 2. In de rapportage 'haalbaarheid van de toepassing van geozandelementen, dec '99' is een eenvoudige methodiek gepresenteerd, die gebaseerd is op een zeer eenvoudige aanname van de druktransmissie door de stapeling geocontainers en een oneindig lang verondersteld talud. De gekozen aannamen voor de drukken in de stapeling leiden ertoe dat de resultaten erg conservatief zijn. Om de resultaten van geotechnische stabiliteitsanalyse te verbeteren is 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 is in de huidige proeven deze druktransmissie in een stapeling geocontainers gemeten.

De huidige proeven zijn erop gericht de geotechnische stabiliteit te beproeven 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. 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. 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 dikte van gemiddeld 6 cm, breedte van 37 cm en een gemiddelde massa van 49 kg (droog). In de tweede stapeling waren de geocontainers dikker en zwaarder: 9,3 cm dik, 32 cm breed en een droog gewicht van 75 kg.



Figuur 10, Vooraanzicht van de stapeling geocontainers (schematisch)



Figuur 11, Schematisch dwarsdoorsnede van opstelling geocontainerstapeling met locatie van de drukopnemers
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 11. 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 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):

		regelmatige golven		onregelmatige golven	
proefnummer	waterstand	H (cm)	T (s)	H_s (cm)	T_s (s)
1	8 cm boven kruin	14,4	1,60	14,8	1,61
2	8 cm boven kruin	22,4	1,80	18,4	1,85
3	8 cm boven kruin	22,1	2,20	21,2	2,22
4	op kruinhoogte	15,4	2,20	17,1	2,24
5	8 cm boven kruin	14,1	1,60	15,9	1,63
6	8 cm boven kruin	19,1	1,80	20,6	1,83
7	op kruinhoogte	17,2	1,60	16,3	1,63
8	op kruinhoogte	24,9	1,80	20,9	1,83
bezwijk-proeven	8 cm boven kruin	25 à 30 cm	2,2 ; 1,6 en 2,5 s	-	-

Tabel 3.1 Gemeten golfcondities tijdens de proeven

De hoek van inwendige wrijving werd bepaald door een stapeling van drie geocontainers op een horizontaal vlak te leggen waarna dit vlak langzaam onder een helling werd ingesteld. Uit deze opstelling bleek dat de geocontainer pas bij een hoek van 45° ging verschuiven (wrijvingscoëfficiënt: $f = \tan\phi = 1{,}0$).

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 in de stapeling geocontainers plaats.

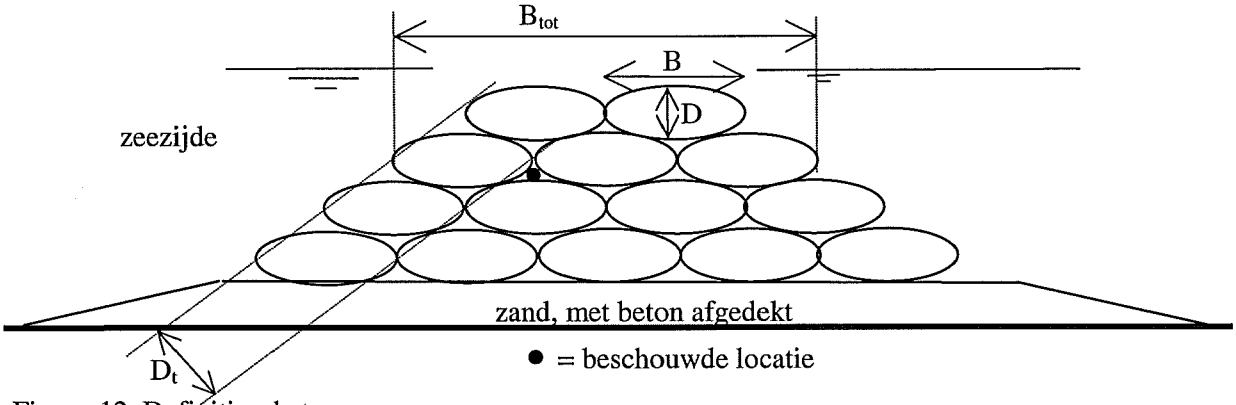
Behalve de geotechnische instabiliteit, waarbij een aantal geocontainers tegelijk van de stapeling schuiven, is het mogelijk dat er afzonderlijke geocontainers door de golfbelasting verplaatst worden. Ook dit bezwijkmechanisme is tijdens de proeven niet geconstateerd, hoewel soms bij een grote golf tijdens de eerste vier proeven (met de dunne geocontainers) de voorste geocontainer een minimale beweging liet zien, zonder netto verplaatsing.

De drukmetingen tijdens de proeven met regelmatige golven zijn nader uitgewerkt en geanalyseerd. 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 wat 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 die 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).
Op grond van deze theoretische overweging is het te verwachten dat het stijghoogteverschil over de geocontainers bovenin de dam groter is dan onderin de dam. Dit komt ook tot uiting in de volgende empirische relatie die is opgesteld op basis van de proefresultaten:

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

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

D_t = dikte van laag geocontainers die zou kunnen afschuiven = haakste afstand van drukopnemer tot taludoppervlak (m)
ϕ = stijghoogteverschil over buitenste laag geocontainers (m)
H = golfhoogte (m)
B = breedte van een geocontainer (m)
D = dikte van een geocontainer (m)



Figuur 12, Definitieschets

Tijdens de proeven met de tweede stapeling zijn er dikkere geocontainers gebruikt (B/D ≈3,5). Bij deze stapeling bleken de stijghoogteverschillen over de buitenste laag geocontainers aanzienlijk groter te zijn: gemiddeld een factor 1,6 groter.

Met behulp van bovenstaande relatie voor het stijghoogteverschil over de buitenste laag geocontainers zijn de formules voor de geotechnische stabiliteit, die waren afgeleid in het kader van het Maasvlakte-onderzoek, verbeterd. Met deze verbeterde formules is ook de stabiliteit van de modelstapelingen doorgerekend. Hieruit is gebleken dat ook volgens deze formules de modelopstelling stabiel had moeten blijven. Dit betekent dat de formules nu minder conservatief zijn, 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.

3 Plaatsingsnauwkeurigheid

3.1 3.1 Waargenomen fenomenen

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 5). Het resultaat is dat de geocontainer niet recht onder de splijtbak tot stilstand komt, maar tot vele meters daarvandaan. 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) is dit proces van afzeilen bij een grote waterdiepte ook veelvuldig geconstateerd; zelfs in een situatie waarbij er geen golven en stroming aanwezig was.

Het afzeilen maakt het uitermate moeilijk om op een grote waterdiepte de geocontainers 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), en wanneer de waterdiepte geringer 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.

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 13 is te zien dat de plaatsingsnauwkeurigheid (standaardafwijking van de uiteindelijke locatie) hard afneemt als de waterdiepte afneemt.
Bij het storten van geocontainers op relatief ondiep water in Australië (waterdiepte van 5 à 10 m) werd een goede plaatsingsnauwkeurigheid gerealiseerd. Dit is ook in overeenstemming met onderstaande figuur.

Figuur 31 uit het verslag 'analyse veldmetingen Kandiadam'

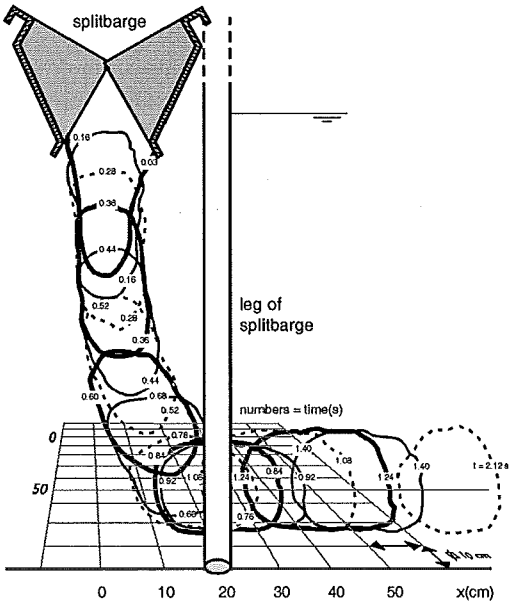
Figuur 13, standaardafwijking van positie geocontainers als functie van de valdiepte

In vrijwel alle gevallen beperkt het probleem van de plaatsingsnauwkeurigheid zich in een ongewenste verplaatsing in de richting haaks op de lengte-as van de splijtbak. In sommige gevallen is in het prototype geconstateerd dat een geocontainer niet goed uit de splijtbak valt, maar met één van de koppen eerst naar beneden gaat, terwijl de andere kop nog blijft hangen

(zie figuur 9). Dit kan leiden tot een ongewenste verplaatsing evenwijdig aan de lengte-as van de splijtbak.

3.2 Verklaring en modellering

Tijdens de proeven in de Venetiëfaciliteit is duidelijk naar voren gekomen dat de geocontainers soms direct onder de splijtbak op de bodem terecht komen, maar dikwijls ook op een grote afstand daarvan. 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 asymetrie 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 stromingsdruk (als gevolg van het vallen) tegen de geocontainers, die er vervolgens voor zorgt dat de verticale snelheid kan worden omgezet in een horizontale beweging (zie figuur 5). Als de geocontainer eenmaal bij de bodem aankomt, zal deze nog geruime tijd vooruitschuiven over de bodem.



Figuur 5, baan van vallen de geocontainer tijdens een proef met stroming (op basis van video-opnamen).

Er zijn twee proeven uitgevoerd waarbij de geocontainer gestort is op een bodem die ruwer was gemaakt door er kippengaas op te monteren. 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 heel 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 is op basis van de video-opnamen van de modelproeven. 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 planning over bodem scheren en vervolgens tot stilstand komen, goed in de simulatie te verwerken. Daardoor zal de

invloed van de parameters meer afgelezen moeten worden uit de invloed die het heeft op de horizontale snelheid op het moment dat de geocontainer bij de bodem aankomt.

Er is niet alleen een simulatie van een vallende geocontainer in het schaalmodel gemaakt, maar ook van een grote geocontainer in het prototype. De resultaten van deze berekening zijn ongeveer gelijk aan die van het schaalmodel, hetgeen een ondersteuning is van het vertrouwen in de representativiteit van het schaalmodel.
Desondanks is er een groot verschil gebleken in de mate van afzeilen in het schaalmodel en in het prototype bij in 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 in het prototype bij de Kandiadam 2 à 5 m was. Er is geen sluitende verklaring gevonden voor dit grote verschil. Een bijdrage zou kunnen zijn gevormd door het feit dat de vulling in het prototype wat minder gelijkmatig was dan in het schaalmodel. Verder zou kunnen meespelen dat de geocontainers werden gestort op de rand van een ophoging, waardoor sommige wellicht van het onderwatertalud zijn afgegleden.

3.3 Conclusies

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 en stroomsnelheid en golfhoogte.

De volgende conclusies kunnen uit het onderzoek worden getrokken:
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 m een steile stapeling met hoogte van vier geocontainers mogelijk met taluds van ongeveer 1:1,5.
Bij een waterdiepte van 15 à 20 m zonder stroming en golven is volgens het onderzoek een gemiddelde verplaatsing als gevolg van het afzeilen van ongeveer 1 tot 3 m te verwachten, als de geocontainer gestort wordt op een vlakke bodem, en mooi gelijkmatig wordt gevuld. Als de geocontainer gestort wordt op de niet vlakke ondergrond van andere geocontainers, is een beduidend grotere nauwkeurigheid mogelijk.
Het 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.
Bij een stroomsnelheid van 0,5 m/s en golven tot H_s = 1,2 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.
Een uitgekiende stortstrategie op basis van de ervaring van de betreffende aannemer kan aanzienlijk bijdragen aan de kwaliteit van het eindresultaat.

De plaatsingsnauwkeurigheid wordt beter als:

de waterdiepte kleiner is (de verhouding tussen waterdiepte en omvang van de geocontainer kleiner wordt),
de golfhoogte of stroomsnelheid kleiner is,
de geocontainer gelijkmatig wordt gevuld (met homogeen zand, qua korrelverdeling en watergehalte, en dit gelijkmatig laag voor laag aanbrengen),
de geocontainer horizontaal de splijtbak verlaat,
het oppervlak van de bodem minder vlak is,
de soortelijke massa van de geocontainer groter is,

4 Bezwijken geotextiel bij storten uit splijtbak

4.1 Bezwijken tijdens het openen van de splijtbak

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.

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 tijdverschil 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.

Uit globale berekeningen volgt dat de gebruikte geotextielen niet sterk genoeg zijn om het onder water gewicht van een geocontainer van 300 m^3 te dragen. Bezwijken is dan ook onvermijdelijk als de geocontainer vlak voor het volledig loskomen van de splijtbak nog even blijft hangen aan die bak.
(HIER EEN GLOBALE BEREKENING TOEVOEGEN. IK (ADAM) KOM OP 150 KN/M ONDERWATERGEWICHT. MET 2 GEOTEXTIELEN VAN 120 KN/M ZOU DAT DUS NET MOETEN KUNNEN).

Toepassing van het rekenmodel beschreven in de paragrafen 4.2 – 4.6 van [de Groot en Bezuijen 1999/2000] laat zien ....

4.2 Bezwijken bij vallen op de bodem

Uit alle waarnemingen volgt dat de snelheid waarmee geocontainers van ca 300 m^3 op de bodem komen bij een waterdiepte van 15 m tot 20 m meer dan 5 m/s bedraagt. Uit globale berekeningen volgens paragraaf 3.2.2 van [Bezuijen 1999] volgt dat de valenergie dan al snel te groot is om volledig geabsorbeerd te worden door rek in het geotextiel.

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. Een en ander kan gekwantificeerd worden met de formules van paragraaf 5.8 van [de Groot en Bezuijen 1999/2000]. 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.

Bij verzadigd zand blijkt dat een significant deel van de kinetische energie van de val tijdens de impact (val op de bodem) geabsorbeerd wordt door wrijving tussen de zandkorrels dankzij korrelspanning door wateronderspanning als gevolg van dilatantie. Daardoor wordt de belasting van het geotextiel tijdens impact beperkt. De belasting op het geotextiel bij een der Brutusbakproeven kwam, teruggerekend naar prototype, zodoende overeen met de halve

treksterkte van het geotextiel. Dit effect is alleen te verwachten bij de toepassing van zand met een klein gehalte aan fijne deeltjes.

De korrelspanningen in het vulmateriaal doen de belasting op het geotextiel ook afnemen als er lucht in de poriën zit (onverzadigd zand) dank zij het 'Bezuijen effect'. Dit effect kan als volgt worden samengevat. 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. Nu zal er 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.

De voor dit effect in [Bezuijen 1999] en [de Groot en Bezuijen 1999/2000] ontwikkelde theorie lijkt de orde grootte van het fenomeen wel goed weer te geven.

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.

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. Het is niet duidelijk of de te absorberen energie bij non-wovens groter kan zijn dan bij 'wovens'. Dat is echter betrekkelijk eenvoudig af te schatten door gebruik te maken van de volgende formule:
FORMULE

De sterkte van de (naai)naden en de sluiting speelt uiteraard ook een grote rol.

4.3 Conclusies

- In het verleden was aangetoond dat het bezwijken 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 het hier nog steeds gaat om een belangrijk probleemgebied.
- 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 bezwijken van het geotextiel te voorkomen.
- Met geocontainers van ca 300 m^3, geotextiel met een nominale treksterkte van 120 kN/m en een waterdiepte van ca 15 m, bezwijkt het geotextiel in het algemeen niet bij het vallen op de bodem, mits het zand een laag siltgehalte heeft en niet volledig verzadigd is.
- Een grotere veiligheid tegen dit soort bezwijken 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.
- Ook bij het verlaten van de splijtbak kan bezwijken 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.
- Het blijkt uit een analyse van de (video) waarnemingen van de prototype proeven dat ....
-

5 Geotechnische stabiliteit stapeling onder golfaanval

5.1 Waargenomen fenomenen

Geocontainers zijn relatief gladde elementen die vrij steil opgestapeld kunnen worden tot een dam. Daardoor kan geotechnische instabiliteit een serieuze bedreiging zijn. Tijdens golfaanval kan een deel van de stapeling afglijden.

Met kleinschalige modelproeven 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. Omgerekend naar prototype-omstandigheden zijn de proeven uitgevoerd met een golfhoogte tot 6 m, maar ondanks deze zware belasting is de stapeling niet bezweken.

De wrijvingscoëfficiënt van de geocontainers was in het model relatief hoog, namelijk f = 1,0. De taludhelling van de stapelingen was respectievelijk 1:3,1 en 1:1,7.

Er zijn helaas geen gegevens uit het prototype over de geotechnische stabiliteit van stapelingen.

5.2 Verklaring en modellering

Het niet bezwijken van de stapeling geocontainers zou een gevolg kunnen zijn geweest van de vrij grote wrijvingscoëfficiënt (f = 1,0). In het prototype zou de wrijvingscoëfficiënt 0,3 à 0,5 kunnen bedragen.

Voor de kwantificering van het bezwijkmechanisme is gebruik gemaakt van de formules die afgeleid zijn in het kader van een Maasvlakte-onderzoek (Berendsen, 1999). Deze formules zijn nu verbeterd op basis van de gemeten stijghoogteverschillen over de buitenste laag geocontainers. Het narekenen van het modelonderzoek levert op dat voor de eerste stapeling een bezwijkgolfhoogte van ongeveer 5 m (prototype waarde) te verwachten was. Tijdens het modelonderzoek is bij een golfhoogte van 4,5 m geen instabiliteit geconstateerd. Deze resultaten zijn in overeenstemming met elkaar.

Voor de tweede stapeling is een bezwijkgolfhoogte berekend van 4,4 m, terwijl in het modelonderzoek tot een golfhoogte van 6 m nog geen instabiliteit optrad. Aan de hand van dit resultaat blijkt de rekenmethodiek conservatief te zijn.

5.3 Conclusies

Tijdens het kleinschalig modelonderzoek in de Venetiëfaciliteit is de geotechnische instabiliteit van de stapeling geocontainers niet opgetreden. De gemeten drukken in de stapeling konden gebruikt worden om de rekenmethodiek van (Berendsen, 1999) te verbeteren.
Aan de hand van het narekenen van de resultaten van het modelonderzoek kan geconcludeerd worden dat het rekenmodel conservatieve resultaten geeft. Dit rekenmodel kan derhalve gebruikt worden als eerste controle of bij een beoogd ontwerp geotechnische instabiliteit te verwachten is.

6 Instabiliteit individuele elementen onder stroom en golf

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. De geocontainers hadden een breedte en dikte, omgerekend naar prototype waarden, van respectievelijk 7,4x1,2 m en 6,4x1,9 m.

Dit resultaat is verrassend in vergelijking tot de resultaten van het modelonderzoek van Klein Breteler et al (1994). Toen is vastgesteld dat geocontainers bij een golfhoogte van 3 à 4 m van de stapeling verplaatst raken. De geocontainers hadden in dat onderzoek een dwarsdoorsnede van 3,8x2,2 m^2 en 8,4x1,8 m^2.

Door Pilarczyk (2000) is een formule voor de golfhoogte waarbij instabiliteit ontstaat gegeven, namelijk $H = 1{,}1 \cdot \Delta B$, met $\Delta = (1 - n)(\rho_k - \rho)/\rho$ en B = breedte van de geocontainer (m). Met deze formule wordt een bezwijkgolfhoogte voor de stapeling geocontainers in de Venetiëfaciliteit gevonden van respectievelijk 8,0 m en 7,0 m. Dit resultaat is in overeenstemming met de huidige proefresultaten.

Als het onderzoek van Klein Breteler et al (1994) met de formule van Pilarczyk (2000) worden nagerekend, krijgen we een bezwijkgolfhoogte van respectievelijk 4,2 m en 9,2 m. Gezien het feit dat tijdens de modelproeven instabiliteit optrad bij een golfhoogte van 3 à 4 m moet geconcludeerd worden dat er hier sprake is van een grote discrepantie.
Totdat hier een goede verklaring voor wordt gevonden, wordt geadviseerd de formule van Pilarczyk (2000) met grote voorzichtigheid te hanteren.

De stabiliteit onder stromingsbelasting is in het huidig onderzoek niet onderzocht. Er wordt geadviseerd de resultaten van Klein Breteler et al (1994) te hanteren:

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

Er kan ook gebruik gemaakt worden van de formule van Pilarczyk (2000):
$u_{cr}/(g\Delta D) = 0{,}5$ à $1{,}0$
met:
u_{cr} = maximaal toelaatbare snelheid op de kruin (m/s)
g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)
$\Delta = (1 - n)(\rho_k - \rho)/\rho$
D = dikte van de geocontainer (m)

7 Schaaleffecten en andere modeleffecten

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 natuurlijk 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 schaaleffect; mogelijk wel van een modeleffect. 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 Kandiaproef 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 moelijk 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 het zand op een zodanige manier wordt aangebracht dat de relatieve dichtheid van het zand niet verschilt.
- ***Bezwijken 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.

8 Consequenties voor toepasbaarheid in de praktijk

1 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: 3 in stil water en 1: 5 onder Noordzee condities. Dat geldt voor geocontainers met een volume van ca 300 m^3. 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 kunnen daar wellicht tegenaan gestort worden. Ervaring van het uitvoerende personeel met het materieel, het gebruikte zand en de locale omstandigheden zal een belangrijke bijdrage leveren aan het bereiken van die hellingen.

2 Bij een waterdiepte kleiner dan 10 m zal de haalbare nauwkeurigheid flink toenemen, zodat hellingen van 1:2, respectievelijk 1:3 haalbaar lijken.

3 Bij toename van de diameter van de geocontainers neemt de plaatsingsnauwkeurigheid toe bij gelijkblijvende waterdiepte. Dat blijkt bijvoorbeeld uit de formule voor de standaardafwijking van de horizontale verplaatsing die gevonden is uit de metingen bij de Kandiadam. Daarvoor zou gelden: $\sigma \approx 0{,}5(h - 2{,}5D)$, waarin h de waterdiepte is en D de diameter (wortel uit het oppervlak van de dwarsdoorsnee). Bij h = 20 m en D = 3m wordt $\sigma \approx 6{,}3$ m gevonden. Bij D = 4m daalt deze waade tot D = 5 m. Bij kleinere geocontainers neemt de nauwkeurigheid af, maar er is een grens bij $\sigma \approx 0{,}5$ h. Dus toepassing van zeer kleine geocontainers ('zandzakken') is evenzeer mogelijk als men rekening houdt de bijbehorende standaardafwijking.

4 Toepassing van droog zand is voordelig waar het gaat om de de kans op bezwijken van de geocontainer bij het vallen op de bodem. Wel neemt de plaatsingsnauwkeurigheid waarschijnlijk iets af (orde 10%).

In stil water, waterdiepte 15 m tot 20 m: 1:3

- In zee, waterdiepte 15 m tot 20 m: 1:5
- Kleinere diepte: grotere nauwkeurigheid
- Kleinere geocontainers: ...
- Grotere geocontainers: ..
- Vulling van de containers gelijkmatig
- Droog zand
- Non-wovens
-

9 Aanbevelingen

Referenties

[Adel 1989]
Heranalyse doorlatendheidsmetingen met de Forchheimerrelatie.
GeoDelft Rapport CO-272553/56,

[Adel 1996]
Adel H. den
Alternatieve systemen, geocontainers
GeoDelft Rapport, CO-365930, april, 1996.

[Adel 1996a]
Adel H. den, Hendrikse C.S.H. & Pilarczyk K.W.
Design and application of geotubes and geocontainers. Proc. EuroGeo 1. 30-9/2-10, Maastricht, The Netherlands, pp 925-931, 1996

[Berendsen 2001]
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 hoofdtuk 6 in [Pilarczyk 1999]

[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.

[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

[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

[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

[Schrijver en Peters 2001]
Schrijver, R.R. en Peters, A.J.M. (september 2002).
Veldmetingen storten geocontainers in Kandiadam
Delft Cluster Rapport 03.02.01–06, september 2002.

[Pilarczyk 2000]
Pilarczyk K.W., Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering,
A.A. Balkema, Rotterdam (balkema@balkema.nl).

[WL, 2000]
Klein Breteler M.
Kennisontwikkeling geo-zandelementen, Modelonderzoek naar het storten van geocontainers
WL | Delft Hydraulics rapport H3679, december 2000

[Berendsen, 1999]
Berendsen E., 1999: Project Maasvlakte 2. Haalbaarhei van de toepassing van geo-zandelementen. Waterbouw Innovatie Steunpunt.

[Klein Breteler, 1994]
Klein Breteler M. et al (1994),
Stabilitty of geotubes and geocontainers, WL | Delft Hydraulics report H2029.

Pilarczyk, K.W. (DWW)

Van: Pilarczyk, K.W. (DWW)
Verzonden: woensdag 27 november 2002 12:26
Aan: 'Maarten de Groot'
CC: Berendsen, E. (DWW); Mark Klein Breteler (E-mail)
Onderwerp: RE: heranalyse geotechnische stabiliteit geocontainers

Maarten,
Ik ben morgen voor het laatst, maar dan de hele dag met Chinese delegatie, dus korte reaktie.

Zie ook mijn eerdere emails over heranalyse van Chris Stolker; GeoDelft zal daar ook moeten helpen en niet alleen aan het WL overlaten (dit is een gezamenlijk onderzoek).

Ik heb Mark ook gevraagd om naar hydraulische stabiliteit te kijken (criteria zoals in bijlage Stability of geotubes, maar dan voor geocontainers, gebasserd op 1994 onderzoek, en van nu); het is jammer dat wij geen bezwijkproef hebben gehad 9ik zal dit nog wel doen als kan, dit kan veel meer duidelijkheid opleveren, in combinatie met Duitse gegevens van geobags, die jij zal moeten via Oumeraci binnen te krijgen).

Ik vind paragraaf 6 Instabiliteit....., te oppervlakkig, en niet duidelijk (voor de lezer). Probeer veel meer stap voor stap uit te leggen. Bij strom zijn wel gegevens uit 1994 opgenomen. Doe dit ook voor golven en dan pas commentaar (gebruik ev. tabel op blz. 346, uit Geosystems 2000). Ik zal ook paar fotos uit verslag 1994, als illustratie, ook hier opnemen.

De stabiliteits regel in geosystems 2000 is gebaseerd op mortar-filled tubes 9rigid systems), en kan denk ik gebruik worden ook bij compacte elementen, zoals tube met verhouding breedte/hoogte<2 (tot 3). Bij geocontainers waar de breedte aantal malen de hoogte bedraagt zal eerst de rand worden opgelicht/omgeslagen, en dus vindt ik criterium gebaseerd op de breedte niet juist; ik denk dat dit op (gemiddelde) dikte (of A^0.5, waar A is dwaarsdoorsnede) beter moet zijn.

Antwoord van mark vindt jij in Excel (bij dikte criterium heeft hij Dmax gebruikt).
Zijn conclusie dat criterium gebaseerd op breedte b lijkt mij voorbarig (en niet logisch).
De proeven uit Duitsland zouden ons veel kunnen helpen.

In paragraaf 8 zal ik mijn eerdere suggestie om voor grotere dieptes de containers naar beneden laten zaken opnemen. ik heb van Ed begrepen dat van Herik eerste schetsen in die richting heeft gemaakt. Misschien, met hun toestemming, dit kan in het rapport opgenomen worden. Anders tenminste de tekst met verwijzing dat voor tubes in het verleden dit is ook toegepast (Van Oord ACZ). Bij geocontainers moet men denken aan een lift-platform binnen de bak.

Ook meer praktische informatie is nodig over plaatsing nauwkeurigheid in relatie van verdeling van materiaal in de bak en dumping procedure., bv. eerst deels openen, laten uitbulken, en dan laten vallen, etc.

Ik denk dat alle mogelijke suggesties voor verbetering in het rapport opgenomen moeten worden (eventueel als bijlage).

Er moet ook aktie ondernomen worden om de gegevens uit Amsterdam boven water te krijgen (paragr. 2.5); er moet iemand daar op bezoek en vertellen het belang, anders wordt dit niets.

Ik zal ook een voorbeeld berekening laten maken (van randvoorwaarden, ontwerp en uitvoringsaspecten, voor diepte 10 en 20m), zodat mensen dit getalsmatig kunnen volgen en gevoel krijgen over de uitkomsten, anders blijft dit een droog stuk papier. Misschien kunnen ook Excel rekenmodellen zoals GD en WL intern gebruikt bijgevoegd kunnen worden voor gevoeligheidsanalyses.

Ik zal graag dit rapport zien niet alleen als verantwoording van onderzoek, maar meer als aanvulling/correctie op Geosystems 2000, met praktische aanbevelingen voor gebruik gebaseerd op wat wij geleerd hebben, en hoe kan men de bestaande onzekerheden via overdimensionering (of restricties) op te vangen, zodat dit moet niet gezien als tegenwerking maar als stimulering van verdere toepassing en het leren de onzekerheden te verhelpen.

Veel success

-----Oorspronkelijk bericht-----
Van: Maarten de Groot [mailto:M.B.deGroot@geodelft.nl]
Verzonden: woensdag 27 november 2002 10:58
Aan: Pilarczyk, K.W. (DWW)
Onderwerp: Re: heranalyse geotechnische stabiliteit geocontainers

Beste Kristian,

Hierbij het eerste concept van ons rapport met resultaten van het geocontaineronderzoek. We hebben het gisteren met z'n vieren besproken (Ed, Adam en Mark). Er moet nog het nodige worden aangevuld en gewijzigd. Maar als je voor je vertrek naar Vietnam (?) nog tijd en energie hebt om je commentaar te geven, dan zouden wij dat zeer waarderen.

Hartelijke groeten, ook aan Marjan,
Maarten