

Title:	<b>Afrondende studies geocontaineronderzoek (Final studies geocontainer research)</b>		
Author:	Ir. M. Klein Breteler	Institute:	WL   Delft Hydraulics
Author:	Ir. C. Stolker	Institute:	WL   Delft Hydraulics
Author:	Ir. M.B. de Groot	Institute:	GeoDelft
			<b>June 2003</b>
Number of pages	:	92	
Keywords (3-5)	:	geocontainers, geotextiles, wave loading, sliding stability	
DC-Publication-number	:	DC1-321-12	
Institute Publication-number (optional)	:		
Report Type	:	<input checked="" type="checkbox"/>	Intermediary report or study
	:	<input 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 results of the main studies have been reported in other reports of this series: DC1-321-3,4,5,6 & 7. The results of 4 studies on special aspects, which appeared to be relevant during the reporting of the main studies, have been reported here. All results, including the ones reported here, have been summarised in report DC1-321-11.

The special aspects include:

1. The influence of obliqueness of a geocontainer at the moment it falls out of the splitbarge, on its horizontal displacement during the dumping process
2. The influence of the specific mass of a geocontainer on its horizontal displacement during the dumping process
3. The influence of the wave induced outward pressure head difference over the upper layer of geocontainers in the seaward slope of a heap of geocontainers on the sliding stability of the outer layer of geocontainers
4. The process of falling out of the splitbarge during the opening of the splitbarge, as observed during the dumping of a geocontainer in the Kandiadam.

These aspects are discussed in, respectively ‘DEEL 1’, ‘DEEL 2’, ‘DEEL 3’ and ‘DEEL 4’ of this volume.

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

## 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 results of the main studies have been reported in other reports of this series: DC1-321-3,4,5,6 & 7. The results of 4 studies on special aspects, which appeared to be relevant during the reporting of the main studies, have been reported here. All results, including the ones reported here, have been summarised in report DC1-321-11.

These aspects are discussed in ‘DEEL 1’, ‘DEEL 2’, ‘DEEL 3’ and ‘DEEL 4’ of this volume.

DEEL 1 discusses the influence of obliqueness of a geocontainer at the moment it falls out of the splitbarge, on its horizontal displacement during the dumping process. The obliqueness refers to the situation that one end of the geocontainer arrives at the sea bed earlier than the other end. The influence is studied by a detailed analysis of the video’s recorded during the tests of the dumping of scaled model containers in water with or without waves and currents. See also DC1-321-5.

DEEL 2 discusses the influence of the specific mass of a geocontainer on its horizontal displacement during the dumping process. The influence is studied by performing a number of calculations with the numerical model for the falling process reported in DC1-321-5.

DEEL 3 discusses the influence of the wave induced outward pressure head difference over the upper layer of geocontainers in the seaward slope of a heap of geocontainers on the sliding stability of the outer layer of geocontainers. The influence is studied by re-analysing the measured pressure signals in the wave-attacked heap of geocontainers during the scale model tests reported in DC1-321-7. The re-analysis is performed in such a way as to find the maximum outward pressure head difference over the upper layer of geocontainers on the seaward slope of the heap of geocontainers. This difference appears to be a function of the wave height and the ratio between the thickness of the layer and the width of the heap. A mathematical formulation is established for this empirical function. The resulting pressure head difference is used as input for calculations with the equation derived by Koehorst for the sliding stability of this upper layer. The calculations were applied to the test situations. The calculation results have been compared with the observed stability.

DEEL 4 discusses the process of falling out of the splitbarge during the opening of the splitbarge, as observed during the dumping of a geocontainer in the Kandiadam. The video of this process has been used to establish the relationship between the degree of opening of the splitbarge and the degree of settlement of the upper part of the geocontainer. Special attention is paid to the opening size at which the geocontainer left the splitbarge. A hindcast of this process has been made by means of an earlier developed mathematical model. The model had to be revised slightly in view of the ‘overlengte’ (additional length of geotextile in the lower part of the container). The model appeared to simulate fairly well the degree of settlement of the upper part of the geocontainer as a function of the opening size and the opening size critical for the falling out of the barge. This enabled the application of the mathematical model to estimate the influence of many parameters on the critical opening size, an important boundary condition for the falling process.

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

## 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	:	<a href="#">03.02.01</a>		
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](mailto:info@delftcluster.nl)  
[www.delftcluster.nl](http://www.delftcluster.nl)

**Theme Managementteam: Coast and River**

<b>Name</b>	<b>Organisation</b>
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:

<b>Name</b>	<b>Organisation</b>
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:

<b>Name</b>	<b>Organisation</b>
1 Ir Ir. M. Klein Breteler	WL Delft Hydraulics
2 Ir. C. Stolker	WL Delft Hydraulics
3 Ir. M.B. de Groot	GeoDelft

## **INHOUD**

- Deel 1      Storten van geocontainers  
                 Invloed scheefstand tijdens het vallen**
- Deel 2      Invloed soortelijke massa op afzeilen van geocontainers**
- Deel 3      Heranalyse van modelonderzoek geotechnische stabiliteit van  
                 stapel geocontainers**
- Deel 4      Wegzakken en loskomen uit splijtbak  
                 Nadere analyse van geocontainer gestort bij Kandia**

## **DEEL 1**

### **Storten van geocontainers Invloed scheefstand tijdens het vallen**

**M. Klein Breteler**

# STORTEN VAN GEOCONTAINERS, INVLOED SCHEEFSTAND TIJDENS HET VALLEN

M. Klein Breteler  
25-11-'02

## 1 Inleiding

Geocontainers komen helaas niet altijd recht onder de splijtbak op de bodem terecht. In veel gevallen treedt er een soort afzeilmecanisme op waarbij de geocontainer eerst recht naar beneden valt en op gegeven moment zijn verticale snelheid weet om te zetten naar een horizontale snelheid. De geocontainer komt dan pas na vele meters tot stilstand.

Onlangs is de suggestie gedaan dat wellicht een scheefstand tijdens het vallen van de geocontainer invloed zou kunnen hebben op de mate van het afzeilen.

Met deze scheefstand wordt bedoeld dat de ene kop van de geocontainer eerder bij de bodem aan komt dan de andere kop. Dit zou een gevolg kunnen zijn van het niet gelijkmatig loskomen uit de splijtbak, waardoor de ene kop nog heel even wordt vastgehouden terwijl de andere kop al gaat vallen.

In deze notitie zijn de resultaten beschreven van een nadere analyse van de videobeelden van het storten van de geocontainers tijdens de proeven in de Venetiëfaciliteit [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]

## 2 Resultaten

In tabel 1 en 2 zijn de resultaten van de nadere analyse van het vallen van de geocontainers gegeven. In de laatste kolom van de tabellen is de maximale scheefstand tijdens het vallen gegeven:

- categorie a:  $0^\circ < |\theta| < 10^\circ$
- categorie b:  $10^\circ < |\theta| < 20^\circ$
- categorie c:  $|\theta| > 20^\circ$

$\theta$  = de maximale hoek met de horizontaal die de geocontainer heeft tijdens het vallen ( $^\circ$ )

In de tabellen valt op dat de witte geocontainers, die gebruikt zijn in de eerste proevenserie (zie tabel 1), veel vaker scheef naar beneden vielen, dan de Geolon 15 geocontainers uit tabel 2. Van de witte geocontainers viel 54% met  $|\theta| < 10^\circ$  en 19% met  $|\theta| > 20^\circ$ , terwijl dit voor de geocontainers in tabel 2 respectievelijk 74% en 9% was.

Op basis van de waarnemingen is er geen relatie te ontdekken tussen de mate van afzeilen en de scheefstand tijdens het vallen van de geocontainers.



### 3 Conclusie

In deze notitie zijn de resultaten gegeven van een analyse van de scheefstand van geocontainers tijdens het vallen in relatie tot de mate van afzeilen van de geocontainers tijdens dit stortproces.

De analyse heeft geleid tot de conclusie dat er geen relatie is te ontdekken tussen de mate van afzeilen en de scheefstand tijdens het vallen van de geocontainers.

proefnr	code	Geotextiel	D <sub>50</sub> zand mm	verstijfde ruwe bak?	Hs cm	u cm/s	V cm	R gr	bijzonderheden	valt scheef?
1	1	wit PP	0.145	nee	droog		-1	0	plooi lag in de bak	a
2	2	wit PP	0.145	nee	droog		0	0	plooi lag in de bak	c
3	3A	wit PP	0.145	nee	0	0	-36	-4	plooi lag in de bak	a
4	3B	wit PP	0.145	nee	0	0	-10	0	plooi lag in de bak	a
5	3C	wit PP	0.145	nee	0	0	-10	-2	plooi lag in de bak	a
6	3D	wit PP	0.145	nee	0	0	-20	0	plooi lag in de bak	b
7	3E	wit PP	0.145	nee	0	0	0	0	plooi lag in de bak	c
8	4A	wit PP	0.145	nee	6	0	2	2	plooi lag in de bak	b
9	3A2	wit PP	0.145	nee	0	0	0	0		b
10	3B2	wit PP	0.145	nee	0	0	-12	-8		c
11	3C2	wit PP	0.145	nee	0	0	-10	-10		a
12	3D2	wit PP	0.145	nee	0	0	-12	6		c
13	3E2	wit PP	0.145	nee	0	0	-21	-3		a
14	4A2	wit PP	0.145	nee	6	0	-40	8	Openingsnelheid: 5s	
15	4B2	wit PP	0.145	nee	6	0	-39	5	Openingsnelheid: 5s	c
16	4C2	wit PP	0.145	nee	6	0	-10	4	Openingsnelheid: 5s	a
17	4D2	wit PP	0.145	nee	6	0	1	7	Openingsnelheid: 5s	b
18	4E2	wit PP	0.145	nee	6	0	-11	10	Openingsnelheid: 5s	a
19	4A3	wit PP	0.145	nee	6	0	18	4	Openingsnelheid: 3.1s	a
20	4B3	wit PP	0.145	nee	6	0	7	2	Openingsnelheid: 3.1s	b
21	4C3	wit PP	0.145	nee	6	0	4	-4	Openingsnelheid: 3.1s	a
22	4D3	wit PP	0.145	nee	6	0	10	0	Openingsnelheid: 3.1s	a
23	4E3	wit PP	0.145	nee	6	0	0	-7	Openingsnelheid: 3.1s	b
24	3A4	wit PP	0.210	nee	0	0	0	1	Openingsnelheid: 3.1s	a
25	3A5	wit PP	0.210	ja	0	0	0	0		a
26	3B5	wit PP	0.210	ja	0	0	-40	13		a
27	3C5	wit PP	0.210	ja	0	0	-27	8		b

Tabel 1 Proeven programma en de resultaten met witte PP-geocontainers (V = verplaatsing in stroomafwaarts richting tijdens stortproces; R = rotatie om verticale as tijdens stortproces; scheefstand tijdens vallen: a = 0 à 10°; b = 10 à 20°; c = 10° à 90°)

proefnr	code	Geotextiel	D <sub>50</sub> zand mm	verstijfde ruwe bak?	Hs cm	u cm/s	V cm	R gr	bijzonderheden	valt scheef?
30	3A6	geolon 15	0.210	ja	0	0	2	2		a
31	3B6	geolon 15	0.210	ja	0	0	0	0		a
32	3C6	geolon 15	0.210	ja	0	0	15	6	scheef gestikte zak	a
33	3D6	geolon 15	0.210	ja	0	0	10	2		a
34	3E6	geolon 15	0.210	ja	0	0	2	-4		a
35	4A4	geolon 15	0.210	ja	6	0	-7	0		a
36	4B4	geolon 15	0.210	ja	6	0	36	-10		a
37	4C4	geolon 15	0.210	ja	6	0	21	10		b
38	4D4	geolon 15	0.210	ja	6	0	20	6		a
39	4E4	geolon 15	0.210	ja	6	0	44	-8		a
40	1A1	geolon 15	0.210	ja	0	22	94	-3		a
41	1B1	geolon 15	0.210	ja	0	22	99	-16		b
42	1C1	geolon 15	0.210	ja	0	22	124	16		a
43	1D1	geolon 15	0.210	ja	0	22	139	16		a
44	1E1	geolon 15	0.210	ja	0	22	110	-21		a
45	5A1	geolon 15	0.210	ja	6	22	130	0		a
46	5B1	geolon 15	0.210	ja	6	22	115	27		a
47	5C1	geolon 15	0.210	ja	6	22	122	-20		a
48	5D1	geolon 15	0.210	ja	6	22	121	-10		a
49	5E1	geolon 15	0.210	ja	6	22	128	-23		a
50	2A1	geolon 15	0.210	ja	0	11	28	-14		b
51	2B1	geolon 15	0.210	ja	0	11	80	-26		b
52	2C1	geolon 15	0.210	ja	0	11	76	0		a
53	2D1	geolon 15	0.210	ja	0	11	72	-12		a
54	2E1	geolon 15	0.210	ja	0	11	9	3		c
55	6A1	geolon 15	0.210	ja	6	11	-32	4	lage vullingsgraad: 40 kg	a
56	6B1	geolon 15	0.210	ja	6	11	52	-49	lage vullingsgraad: 40 kg	b
57	6C1	geolon 15	0.210	ja	6	11	100	0		a
58	6D1	geolon 15	0.210	ja	6	11	92	10		a
59	6E1	geolon 15	0.210	ja	6	11	20	6		b
60	6F1	geolon 15	0.210	ja	6	11	100	7		a
61	6G1	geolon 15	0.210	ja	6	11	101	-14		
62	8A	geolon 15	0.210	ja	6	11	62	-7	op gaasbodem	
63	9A	geolon 15	0.210	ja	0	0	-1	0	op gaasbodem	
64	10A	velour	0.210	ja	6	11	15	7		c
65	10B1	velour	0.210	ja	6	11	6	8		a
66	10C	velour	0.210	ja	6	11	0	11		c

Tabel 2 Proeven programma en de resultaten met geocontainers van Geolon 15 en velour (V = verplaatsing in stroomafwaarts richting tijdens stortproces; R = rotatie om verticale as tijdens stortproces; scheefstand tijdens vallen: a = 0 à 10°; b = 10 à 20°; c = 10° à 90°)

## **DEEL 2**

### **Invloed soortelijke massa op afzeilen van geocontainers**

**M. Klein Breteler**

# INVLOED SOORTELIJKE MASSA OP AFZEILEN VAN GEOCONTAINERS

M. Klein Breteler  
22-11-'02

## 1 Inleiding

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; Klein Breteler et al 2001) 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. Het resultaat is dat de geocontainer niet recht onder de splijtbak tot stilstand komt, maar vele meters daarvandaan.

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.

In deze notitie is de invloed van de soortelijke massa van de geocontainer op de mate van afzeilen bekeken. Daarvoor is gebruik gemaakt van het numerieke model van WL waarmee het valproces van geocontainers kan worden gesimuleerd. Dit numerieke model is in detail beschreven in (Klein Breteler et al 2001).

Dit aspect is van belang omdat een geocontainer met droog zand lichter is dan een met water verzadigd zand.

## 2 Numerieke simulaties

In het numerieke model van WL is het krachtenspel op vallende geocontainers op basis van de elementaire vloeistofmechanica weergegeven. Het resulterende computerprogramma kan de baan van de vallende geocontainer beschrijven. Het is gebleken dat het valproces verdeeld kan worden in twee delen:

1. eerst valt de geocontainer ongeveer recht naar beneden,
2. maar bij de bodem wordt de verticale snelheid omgezet in een horizontale snelheid en zeilt de geocontainer over een grote afstand weg.

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. 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.

De invloed van de soortelijke massa van de geocontainer op de mate van afzeilen is geschat met behulp van een aantal berekeningen met het numerieke model, hoewel dit model het laatste deel van de beweging niet goed weergeeft. Daarom wordt deze invloed afgeleid uit de grootte van de horizontale snelheid op moment dat de geocontainer bij de bodem is aangekomen (de overgang van het eerste deel van het valproces naar het tweede deel).

Als uitgangspunt is de volgende berekening genomen:

- soortelijke massa van het water:  $1000 \text{ kg/m}^3$
- waterdiepte: 16 m
- stroomsnelheid: 0,49 m/s
- hydraulische ruwheid van de bodem: 20 mm
- lengte van de geocontainer: 28,8 m
- soortelijke massa van de geocontainer (water en zand):  $1800 \text{ kg/m}^3$
- massa van de geocontainer (water en zand): 480 ton
- hoogte-breedte verhouding: 2,3
- $C_d$ -waarde van geocontainer (coëfficiënt stromingskracht): 1,2
- elasticiteit van geocontainer:  $10^7 \text{ Pa/m}$
- niveau van het hart van de geocontainer bij begin van de beweging: 14 m boven de bodem

Het resultaat van de berekening is te zien in figuur 1. In deze figuur zijn volgende variabelen gebruikt:

$u_c$  = horizontale snelheid van de geocontainer (m/s)

$u_s$  = watersnelheid tussen de geocontainer en de bodem (m/s)

$P_{\max}$  = druk tussen de geocontainer en de bodem (Pa)

$w_c$  = verticale snelheid van de geocontainer (m/s)

$x$  = horizontale coördinaat (m)

$z$  = verticale coördinaat (m)

In deze figuur is te zien dat de maximale horizontale snelheid van de geocontainer met soortelijke massa van  $1800 \text{ kg/m}^3$ , als deze de bodem bereikt, gelijk is aan 1,30 m/s.

In figuur 2 en 3 zijn de resultaten gegeven van de berekeningen met geocontainers met een soortelijke massa van respectievelijk  $1500 \text{ kg/m}^3$  en  $2100 \text{ kg/m}^3$ . Het blijkt dat de maximale horizontale snelheid nu respectievelijk 1,43 m/s en 1,23 m/s.

Met deze berekeningen wordt duidelijk dat een lichte geocontainer een grotere horizontale snelheid bij de bodem krijgt en daardoor waarschijnlijk ook verder gaat afzeilen. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door het feit dat de verticale snelheid van de lichte geocontainer lager is waardoor hij meer tijd heeft om een rotatie om zijn lengte-as te maken. Juist deze rotatie zorgt ervoor dat hij zijn verticale snelheid kan omzetten in een horizontale snelheid.

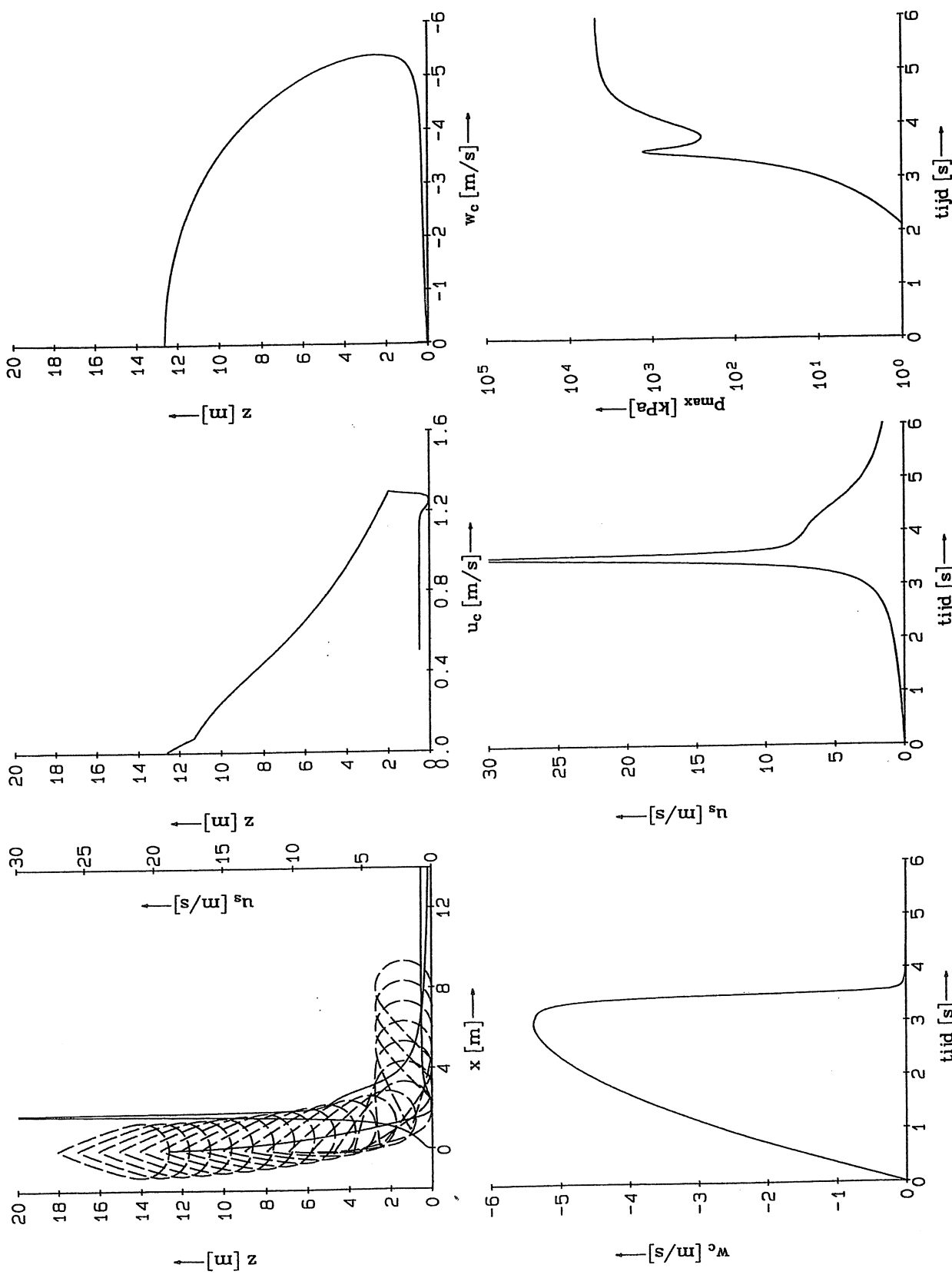
### 3 Conclusies

De soortelijke massa van een geocontainer die gevuld is met droog zand zal beduidend kleiner zijn dan een die gevuld is met verzadigd zand. De numerieke simulaties leiden tot de conclusie dat een lichte geocontainer een grotere horizontale snelheid bij de bodem krijgt en daardoor waarschijnlijk ook verder gaat afzeilen.

Hierdoor zal de plaatsingsnauwkeurigheid van geocontainers die gevuld zijn met droog zand minder zijn dan die gevuld zijn met nat zand.

### Referenties

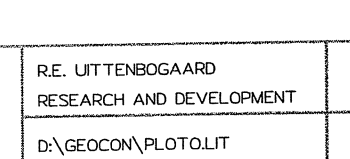
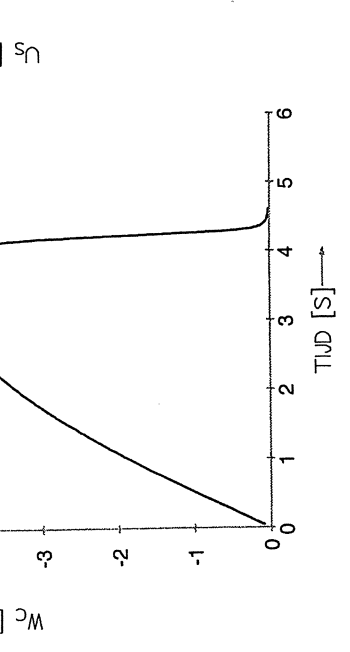
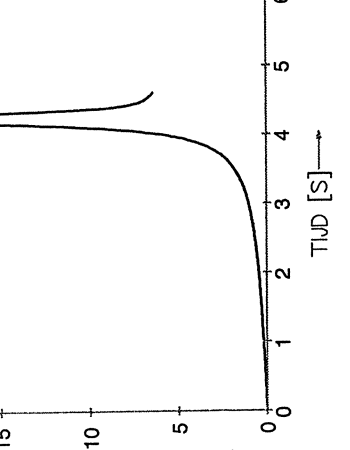
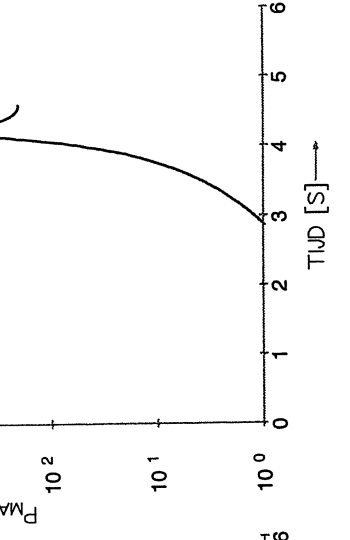
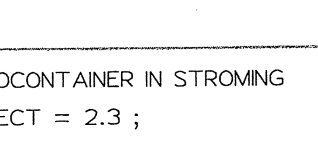
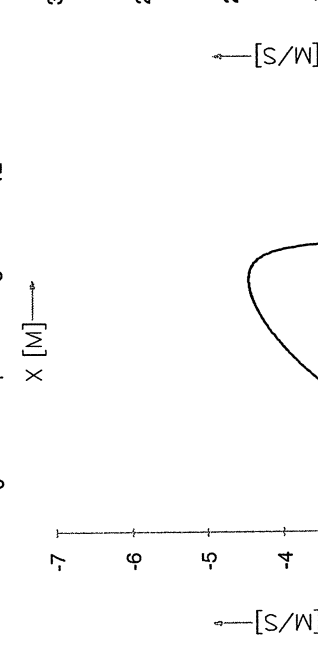
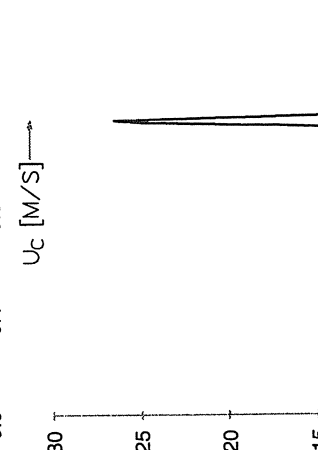
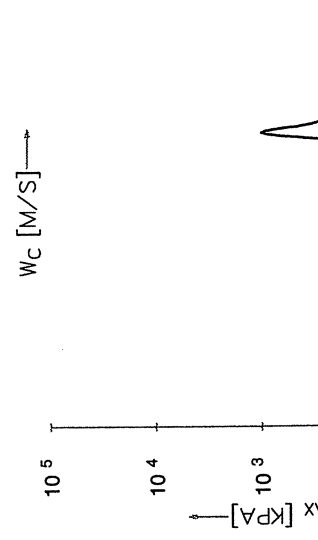
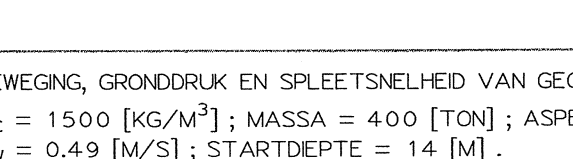
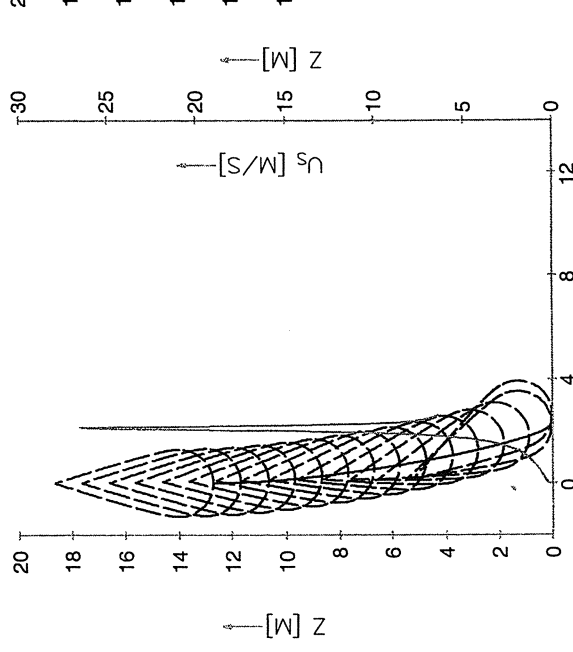
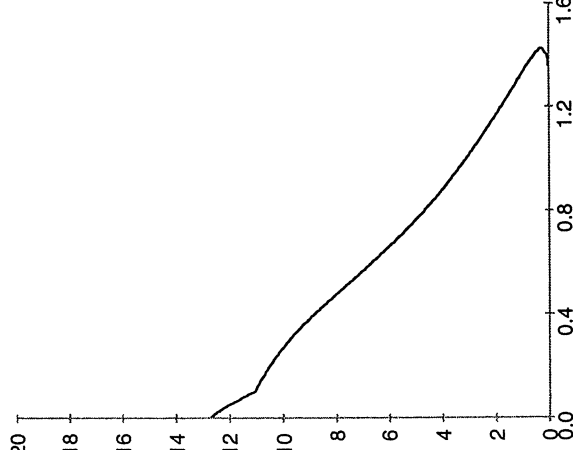
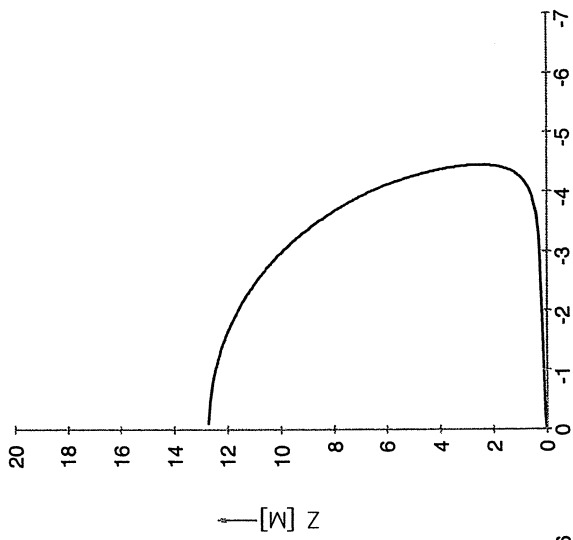
Klein Breteler, M., R.E. Uittenboogaard en W. Eysink  
Storten van geocontainers in stroming en golven  
modelonderzoek en numerieke simulatie  
Delft Cluster Rapport 03.02.01-05, november 2001  
WL- rapport H3820



Beweging, gronddruk en spleetsnelheid van geocontainer in stroming  
 $\rho_c = 1800 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ ; massa = 480 [ton]; aspect = 2.3;  
 $u_w = 0.49 \text{ [m/s]}$ ; startdiepte = 14 [m].

RE Uittenbogaard  
 Research and Development  
 d:\geocon\ploto.pro

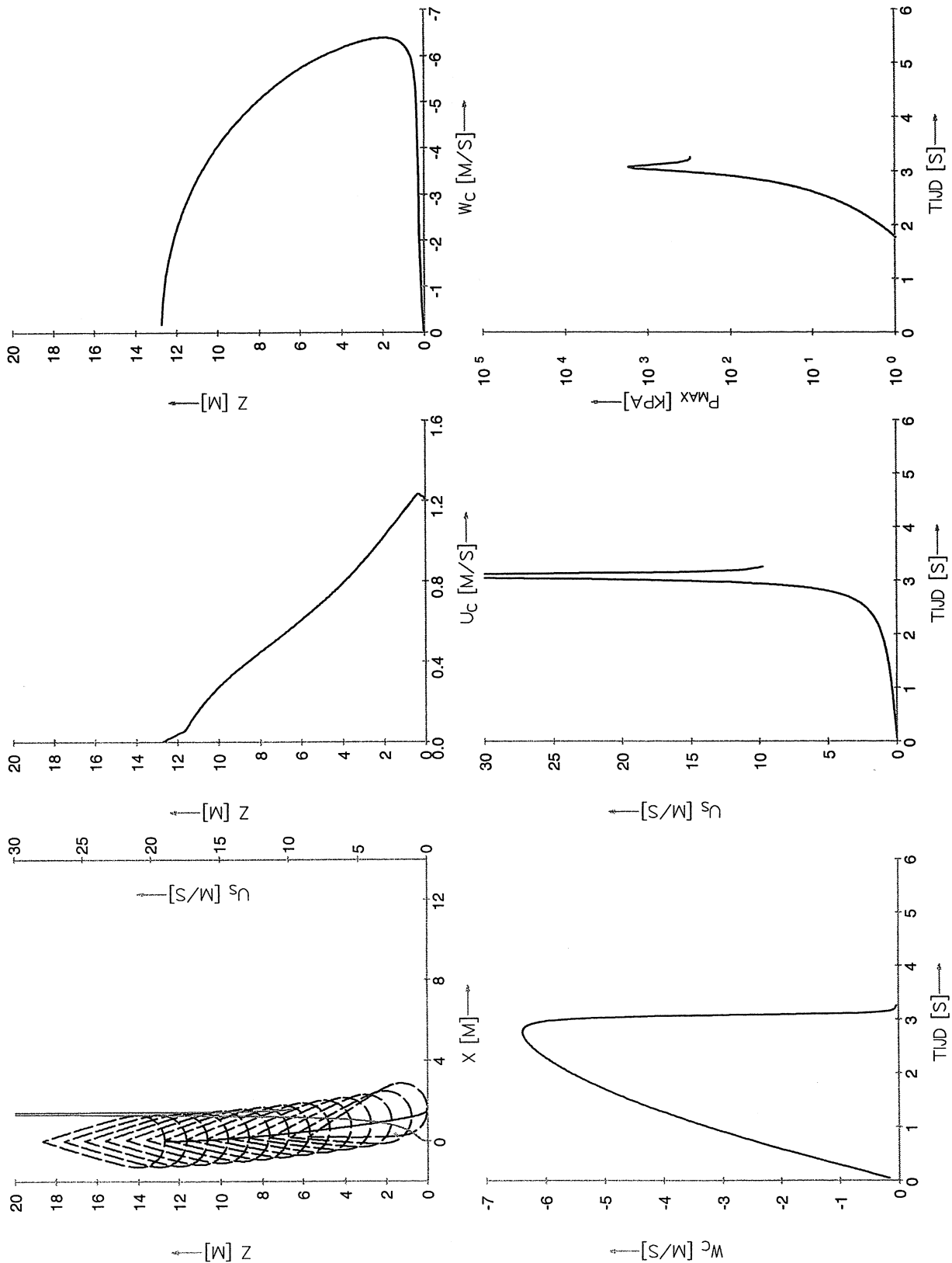




BEWEGING, GRONDDRUK EN SPLEETSNELHEID VAN GEOCONTAINER IN STROMING  
 $\sigma_c = 1500 \text{ [KG/M}^3\text{]}$ ; MASSA = 400 [TON]; ASPECT = 2.3;  
 $U_w = 0.49 \text{ [M/S]}$ ; STARTDIEPTE = 14 [M].

R.E. UITTENBOGAARD  
 RESEARCH AND DEVELOPMENT

D:\GEOCON\PLOT.LIT



BEWEGING, GRONDDRUK EN SPLEETSNELHEID VAN GEOCONTAINER IN STROMING

$\sigma_c = 2100$  [KG/M<sup>3</sup>]; MASSA = 560 [TON]; ASPECT = 2.3;

$U_w = 0.49$  [M/S]; STARTDIEPTE = 14 [M].

R.E. UITTENBOGAARD  
RESEARCH AND DEVELOPMENT

D:\GEOCON\PLOTO.HEA

## **DEEL 3**

### **Geotechnische stabiliteit van stapel geocontainers**

**Heranalyse van modelonderzoekresultaten**

**C. Stolker**

# **Geotechnische stabiliteit van stapeling geocontainers**

Heranalyse van modelonderzoekresultaten

**C. Stolker**

augustus 2003



# Inhoud

## Symbolenlijst

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Korte beschouwing van de uitgevoerde proeven.....</b>	<b>2</b>
2.1	Modelopbouw .....	2
2.2	Drukopbouw.....	3
2.3	Proeven.....	3
2.4	Hoek van inwendige wrijving en dilatantie .....	3
<b>3</b>	<b>Databewerking.....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Analyse van de drukopbouw in de stapeling .....</b>	<b>8</b>
4.1	Inleiding .....	8
4.2	Relatie drukopbouw en locatie in de stapeling .....	9
<b>5</b>	<b>Geotechnische stabiliteit .....</b>	<b>12</b>
5.1	Algemeen .....	12
5.2	1 <sup>e</sup> stapeling .....	13
5.3	2 <sup>e</sup> stapeling .....	15
<b>6</b>	<b>Discussie .....</b>	<b>19</b>
6.1	Stijghoogteverschil.....	19
6.2	Maatgevende belastingen .....	20
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen .....</b>	<b>22</b>

## Literatuur

## Appendix A

## Appendix B

## Lijst van Symbolen

Symbool	Eenheid	Betekenis
a, b, c, d	m	parameters die afstanden vertegenwoordigen
$B_b$	m	breedte stapeling op de basis (bodem)
$B_G$	m	breedte van een individuele geocontainer
$B_k$	m	breedte stapeling op kruinniveau
$B_{tot}$	m	totale horizontale breedte van de stapeling op een bepaald niveau
D	m	karakteristieke doorsnede van het buitenste goeement
$D_t$	m	haakse afstand van drukopnemer tot talud
$D_8$	m	directe afstand van drukopnemer tot drukopnemer 8
F	N/m	variërende component van de kracht in de stapeling p.e.v. lengte
f	-	gemobiliseerde wrijvingscoëfficiënt
$f_c$	-	kritieke wrijvingscoëfficiënt = $\tan \gamma$
$f_e$	-	wrijvingscoëfficiënt uit experiment
G	N/m	kracht door eigen gewicht p.e.v. lengte
g	$m/s^2$	gravitatieversnelling ( $9,81 m/s^2$ )
h	m	waterdiepte
H	m	golfhoogte
$H_c$	m	kritieke golfhoogte
$H_s$	m	significante golfhoogte
I	$m^3/m^1$	volume van een geocontainer per strekkende meter
$I_c$	$m^3$	volume van een geocontainer
$I_t$	$m^3/m^1$	volume van een verzameling geocontainers per strekkende meter
l	m	lengte geocontainer (haaks op de kust)
$L_t$	m	horizontale afstand van een bepaalde locatie (bijvoorbeeld vanaf de drukopnemer) tot het talud aan de zeezijde (soms $L_{talud}$ genoemd)
$L_s$	m	beschouwde lengte langs het talud
$L_0$	m	golflengte ( $=1,56 \cdot T_p^2$ )
$L_8$	m	horizontale afstand van de drukopnemer tot drukopnemer 8
N	N/m	Normaalkracht p.e.v. lengte
n	-	poriëngetal
P	$N/m^2$	netto (naar buiten gerichte) druk in de stapeling
$P_c$	$N/m^2$	kritieke (naar buiten gerichte) druk in de stapeling
$P_x$	$N/m^2$	drukwaarde van drukopnemer x, respectievelijk 1, 2, 5, 6, 7, 9
$T_p$	s	golfperiode
V	m	afstand onder de kruin
$V_{tot}$	m	totale hoogte van de stapeling
W	N/m	wrijvingskracht p.e.v. lengte
zero-level	$kN/m^2$	drukniveau van de drukopnemer bij stilstaand
$\alpha$	°	hellingshoek talud van de stapeling
$\beta$	°	dilatatiehoek, hoek waaronder de goeementen over elkaar willen afschuiven
$\varphi$	°	hoek van wrijving tussen geotextielen
$\phi$	m	stijghoogteverschil tussen twee drukopnemers

---

$\phi_{50\%}$	m	50% overschrijdingswaarde van het stijghoogteverschil tussen twee drukopnemers
$\gamma$	°	totale wrijvingshoek c.q. rusthoek voor geotextielen stapeling
$\rho_b$	kg/m <sup>3</sup>	bulkdictheid van zand (= inclusief poriën)
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	dichtheid van water (1000 kg/m <sup>3</sup> )





# 1 Inleiding

In 2001 zijn fysische experimenten uitgevoerd met golfbelasting op twee stapelingen van met zand gevulde geocontainers. In het rapport van die studie (Klein Breteler, 2001) is een analyse uitgevoerd naar de drukopbouw in deze stapelingen. Op basis van de resultaten van de experimenten zijn relaties afgeleid tussen de dimensieloze drukgolfhoogte en de dimensieloze locatie in de stapeling. Hierbij was de drukgolfhoogte gedefinieerd als het verschil in gemiddelde druk onder een golftop (c.q. het gemiddelde van de maximale druk) en de druk in een golfdal (c.q. het gemiddelde van de minimale druk) per drukopnemer. Bij nader inzien blijkt dit toch niet een goede keuze geweest te zijn, omdat juist het maximale drukverschil tussen twee locaties op een bepaald tijdstip van belang is en niet zozeer een verschil in drukgolfhoogte op één locatie.

In 2002 zijn daarom nieuwe activiteiten geformuleerd in het kader van onderzoek naar de geotechnische stabiliteit van geocontainers. Eén onderdeel betrof de analyse van de gemeten drukverschillen tussen twee locaties. Dit rapport beschrijft deze analyse.

Tevens gaat dit verslag in op een berekeningsmethode voor het bepalen van de stabiliteit van een stapeling geocontainers. De resultaten uit de experimenten dienen hierbij als input. Deze analyse vervangt de 'analyse van de geotechnische stabiliteit' gepresenteerd in paragraaf 4.2 van (Klein Breteler, 2001).

Geotubes<sup>®</sup> en Geocontainers<sup>®</sup> zijn geregistreerde handelsmerken van Ten Cate Nicolon BV.

## 2 Korte beschouwing van de uitgevoerde proeven

### 2.1 Modelopbouw

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.

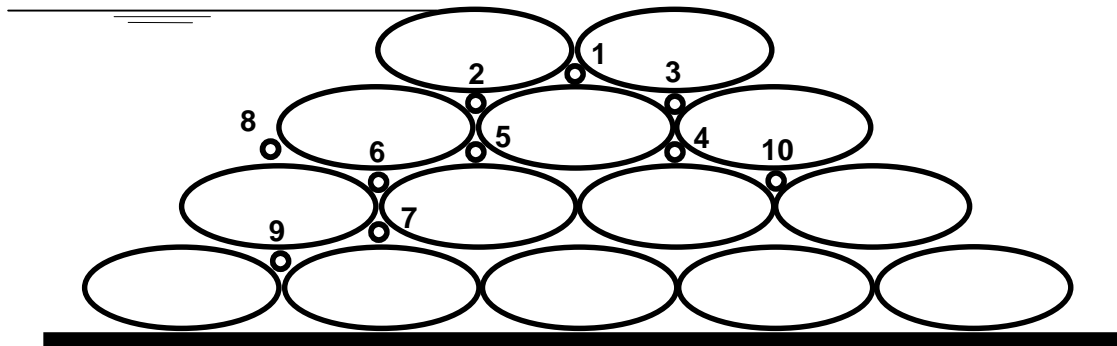
Met kleinschalige modelproeven in de Venetiëfaciliteit van WL | Delft Hydraulics is onderzocht bij welke golfcondities dit mechanisme gaat optreden. Het onderzoek is uitgevoerd met normaal gevulde geocontainers en extra gevulde geocontainers op een schaal 20, waardoor de stijghoogte in het prototype 20 maal groter is dan in het model. Omgerekend naar prototype-omstandigheden zijn de proeven uitgevoerd met geocontainers met een dwarsdoorsnede van respectievelijk  $1,2 \cdot 7,4 \text{ m}^2$  en  $1,9 \cdot 6,4 \text{ m}^2$  en golfhoogtes tot 6 m, maar ondanks deze zware belasting is de stapeling niet bezwaken.

De proefopstelling van het experiment bestond uit een stapeling van geocontainers, zoals afgebeeld in Figuur 1. De in de figuur aangegeven bodem bevond zich op 0,15 m boven de gootbodem en strekte zich uit tot ca. 0,5 m ter weerszijden van de teen van de stapeling. De stapeling kan zodoende worden beschouwd als het model van het bovenste deel van een onderwater dam die 0,15 m hoger is dan die van de stapeling en die voorzien is van bermten op 0,15 m boven de zeebodem.

De experimenten zijn uitgevoerd met twee afmetingen geocontainers, waarbij de vorm van de stapeling echter is gehandhaafd. Tabel 1 geeft de afmetingen weer van de geocontainers die voor de twee stapelingen zijn gebruikt. Tevens geeft deze tabel het individuele gewicht van een container.

	hoogte container (m)	breedte container (m)	lengte container (m)	droog gewicht (kg)	vul percentage %
<b>1e stapeling</b>	0,06	0,37	1,40	49	46
<b>2e stapeling</b>	0,093	0,32	1,40	75	70

Tabel 1 Afmetingen geocontainers



Figuur 1 Dijklichaam van geocontainers, inclusief locatie drukopnemers

## 2.2 Drukopbouw

Voorts zijn waterdrukmetingen uitgevoerd. Er bevonden zich hiervoor 10 drukopnemers tussen de verschillende geocontainers, genummerd van 1 tot 10 (zie Figuur 1). Met deze drukopnemers is de drukopbouw in de stapeling bekeken.

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 in dit geval 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).

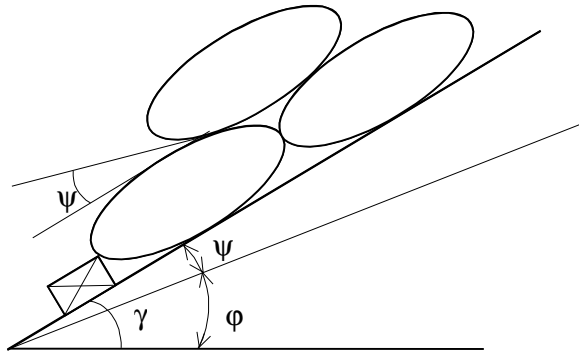
## 2.3 Proeven

Het dijklichaam werd, afhankelijk van de proef, gedurende een bepaalde periode belast door regelmatige of onregelmatige golven. Voor de proeven werd de golfhoogte, de golfperiode en het waterstandsniveau boven de kruin gevarieerd. In totaal zijn er 21 proeven uitgevoerd, waarvan 11 met regelmatige golven. Gedurende alle proeven is het dijklichaam niet bezweken, ondanks de laatste uitgevoerde 'bezwijk'-proef, waarbij de maximaal uit de faciliteit te halen golfhoogte is ingezet ( $H = 30$  cm). De stapeling stond hierbij overigens wel sterk met de golven mee te deinen (mondelinge mededeling modelassistenten). Dit deinen bleek bij regelmatige golven sterker te zijn dan bij onregelmatige golven, waardoor is gekozen de bezwijkproef bij regelmatige golven uit te voeren.

## 2.4 Hoek van inwendige wrijving en dilatantie

Naast de drukverdeling in een stapeling is voor de geocontainers van de 2<sup>e</sup> stapeling de wrijvingscoëfficiënt bepaald, door een stapeling van drie geocontainers (2 onder, 1 boven) op een hellend vlak te leggen en dit vlak langzaam steeds steiler in te stellen. Met een latje werd voorkomen dat de onderste twee containers gingen schuiven. Zie Figuur 2 en foto 13

uit (Klein Breteler 2001). Uit deze opstelling bleek dat de bovenste geocontainer pas bij een hoek van  $\gamma = 45^\circ$  ging verschuiven. De kritieke wrijvingscoëfficiënt  $f_c$  is hiermee  $f_c = \tan\gamma = 1.0$ . Opgemerkt dient te worden dat de hoek  $\gamma$  niet alleen de wrijving tussen de geotextielen (hoek  $\phi$ ) vertegenwoordigt, maar ook de dilatantie (hoek  $\psi$ ), dat wil zeggen de noodzaak van de bovenste container om uit de kuil tussen de onderste containers omhoog te komen.



Figuur 2 Definitiefiguur onderverdeling totale wrijvingshoek

Bij beschouwing van het evenwicht bij het afschuiven van een geocontainer langs een vlak (hier een vlak evenwijdig aan het hellend vlak) kan de verhouding tussen de langskracht (kracht evenwijdig aan dat vlak) die nodig is om die geocontainer weg te laten schuiven en de normaalkracht, gelijk gesteld worden aan de tangens van de 'totale wrijvingshoek'  $\gamma$ . Die hoek is de som van de wrijvingshoek  $\phi$  tussen de geotextielen en de dilatantiehoek  $\psi$ . Dus  $\gamma = \phi + \psi$ .

Dit effect, te danken aan de geaccidenteerde vorm van de geocontainers en het feit dat de bovenste of buitenste containers gelegen zijn in de holtes tussen twee geocontainers eronder, treedt ook op bij stenen of zandkorrels en wordt daar 'dilatantie' genoemd. Vandaar dat de hoek waaronder de geocontainers wegschuiven ten opzichte van het talud ook hier wordt aangeduid met de dilatantiehoek  $\psi$ .

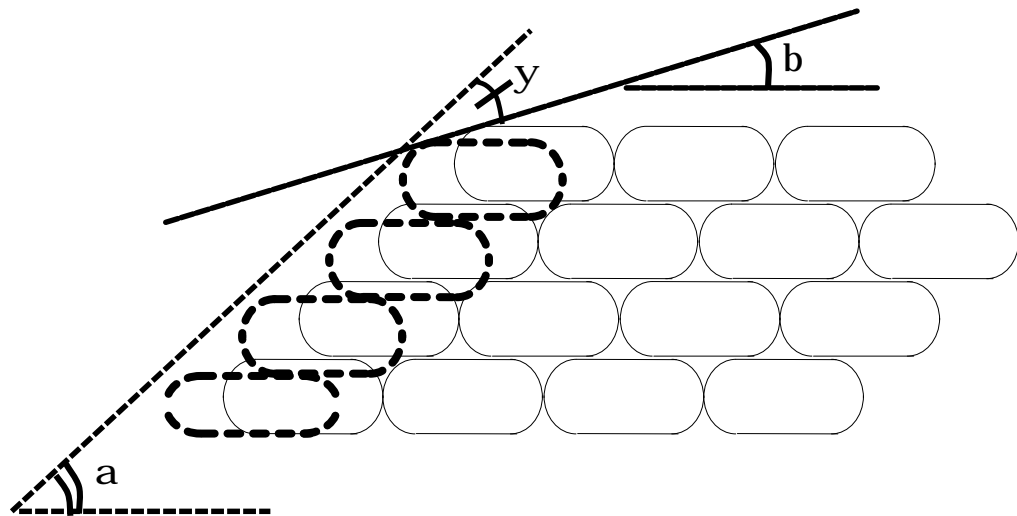
Uit de proeven in de Brutusbak (Bezuijen en Oung (2000) en Bezuijen (2001)) en elders gerapporteerde proeven volgt dat  $\phi \approx 30^\circ$  tot  $35^\circ$ . Uit de proef bij de Venetiëbakproeven volgde voor de extra gevulde geocontainers (2<sup>e</sup> stapeling) dat de totale wrijvingshoek  $\phi + \psi = 45^\circ$ , zodat daar waarschijnlijk gold:  $\psi \approx 10^\circ$  à  $15^\circ$ . Voor de minder gevulde geocontainers uit de eerste stapeling gold waarschijnlijk naar schatting  $\psi \approx 0^\circ$  à  $5^\circ$ . In de praktijk zijn waarden tot  $\psi \approx 20^\circ$  goed mogelijk, omdat daar de stapeling minder netjes (geïdealiseerd) zal zijn.

Het niet bezwijken van de stapeling geozandelementen bij de golfproeven, ondanks de vrij steile taludhelling en zware golfbelasting, hangt waarschijnlijk mede samen met het feit dat de buitenste geocontainers 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. Het effect van de halfsteensstapeling kan als een vorm van dilatantie beschouwd worden.

In het rekenmodel van Koehorst dat gerapporteerd is in [Berendsen 1999] wordt dit effect expliciet in rekening gebracht met de hoek  $\beta$  t.o.v. de horizontaal, waaronder de geocontainers kunnen wegschuiven van het talud. Uit de definitie volgt:  $\beta = \alpha - \psi$ , als  $\alpha$  de taludhelling is. Zie figuur 3.

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  $\alpha = \arctan(1/3,1) = 18^\circ$ . Ook bij de meer gevulde containers is ter vereenvoudiging aangenomen dat  $\beta = 0$  ofwel  $\psi = 30^\circ$ , maar gegeven de taludhelling van  $\alpha = \arctan(1/1,7) = 30^\circ$ , is het twijfelachtig of dat erg nauwkeurig is.

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



Figuur 3 Definitiefiguur dilatantie voor de stapeling zoals die bij de WL proeven is toegepast

### 3 Databewerking

De proeven met regelmatige golven zijn opnieuw geanalyseerd. Tabel 2 geeft de verschillende proeven weer met regelmatige golven. Tevens zijn aan deze tabel enige belangrijke parameters van de betreffende experimenten toegevoegd.

proefcode	proef	stapeling	H (cm)	T <sub>p</sub> (s)	cm waterniveau boven kruin
R012	1	1	14.4	1.6	8
R002	2	1	22.4	1.8	8
R003	3	1	22.1	2.2	8
R006	4	1	15.4	2.2	0
R201	5	2	14.1	1.6	8
R202	6	2	19.1	1.8	8
R204	7	2	17.2	1.6	0
R205	8	2	24.9	1.8	0

Tabel 2 Uitgevoerde en geanalyseerde proeven met regelmatige golven, inclusief enkele belangrijke proefparameters

Voor ieder experiment blijken de drukopnemers bij een lege goot te zijn genuld. Vervolgens is bij het ingestelde waterniveau, per drukopnemer een zogenaamde zero-level (kN/m<sup>2</sup>) bepaald, die de waterdruk boven de drukopnemer bij stilstaand water aangeeft. Teneinde alleen de variërende component van de druk door de golven te beschouwen, dienen gemeten drukvariëtes verminderd te worden met de zero-level van de betreffende drukopnemer.

Uit deze zero-levels kan ook het exacte niveau onder het wateroppervlak worden afgeleid. Hoewel dit ook kan worden bepaald op basis van de afmetingen van de individuele geocontainers, blijkt dit minder exact te zijn. Reden hiervoor is dat de drukopnemers dieper kunnen liggen doordat ze net in een kuiltje bevinden, waardoor de diepte bepaald op basis van de containerafmetingen een onderschatting geeft.

De kracht die er vermoedelijke voor zorgt dat een uit geocontainers bestaand dijklichaam bezwijkt, is de kracht die vanuit het dijklichaam naar buiten is gericht. Waarschijnlijk zal de krachtsvector haaks op het dijktalud staan. Aangezien van de 10 drukopnemers slechts één drukopnemer buiten de stapeling bevond, namelijk drukopnemer 8, is er voor gekozen drukopnemers 1, 2, 5, 6, 7, 9 met deze drukopnemer te vergelijken. De overige drukopnemers bevonden zich aan de lezijde en zijn daarom buiten de analyse gelaten.

Om de grootste naar buiten toe gerichte kracht aan de meetdata te ontleen is respectievelijk de 80%, 50%, 20% en 5% overschrijdingswaarde van het maximale stijghoogteverschil van een bepaalde drukopnemer, ten opzichte van drukopnemer 8, bepaald. Dit wordt uitgedrukt in de volgende vergelijking:

$$f = \left[ \left( \frac{P_x - \text{zero level}}{r \cdot g} \right) - \left( \frac{P_8 - \text{zero level}_8}{r \cdot g} \right) \right]_{\max}$$

waarin:

$P_x$	= drukwaarde van drukopnemer x, respectievelijk 1, 2, 5, 6, 7, 9 (kN/m <sup>2</sup> )
zero-level	= drukniveau van de drukopnemer bij stilstaand water (kN/m <sup>2</sup> )
$\rho$	= dichtheid van water (1000 kg/m <sup>3</sup> )
$g$	= gravitatieversnelling (9,81 m/s <sup>2</sup> )
$\phi$	= stijghoogteverschil tussen twee drukopnemers (m)

Voor het bepalen van deze overschrijdingswaarden is het volledige tijdsignaal van de proef genomen. De 80% overschrijdingswaarde van het maximale stijghoogteverschil moet worden gezien als het stijghoogteverschil die bij 80% van de golven wordt overschreden. Tevens wordt opgemerkt dat ondanks het feit dat het ging om regelmatige golven, de 80%, 50%, 20% en 5% overschrijdingswaarden toch van elkaar verschillen. Dit wordt mede veroorzaakt door toevalligheden in het brekerproces en kleine golfhoogtevariatiën tijdens de proef. Voor de analyse is gekozen de 50% overschrijdingswaarde te hanteren. Gemiddeld gezien wijkt de 80% overschrijdingswaarde 25% af van de 50% overschrijdingswaarde. De 20% en 5% overschrijdingswaarde wijken gemiddeld gezien respectievelijk 15% en 40% af van de 50% overschrijdingswaarde.



## 4 Analyse van de drukopbouw in de stapeling

### 4.1 Inleiding

De bewerkte data zijn geanalyseerd en in figuren uitgezet. De analyse heeft zich beperkt tot de proeven met regelmatige golven. De volgende zaken zijn uitgevoerd en worden middels figuren getoond (zie hiervoor bijlage A): N.B. de huidige analyse beslaat Figuur A3-A18.

- Figuur A-1 Verschil in stijghoogte tussen drukopnemer 1, 2, 5, 6, 7, 9 en 8 voor de 1e stapeling (proeven 1 tot en met 4)
- Figuur A-2 Verschil in stijghoogte tussen drukopnemer 1, 2, 5, 6, 7, 9 en 8 voor de 2e stapeling (proeven 5 tot en met 8)
- Figuur A-3 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze horizontale afstand in de stapeling (1e stapeling)
- Figuur A-4 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze horizontale afstand in de stapeling (2e stapeling)
- Figuur A-5 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze horizontale afstand tot drukopnemer 8 (1e stapeling)
- Figuur A-6 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze horizontale afstand tot drukopnemer 8 (2e stapeling)
- Figuur A-7 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze verticale afstand onder de kruin (1e stapeling)
- Figuur A-8 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze verticale afstand onder de kruin (2e stapeling)
- Figuur A-9 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze verticale afstand onder het wateroppervlak (1e stapeling)
- Figuur A-10 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze verticale afstand onder het wateroppervlak (2e stapeling)
- Figuur A-11 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze directe afstand tot drukopnemer 8 (1e stapeling)
- Figuur A-12 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze directe afstand tot drukopnemer 8 (2e stapeling)
- Figuur A-13 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de haakse afstand tot het talud (1e stapeling)
- Figuur A-14 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de haakse afstand tot het talud (2e stapeling)
- Figuur A-15 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de verhouding tussen de dimensieloze verticale en horizontale afstand in de stapeling (1e stapeling)
- Figuur A-16 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de verhouding tussen de dimensieloze verticale en horizontale afstand in de stapeling (2e stapeling)

- Figuur A-17 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de verhouding tussen de dimensieloze verticale afstand onder het wateroppervlak en horizontale afstand in de stapeling (1e stapeling)
- Figuur A-18 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de verhouding tussen de dimensieloze verticale afstand onder het wateroppervlak en horizontale afstand in de stapeling (2e stapeling)
- Figuur A-19 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de verhouding tussen verticale afstand horizontale afstand in de stapeling (1e stapeling)
- Figuur A-20 Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de verhouding tussen verticale afstand horizontale afstand in de stapeling (2e stapeling)

Merk op dat ieder figuur voor de 2e stapeling steeds direct na de figuur voor de 1e stapeling is geplaatst. Ter verduidelijking is Figuur 4 aan dit rapport toegevoegd met een definitieschets van de bij de analyse gebruikte parameters.

## 4.2 Relatie drukopbouw en locatie in de stapeling

Uit Figuur A-1 (1e stapeling) blijkt dat het verschil in stijghoogte, hetgeen de variërende component van de belasting representeert, groter is als de drukopnemers hoger in de verticaal liggen. Dit is ook te verwachten, omdat de variërende component van de belasting bij het wateroppervlak groter zal zijn. Bij de tweede stapeling is dit beeld globaal nog aanwezig, alhoewel minder duidelijk. Er is hier echter geen directe relatie uit af te leiden, aangezien hier ook een breedtelocatie in naar voren komt.

Als wordt gekeken naar een functioneel verband dan zal de grootte van het drukverschil over de buitenste laag geocontainers aan de zeezijde vooral afhankelijk zijn van de golfhoogte en de locatie in 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 containers 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 boven in de dam groter is dan onderin. Hoewel de golfperiode ook een rol zal spelen is verwacht dat deze minder invloed heeft. Voor de analyse is het gemeten stijghoogteverschil derhalve dimensieloos gemaakt door deze te delen door de gebruikte golfhoogte. Deze dimensieloze verhouding is steeds uitgezet tegen een dimensieloze locatie in de stapeling. Deze dimensieloze locatie is op een aantal wijzen uitgedrukt.

In Figuur A-3 en A-4 is de dimensieloze locatie in de stapeling uitgedrukt door de horizontale afstand van de drukopnemer tot het taludoppervlak aan de zeezijde ( $L_1$ ) te delen door de totale breedte van de stapeling op hetzelfde niveau ( $B_{tot}$ ), zie figuur 4.

In Figuur A-5 en A-6 is niet de afstand tot het talud maar de horizontale afstand tot drukopnemer 8 gebruikt. Aangezien drukopnemer 8 steeds als referentie gold.

Men kan zich echter voorstellen dat naast de horizontale afstand ook de verticale afstand een rol zal spelen. Hierdoor is in Figuur A-7 en A-8 de dimensieloze locatie in de stapeling

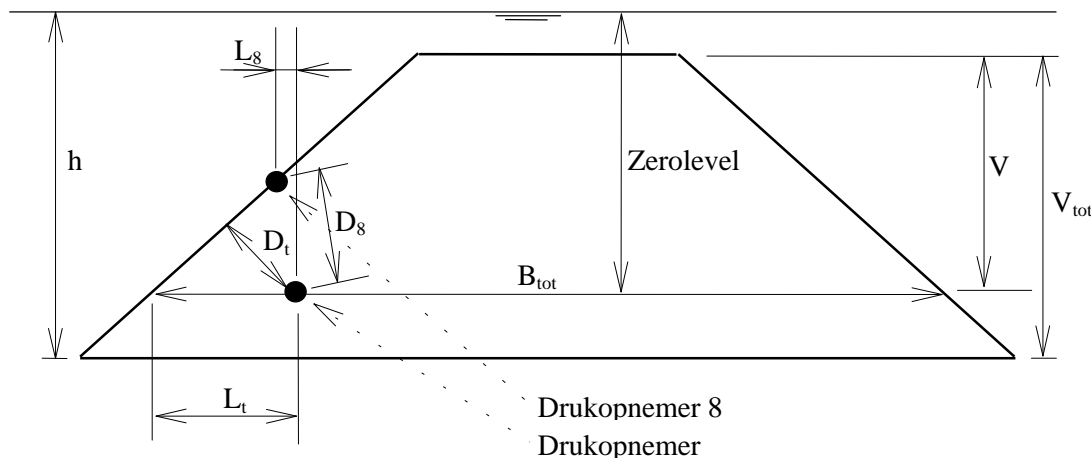
uitgedrukt door het verticale niveau vanaf de kruin ( $V$ ) te delen door de totale hoogte van de stapeling ( $V_{\text{tot}}$ ).

Evenzo is in Figuur A-9 en A-10 de hoogte onder het wateroppervlak (zero level) gedeeld door de totale waterdiepte.

In Figuur A-11 en A-12 is de loodrechte of directe afstand ( $D_8$ ) genomen tussen betreffende drukopnemer en drukopnemer 8 en dimensieloos gemaakt door de waarde te delen door de totale breedte ( $B_{\text{tot}}$ ). Evenzo is in Figuur A-13 en A-14 de haakse afstand ( $D_t$ ) tot het talud genomen.

Om zowel de verticale locatie als de horizontale locatie mee te nemen is voor de analyse tevens een verhouding gekozen tussen het dimensieloze verticale niveau onder de kruin en de dimensieloze horizontale afstand tot het talud (Figuur A-15 en A-16). Evenzo is dit gedaan voor de dimensieloze hoogte onder de waterspiegel (Figuur A-17 en A-18)

Tot slot is gekozen om het verticale niveau onder de waterspiegel (zero\_level) te delen door de horizontale afstand tot de kruin (Figuur A-19 en A-20).



Figuur 4 Definitie van symbolen die gebruikt zijn bij de analyse van de meetdata

In alle exercities is een duidelijke trend waarneembaar. Deze trend is als een logaritmische of exponentiële functie door de punten gefit. De waarden, die ontleend zijn aan de proeven bij de 2e stapeling, liggen structureel boven de trend die steeds op basis van de waarden bij de 1e stapeling is verkregen.

Met betrekking tot de verschillende relaties kunnen de volgende opmerkingen worden gemaakt:

- Een relatie op basis van een (dimensieloze) horizontale afstand in de stapeling lijkt een goede relatie (Figuur A-3 en A-4), omdat verwacht mag worden dat de zuigende werking van de golven kleiner zal worden naarmate de stapeling breder wordt. Een dimensieloze afstand tot drukopnemer 8 (Figuur A-5 en A-6) is fysisch gezien minder logisch.
- Op basis van de lineaire golftheorie zou de drukgolfhoogte aan de bodem slechts orde 20% kleiner zijn dan aan het wateroppervlak voor de betreffende experimentele situaties. Een relatie tussen het stijghoogteverschil en de verticale locatie in de stapeling

is derhalve aan de orde maar zal vermoedelijk minder sterk zijn dan een relatie met een horizontale afstand in de stapeling. Bij een dimensieloze locatie onder de kruin (Figuur A-7 en A-8), wordt de waterdiepte buiten beschouwing gelaten, deze relatie lijkt derhalve niet correct.

- Een directe afstand tot het talud beschrijft min of meer de belangrijkste richting van de krachtsvector.
- Daar waar zowel de dimensieloze diepte als lengte wordt gebruikt (Figuren A15 - A18), blijkt de spreiding het kleinste te zijn. Omdat hier de dimensieloze verticale afstand even zwaar wordt gewogen als de dimensieloze horizontale afstand lijken deze relaties toch minder geschikt.
- Door de druk te relateren aan die bij drukopnemer 8 is het stijghoogteverschil over de bovenste geocontainer wat overschat. Het maximale stijghoogteverschil wordt daar gedomineerd door het droogvallen van de voorzijde van de geocontainers, terwijl dit onvoldoende wordt meegewogen als het verschil met drukopnemer 8 wordt beschouwd.

Ondanks het feit dat de verschillende relaties elkaar qua spreiding weinig ontlopen wordt geadviseerd gebruik te maken van de relatie waarin de horizontale afstand het sterkst tot uiting komt ( $B_{tot}$ ). Dit lijkt qua (fysische) betrouwbaarheid te verkiezen. Daarnaast is de directe afstand tot het talud ( $D_t$ ), zoals weergegeven in de Figuren A-13 en A-14, een logische keuze omdat dit overeenkomt met de richting van de krachtsvector, dus:

$$\frac{f_{50\%}}{H} = 0,27 \cdot \ln\left(\frac{D_t}{B_{tot}} + 0,04\right) + 0,87$$

Opgemerkt wordt dat deze resultaten geldig zijn voor een breedte / hoogte verhouding van de individuele geocontainers van orde 6. Het stijghoogteverschil  $\phi_{50\%}$  kan worden vertaald naar een naar buiten gerichte druk door deze te vermenigvuldigen met  $\rho \cdot g$ .

Op basis van de resultaten met de tweede stapeling kan worden geconcludeerd dat deze relatie gemiddeld 1,2 hoger moet worden, hetgeen leidt tot:

$$\frac{f_{50\%}}{H} = 0,32 \cdot \ln\left(\frac{D_t}{B_{tot}} + 0,04\right) + 1,04$$

De hier bij horende breedte / hoogte verhouding van de individuele container bedraagt circa 3,5.

## 5 Geotechnische stabiliteit

### 5.1 Algemeen

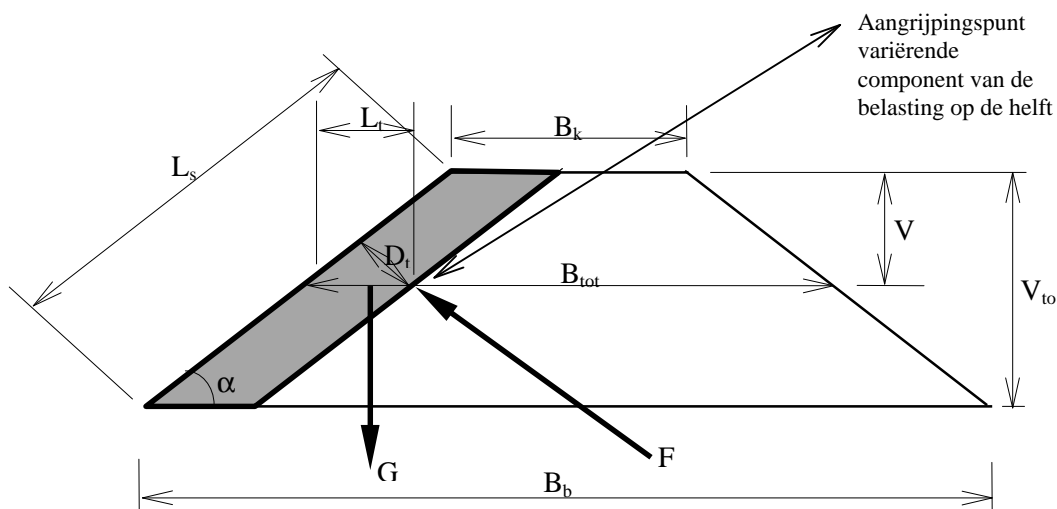
Deze paragraaf beschouwt een berekeningsmethode voor het bepalen van de geotechnische stabiliteit van een stapeling geocontainers.

De berekeningsmethode is ontleend aan de methode van Koehorst zoals beschreven in [Berendsen, '99]. De uitgangspunten en de afleiding staan in bijlage B. De hoek  $\beta$  waaronder de geocontainers zouden kunnen glijden is voor beide stapelingen verondersteld  $\beta \approx 0^\circ$  te zijn, omdat de geocontainers behoorlijk plat zijn en een duidelijk horizontaal contactvlak hebben. Daardoor vereenvoudigt de evenwichtsbeschouwing tot de volgende formule:

$$f = \frac{F \cdot \sin a}{G - F \cdot \cos a}$$

In het geval dat  $\beta \neq 0$  dan wordt de vergelijking een stuk ingewikkelder.

In deze paragraaf wordt de stabiliteitsbenadering toegepast op de experimenten die zijn uitgevoerd in de Venetiëfaciliteit. Figuur 5 licht enkele gebruikte symbolen toe.

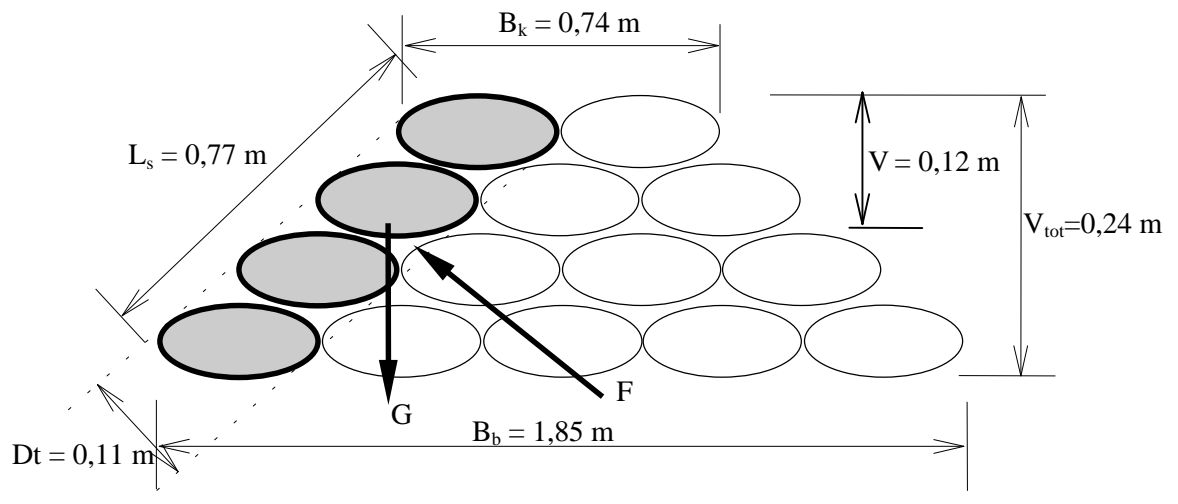


Figuur 5 Definitie van symbolen bij aangrijping variërende component van de belasting op de helft van de stapelinghoogte

## 5.2 1<sup>e</sup> stapeling

### Stabiliteit tijdens proef 2

De relevante maten voor de eerste stapeling staan vermeld in Figuur 6. De donker gekleurde geocontainers worden beschouwd.



Figuur 6 Dimensies 1e stapeling

De grootte van taludhelling  $\alpha$  volgt uit de afmetingen van de geocontainers en de baksteensgewijze stapeling:  $\tan \alpha = 2 \cdot 0,06 \text{ m} / 0,37 \text{ m} = 1/3 = 0,32$ . Dus  $\alpha = 18^\circ$ .

De dimensieloze afstand tot het talud  $D_t$  op de helft van de stapelinghoogte wordt gevonden met:

$$\frac{D_t}{B_{tot}} = \frac{L_t \cdot \sin \alpha}{B_{tot}} = \frac{0,37 \cdot \sin 18}{1,11} = 0,103$$

De totale horizontale afstand  $B_{tot}$  op het beschouwde niveau is uitgedrukt evenredig met het aantal geocontainers : in dit geval  $3 \cdot 0,37 = 1,11 \text{ m}$ .

De druk  $P$  tijdens proef 2 (die de grootste golfhoogte had) wordt gevonden met de relatie:

$$P = r_w \cdot g \cdot H \cdot \left\{ 0,27 \cdot \ln \left( \frac{D_t}{B_{tot}} + 0,04 \right) + 0,87 \right\}$$

$$P = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,224 \cdot \left\{ 0,27 \cdot \ln(0,103 + 0,04) + 0,87 \right\}$$

$$P = 757 \text{ N / m}^2$$

Vervolgens wordt de kracht  $F$  per eenheid van lengte gevonden door het oppervlak in oenschouw te nemen, waarbij de afstand langs het talud  $L_s = 0,77 \text{ m}$  ( $L_s = V_{tot} / \sin \alpha$ ) bedraagt en 1 m lengte in rekening wordt gebracht. Voor  $L_s$  moet een lengte langs het talud worden genomen omdat in de stabiliteitsafleiding de kracht  $F$  haaks op het talud is

aangenomen. Via vermenigvuldiging met  $\sin\beta$  wordt de werkelijke richting van de krachtsvector  $F$  bepaald. Dit is al reeds in de stabiliteitsafleiding meegenomen.

$$F = 757 \cdot 0,77 = 583 \quad N / m$$

Het gewicht  $G$  wordt bepaald door het totaal gewicht van de 4 containers. Het massa van één container bedroeg bij de eerste stapeling 49 kg. De vier containers langs het talud hadden dus samen een massa van 196 kg. De afmetingen van de container staan vermeld in Tabel 1 ( $0,06 \times 0,37 \times 1,40 \text{ m}^3$ ). Het volume van één container wordt benaderd door:

$$I_c = 0,06 \cdot 0,37 \cdot 1,40 = 0,031 \quad m^3$$

De dichtheid van het zand inclusief poriën bedroeg dus:

$$r_b = \frac{196}{4 \cdot 0,031} = 1580 \quad kg / m^3$$

Het volume  $I$  van een container per strekkende meter is derhalve:

$$I = 0,031 \cdot \frac{1}{1,40} = 0,022 \quad m^3 / m^1$$

De naar beneden gerichte kracht  $G$  van de containers onder water per strekkende meter kan nu worden gevonden door:

$$G = (r_b - r_w \cdot (1 - n)) \cdot I_t \cdot g$$

$$G = (1580 - 1000 \cdot (1 - 0,4)) \cdot (4 \cdot 0,022) \cdot 9,81$$

$$G = 846 \quad N / m$$

Op basis van de bovenstaande gegevens en de stabiliteitsvergelijking uit bijlage B kan worden afgeleid dat tijdens de experimenten de gemobiliseerde wrijvingscoëfficiënt (belasting)  $f_e = 0,62$  (-) bedroeg. Hier is aangenomen dat de kritieke wrijvingscoëfficiënt  $f_c = 0,65$  was (sterkte). Het feit dat de stapeling niet is bezweken wordt hierdoor bevestigd, aangezien  $f_e < f_c$  en instabiliteit zou zijn opgetreden als  $f_e > f_c$ .

#### **Kritieke golfhoogte bij bezwijken van 4 geocontainers**

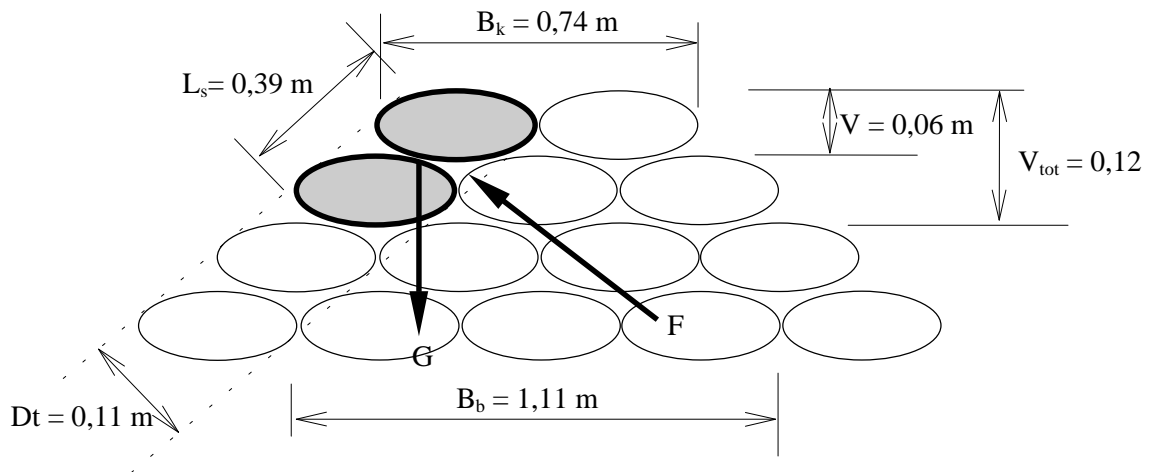
Met het bovenstaande kan worden achterhaald dat bij een kracht  $F = 593 \text{ N/m}$  instabiliteit zou zijn opgetreden. Door dit te delen door het oppervlak wordt een kritieke druk  $P_c = 770 \text{ N/m}^2$  gevonden. Hieruit kan de kritieke golfhoogte worden bepaald, via:

$$H_c = \frac{P_c}{r \cdot g \cdot \left\{ 0,27 \cdot \ln \left( \frac{D_t}{B_{tot}} + 0,04 \right) + 0,87 \right\}}$$

$$H_c = \frac{770}{1000 \cdot 9,81 \cdot \{0,27 \cdot \ln(0,103 + 0,04) + 0,87\}} = 0,23 \text{ m}$$

### Stabiliteit tijdens proef 2 bij bezwijken van 2 geocontainers

Het is echter ook goed mogelijk dat niet alle vier maar bijvoorbeeld slechts 2 containers over de twee onderste containers afschuiven (Figuur 7). Deze situatie wordt hieronder bekeken.



Figuur 7 Dimensies 1e stapeling (2 containers verplaatsen)

De verhouding  $D_t/B_{tot}$  bedraagt in deze situatie  $0,11 / (2 \cdot 0,37) = 0,148$ . De kracht  $F = 358 \text{ N/m}$  ( $P = 920 \text{ N/m}^2$ ). Het gewicht is de helft van het eerste voorbeeld, waardoor  $G = 422 \text{ N/m}$ . Op basis van deze gegevens en de stabiliteitsformulering kan worden bepaald dat de gemobiliseerde wrijvingscoëfficiënt (belasting) in het experiment  $f_e = 1,35$  (-) bedroeg. Hieruit blijkt echter dat bezwijken zou hebben opgetreden ( $f_e = 1,35 > 0,65 = f_c$ ). Op basis hiervan moet worden geconcludeerd dat op basis van deze aanpak instabiliteit zou worden verwacht. Tijdens de proeven is dit echter niet opgetreden. De hier gebruikte rekenmethode is dus conservatief.

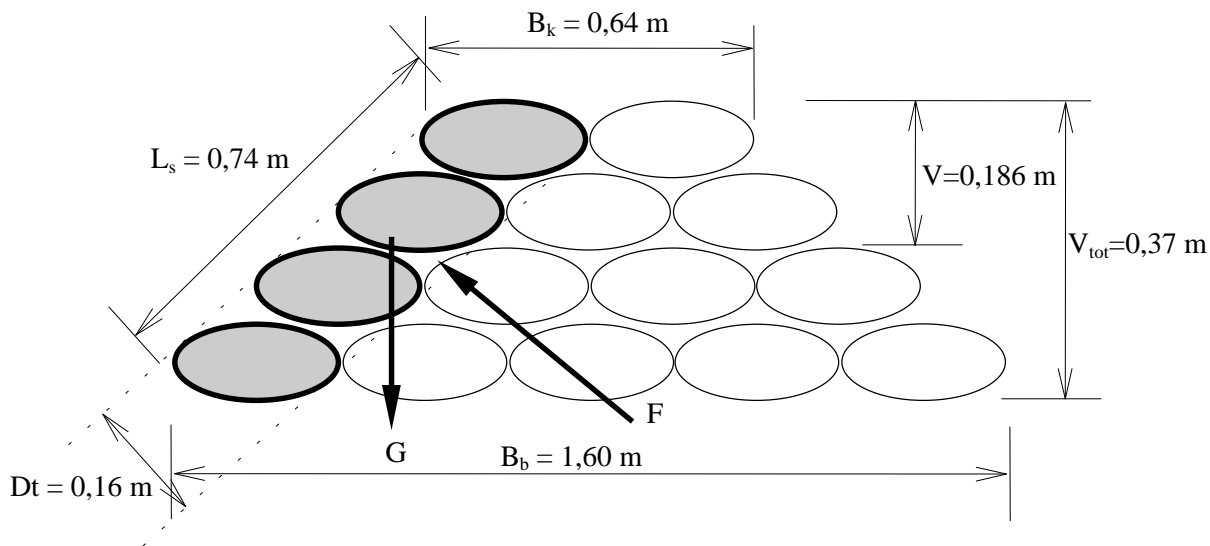
Merk op dat bij een golfdal aan de zeezijde de bovenste geocontainers boven water kunnen zijn gekomen, hetgeen een grotere naar beneden gerichte kracht  $G$  zou betekenen.

## 5.3 2<sup>e</sup> stapeling

### Stabiliteit tijdens proef 8

De relevante maten voor de tweede stapeling staan vermeld in Figuur 8. De donker gekleurde geocontainers worden weer beschouwd.





Figuur 8 Dimensies 2e stapeling (4 containers verplaatsen)

De hoek  $\alpha$  van deze stapeling bedraagt:  $\tan \alpha = 2 \cdot 0,093 \text{ m} / 0,32 \text{ m} = 1 / 1,7 = 0,58$ . Dus  $\alpha = 30^\circ$ .

De dimensieloze afstand tot het talud op de helft van de stapelinghoogte wordt gevonden met:

$$\frac{D_t}{B_{tot}} = \frac{L_t \cdot \sin a}{B_{tot}} = \frac{0,32 \cdot \sin 30}{3 \cdot 0,32} = 0,166$$

De druk  $P$  en vervolgens hieruit afgeleid de kracht  $F$  wordt gevonden door de volgende relatie, die ten opzicht van de eerste stapeling met een factor 1,2 is verhoogd:

$$P = 1,2 \cdot r_w \cdot g \cdot H \cdot \left\{ 0,27 \cdot \ln \left( \frac{D_t}{B_{tot}} + 0,04 \right) + 0,87 \right\}$$

$$P = 1,2 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,249 \cdot \left\{ 0,27 \cdot \ln(0,166 + 0,04) + 0,87 \right\}$$

$$P = 1299 \text{ N / m}^2$$

De grootste golfhoogte bij de proeven met de eerste stapeling bedroeg 0,249 m, alhoewel bij de bezwijkproeven golfhoogtes van 0,3 m zouden zijn gerealiseerd.

De kracht  $F$  wordt gevonden door het oppervlak in ogeschouw te nemen, waarbij de lengte langs het talud  $L_s = 0,74 \text{ m}$  bedraagt en 1 m lengte in ogeschouw wordt genomen.

$$F = 1299 \cdot 0,74 = 961 \text{ N / m}$$

Bij de berekeningen met de eerste stapeling is reeds gevonden dat de bulkdichtheid van het zand  $1580 \text{ kg/m}^3$  bedraagt. De afmetingen van de containers in de tweede stapeling staan

vermeld in Tabel 1 ( $0,093 \times 0,32 \times 1,40 \text{ m}^3$ ). Het volume van één container in de tweede stapeling is:

$$I_c = 0,093 \cdot 0,32 \cdot 1,40 = 0,042 \text{ m}^3$$

Het volume I van een container per strekkende meter is derhalve:

$$I = 0,042 \cdot \frac{1}{1,40} = 0,0297 \text{ m}^3 / \text{m}^1$$

De naar beneden gerichte kracht G van de containers onder water per strekkende meter kan nu worden gevonden door:

$$G = (r_b - r_w \cdot (1 - n)) \cdot I_t \cdot g$$

$$G = (1580 - 1000 \cdot (1 - 0,4)) \cdot (4 \cdot 0,0297) \cdot 9,81$$

$$G = 1142 \text{ N / m}$$

Op basis van de bovenstaande gegevens en de stabiliteitsvergelijking uit bijlage B kan worden achterhaald dat tijdens de experimenten de gemobiliseerde wrijvingscoëfficiënt  $f_e = 1,55$  (-) bedroeg (belasting). Aangenomen is dat de kritieke wrijvingscoëfficiënt  $f_c = 0,65$  was (sterkte). Het feit dat de stapeling niet is bezweken wordt hierdoor niet bevestigd aangezien  $f_e > f_c$ . Wel kan geconcludeerd worden dat de rekenmethode conservatief is.

#### ***Kritieke golfhoogte bij bezwijken van 4 geocontainers***

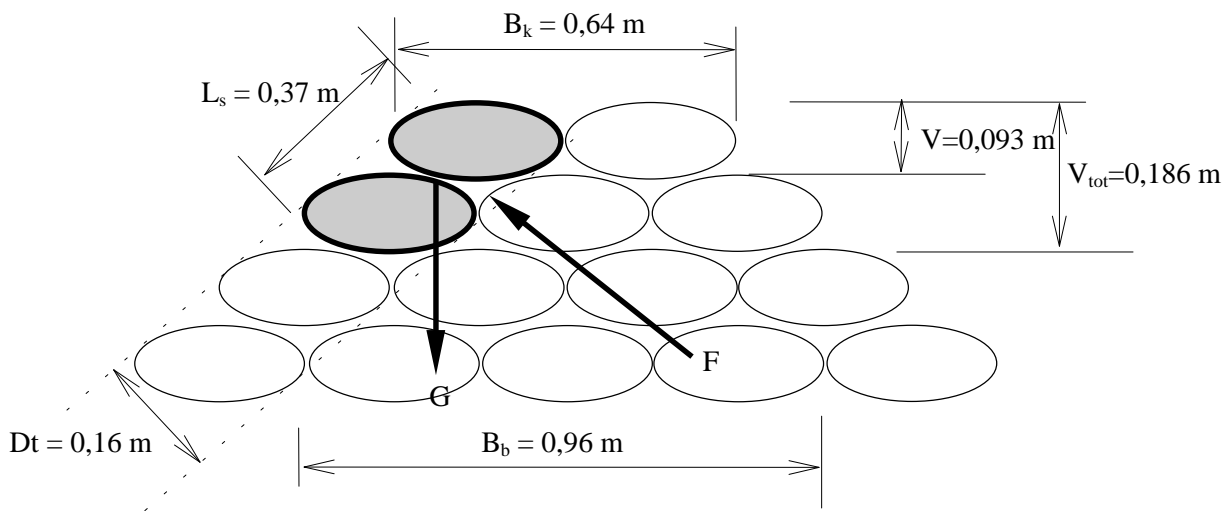
Derhalve kan worden achterhaald dat al reeds bij een kracht  $F = 698 \text{ N/m}$  instabiliteit zou zijn opgetreden. Door dit te delen door het oppervlak wordt een kritieke druk  $P_c = 944 \text{ N/m}^2$  gevonden. Hieruit kan de kritieke golfhoogte worden bepaald, via:

$$H_c = \frac{P_c}{1,2 \cdot r \cdot g \cdot \left\{ 0,27 \cdot \ln \left( \frac{D_t}{B_{tot}} + 0,04 \right) + 0,87 \right\}}$$

$$H_c = \frac{944}{1,2 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot \left\{ 0,27 \cdot \ln(0,166 + 0,04) + 0,87 \right\}} = 0,18 \text{ m}$$

#### ***Stabiliteit tijdens proef 8 bij bezwijken van 2 geocontainers***

Indien wordt aangenomen dat slechts 2 containers zouden verplaatsen, dan wordt de volgende situatie verkregen (zie Figuur 9).



Figuur 9 Dimensies 2e stapeling (2 containers verplaatsen)

De verhouding  $D/B_{\text{tot}}$  bedraagt in deze situatie  $0,16 / (2 \cdot 0,32) = 0,25$ . De kracht  $F = 581$  N/m ( $P = 1570$  N/m<sup>2</sup>). Het gewicht is de helft van die in het eerdere voorbeeld van de tweede stapeling, waardoor  $G = 571$  N. Op basis van deze gegevens en de stabiliteitsformulering kan worden bepaald dat de gemobiliseerde wrijvingscoëfficiënt (belasting) in het experiment  $f_c = 4,28$  (-) bedroeg. Op basis van deze bevinding zou ook in deze situatie bezwijken moeten hebben opgetreden.

### Conclusie

Volgens de berekeningen zou de tweede stapeling dus bezwijken moeten zijn bij  $H=0,18$  m, terwijl dat in werkelijkheid bij  $0,30$  m niet is gebeurd. Hieruit blijkt dat de methode conservatief is en de stabiliteit met minstens een factor  $1,7$  onderschat, gebaseerd op de aanname dat  $\varphi = 33^\circ$  ( $f_c=0,65$ ).

## 6 Discussie

### 6.1 Stijghoogteverschil

De uitgevoerde proeven en de gepresenteerde formules geven een indruk van de maximale waarden van het stijghoogteverschil over de buitenste laag geocontainers 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 formules zijn. Daarbij moeten de volgende factoren worden beschouwd:

- a) het betreft een dam van geocontainers zonder zandaanvulling aan de achterzijde
- b) de kruin van de dam reikt tot het stilwaterniveau of daar vlak onder
- c) de modelstapeling was een veel nettere stapeling dan in de praktijk gerealiseerd kan worden
- d) de situatie beperkte zich tot één waterdiepte, namelijk een prototype waterdiepte van ca 5 tot 9 m voor geocontainers met een dwarsdoorsnede van respectievelijk ca 9 m<sup>2</sup> en ca 12 m<sup>2</sup>
- e) het betrof proeven met regelmatige golven
- f) het aangegeven stijghoogteverschil betreft de verwachtingswaarde; bij meerdere golven van dezelfde hoogte kunnen ook hogere stijghoogteverschillen optreden
- g) het betreft schaalproeven

#### *Ad (a)*

Situaties met een zandaanvulling er achter zijn waarschijnlijk wat gunstiger. Uit analyses met zeer poreuze dammen volgt dat een praktisch waterdichte wand aan de achterzijde van een smalle dam er toe leidt dat de stijghoogte in de dam de stijghoogte buiten praktisch volledig volgt. Nu is deze dam van geocontainers niet zeer poreus, maar toch is het te verwachten dat een dergelijke invloed ook hier opgaat.

#### *Ad (b)*

Situaties met de kruin op een 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 een 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 potentieel 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 waterdieptes 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)*

De vertaling naar onregelmatige golven is verder uitgewerkt in paragraaf 6.2.

*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. Daar komt bij dat de gemiddelde hydraulische weerstand van de stroming in die 'poriën' geen grote invloed heeft op de stijghoogteverdeling, doordat het proces in de dam een semi-stationair karakter heeft.

Aan de hand van de schaalregels voor de doorlatendheid van zand kan aangetoond worden dat de korrelgrootte in het model ongeveer een factor 2 te groot was. Deze fout is dus relatief gering, waardoor ook in het model de invloed van de doorlatendheid van de geocontainers verwaarloosbaar is geweest.

## 6.2 Maatgevende belastingen

In de analyse van de geotechnische stabiliteit is steeds uitgegaan van de 50% waarden van het stijghoogteverschil. Hiermee is geanticipeerd op een vertaling van deze belasting naar de verwachte belasting door afzonderlijke golven in een onregelmatig golfveld.

Bij onregelmatige golfaanval zou men kunnen verwachten dat de hoogste golf gedurende een storm maatgevend is als één golf bezwijken kan veroorzaken.

Echter, het bewegen van de geocontainers bij een dergelijke extreme golf, door het ontbreken van een krachterevenwicht, hoeft niet direct te leiden tot instabiliteit of bezwijken van de constructie. Het verplaatsen van de geocontainers zal leiden tot een andere drukverdeling, waarbij de aandrijvende kracht (verschildrukken) vermoedelijk deels wegvalt door onder andere vergroting van de ruimte tussen de bewegende geocontainers en het verdwijnen van water via de kieren die zich tussen de verschillende geocontainers bevinden. De rekenmethode houdt hier geen rekening mee. Dit principe kan tevens verklaren dat tijdens de experimenten wel beweging van de geocontainers, maar geen bezwijken is geconstateerd.

Hoe hier mee om te gaan? Bij elke golf die overbelasting veroorzaakt zal een geocontainer meetbaar verschuiven. Als dus veel golven gedurende een storm overbelasting veroorzaken, dan kan de vervorming zo groot worden dat er sprake is van bezwijken. Dit betekent dat het in rekening brengen van bijvoorbeeld de golf die door 1% van de alle golven wordt overschreden (tientallen tijdens een storm) waarschijnlijk wel veel meer bepalend zal zijn dan de maximale golf die slechts eenmaal voorkomt. Derhalve zou voor stormsituaties een golf met 1% overschrijdingsfrequentie ( $H \approx 1,5 \cdot H_s$  bij diep water; en  $H \approx 1,2 \cdot H_s$  bij

brekende golven in ondiep water) als maatgevend moeten worden beschouwd. Dit impliceert dat, als de kritieke regelmatige golfhoogte volgens de huidige bevindingen  $H_{\text{regelmatig, kritiek}} = 20 \times 0,23\text{m} = 4,6\text{ m}$  bedraagt, dat dan de kritieke significante golfhoogte bij een Rayleighverdeling ongeveer bedraagt:  $H_{s,\text{kritiek}} = 4,6\text{ m}/1,5 = 3,1\text{ m}$ .

Er kan derhalve geconcludeerd worden dat de formules als volgt toepasbaar kunnen worden gemaakt voor onregelmatige golven op diepwater:

- een stapeling met een breedte / hoogte verhouding van de individuele geocontainers van orde 6:

$$\frac{f}{H_s} = 0,41 \cdot \text{Ln} \left( \frac{D_t}{B_{tot}} + 0,04 \right) + 1,31$$

- een stapeling met een breedte / hoogte verhouding van de individuele geocontainers van orde 3,5:

$$\frac{f}{H_s} = 0,48 \cdot \text{Ln} \left( \frac{D_t}{B_{tot}} + 0,04 \right) + 1,56$$

## 7 Conclusies en aanbevelingen

Onderwerp van dit rapport is de stabiliteit van stapelingen geocontainers. Hiervoor zijn in 2001 experimenten uitgevoerd en geanalyseerd. De experimenten betroffen twee stapelingen geocontainers die gedurende een bepaalde tijd werden belast met regelmatige of onregelmatige golven. De stapelingen zijn hierbij niet bezweken. In de analyse bleek een aantal beslissingen te zijn genomen die bij nader inzien niet zo logisch waren. Deze analyse is derhalve in dit verslag verbeterd. In de toenmalige analyse was de relevante parameter van de verschildruk tussen twee locaties nog niet betrokken. Dat is nu wel gedaan. De geotechnische stabiliteit is nu ook opnieuw geanalyseerd, waarbij enige verbeteringen zijn toegepast.

Op grond van de data afkomstig uit de experimenten en de analyse is de volgende formule opgesteld die de naar buiten gerichte netto stijghoogteverschil, dimensieloos gemaakt door deling met de golfhoogte, koppelt aan de dimensieloze locatie in de stapeling:

$$\frac{f_{50\%}}{H} = 0,27 \cdot \ln\left(\frac{D_t}{B_{tot}} + 0,04\right) + 0,87$$

In figuur 5 zijn de variabelen uitgelegd.

Deze formule geldt voor een stapeling met een breedte / hoogte verhouding van de individuele geocontainers van orde 6. In de tweede stapeling was de belasting 1,2 maal groter, hetgeen leidt tot:

$$\frac{f_{50\%}}{H} = 0,32 \cdot \ln\left(\frac{D_t}{B_{tot}} + 0,04\right) + 1,04$$

Hiervoor geldt een breedte / hoogte verhouding van de individuele geocontainers van circa 3,5.

Ten tweede is een stabiliteitsberekening toegepast op basis van een benadering zoals beschreven in Berendsen '99. In deze benadering is de variërende component van de belasting in rekening gebracht via de formule die uit de analyse is voortgekomen. Voor de eerste stapeling bevestigen de berekeningen hetgeen is waargenomen tijdens de experimenten, namelijk dat deze stapeling stabiel blijft onder de opgelegde belastingen. Echter, indien de 2 bovenste geocontainers langs het talud worden beschouwd, dan zou volgens de berekeningsmethode instabiliteit zich moeten hebben voorgedaan. Volgens de berekeningsmethode zou ook voor de tweede stapeling bezwijken hebben voorgedaan, hetgeen niet is geschied. Op basis hiervan lijkt de methode een conservatieve benadering. Er zijn aanwijzingen dat de rekenmethode de stabiliteit met een factor van tenminste 1,7 onderschat.

Opgemerkt wordt dat de aandrijvende kracht  $F$  in de voorbeelden steeds op één niveau is bepaald. Mogelijk dat het bepalen van  $F$  op basis van een geïntegreerde aanpak over de hoogte beter zal zijn.

Resumerend, ondanks de vele beperkingen inherent aan de uitgevoerde proeven, kan de aan het begin van dit hoofdstuk 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 golfhoogte in een storm en als functie van de verhouding tussen de breedte van de geocontainers en de totale breedte van de stapeling.

De door Koehorst [Berendsen 1999] afgeleide stabiliteitsmodel geeft goed bruikbare conservatieve resultaten. 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 paragraaf 5.1:

$$f = \frac{F \cdot \sin a}{G - F \cdot \cos a} \quad \text{met} \quad F = L_s \cdot r \cdot g \cdot f_{50\%}$$

Op basis van de onderzoeksresultaten kan geconcludeerd worden dat geotechnische instabiliteit van een stapeling geo-elementen, met een dwarsdoorsnede van ca 5 tot 15 m<sup>2</sup> belast door golven, alleen kan 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.

Voor prototype situaties wordt geadviseerd gebruik te maken van de golfhoogte die door 1% van de golven wordt overschreden. Dit kan worden gevonden via  $H \approx 1,5 \cdot H_s$  bij diep water (zie paragraaf 6.2) en  $H \approx 1,2 \cdot H_s$  bij ondiep water waarin de golven breken. Deze aanpak houdt beter rekening met (slechts) een gedeeltelijke verplaatsing van de containers wanneer een golf overbelasting veroorzaakt, hetgeen niet direct tot bezwijken van de stapeling leidt.

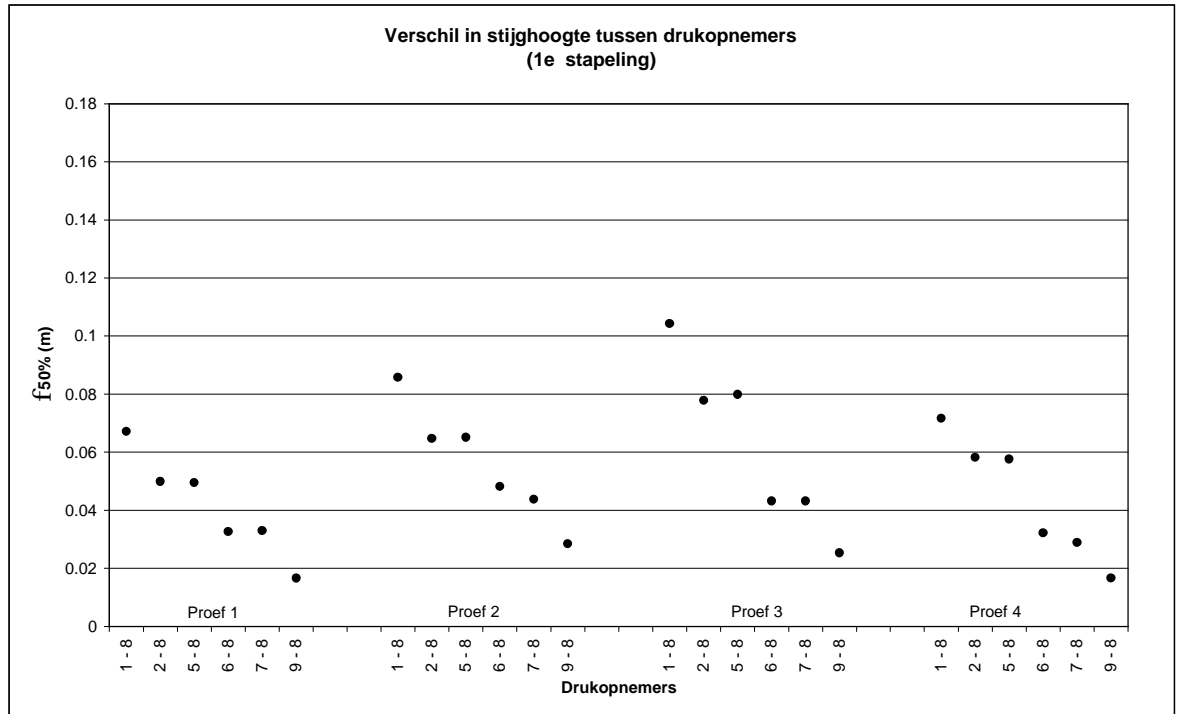




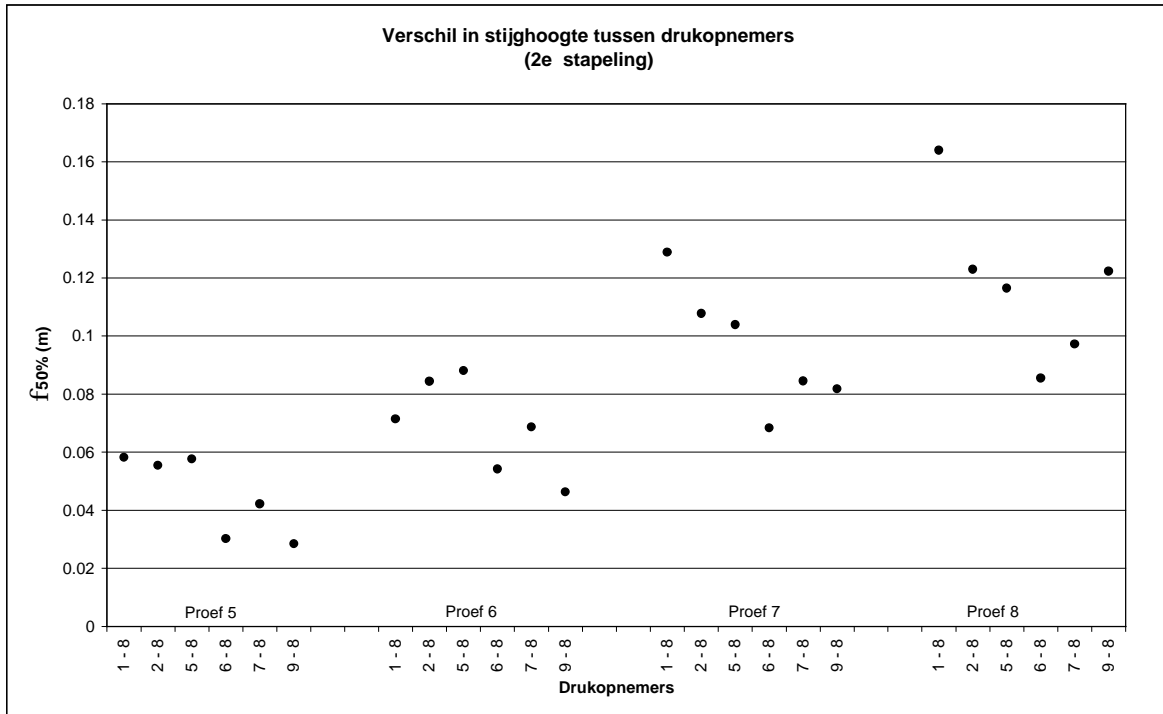
## Literatuur

- Berendsen, E. (1999). **Project Maasvlakte 2, haalbaarheid van de toepassing van geo-zandelementen**  
Waterbouw Innovatie Steunpunt
- Bezuijen, A., Oung, O. en de Groot, M.B. (2000). **Geocontainers - Kleinschalige proeven in de Brutusbak**  
Delft Cluster rapport 03.02.01–03, GeoDelft CO-730201/15, december 2000.
- Bezuijen A. (2001). **Geocontainers - Analyse resultaten Brutusbakproeven** Delft Cluster rapport 03.02.01–  
04, GeoDelft CO-730201/87, november 2001.
- Klein Breteler, M. en J. Lambeek (2001), **Geotechnische stabiliteit van geocontainers, Analyse van  
modelonderzoek**, H3820, Delft Cluster project 03.02.01





Verschil in stijghoogte tussen drukopnemer 1, 2, 5, 6, 7, 9 en 8		
WL   DELFT HYDRAULICS	H4071.10	Fig. A-1

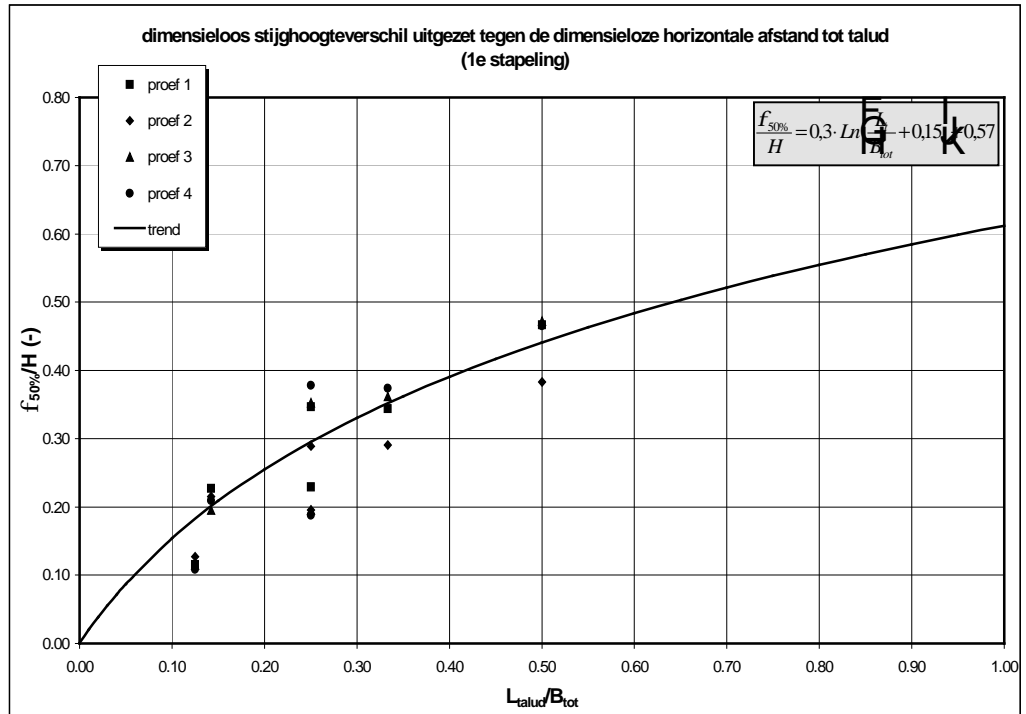


50% overschrijdingswaarde van verschil in stijghoogte tussen drukkopnemers 1, 2, 5, 6, 7, 9 en 8 (2e stapeling)

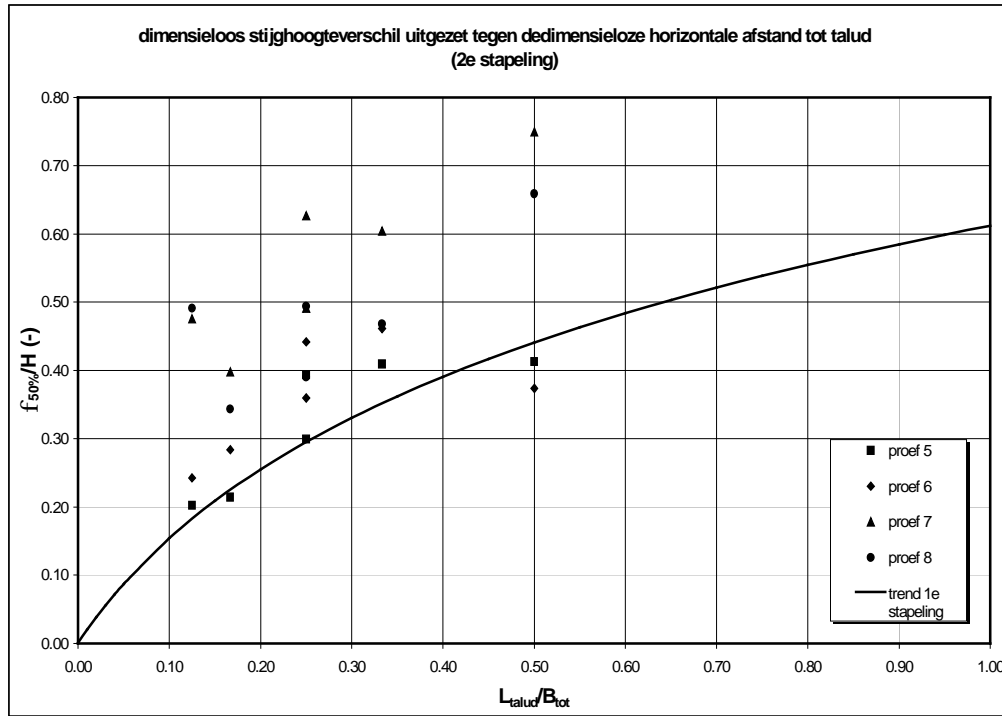
WL | DELFT HYDRAULICS

H4071.10

Fig. A-2



Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze horizontale afstand in de stapeling (1e stapeling)		
WL   DELFT HYDRAULICS	H4071.10	Fig. A-3

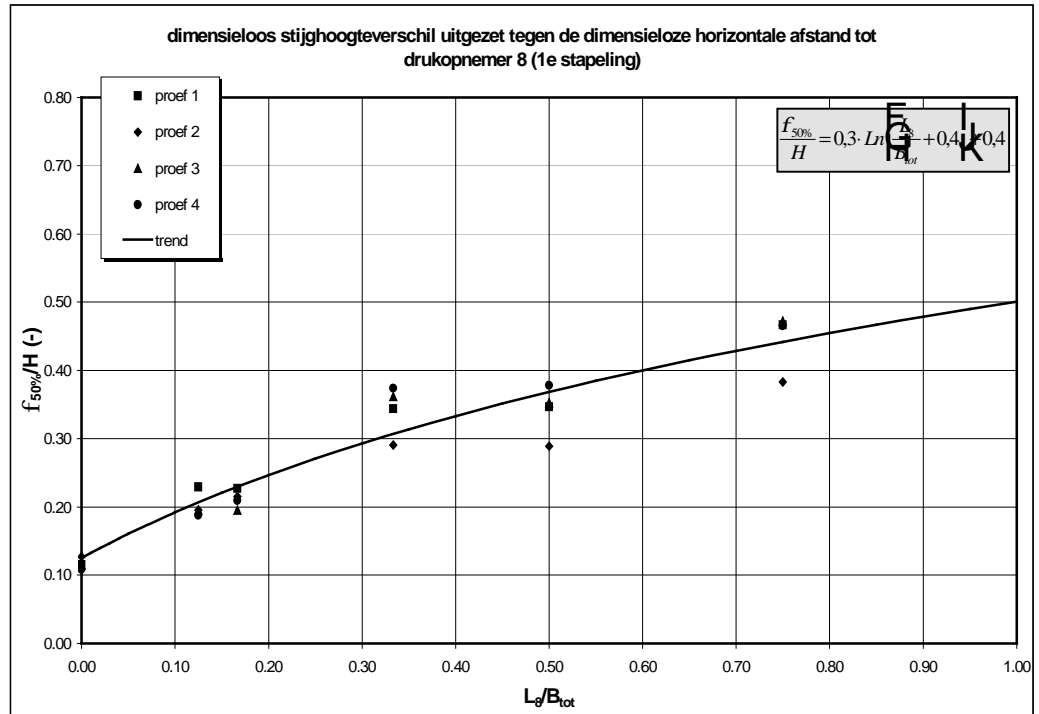


Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze  
horizontale afstand in de stapeling (2e stapeling)

WL | DELFT HYDRAULICS

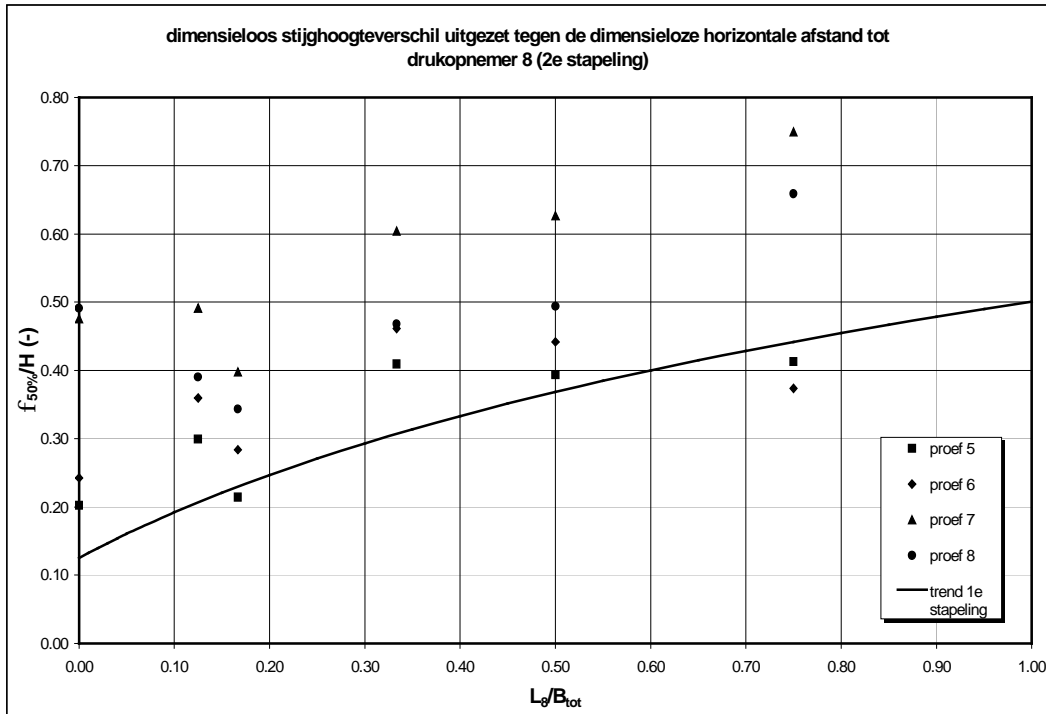
H4071.10

Fig. A-4

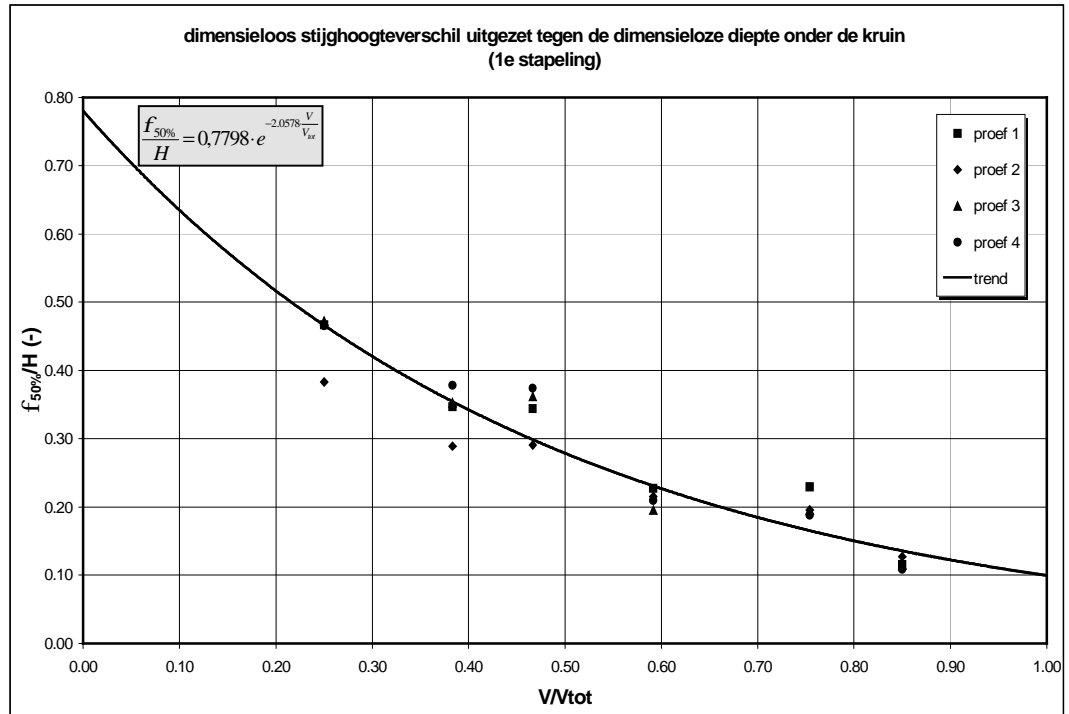


Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze horizontale afstand tot drukopnemer 8 (1e stapeling)		
	WL   DELFT HYDRAULICS	H4071.10

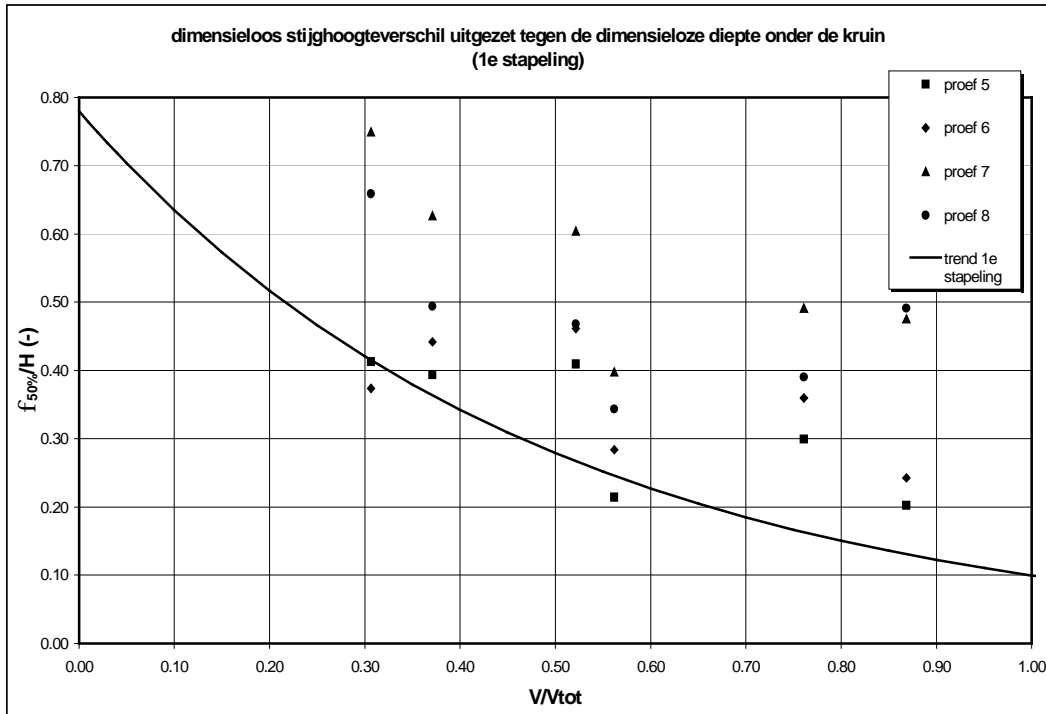




Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze horizontale afstand tot drukopnemer 8 (2e stapeling)		
WL   DELFT HYDRAULICS	H4071.10	Fig. A-6



Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze verticale afstand onder de kruin (1e stapeling)		
<b>WL   DELFT HYDRAULICS</b>	H4071.10	Fig. A-7

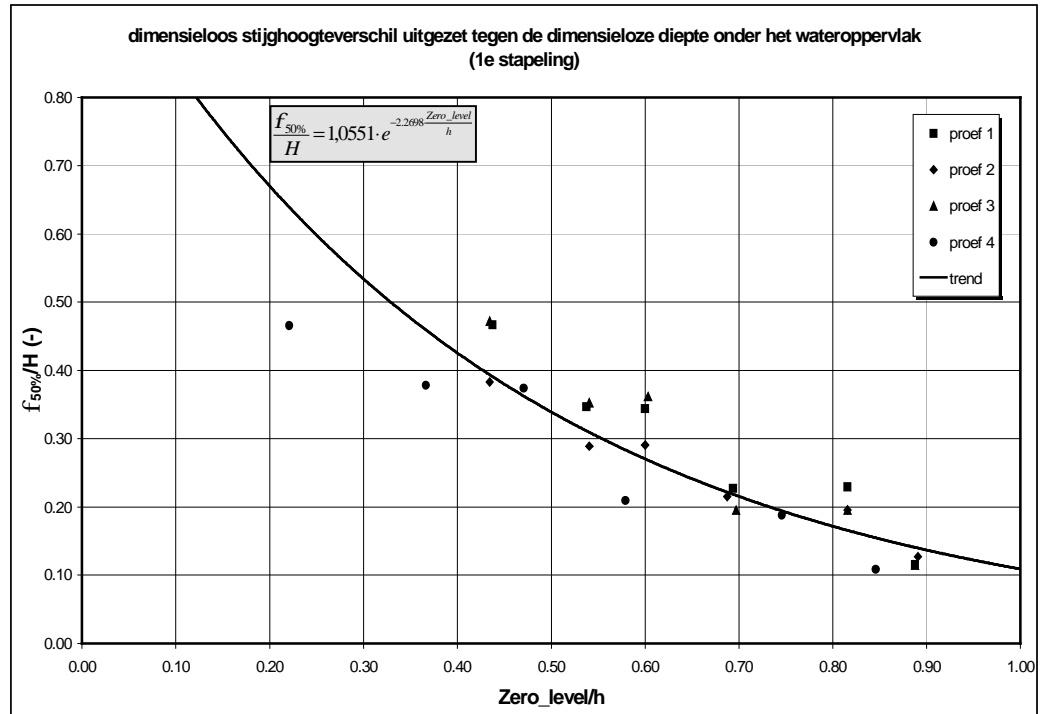


Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze  
verticale afstand onder de kruin (2e stapeling)

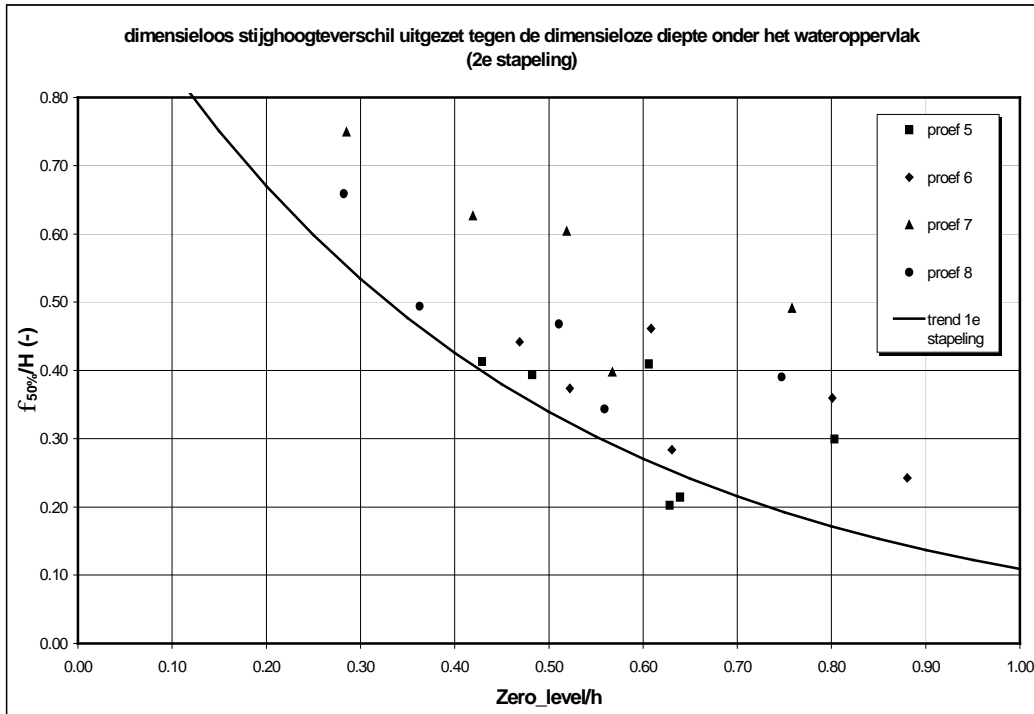
WL | DELFT HYDRAULICS

H4071.10

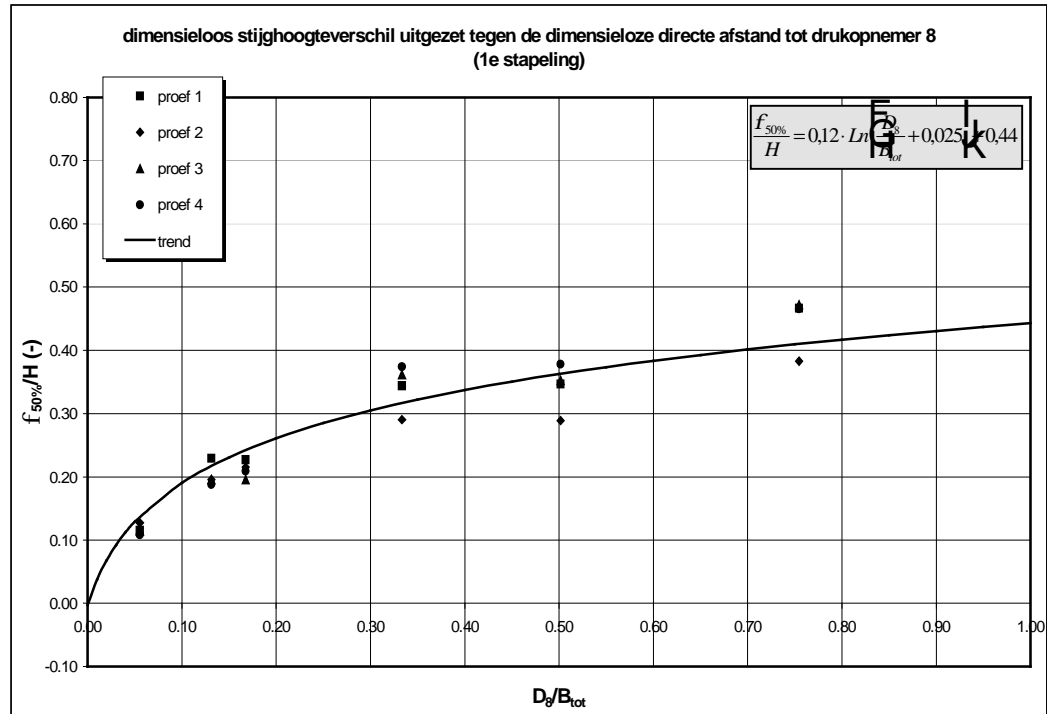
Fig. A-8



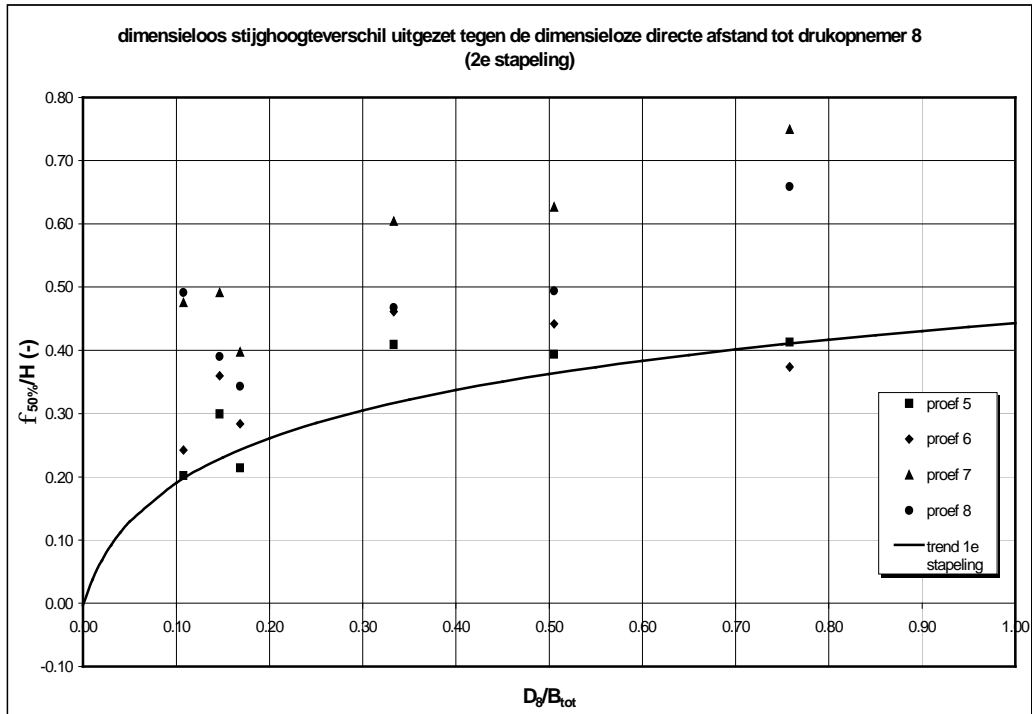
Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze		
verticale afstand onder het wateroppervlak (1e stapeling)		
WL   DELFT HYDRAULICS	H4071.10	Fig. A-9



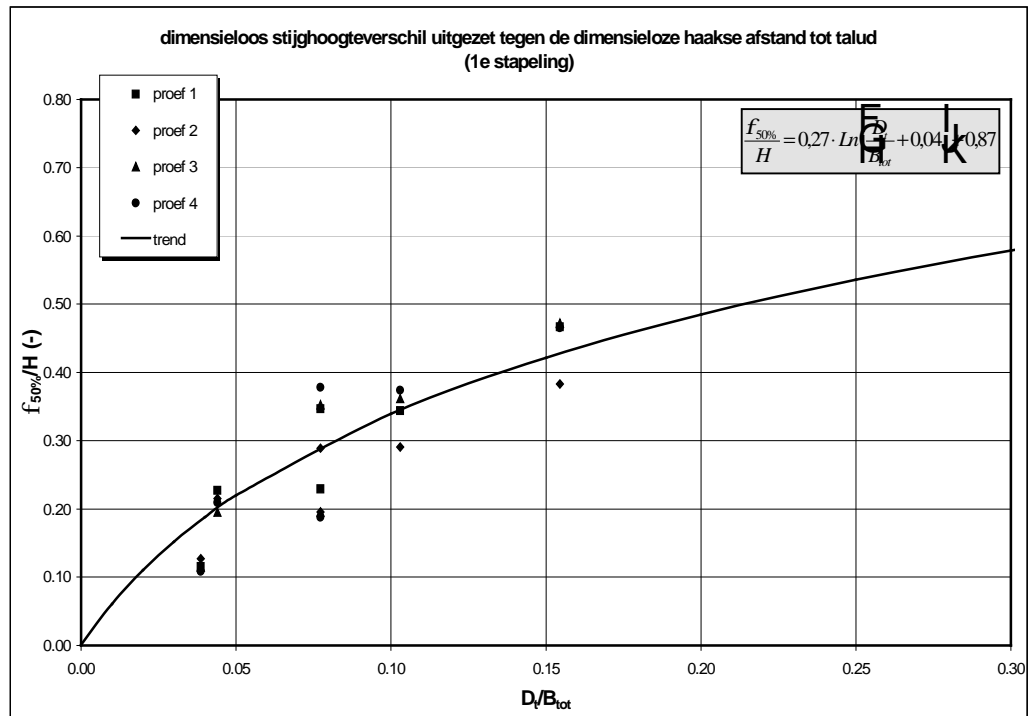
Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze verticale afstand onder het wateroppervlak (2e stapeling)		
<b>WL   DELFT HYDRAULICS</b>	<b>H4071.10</b>	<b>Fig. A-10</b>



Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze directe afstand tot drukopnemer 8 (1e stapeling)		
WL   DELFT HYDRAULICS	H4071.10	Fig. A-11



Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze directe afstand tot drukopnemer 8 (2e stapeling)



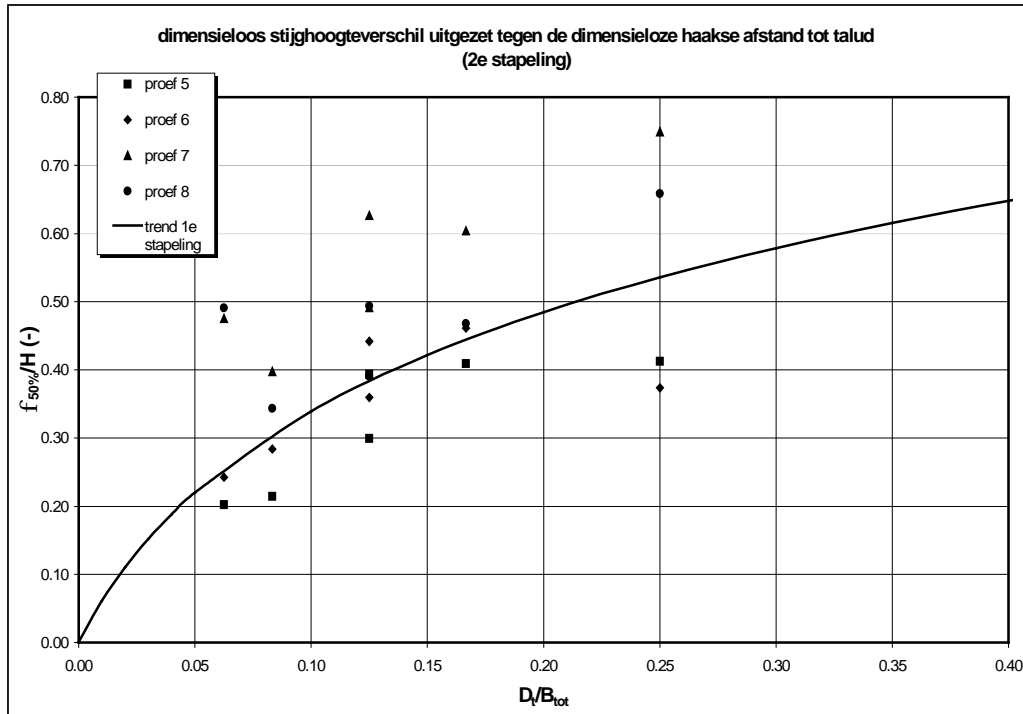
Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de haakse afstand tot het talud

WL | DELFT HYDRAULICS

H4071.10

Fig. A-13



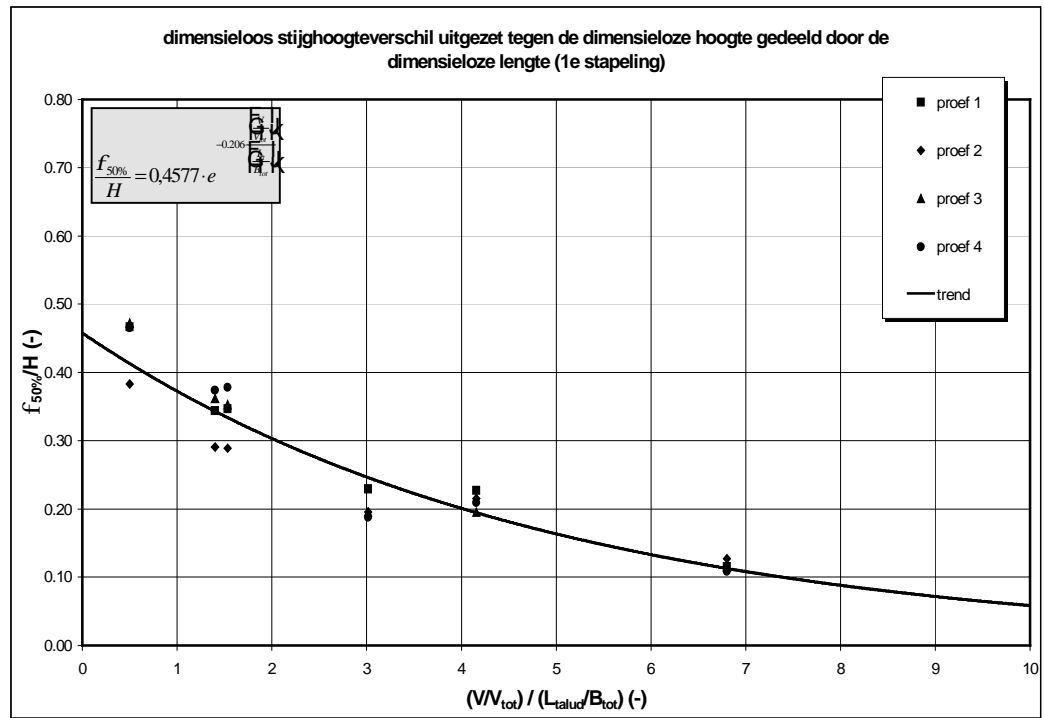


Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de haakse  
afstand tot het talud (2e stapeling)

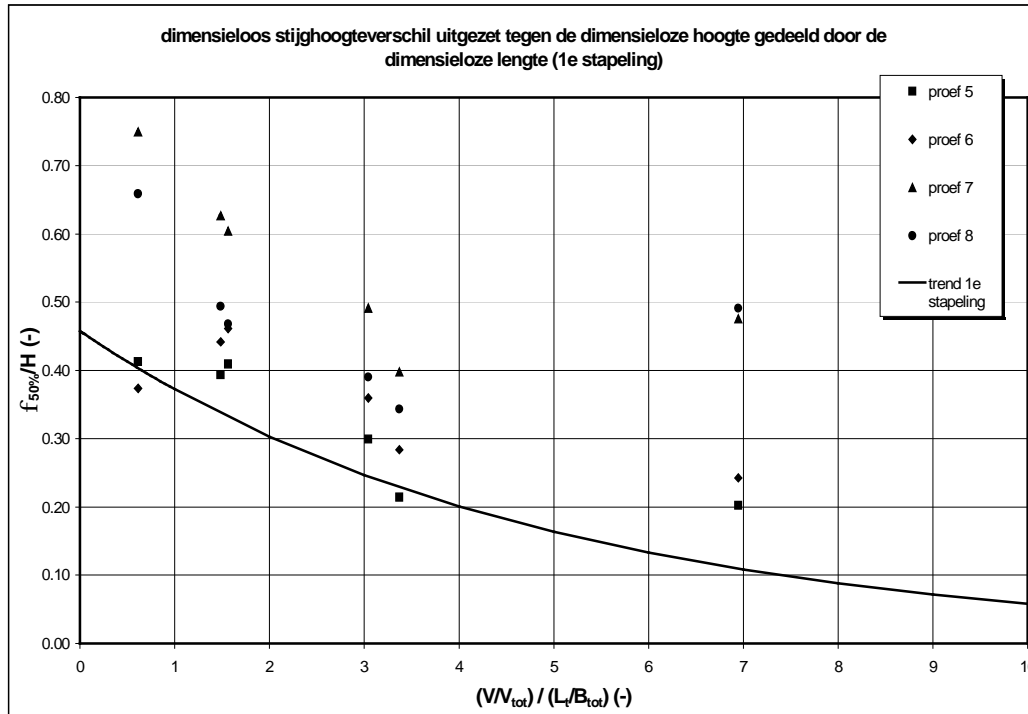
WL | DELFT HYDRAULICS

H4071.10

Fig. A-14



Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze verhouding tussen verticale en horizontale afstand in de stapeling (1e stapeling)		
WL   DELFT HYDRAULICS	H4071.10	Fig. A-15

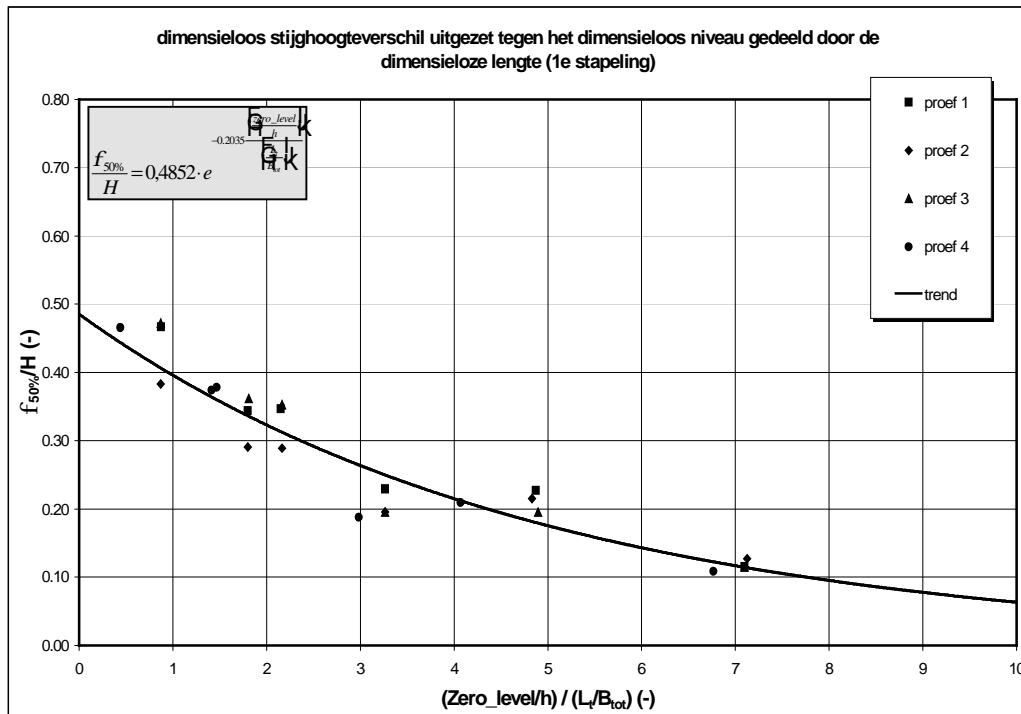


Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze verhouding tussen verticale en horizontale afstand in de stapeling (2e stapeling)

WL | DELFT HYDRAULICS

H4071.10

Fig. A-16

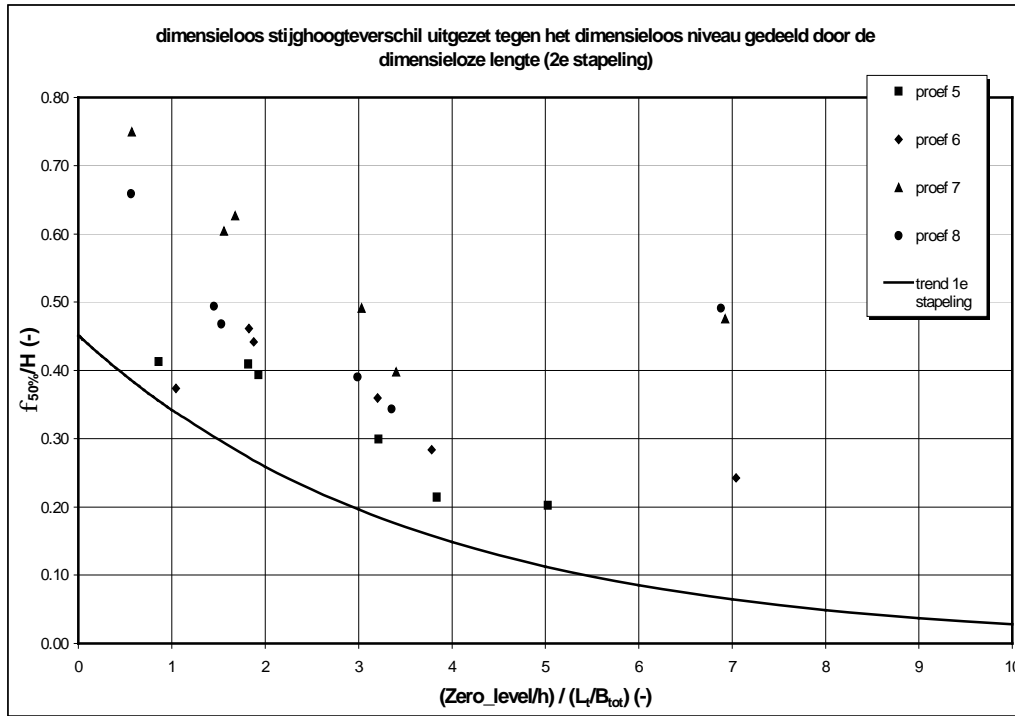


Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze verhouding tussen verticale afstand onder de waterspiegel en de horizontale afstand in de stapeling (1e stapeling)

WL | DELFT HYDRAULICS

H4071.10

Fig. A-17

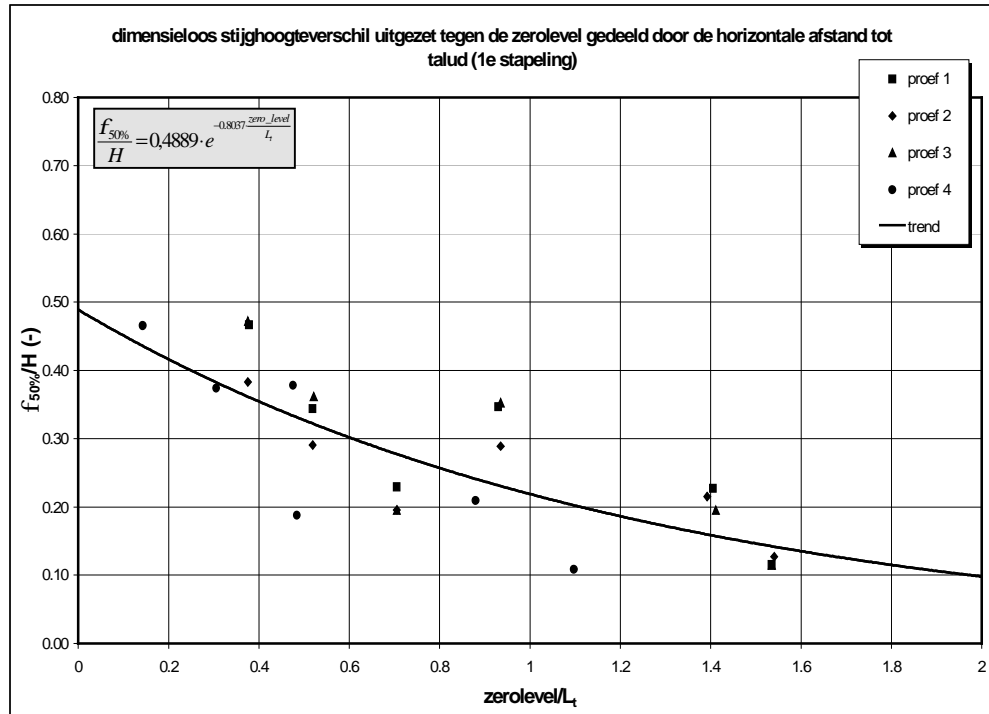


Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze verhouding tussen verticale afstand onder de waterspiegel en de horizontale afstand in de stapeling (2e stapeling)

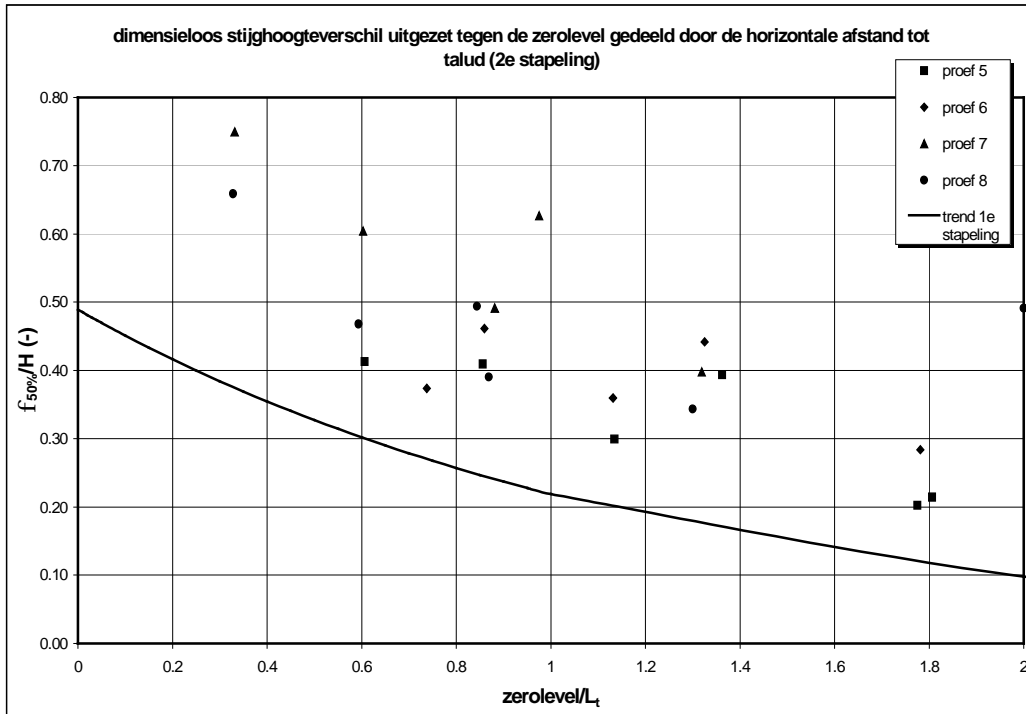
WL | DELFT HYDRAULICS

H4071.10

Fig. A-18



Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze verhouding tussen verticale afstand in de stapeling en de haakse afstand tot het talud (1e stapeling)		
	WL   DELFT HYDRAULICS	H4071.10 Fig. A-19



Dimensieloos stijghoogteverschil uitgezet tegen de dimensieloze verhouding tussen verticale afstand in de stapeling en de haakse afstand tot het talud (2e stapeling)

WL | DELFT HYDRAULICS

H4071.10

Fig. A-20

## B-1 Inleiding

Uitgangspunt is de benadering van Koehorst [Berendsen, 1999] die een vorm van afschuiven beschouwd waarbij alle buitenste containers langs het talud naar beneden bewegen en de onderkant van de stapel tegelijk ook horizontaal (over bijvoorbeeld een vlakke vloer) naar buiten schuift. Zie Figuur B-1

De beweging van de buitenste containers langs het talud is echter niet parallel aan het talud, doch enigszins naar buiten gericht. de containers worden daartoe gedwongen door hun vorm en de vorm van de onderliggende containers. De richting van die beweging ten opzichte van de horizontaal is aangeduid met de dilatantiehoek  $\beta$ . Dat naar buiten bewegen, gedwongen door de onvlakheid van de elementen, treedt ook op bij steenachtige elementen en zandkorrels en wordt daar ook 'dilatantie' genoemd

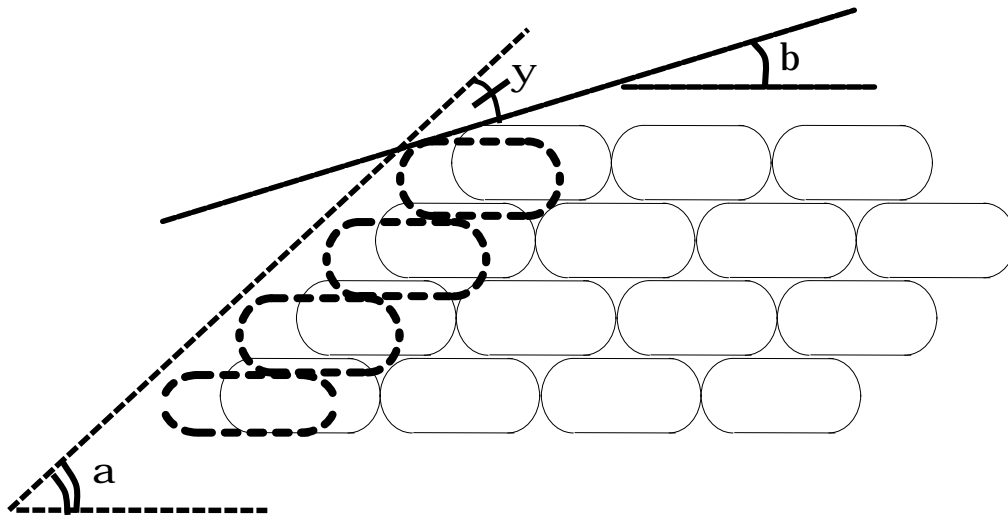
Zoals te zien is aan Figuur B-1 is de vorm van afschuiven waarbij alle buitenste containers langs het talud naar beneden bewegen en de onderkant van de stapel tegelijk ook horizontaal naar buiten schuift, alleen mogelijk als de onderste containers(s) sterk vervormen. Het is de vraag of dat wel kan, gezien de weerstand die het geotextiel zal bieden.

Die discutabele en conservatieve veronderstelling van sterke vervorming is in twee gevallen niet nodig:

- Voor een oneindig lang talud
- Als  $\beta = 0$ .

Gezien de platte vorm van de geocontainers lijkt laatstgenoemde veronderstelling heel aannemelijk. Daarom is die veronderstelling in hoofdstuk 5 gedaan. Hieronder volgt echter de algemene afleiding, ook geldig voor  $\beta \neq 0$ , echter nog steeds uitgaande van een afschuiving over een vlakke ondergrond. In onderdeel B-3 wordt kort ingegaan op de situatie dat deze ondergrond niet vlak is of dat de beschouwde afschuivende laag geocontainers weer op onderliggende containers rust, en afschuiving over de onderliggende containers via dilatantie zou plaatsvinden.





Figuur B-1. Stapeling geocontainers met aangenomen vorm van afschuiven

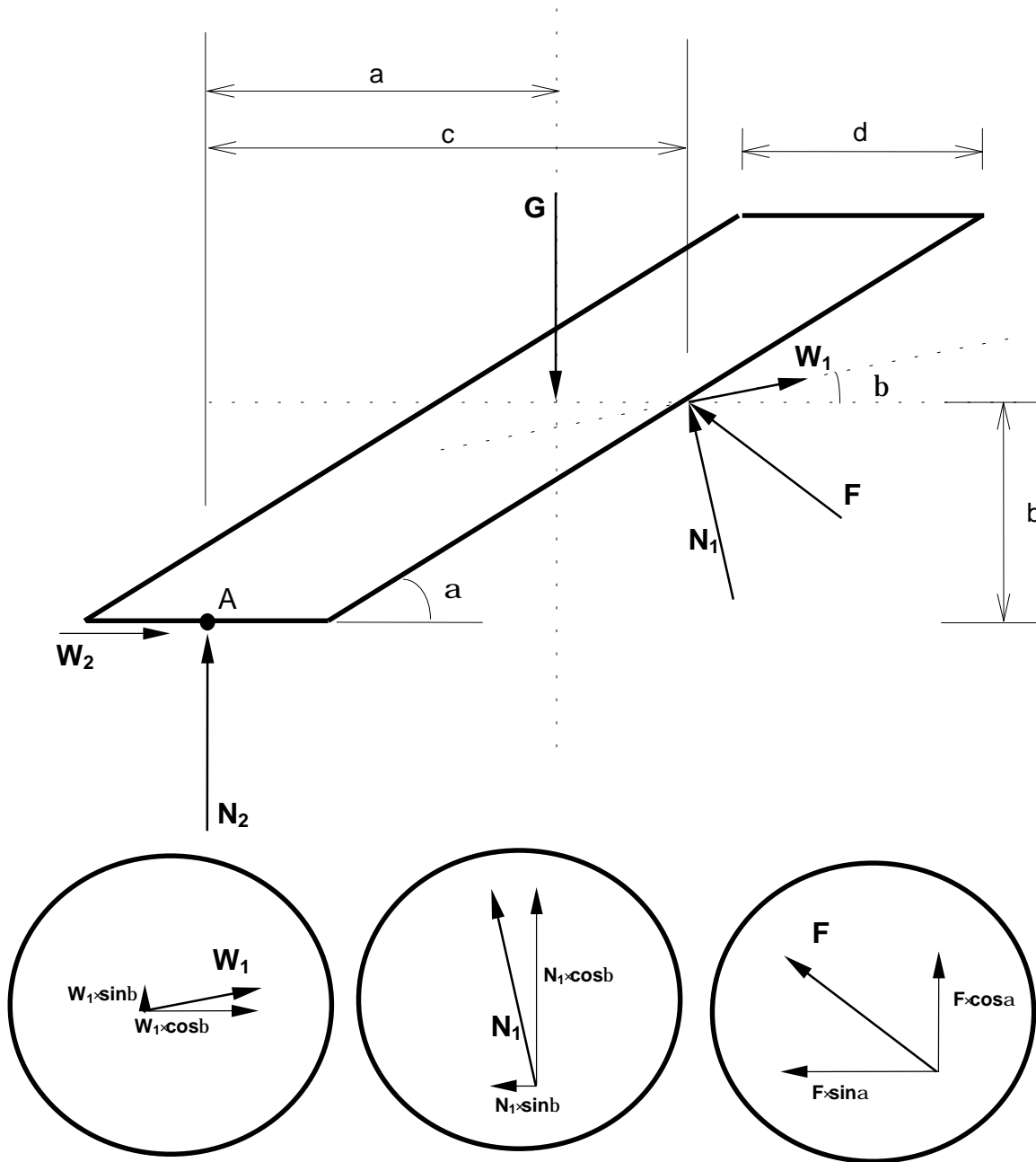
## B-2 Definitie Parameters

Gegevens: - Dijkhoogte :  $2b$  (m)  
 - Breedte goeement :  $d$  (m)

### Symbolen

- $f$  = Wrijvingsfactor (-)
- $F$  = Variërende component van de inwendige naar buiten gerichte kracht (N/m)
- $G$  = Eigen gewicht (aandrijvende kracht) (N/m)
- $N$  = Normaalkracht (N/m)
- $W$  = Gemobiliseerde wrijvingskracht (N/m)
- $\beta$  = hoek waaronder de buitenste rij geo-elementen kunnen wegschuiven t.o.v. de horizontaal ( $^{\circ}$ )
- $\psi$  = dilatantiehoek c.q. hoek waaronder de buitenste rij geo-elementen kunnen wegschuiven t.o.v. het talud ( $^{\circ}$ )

**B-2                      Stabiliteitsafleiding bij afschuiven van de buitenste laag  
 geocontainers van een stapeling over een horizontale ondergrond**



Figuur B-2                      Krachtenspel in een stapeling geoelementen

*Krachtenevenwicht*

$$\text{Verticaal evenwicht } (\Sigma V=0) \Rightarrow G = N_2 + N_1 \cdot \cos b + W_1 \cdot \sin b + F \cdot \cos a \quad (1)$$

$$\text{Horizontaal evenwicht } (\Sigma H=0) \Rightarrow W_2 + W_1 \cdot \cos b = N_1 \cdot \sin b + F \cdot \sin a \quad (2)$$

Momenten evenwicht ( $\Sigma M_A=0$ )  $\Rightarrow$

$$a \cdot G + b \cdot W_1 \cdot \cos b = b \cdot N_1 \cdot \sin b + c \cdot N_1 \cdot \cos b + c \cdot W_1 \cdot \sin b + c \cdot F \cdot \cos a + b \cdot F \cdot \sin a \quad (3)$$

*Vastlegging wrijvingsfactoren*

$$W_1 = f \cdot N_1$$

$$W_2 = f \cdot N_2$$

De wrijvingskracht  $W_1$  treedt op doordat de buitenste laag die afschuift initieel nog in contact staat met de tweede laag geocontainers, en hier een wrijvingskracht overwonnen moet worden. Afschuiven treedt langs hoek  $\beta$ .

Omdat aan de onderzijde wordt uitgegaan van een horizontale vloer kan zal wegschuiven hier horizontaal plaatsvinden en zal de wrijvingskracht  $W_2$  derhalve horizontaal gericht zijn.

*Berekening*

Met de wrijvingsfactoren worden (1), (2) en (3) respectievelijk:

$$N_2 = G - N_1 \cdot \cos b - f \cdot N_1 \cdot \sin b - F \cdot \cos a \quad (4)$$

$$N_2 = \frac{N_1 \cdot \sin b + F \cdot \sin a}{f(1 + \cos b)} \quad (5)$$

$$N_1 = \frac{a \cdot G - b \cdot F \cdot \sin a - c \cdot F \cdot \cos a}{(c \cdot f \cdot \sin b - b \cdot f \cdot \cos b + b \cdot \sin b + c \cdot \cos b)} \quad (6)$$

(4) gelijk stellen aan (5) levert:

$$f \cdot G - f \cdot N_1 \cdot \cos b - f^2 \cdot N_1 \cdot \sin b - f \cdot F \cdot \cos a + f \cdot N_1 \cdot \cos b = N_1 \cdot \sin b + F \cdot \sin a$$

$$\Leftrightarrow N_1 \cdot (\sin b + f^2 \cdot \sin b) = f \cdot G - f \cdot F \cdot \cos a - F \cdot \sin a$$

$$\Leftrightarrow N_1 = \frac{f \cdot G - f \cdot F \cdot \cos a - F \cdot \sin a}{(\sin b + f^2 \cdot \sin b)} \quad (7)$$

(5) gelijkstellen aan (6) levert dan:

$$(f \cdot G - f \cdot F \cdot \cos a - F \cdot \sin a) \cdot (c \cdot f \cdot \sin b - b \cdot f \cdot \cos b + b \cdot \sin b + c \cdot \cos b) = (\sin b + f^2 \cdot \sin b) \cdot (a \cdot G - b \cdot F \cdot \sin a - c \cdot F \cdot \cos a)$$

$$\Leftrightarrow c \cdot f^2 \cdot G \cdot \sin b - b \cdot f^2 \cdot G \cdot \cos b + b \cdot f \cdot G \cdot \sin b + c \cdot f \cdot G \cdot \cos b - c \cdot f^2 \cdot F \cdot \sin b \cdot \cos a + b \cdot f^2 \cdot F \cdot \cos a \cdot \cos b - b \cdot f \cdot F \cdot \sin b \cdot \cos a - c \cdot f \cdot F \cdot \cos a \cdot \cos b - c \cdot f \cdot F \cdot \sin a \cdot \sin b + b \cdot f \cdot F \cdot \sin a \cdot \cos b - b \cdot F \cdot \sin a \cdot \sin b - c \cdot F \cdot \sin a \cdot \cos b = a \cdot G \cdot \sin b - b \cdot F \cdot \sin a \cdot \sin b - c \cdot F \cdot \sin b \cdot \cos a + a \cdot f^2 \cdot G \cdot \sin b - b \cdot f^2 \cdot F \cdot \sin a \cdot \sin b - c \cdot f^2 \cdot F \cdot \sin b \cdot \cos a$$

$$\Leftrightarrow (c - a) \cdot f^2 \cdot G \cdot \sin b - b \cdot f^2 \cdot G \cdot \cos b + b \cdot f \cdot G \cdot \sin b + c \cdot f \cdot G \cdot \cos b + b \cdot f^2 \cdot F \cdot \cos a \cdot \cos b - b \cdot f \cdot F \cdot \sin b \cdot \cos a - c \cdot f \cdot F \cdot \cos a \cdot \cos b - c \cdot f \cdot F \cdot \sin a \cdot \sin b + b \cdot f \cdot F \cdot \sin a \cdot \cos b - c \cdot F \cdot \sin a \cdot \cos b - a \cdot G \cdot \sin b + c \cdot F \cdot \sin b \cdot \cos a + b \cdot f^2 \cdot F \cdot \sin a \cdot \sin b = 0$$

Hetgeen leidt tot de uiteindelijke vergelijking:

$$\Leftrightarrow f^2 \left\{ (c - a) \cdot G \cdot \sin b - b \cdot G \cdot \cos b + b \cdot F \cdot \cos a \cdot \cos b + b \cdot F \cdot \sin a \cdot \sin b \right\} + f \left\{ b \cdot G \cdot \sin b + c \cdot G \cdot \cos b - b \cdot F \cdot \sin b \cdot \cos a - c \cdot F \cdot \cos b \cdot \cos a - c \cdot F \cdot \sin a \cdot \sin b + b \cdot F \cdot \sin a \cdot \cos b \right\} - a \cdot G \cdot \sin b - c \cdot F \cdot \sin a \cdot \cos b + c \cdot F \cdot \sin b \cdot \cos a = 0 \quad (8)$$

Deze formule vereenvoudigt voor de situatie met  $\beta = 0$  tot:

$$\Leftrightarrow f^2(-b \cdot G + b \cdot F \cdot \cos a) + f(c \cdot G - c \cdot F \cdot \cos a - b \cdot F \cdot \sin a) - c \cdot F \cdot \sin a = 0$$

$$\Leftrightarrow (c - b \cdot f) \cdot \{f(G - F \cos a) - F \cdot \sin a\} = 0$$

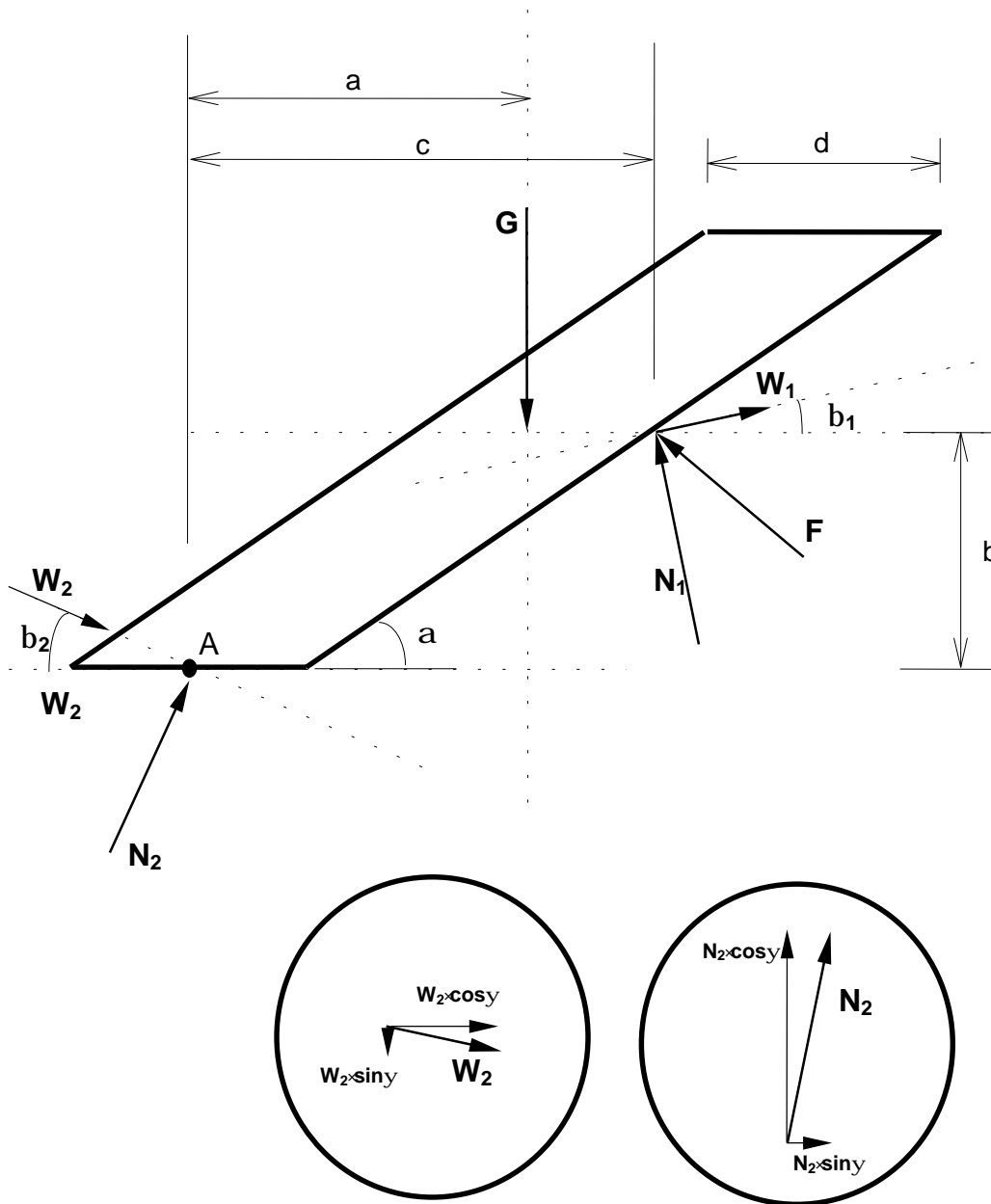
Uit gelijkstelling van de tweede term aan nul, volgt de eerste formule van hoofdstuk 5, waarin het horizontaal en het verticaal evenwicht verwerkt zijn:

$$f = \frac{F \cdot \sin a}{G - F \cdot \cos a} \quad (9)$$

### B-3 Opmerkingen

In de hierboven uitgewerkte stabiliteitsafleiding wordt uitgegaan van afschuiven van de buitenste laag geocontainers over een horizontale ondergrond. In het geval deze ondergrond

niet horizontaal ligt, of in het geval dat de ondergrond ook weer uit geocontainers bestaat moet hoek  $\beta_2$  worden geïntroduceerd (zie Figuur B-3). Hoek  $\beta_2$  kan ook worden gezien als een dilatantiehoek. Hoek  $\beta_1$  en  $\beta_2$  hoeven niet per definitie gelijk te zijn. Deze afleiding is hier niet verder uitgewerkt. Wel wordt opgemerkt dat de uiteindelijke vergelijking in deze situatie een stuk ingewikkelder wordt dan vergelijking (8) en lastiger lijkt te vereenvoudigen. In het geval er weer wordt uitgegaan van de situatie dat  $\beta_1 = \beta_2 = 0$ , dan zal ook deze situatie weer vereenvoudigen en leiden tot vergelijking (9).



Figuur B-3 Krachtenspel in een stapeling geoelementen bij niet horizontale vloer of bij onderliggende geoelementen

## **DEEL 4**

### **Wegzakken en loskomen uit splijtbak**

**Nadere analyse van geocontainer gestort bij Kandia**

**M.B. de Groot**

**DEEL 4**  
**Wegzakken en loskomen uit splijtbak**  
**Nadere analyse van geocontainer gestort bij Kandia**

M.B. de Groot

**Inhoud**

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Video-analyse wegzakken en loskomen Kandia container .....</b>	<b>3</b>
	2.1 Analysemethode.....	3
	2.2 Resultaten.....	4
<b>3</b>	<b>Rekenmodel wegzakken en loskomen uit splijtbak.....</b>	<b>6</b>
	3.1 Kwalitatieve beschrijving van het model.....	6
	3.2 Formules voor geometrie en gewicht.....	7
	3.3 Formules voor fase ‘pre-IV’ .....	8
	3.4 Formules voor fase IV .....	8
<b>4</b>	<b>Kandiaproef nagerekend met rekenmodel.....</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Invloed parameters op kritieke openingsbreedte .....</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>Conclusies.....</b>	<b>17</b>
	<b>Referenties .....</b>	<b>18</b>

**Bijlage I Afmetingen van de splijtbak en de geocontainer**

**Bijlage II Rekenblad fase ‘pre-IV’ voor wegzakken en loskomen toegepast op Kandia geocontainer**

**Bijlage III Rekenblad fase ‘IV’ voor wegzakken en loskomen toegepast op Kandia geocontainer**

## 1 Inleiding

Het wegzakken en loskomen van een geocontainer uit de splijtbak is in het verleden vrij uitgebreid bestudeerd. Zie deel 6 uit [Pilarczyk 2000] en [de Groot en Bezuijen 1999/2000]. De toen ontwikkelde rekenmodellen lieten zien dat de belasting van het geotextiel tijdens het wegzakken en loskomen minder groot zijn dan tijdens het vallen op de bodem. Voor ervaren aannemers bleek dit deel van het proces ook niet de grootste problemen op te leveren. Om al deze redenen werd bij de start van het onderhavige geocontaineronderzoek geen prioriteit aan het wegzakken en loskomen gegeven.

Bij de uitvoering van de geocontainers in Kandia bleek dit deel van het proces echter wèl grote problemen op te leveren. Een flink aantal geocontainers bezweek al tijdens het loskomen uit de splijtbak. Bovendien bleek dat het ongelijkmatig loskomen uit de splijtbak tot grote afwijking van het horizontaal vallen leidt en daardoor ook ongunstig is voor het vallen op de bodem.

De veronderstelling dat het ongelijkmatig loskomen te wijten is aan het ongelijkmatige vullen van de geocontainer verdiende nadere onderbouwing. De videorapportage van één van de proeven levert voldoende informatie op om het proces van wegzakken en loskomen vrij gedetailleerd te beschrijven. Die beschrijving kan vergeleken worden met de beschrijving die volgt uit de toepassing van bovengenoemd rekenmodel.

Bij voldoende overeenkomst tussen waarneming en model is het gerechtvaardigd om middels een parametervariatie na te gaan wat de invloed kan zijn van ongelijkmatig vullen op het proces van wegzakken en loskomen. Als de invloed van een parameter significant is en als die parameter door ongelijkmatig vullen kan variëren in de langsrichting binnen één container, zou daarmee een verklaring gevonden zijn voor het ongelijkmatig loskomen uit de splijtbak.

Overeenkomstig deze gedachtegang wordt eerst de videorapportage geanalyseerd (hoofdstuk 2), vervolgens het rekenmodel toegepast (hoofdstuk 4) en tenslotte met een parametervariatie onderzocht wat de invloed is van die parameters op de kritieke openingsbreedte van de splijtbak, dat is de openingsbreedte waarbij de geocontainer loskomt uit de bak (hoofdstuk 5). Aangezien de bij Kandia toegepast 'overlengte' aan geotextiel onder in de splijtbak, niet gemodelleerd was in de oude rekenmodellen, moest het rekenmodel eerst worden aangepast alvorens het kon worden gebruikt (hoofdstuk 3).



## 2 Video-analyse wegzakken en loskomen Kandia container

### 2.1 Analysemethode

Bij de derde proef gerapporteerd in [Schrijver en Peters 2002] en geanalyseerd in [Bezuijzen 2002] was Bezuijzen aanwezig. Hij heeft een video opname gemaakt, waarbij de camera op een statief stond in de as van de splijtbak op het dek aan de achterzijde (oostzijde). Het 'dek' bestaat ter plaatse uit een stalen plaat die min of meer horizontaal blijft tijdens het openen van de splijtbak. De camera was gericht op de beun in westelijke richting. Een groot deel van de beun en de geocontainer daarin was zichtbaar, alsmede het aangrenzende dek van de splijtbak, de horizon daarachter en de zijkant van het ponton waaraan de splijtbak lag afgemeerd. Eén van de laatste videobeelden is weergegeven in figuur 8 van [Bezuijzen 2002] en hier overgenomen:



De video registreert de tijd vanaf het moment dat hij aangezet wordt. Die tijd kon gerelateerd worden aan de tijdregistratie die gehanteerd werd bij de drukmetingen omdat het moment van het begin van openen van de splijtbak daar duidelijk zichtbaar is, te weten op  $t = 18$  s. Nauwkeurigheid geschat op  $\pm 2$  s. Zie de bijlagen 6.3a, 6.3c en 6.3e uit [Schrijver en Peters 2002]. Hieronder zal de tijdsaanduiding van de drukregistraties gebruikt worden.

Goed zichtbaar aan de voorzijde van de splijtbakbeun is het mastje dat bevestigd is aan de bakboordhelft van de bak. Met een gradenboog kon de hoek ( $\theta - \theta_0$ ) die het mastje met de horizon maakt bij elk videobeeld worden opgemeten met een geschatte nauwkeurigheid van  $\pm 3^\circ$ . Opmerking:  $\theta_0$  is de hoek die de beunwand met de horizon maakt wanneer de splijtbak gesloten is.

De breedte van de beunopening als functie van de hoek is afgeleid uit de afmetingen van de splijtbak en de locatie van het scharnier (op dekhooft) die zijn weergegeven in bijlage I. Die bijlage is op één punt niet geheel correct: de beunwand was niet geknikt, zoals aangegeven op de tekening, maar gekromd. Aangenomen wordt dat de invloed van die fout verwaarloosbaar is.

De diepte waarover de geocontainer aan bakboordzijde is weggezak t.o.v. de bakboord bovenrand van de beun is te schatten op basis van de verhouding van die diepte tot andere bekende lengtes op

dezelfde afstand van de camera. Hetzelfde geldt voor stuurboord. De nauwkeurigheid wordt geschat op  $\pm 0,1$  m.

De hoogte van de beunrand t.o.v. pontondek kon geschat worden met een geschatte nauwkeurigheid van  $\pm 0,5$  m. De nauwkeurigheid was zo gering omdat de splijtbak tijdens het openen ook in dwars- en langsrichting beweegt t.o.v. het ponton. Tenslotte kon ook een schatting gemaakt worden van de hoogte van de camera t.o.v. het pontondek, door te zichten op de horizon. Ook die nauwkeurigheid was beperkt tot  $\pm 0,5$  m.

## 2.2 Resultaten

De belangrijkste resultaten zijn weergegeven in tabel 1.

De resultaten op drie ogenblikken zijn geschetst in figuur 1. De hoogte van de geocontainer onder de opening,  $h_h$  is berekend op basis van het gegeven dat het dwarsprofiel van de geocontainer constant is gebleven. De hoogte van beun enerzijds en geocontainer anderzijds t.o.v. de waterspiegel zijn geschat op basis van de waargenomen druk in D1 en D2 (bijlagen 6.3a en 6.3b in [Schrijver en Peters 2002]) in combinatie met het oppervlak onder water van het dwarsprofiel van splijtbak + geocontainer. Dat oppervlak moet tot aan het loskomen van de geocontainer steeds gelijk blijven.

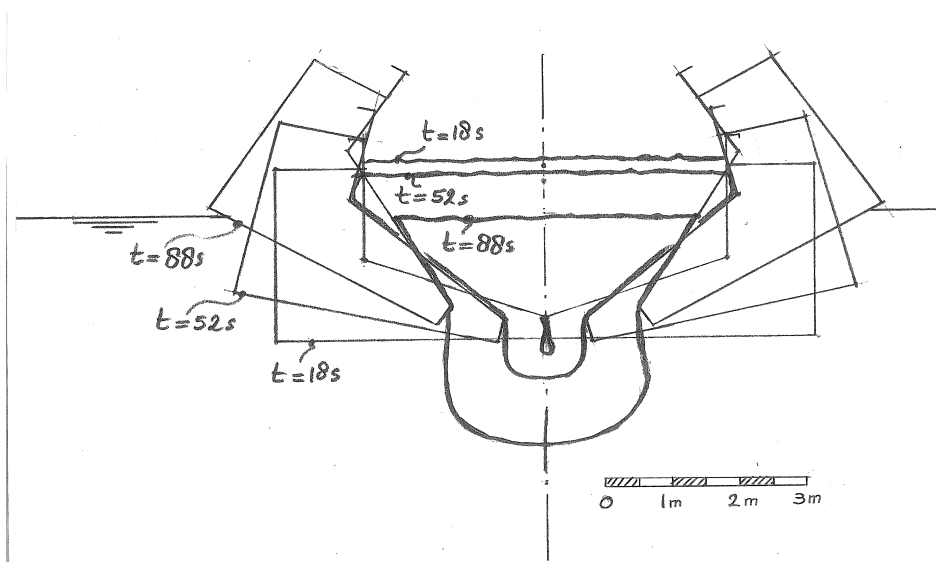


Fig. 1 Schets van dwarsdoorsnede splijtbak en geocontainer bij begin opening, vlak voor loskomen en op een tijdstip daartussenin

t	$(\theta - \theta_0)$	$b_0$	zakking bakboord	zakking stuurboord	hoogte beunrand t.o.v. pontondek (m)	hoogte camera t.o.v. pontondek (m)	WAARNEMINGEN
(s)	(°)	(m)	(m)	(m)			
18	0	0	0	0			Splijtbak 1,5 m (?) van ponton; landvast strak Bak beweegt naar ponton Bak botst tegen ponton
22	0	0	0	0	-1,4	+0,8	
29	4	0,36	0	0,05			
31			0	0,3			
34	6	0,54	0	0,3			
36	7	0,63	0,2	0,3			

40	7	0,63	0,4	0,4	-1,2		Bak beweegt van ponton af
44	12	1,08	0,6	0,6			Bak op constante afstand
52	14	1,26	0,8	0,8	-1,0		Bak beweegt naar voren
58	15	1,35	0,9	0,9	-0,7		
62	17	1,52	1,1	1,1			Bak beweegt naar voren of van ponton af
66	19	1,69	1,1	1,1		+0,8	Bak ligt stil
72	22	1,95	1,4	1,4	-0,5		
78	24	2,12	1,6	1,6	-0,3		
83	23	2,03	1,8	1,8	-0,1		
87	29	2,52	2,0	2,0			
88	30	2,60	2,1	2,1			Bak springt omhoog
90	32	2,76	2,2	2,2	+0,3		
91	33	2,83	2,6	2,6		+1,2	Water komt vooraan binnen
92					+0,6	+1,6	Bak bereikt hoogste niveau; container nog 3 m breed
93	32	2,76	3,0	3,0			Container nog 1,5 m breed
94	33	2,83	> 3,0	> 3,0			Container verdwijnt
102	32	2,76	> 3,0	> 3,0	+0,8	+1,3	

Tabel 1 Waarnemingen van videoband veldmeting 3

Uit de tabel is af te lezen dat de geocontainer in de periode  $t = 18 \text{ s} - 88 \text{ s}$  slechts langzaam wegzakt t.o.v. de beunrand. De absolute zakkingsnelheid is nog veel lager, omdat de beunrand meer omhoogkomt dan dat de geocontainer wegzakt, zoals weergegeven in figuur 1. De veronderstelling is dan ook gerechtvaardigd dat geocontainer en splijtbak tot  $t = 88 \text{ s}$  voortdurend in evenwicht zijn, al gaat het om een geleidelijk verschuivend evenwicht. Versnellingen en vertragingen spelen geen rol.

Uit de tabel blijkt verder dat zich in het begin een verschil tussen bakboord en stuurboord manifesteert. Later is zo'n verschil niet meer waargenomen.

Uit de waarnemingen blijkt dat de snelheid waarmee de splijtbak opent, na een aarzelend begin, min of meer constant is:  $d\theta/dt \approx 0,5^\circ/\text{s}$  en  $db_0/dt \approx 0,04 \text{ m/s}$ .

Op  $t = 88 \text{ s}$  neemt de snelheid waarmee de geocontainer wegzakt snel toe. Op  $t = 91 \text{ s}$  komt er aan de voorkant water binnen boven de geocontainer. In de periode  $t = 88 \text{ s} - 92 \text{ s}$  springt de splijtbak omhoog. Op  $t = 94 \text{ s}$  is het laatste stuk van de geocontainer verdwenen. Een en ander lijkt aardig in overeenstemming met de drukmetingen aan de meters D1, D2, D3 en D4.

### 3 Rekenmodel wegzakken en loskomen uit splijtbak

#### 3.1 Kwalitatieve beschrijving van het model

In [de Groot en Bezuijen 1999/2000] is een rekenmodel beschreven. Het model beschrijft het evenwicht dat telkens opnieuw ontstaat als de splijtbak weer een eindje verder is opengegaan en de geocontainer iets verder is weggezakt. Het bevat geometrische relaties, zoals het verband tussen openingsbreedte  $b_0$ , scharnierhoogte en openingshoek  $\theta$ , en zoals de voorwaarde dat het oppervlak van het dwarsprofiel van de geocontainer steeds gelijk blijft. Daarnaast beschrijft het model het globale evenwicht van de container, zoals dat de verticale component van de kracht uitgeoefend door de splijtbak op de container is gelijk aan het gewicht van de geocontainer, alsmede het evenwicht van gedeeltes van de geocontainer: de uitstulping, de bakboort helft, de stuurboord helft en het middengedeelte. Tenslotte bevat het model een aantal vergelijkingen die de spanningsverdeling in het zand beschrijven: actief of passief; drukverdeling in twee-dimensionale silo.

Hieronder worden de belangrijkste figuren, formules en tekstgedeeltes (in het engels) overgenomen. De nummers van de formules zijn die uit dat rapport. Niet alle figuren waarnaar verwezen wordt zijn overgenomen. De formules zijn verwerkt in Excel rekenbladen. Zie de bijlagen II en III.

Een aanpassing van het model is nodig i.v.m. de toepassing van 'overlengte' van geotxtiel op de bodem van de splijtbak. Daardoor vervallen de fasen I, II en III, waarin de geleidelijke uitstulping van het geotextiel met zand door de opening beschreven wordt. Door de overlengte is er praktisch direct naar de eerste opening meteen een uitstulping met een hoogte van de halve overlengte.

In plaats van die fasen komt er nu een fase 'pre-IV'. Door de overlengte wordt er niet meteen hard getrokken aan het geotextiel dat door de opening steekt. Dat betekent dat het geotextiel ook niet meteen begint te glijden langs de beunwand, tenminste als de wrijvingscoëfficiënt voldoende is. Wel treedt er instabiliteit van het zand boven de opening op. Dat heeft twee oorzaken:

- Er valt zand door de opening in de uitstulping die door de overlengte wordt gevormd. Bij elke vergroting van de opening neemt het volume van die uitstulping toe en moet er dus extra zand naar beneden vallen. Dit proces is te beschrijven met silovergelijkingen.
- De beunwanden gaan van elkaar af en trekken de bakboordhelft van de stuurboordhelft af. De horizontale gronddruk bereikt zijn minimale waarde (actieve gronddruk), vergelijkbaar met de situatie van een meegeevende damwand. Daardoor ontstaan er glijvlakken, ongeveer onder  $45^\circ + 0,5\phi \approx 65^\circ$  met de horizon. Het zand binnen de twee glijvlakken onder die helling zakt naar beneden en daarmee een groot deel van de bovenkant van de geocontainer.

Dit gaat net zo lang door totdat de helling van de beunwanden zo steil wordt, en de kracht waarmee de steeds zwaardere uitstulping aan het geotextiel trekt zo groot worden, dat het geotextiel langs de wanden begint te glijden. Op dat moment begint fase IV, die beschreven is in 5.5 van [de Groot en Bezuijen 1999/2000]. Het naar beneden glijden leidt ertoe dat de bakboordhelft en de stuurboord helft naar elkaar toe zakken. Daardoor kan er een hogere horizontale gronddruk ontstaan.

Die gronddruk hoeft niet meteen de maximale, passieve waarde aan te nemen zoals verondersteld was in paragraaf 5.5 van [de Groot en Bezuijen 1999/2000]. Daarom wordt formule (5.17e) van een gelijkheid omgezet in een ongelijkheid (relatie (5.7e)). Anderzijds wordt formule (5.20a) van een ongelijkheid in een gelijkheid omgezet. Er wordt nu namelijk vanuit gegaan dat de gemobiliseerde wrijving in het middengedeelte nu meteen zijn maximale waarde heeft omdat bij elke verder opening zand uit het midden naar beneden afschuift:  $\phi_{\text{mob}} = \phi$ .

### 3.2 Formules voor geometrie en gewicht

Relevant for the process described below are the following geometric characteristics of the barge:

- $\theta$  : the angle of the barge bottom [degrees]
- $\theta(0)$  : the initial angle of the barge bottom [degrees]
- $b_o$  : the opening width of the barge [m]

The opening width and the angle are related as follows (figure 3.1; hier figuur 2):

$$b_o = 2R \cdot \sin[\theta - \theta(0)] \quad (3.1)$$

where:

$R$  : the radius of split opening, i.e. the distance between the opening point and the hinge [m]

Another relevant characteristic is the draught, i.e. the still waterlevel with respect to the bin level as a function of the load and the opening angle. This determines the part of the geocontainer situated below the water level in the different stages and the consequent effective weight. This part may also influence the air content in the geocontainer. No equations have been developed to quantify the draught characteristics. The effective weight probably corresponds to the submerged weight during the most critical stages. This needs to be verified in a concrete case.

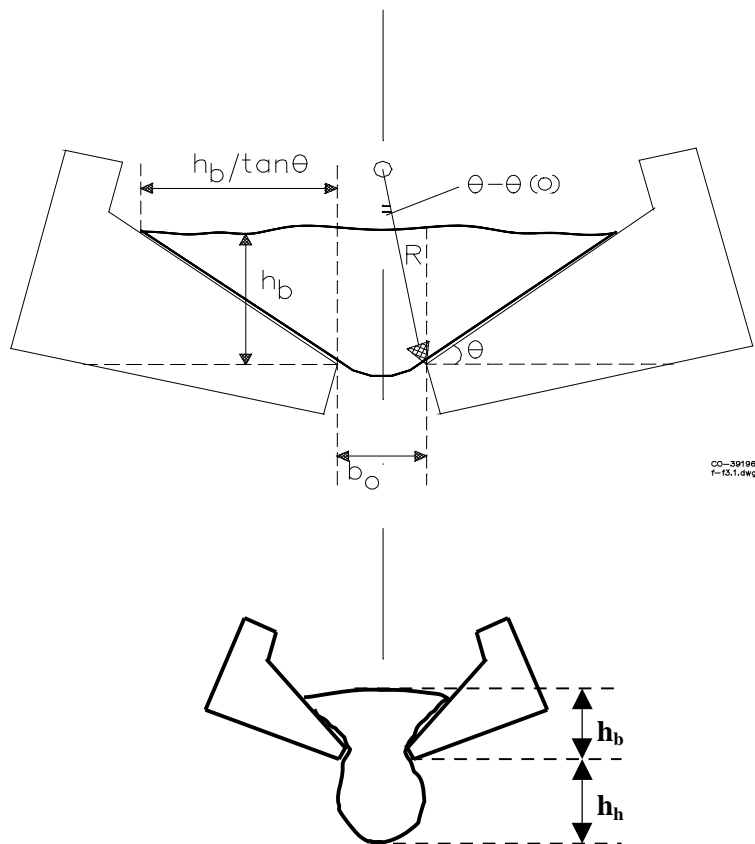


Fig.2 Definitie van geometrische parameters

The relationship between the weight of the geocontainer and its cross section area is expressed by:

$$G = \gamma' \cdot A_f \quad (3.2)$$

where:

$A_f$  : cross section area of geocontainer [ $m^2$ ]

$G$  : effective weight of geocontainer per unit length [ $kN/m$ ]

$n$  : porosity [-]

$S_{at}$  : degree of saturation [-]  $\gamma'$  : average effective unit weight of geocontainer:  $\gamma' = \gamma$ , when completely above the water level and  $\gamma' = \gamma - \gamma_w$ , when completely submerged [ $kN/m^3$ ]

$\gamma$  : unit weight of soil;  $\gamma = (1-n)\gamma_s + n \cdot \gamma_w \cdot S_{at}$  [ $kN/m^3$ ]

$\gamma_s$  : unit weight of solid particles [ $kN/m^3$ ]

$\gamma_w$  : unit weight of water [ $kN/m^3$ ]

### 3.3 Formules voor fase 'pre-IV'

Deze formules zijn gelijk aan die voor fase IV, met de volgende uitzonderingen:

- ◆ In de formules (5.13) en (5.14) wordt de constante  $\mu$  vervangen door de variabele  $\mu_{mob}$ . Er wordt een controlevoorwaarde toegevoegd:

$$\mu - \mu_{mob} < 0$$

- ◆  $h_h$  wordt gelijk gesteld aan de halve overlengte.
- ◆ Er wordt de voorwaarde ingevoerd dat de gemiddelde waarde van de horizontale gronddrukcoëfficiënt gelijk is aan de actieve:

$$F_h = 0,5 \cdot \gamma' \cdot h_b^2 \cdot K_a \quad (5.20.d)$$

### 3.4 Formules voor fase IV

Aangenomen wordt dat de hoogte van de uitstulping,  $h_h$ , bij elke vergroting van de opening van de spleetbak,  $b_0$ , steeds zoveel toeneemt dat de verhouding  $h_h/b_0$  constant blijft. Anders zou de uitstulping erg plat blijven, waardoor er extra trekspanning op het geotextiel rond de uitstulping zou komen te staan (meer dan gemodelleerd in formule 5.16) en dan zou die extra trekkracht er toch toe leiden dat er meer geotextiel uit de beun getrokken wordt.

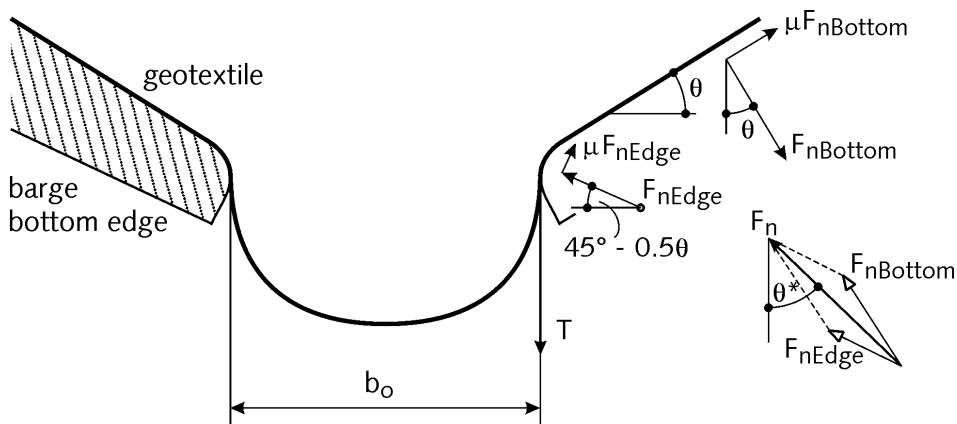


Fig.3 Krachten van beunwand op geotextiel

The geotextile bends around the edges of the opening causing an additional normal force component,  $F_{n,edge}$ , exerted from the barge bottom edge to the geotextile (figure 3.4; hier figuur 3). The friction between edge and geotextile, while the geotextile continues to slide down, also causes an additional tangential force component,  $\mu \cdot F_{n,edge}$ . The resultant,  $F_n$ , of both normal components ( $F_{n,bottom}$  and  $F_{n,edge}$ ) has a direction  $\theta^* > \theta$ . The bending around the edges of the opening increases with the increasing barge opening until the geotextile hangs vertically and (roughly) a half circular part of the geocontainer hangs underneath the opening. This is considered to be the end of this stage. The increased bending allows for increased support of the soil in the middle part by the geotextile part across the opening, without increased tensile force. At the end of this stage and during stage IV,  $\theta^*$  can be approximated by:

$$\theta^* = \theta + 6^\circ \cdot h_h/h_b \quad (5.11)$$

This equation has been found from calculations for the equilibrium of the part of the geotextile in contact with the barge bottom.

During the first part of stage IV, the values of the 7 parameters  $b_o$ ,  $G$ ,  $h_b$ ,  $h_h$ ,  $\theta^*$ ,  $F_n$  and  $F_h$  can be calculated as a function of  $\theta$  with the 7 equations (5.1), (5.2), (5.11), (5.12a), (5.13), (5.14) and  $h_h = 0,5 \cdot b_o$ . Last equation corresponds to the assumption of half circular bulge shape as long as no significant sliding has occurred. These equations are essentially the same as those in section 6.2.4.4 of [Pilarczyk 2000].

*Approximate relationship for geometry of geocontainer, equal to equation (6.22) of [Pilarczyk] (figure 3.5; cross section of bulge simplified to rectangle):*

$$A_f = \frac{h_b^2}{\tan \theta} + b_o h_b + b_o h_h \quad (5.12a)$$

*Vertical equilibrium of half the whole geocontainer (= geotextile and slurry together) (figure 3.2; hier figuur 4):*

$$F_n \cos \theta^* + \mu F_n \sin \theta^* = 0.5G \quad (5.13)$$

*Horizontal equilibrium of half the whole geocontainer, without bulge (figure 3.6a; hier figuur 5a):*

$$F_h = F_n (\sin \theta^* - \mu \cos \theta^*) \quad (5.14)$$

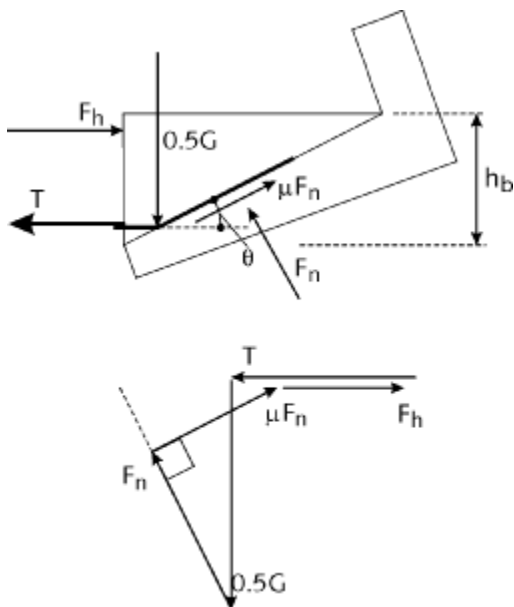


Fig.4 Evenwicht van de helft van de hele geocontainer



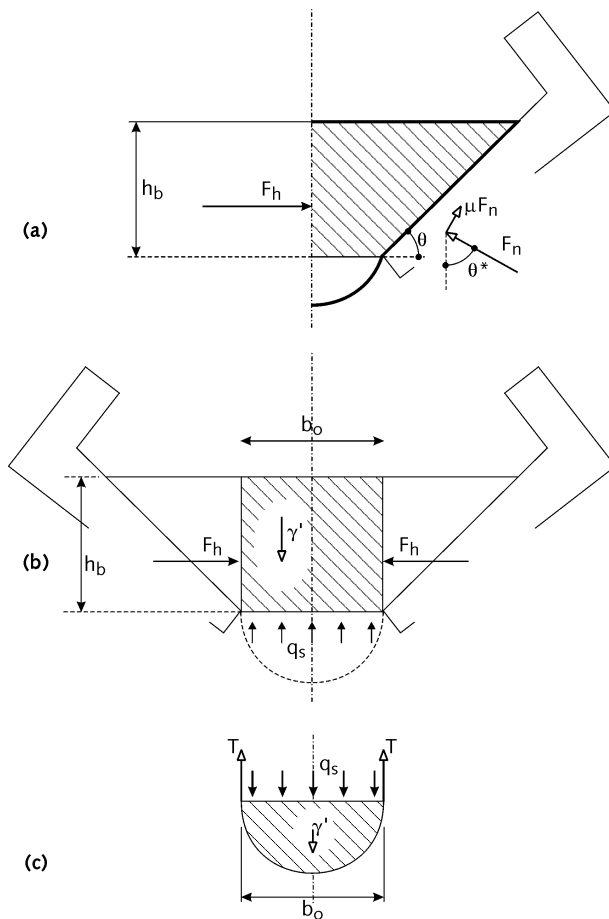
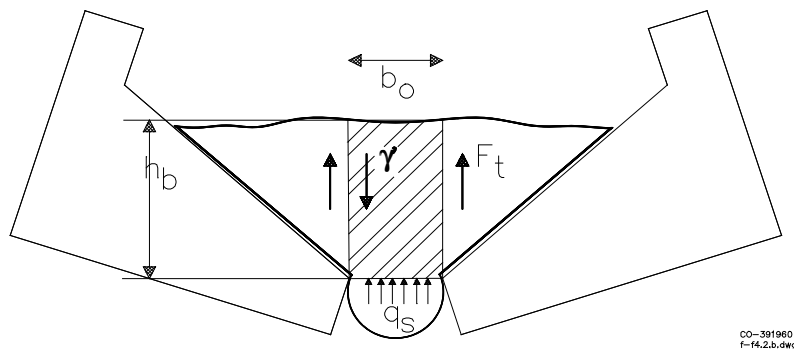


Fig.5 a) horizontaal evenwicht van de helft van het gedeelte van de containerboven de opening; b) niet relevant (zie figuur 4); c) verticaal evenwicht gedeelte onder de opening



CO-391960  
f-14.2.b.dwg

Fig.6 Vertical evenwicht van het middengedeelte

The 6 remaining parameters relevant during the first part of this stage are  $z_0$ ,  $\phi_{mob}$ ,  $K$ ,  $F_t$ ,  $q_s$  and  $T$ . They can be calculated for each value of  $\theta$  by the subsequent solution of the 6 equations (5.18), (5.20a), (5.17d), (5.19), (5.15) and (5.16). These equations are essentially the same or similar to those in section 6.2.4.4 of [Pilarczyk 2000], with  $c = 0$ .



Approximate vertical equilibrium of the middle part of the whole container (figure 4.2; figuur 6):

$$2F_t = \gamma' \cdot b_o \cdot h_b - b_o \cdot q_s \quad (5.15)$$

Approximate vertical equilibrium of the whole bulge (figure 3.6c; cross section of bulge simplified to rectangle):

$$2T = b_o \cdot q_s + \gamma' \cdot b_o \cdot h_h \quad (5.16)$$

The stress distribution in the soil in the middle part can again approximately be described with the general equations for the stress distribution in a 2-dimensional silo, now, however, for the case with descending sand and generalised also for non-failure conditions. This yields equations (5.17) which are found from equations (5.7) by replacing  $z_0$  with  $-z_0$ , by replacing the friction angle,  $\phi$ , with the mobilised friction angle,  $\phi_{mob}$  and by assuming passive earth pressure.

$$\sigma'_{zz} = \sigma'_{zz}(z) = \gamma' z_0 (1 - e^{-z/z_0}) \quad (5.17a)$$

$$\sigma'_{xx} = \sigma'_{xx}(z) = K \cdot \sigma'_{zz}(z) = K \cdot \gamma' z_0 (1 - e^{-z/z_0}) \quad (5.17b)$$

$$\tau_{xz}(-\frac{1}{2} b_o, z) = + \tan \phi_{mob} \cdot \sigma'_{xx}(z) = + \tan \phi_{mob} \cdot K \cdot \gamma' z_0 (1 - e^{-z/z_0}) \quad (5.17c)$$

where:

$$z_0 = \frac{b_o}{2K \tan \phi_{mob}} \quad (5.17d)$$

$$K_a \equiv \tan^2(45^\circ - \frac{1}{2}\phi) = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \leq K \leq K_p \equiv \tan^2(45^\circ + \frac{1}{2}\phi) = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (5.7e)$$

Integration of the stresses over the height,  $z$ , yields the following forces:

$$F_h = \int_0^{h_b} \sigma'_{xx}(z) dz = K \gamma' z_0^2 (e^{-h_b/z_0} + h_b/z_0 - 1) \quad (5.18a)$$

$$F_t = \int_0^{h_b} \tau_{xz}(-\frac{1}{2} b_o, z) dz = \tan \phi_{mob} \cdot F_h = \tan \phi_{mob} \cdot K \gamma' z_0^2 (e^{-h_b/z_0} + h_b/z_0 - 1) \quad (5.19a)$$

$$= \frac{\gamma' b_o^2}{4K \tan \phi_{mob}} \left\{ e^{-2h_b K \tan \phi_{mob} / b_o} + 2h_b K \tan \phi / b_o - 1 \right\}$$

Remark:  $1 - e^{-z/z_0} = z/z_0 - \frac{1}{2}(z/z_0)^2 + \frac{1}{6}(z/z_0)^3 - \text{etc}$       Thus:

If  $z/z_0 \ll 1$ :  $1 - e^{-z/z_0} \approx z/z_0$ ,  $\sigma'_{zz} \approx \gamma' z$ ,  $\sigma'_{xx} \approx K \gamma' z$  and  $\tau_{xy}(-\frac{1}{2} b_o, z) \approx \tan \phi \cdot K \gamma' z$

If  $h_b/z_0 \ll 1$ , i.e.  $2h_b K_p \tan \phi_{mob} / b_o \ll 1$ , then  $\left\{ e^{-h_b/z_0} + h_b/z_0 - 1 \right\} \approx \frac{1}{2} (h_b/z_0)^2$  and:

$$F_h \approx \frac{1}{2} \gamma' h_b^2 K \quad (5.18b)$$

$$F_t \approx \frac{1}{2} \gamma' h_b^2 K \tan \phi \quad (5.19b)$$

where:

$h_h$  : height of the bulge [m]

$F_h$  : part above the barge opening of the horizontal force in soil in the axis [kN/m]

$F_t$  : vertical shear force in soil in vertical boundaries of middle part (figure 4.2) [kN/m]

$q_s$  : vertical soil pressure at the level of the barge opening [kPa]

$T$  : tensile force in the geotextile in the upper part of the bulge (figures 3.4 & 3.6c) [kN/m]

$\Phi_{mob}$ : average mobilised friction angle along the vertical plane ( $x = -b_o/2$ ) and the vertical plane ( $x = +b_o/2$ )  
[-]

As mentioned above, equilibrium requires 3 conditions to be met:

a) Mobilised friction angle equal to friction angle:

$$\Phi_{mob} = + \Phi \quad (5.20a, \text{aangepast})$$

b) Further sliding yields increase of bulge curvature:

$$\frac{h_h}{1.1 \cdot \sin \theta} < \frac{2h_b}{\tan \theta} + b_o \quad (5.20b)$$

This formulation is found with the help of figure 5.1. Assume such a sliding down that  $h_b$  reduces with  $-dh_b$ , the bulge cross section area  $A_{bulge}$  increases with  $dA_{bulge}$ , the perimeter of the soil of the bulge,  $S^*_{bulge}$ , would increase with  $dS^*_{bulge}$ , *if the shape of the bulge would remain the same*, and the perimeter of the geotextile around the bulge,  $S_{bulge}$ , increases with  $dS_{bulge}$ . Then, the curvature increases if  $dS_{bulge} < dS^*_{bulge}$ .

The value of  $dA_{bulge}$  as a function of  $dh_b$  is found as follows. Equation (5.12a), in which the product  $b_o h_h$  represents  $A_{bulge}$ , learns that  $dA_{bulge} = dA_f - d(h_b^2/\tan\theta + b_o h_b)$ . The total cross section area,  $A_f$ , remains constant, so  $dA_f = 0$  and  $dA_{bulge} = -d(h_b^2/\tan\theta + b_o h_b) = -(2h_b/\tan\theta + b_o) \cdot dh_b$ .

If the bulge has a moderate curvature, the shape of the bulge can be described by the following relationships:  $A_{bulge} \approx 0.075(S^*_{bulge})^2$  and  $S^*_{bulge} \approx 3h_h$ . If the shape of the bulge would remain the same,  $dA_{bulge} \approx 0.075 \cdot 2 \cdot S^*_{bulge} \cdot dS^*_{bulge} \approx h_h/(2.2) \cdot dS^*_{bulge}$  or, with the above value of  $dA_{bulge}$ :  
 $dS^*_{bulge} \approx -2.2/h_h \cdot (2h_b/\tan\theta + b_o) \cdot dh_b$ .

The value of  $dS_{bulge}$  as a function of  $dh_b$  is found from figure 5.1:  $dS_{bulge} = -2dh_b/\sin\theta$

Thus, the condition  $dS_{bulge} < dS^*_{bulge}$  can be written as  $2/\sin\theta < 2.2/h_h \cdot (2h_b/\tan\theta + b_o)$ , which yields expression (5.20b).

c) Geotextile does not slip between bin bottom/wall and sand (figure 5.2):

$$T < F_n (\mu + \tan\phi) \quad (5.20c)$$

## 4 Kandiaproef nagerekend met rekenmodel

Het rekenmodel is gebruikt om de in hoofdstuk 2 besproken proef na te rekenen. Als invoergrootheden zijn allereerst de gegeven geometrische parameters van slijtbak, geotextiel en hoeveelheid zand gebruikt. Zie bijlage I. Verder zijn veronderstellingen gedaan omtrent de wrijvings eigenschappen en de soortelijke massa van het zand ( $1900 \text{ kg/m}^3$ ), de interne wrijvingshoek van het zand ( $\phi = 33^\circ$ ) en de wrijvingscoëfficiënt tussen geotextiel en beunwand:  $\mu = 0,7$ . Aanvankelijk was gekozen  $\mu = 0,6$ . Maar dat bleek een te kleine kritieke openingsbreedte op te leveren. Zie ook figuur 11.

De berekeningen zijn weergegeven in de bijlage II (voor fase pre-IV) en bijlage III (voor fase IV). De overgang van de ene fase in de andere is bij een openingsbreedte  $b_0 = 1,33 \text{ m}$ . Enige resultaten zijn weergegeven in de volgende twee figuren. Figuur 7 bevat de hoogte van de geocontainer boven de opening,  $h_b$ , en de hoogte eronder, ofwel de hoogte van de uitstulping,  $h_h$ , beide als functie van de openingsbreedte,  $b_0$ .

Vergelijking met de waarnemingen zoals weergegeven in figuur 1 laat een redelijke overeenkomst zien:

- Op  $t = 52 \text{ s}$  geldt  $b_0 = 1,28 \text{ m}$  en heeft  $h_b$  nog praktisch de oorspronkelijke waarde van ca  $2,5 \text{ m}$  (het model berekent lagere waarden in de beginfase omdat de opstaande rand niet gemodelleerd is);  $h_h \approx 0,8 \text{ m}$  volgens de berekening, terwijl  $h_h \approx 1,0 \text{ m}$  volgens Figuur 1.
- Op  $t = 88 \text{ s}$  geldt  $b_0 = 2,6 \text{ m}$ . Dat is ongeveer de kritieke waarde, terwijl de berekening uitkomt op  $[b_0]_{\text{kritiek}} = 2,4 \text{ m}$ . Bij  $b_0 = 2,6 \text{ m}$  zou, volgens de berekening,  $h_b \approx 1,8 \text{ m}$ . Figuur 1 laat een waarde van  $1,7 \text{ m}$  zien. Bij  $b_0 = 2,6 \text{ m}$  zou, volgens de berekening,  $h_h \approx 1,5 \text{ m}$ . Figuur 1 laat een waarde van  $2,2 \text{ m}$  zien.

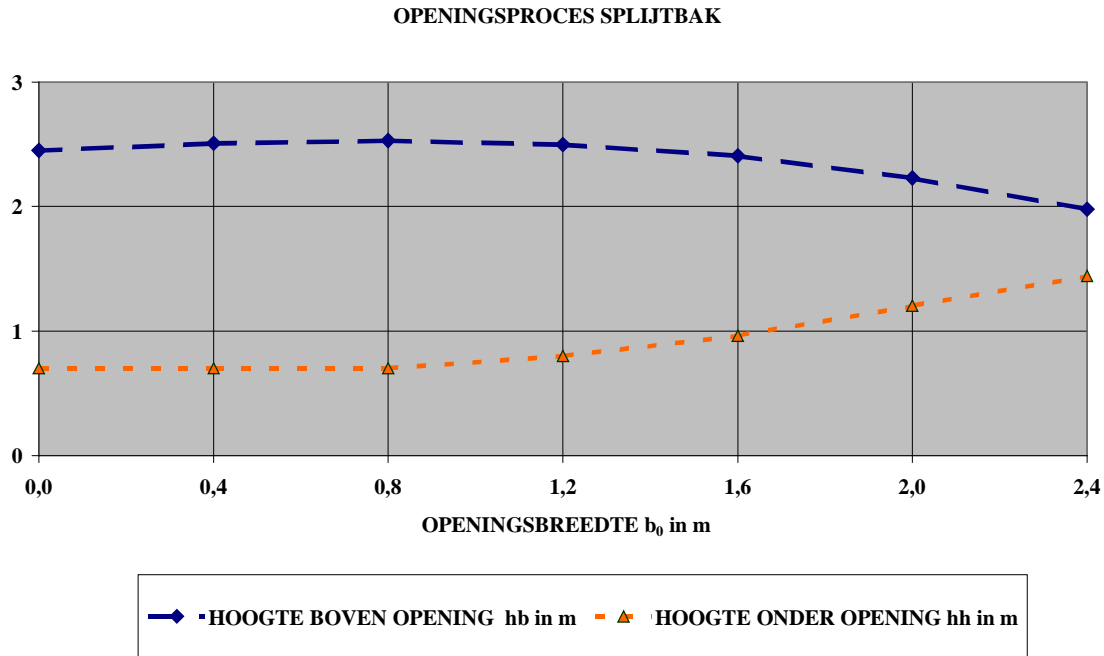


Fig. 7 Hoogtes van geocontainer in en onder beunopening als functie van openingbreedte

In figuur 8 staan enige van de berekende krachten, zoals de horizontale kracht in het midden van de geocontainer  $F_h$  (zie figuur voor de definitie). Ook de gemiddelde horizontale grondrukcoëfficiënt is gegeven (in deze grafiek is het 10-voudige waarde uitgezet). Duidelijk is te zien dat beide gelijk

oplopen en dat pas doen in fase IV. In de figuur is tenslotte de trekkraft in het geotextiel net buiten de opening, dus bovenin de uitstulping gepresenteerd. Die groeit met het gewicht van de uitstulping.

De maximale trekkraft in het geotextiel treedt op vlak voor het loskomen. Hij bedraagt  $T = 35$  kN/m. Die belasting ondervindt het geotextiel aan beide zijden. Het totale onderwater gewicht van de geocontainer bedraagt omstreeks 150 kN/m. Daarvan komt dus 70 kN/m, dat is bijna 50 %, als belasting op het geotextiel op het moment van loskomen. Dit is een zuiver tweedimensionale beschouwing. In werkelijkheid zal bij ongelijkmatig loskomen (achter eerder dan voor of omgekeerd) het geotextiel lokaal zwaarder belast worden.

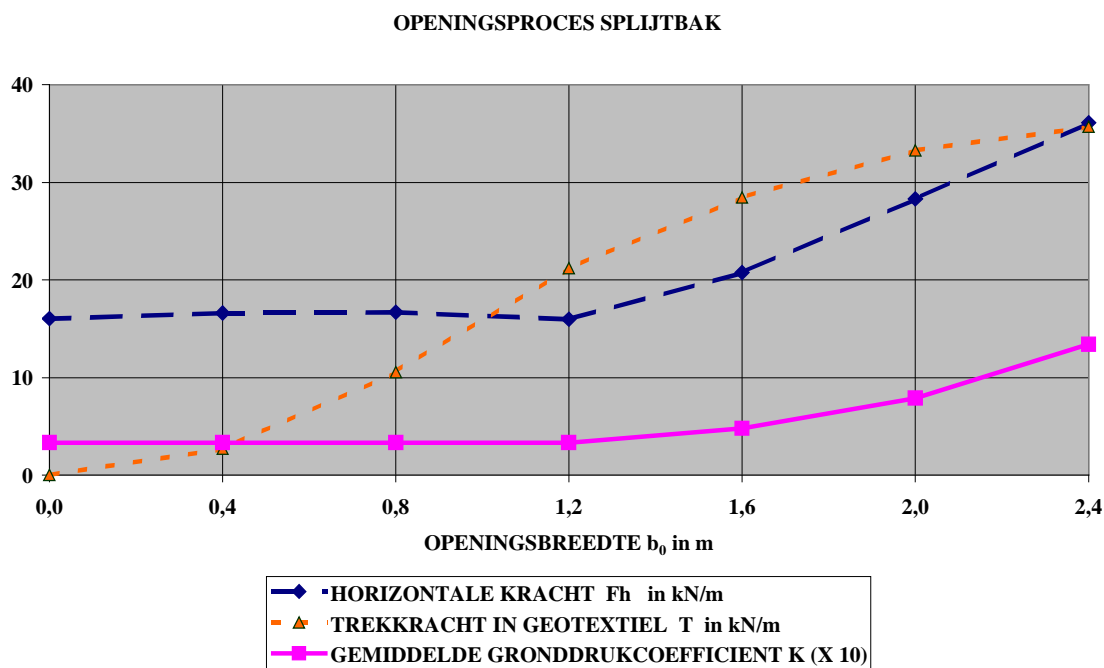


Fig.8 Krachten als functie van openingsbreedte

## 5 Invloed parameters op kritieke openingsbreedte

Met behulp van het rekenmodel zijn een aantal invoergrootheden gevarieerd om hun invloed op de kritieke openingsbreedte af te kunnen schatten. Steeds zijn twee berekeningen uitgevoerd, die ieder twee punten opleveren in een van de volgende grafieken. Het is van belang op te merken dat het feit dat de lijnen in onderstaande figuren recht zijn, niet betekent dat de verbanden lineair zijn.

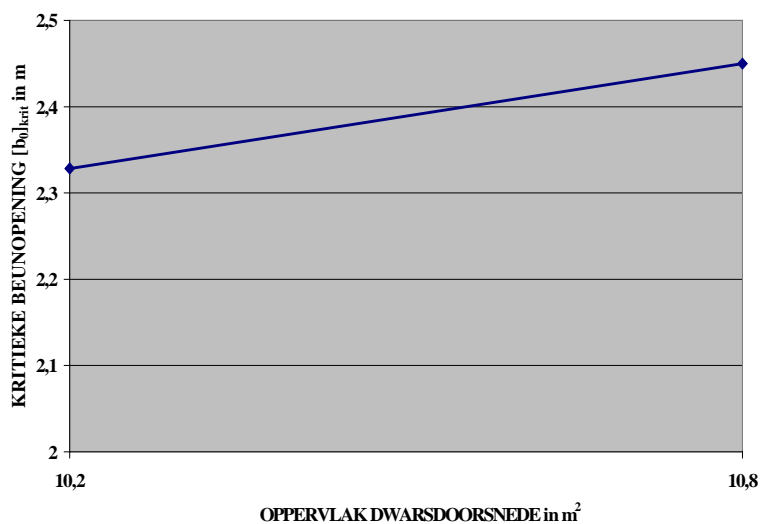


Fig.9 Invloed van oppervlakte dwarsdoorsnede ofwel vullingsgraad

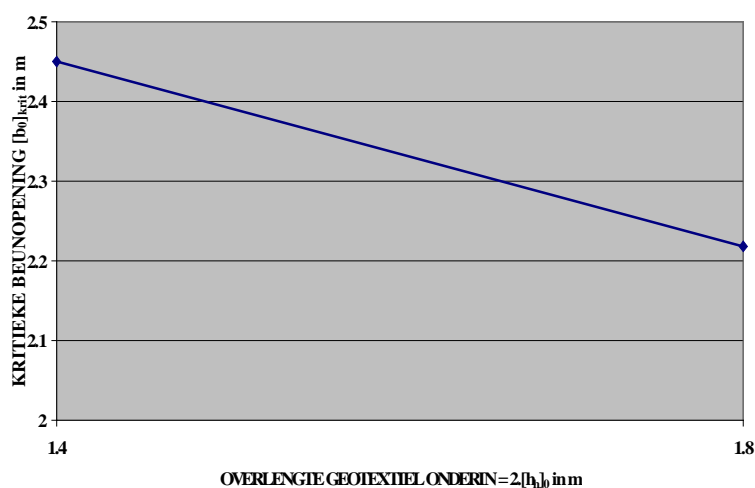


Fig.10 Invloed overlengte geotextiel onderin beun

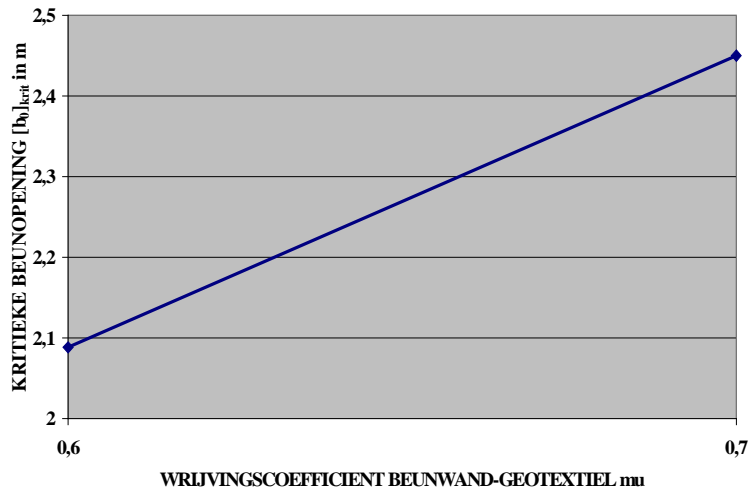


Fig.11 Invloed wrijvingscoëfficiënt beunwand-geotextiel

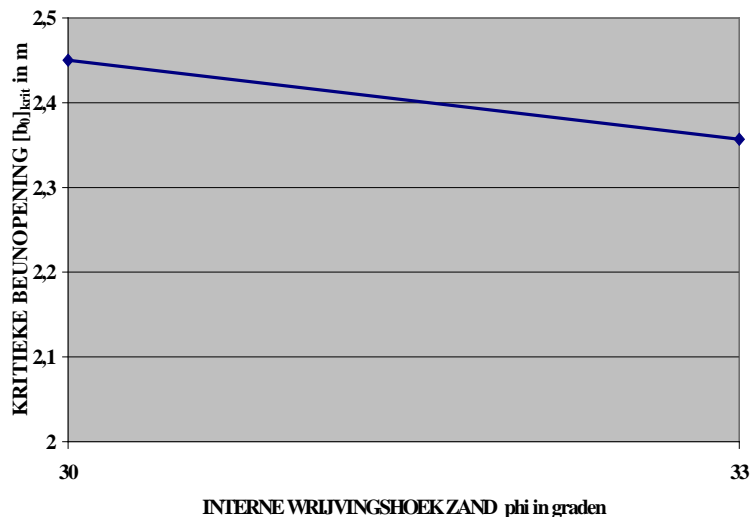


Fig.12 Invloed hoek van interne wrijving van zand

Tenslotte is ook het soortelijk gewicht gevarieerd. Dat bleek geen invloed te hebben op de kritieke openingsbreedte. Het heeft wel invloed op de krachten. Die zijn alle recht evenredig met het gemiddelde soortelijk gewicht.

De cohesie is niet gevarieerd, omdat het rekenmodel daar (nog) geschikt voor is. Maar een indruk van de invloed kan men krijgen door de invloed te beschouwen van een verschil in schuifsterkte door verschil in interne wrijvingshoek  $\phi$ . Eén graad in verschil in die hoek, leidt tot een verschil in schuifsterkte van bijna 2% van de verticale spanning. Die laatste is gemiddeld ca 10 kPa, zodat 0,2 kPa verschil in cohesie ongeveer hetzelfde verschil heeft als één graad verschil in interne wrijvingshoek.

Bovengegeven resultaten zijn ondermeer belangwekkend bij de beschouwing van de vraag of variatie van de parameters binnen een geocontainer in de langsrichting invloed kan hebben op het ongelijkmatig loskomen uit de splijtbak. Daarbij moet bedacht worden dat een verschil van 0,04 m in de kritieke openingsbreedte voldoende is om te resulteren in een significant verschil van 1 s in het moment van loskomen uit de splijtbak. Uit bovenstaande grafieken is af te leiden dat de volgende verschillen in de parameters ieder voldoende zijn voor 1 s verschil in moment van loskomen:

Parameter	Vershil voldoende voor 1 s verschil in moment van loskomen
Opp dwarsdsn $A_f$	0,2 m <sup>2</sup>
Overlengte $2h_h$	0,07 m
Wrijvingshoek geotextiel-beunwand $\mu$	0,6°
Interne wrijving zand $\phi$	1°
(Schijnbare) cohesie $c$	0,2 kPa
Effectief soortelijk gewicht $\gamma'$	geen directe invloed; wel indirect

Tabel 2 Verschil in parametergrootte voldoende voor 1s verschil in moment van loskomen

Het effectief soortelijk gewicht wordt bepaald, behalve door de mate van onderdamping onder water, door het luchtgehalte, de korrelverdeling en de pakkingsdichtheid. Dat het effectief soortelijk gewicht geen directe invloed heeft, betekent niet dat een verschil tussen nat en droog zand of tussen meer of minder fijne deeltjes of tussen losser en vastergepakt zand geen invloed heeft. Immers, die factoren hebben ieder een grote invloed op de schuifsterkte, dus op de interne wrijvingshoek  $\phi$  en/of de effectieve cohesie, factoren die wel invloed hebben.

## 6 Conclusies

- (a) De videobeelden, in combinatie met de drukmetingen, hebben het mogelijk gemaakt het proces van het wegzakken en loskomen uit de splijtbak van de betreffende geocontainer goed te volgen.
- (b) Met het in het verleden ontwikkelde rekenmodel is dit proces redelijk goed te simuleren, waardoor het mogelijk lijkt het model te gebruiken om de invloed van verschillende parameters op dit proces af te schatten.
- (c) De volgende parameters hebben een significante invloed op de openingsbreedte van de splijtbak die kritiek is voor het loskomen van de geocontainer uit de bak:
  - dwarsdoorsnede oppervlak  $A_f$
  - overlengte  $2h_h$
  - wrijvingscoëfficiënt tussen geotextiel en beunwand  $\mu$
  - hoek van interne wrijving  $\phi$  en/of cohesie  $c$  van het zand
- (d) Daardoor kan variatie van die parameters in de langsrichting binnen een container leiden tot ongelijkmatig loskomen uit de bak en scheef vallen
- (e) Daardoor kan variatie ook van de volgende zandeigenschappen in de langsrichting binnen een container leiden tot ongelijkmatig loskomen uit de bak en scheef vallen:
  - vochtgehalte
  - korrelverdeling
  - pakkingsdichtheid.

## Referenties

[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

[Pilarczyk 2000]

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

A.A. Balkema, Rotterdam ([balkema@balkema.nl](mailto:balkema@balkema.nl)).

[Schrijver en Peters 2002]

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

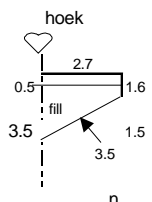
Veldmetingen storten geocontainers in Kandiadam

Delft Cluster Rapport 03.02.01-06, september 2002.

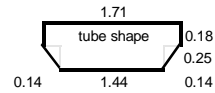
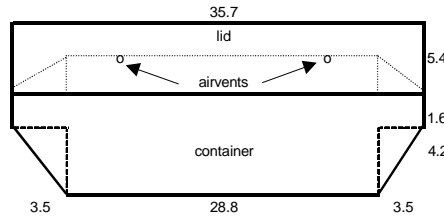


## Bijlage I Afmetingen van de splijtbak en de geocontainer

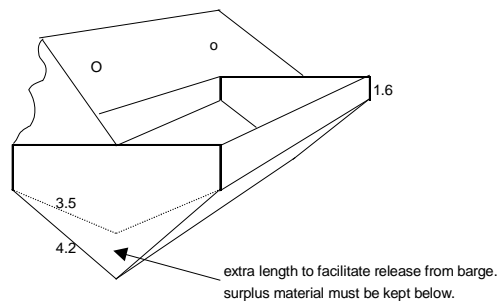
GEOCONTAINER		Pannerdensch Kanaal / Kandia put		factor	1	scaled 1 : 20			
<b>barge dimensions</b>	length hopper	m	28.8		28.8	hoek	39.52	1.440	
	width hopper	m	5.4	5.4	5.4	2.7		0.270	
	depth hopper	m	3.1	3.1	3.1	0.5	fill	0.155	
	vertical part	m	1.6	1.6	1.6	1.6		0.080	
	sloped part	m	3.5	3.5	3.5	3.5	1.5	0.154	
	circum hopper	m	15.6		15.6			0.739	
	capacity hopper	m <sup>3</sup>	365.5		365.5			0.046	
	max opening	m	3.2		3.2		n	0.160	
	average opening	m	2.2		2.2		rho	2650	
							gamma	1484	
<b>GC dimensions</b>	fill	0.8 m <sup>3</sup>	292.4		292.4	gewicht	54.24 m	0.037	
	fill/m <sup>1</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>1</sup>	10.2		10.2	gew./m	37.66 m	0.025	
	height soilblock	m	4.6		4.6			0.231	
	circum GC	m	17.0		17.0			<u>0.852</u>	
<b>after placing</b>	<b>width</b>	<b>m</b>	<b>7.7</b>		<b>7.7</b>			<b>0.387</b>	
	<b>max height</b>	<b>m</b>	<b>2.1</b>		<b>2.1</b>			<b>0.105</b>	
<b>fabrication</b>	flat length max	m	35.7		35.7			1.710	
	length at bottom	m	28.8		28.8			1.440	
	width closing lid	m	5.4		5.4			0.270	
	depth of container	m	5.8		5.8			0.291	
	surface fabric	m <sup>2</sup>	631.0		631.0			1.457	
								area hoppr	12.69
								area gc	23.09638 2.711421
									0.689713 2.23



drawing 2 dim.



sketch 3 dim.



Prototype	fill m <sup>3</sup>	fill m <sup>3</sup> /m <sup>1</sup>	circum GC m	fabric/fill m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	W m	H m	max fill m <sup>3</sup> /m <sup>1</sup>	fill %	
Vulpercentage									
0.70	256	8.9	15.6	2.3	7.0	<b>2.0</b>	19.3	46%	
0.75	274	9.5	16.3	2.2	7.4	<b>2.1</b>	21.2	45%	
0.80	292	10.2	17.0	2.2	7.7	<b>2.1</b>	23.0	44%	662.4
0.85	311	10.8	17.8	2.1	8.1	<b>2.1</b>	25.1	43%	
0.90	329	11.4	18.5	2.1	8.4	<b>2.2</b>	27.2	42%	
0.95	347	12.1	19.2	2.0	8.8	<b>2.2</b>	29.3	41%	
1.00	365	12.7	19.9	2.0	9.1	<b>2.2</b>	31.6	40%	
Model	fill m <sup>3</sup>	fill m <sup>3</sup> /m <sup>1</sup>	circum GC m	fabric/fill m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	W cm	H cm	max fill m <sup>3</sup> /m <sup>1</sup>	fill %	gewicht
Vulpercentage									
0.70	0.032	2.22E-02	0.83	61.6	41	<b>8.6</b>	5.48E-02	41%	47.46
0.75	0.034	2.38E-02	0.83	57.5	41	<b>9.2</b>	5.48E-02	43%	50.85
0.82	0.037	2.60E-02	0.83	52.6	41	<b>10.0</b>	5.48E-02	47%	55.59
0.85	0.039	2.70E-02	0.83	50.7	41	<b>10.4</b>	5.48E-02	49%	57.63
0.90	0.041	2.86E-02	0.83	47.9	41	<b>11.0</b>	5.48E-02	52%	61.02
0.95	0.043	3.01E-02	0.83	45.4	41	<b>11.6</b>	5.48E-02	55%	64.41
0.98	0.045	3.11E-02	0.83	44.0	41	<b>12.0</b>	5.48E-02	57%	66.44

## Bijlage II Rekenblad fase 'pre-IV' voor wegzakken en loskomen toegepast op Kandia geocontainer

### SAND FILLED GEOCONTAINERS FALLING STAGE PRE-IV, 2002-11

			-0.01006	-0.02904	-0.02622	0.03015	-0.05263	0.523	0 phi=	29.98
			theta0,deg	theta0,rad	R	Af	mu	c	S	tan(phi K_a K_p
			29.05	0.507018	2.6	10.8	0.7	0	17	0.577 0.33 3
K	Vary: loop 2	Select value 0,3 < K < 3, such that phi_mob maximum and Fh* - Fh = 0	1	3	0.63	0.47	0.45			
mu-mob	Vary: loop 3 mu	Start with mumob = 0; enlarge until Fh** - Fh = 0	0.37	0.448	0.54	0.66	0.7			
theta,degr	Vary: loop 4	Start with theta_0; enlarge until one of the conditions a, b or c is not met any more	29.1	33.47	37.9	42.4	43.9			
theta-theta0,degr			0.05	4.42	8.85	13.35	14.85			
theta0,rad		radians(C7)	0.507891	0.584162	0.66148	0.74002	0.7662			
gamma'		16-7*C11*C17/\$G4	15.99794	15.81818	15.63703	15.37743	15.30897			
b_o	5.1=3.1=4.1	2*\$F4*SIN(C9-\$E4)	0.004538	0.400749	0.80001	1.200674	1.332705			
G	5.2=3.2	C10*\$G4	172.7778	170.8363	168.8799	166.0762	165.3369			
theta*,degr	5.11=3.8=4.9	C7+6*C18/C17	30.81418	35.14461	39.56065	44.32079	45.83098			
theta*,rad		RADIANS(C13)	0.537809	0.613389	0.690464	0.773544	0.799902			
Fn	5.13 maar met m	0,5*C12/(COS(C14)+C6*SIN(C14))	82.40323	79.41522	75.73948	70.57675	68.9548			
Fh	5.14 maar met m	C15*(SIN(C14)-C6*COS(C14))	16.02637	16.62254	16.70671	15.98457	15.82812			
hb	5.12a=3.9a=4.1c	-0,5*C11*TAN(C9)+SQRT(0,25*C11*C11*TAN(C9)*TAN(C9)+(\$G4-C11*C18)*TAN	2.450152	2.508041	2.52913	2.498974	2.485778			
hh		0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8			
z0	5.17d	C11/(2*C5*C22)	0.515665	0.148425	1.100397	2.213714	2.566348			
Fh*	5.18a	C5*C10*C19*C19*(EXP(-C17/C19)+C17/C19-1)	15.99547	16.61986	16.68589	16.01824	15.79938			
Fh*-Fh		<b>C20-C16</b>	<b>-0.0309</b>	<b>-0.00268</b>	<b>-0.02081</b>	<b>0.033662</b>	<b>-0.02874</b>			
tan(phi_mob)	Vary: loop 1	Select value such that Fh*-Fh = 0	0.0044	0.45	0.577	0.577	0.577			
Ft	5.19a	C22*C20	0.07038	7.478937	9.627761	9.242522	9.116241			
qs	5.15=4.13	C10*C17-2*C23/C11	8.178314	2.34782	15.47899	23.03224	24.37389			
T	5.16=3.12=4.14	0,5*C11*(C24+C10*C18)	0.043965	2.689133	10.57011	21.21242	24.40253			
S*	5.21=3.15=4.17	2*C11+2*C18+2*C17*(1/SIN(C9)+1/TAN(C9))	20.28916	18.88394	17.73202	16.88683	16.60143			
S-S*		\$J4-C26	-3.28916	-1.88394	-0.73202	0.113172	0.398573			
qs(alternative)	5.17a	C10*C19*(1-EXP(-C17/C19))	8.178314	2.34782	15.47899	23.03224	24.37389			
Condition a)	mu_mob - mu <	C6-\$H4	-0.33	-0.252	-0.16	-0.04	0			
Condition b)	5.20b	C18/1,1/sin(C9)-2*C17/tan(C9)-C11 moet < 0	-7.50016	-6.83397	-6.26169	-5.59557	-5.45007			
Condition c)	5.20c	C25-C15*(H4+\$K4) moet < 0	-105.185	-98.7241	-86.1492	-68.9141	-63.6527			
Fh**	5.20d	0,5*C10*C17*C17*\$L4	16.01631	16.5935	16.68049	16.01472	15.77549			
Fh** - Fh		C32-C16 moet = 0	<b>-0.01006</b>	<b>-0.02904</b>	<b>-0.02622</b>	<b>0.03015</b>	<b>-0.05263</b>			
Kgemiddeld		2*C16/(C10*C17*C17)	0.333745	0.334119	0.33406	0.332908	0.334648			

## Bijlage III Rekenblad fase 'IV' voor wegzakken en loskomen toegepast op Kandia geocontainer

### SAND FILLED GEOCONTAINERS FALLING STAGE IV, 2002-11

			0.523336									
			phi=	29.98495								
			theta0,deg	theta0,ra	R	Af	mu	c	S	tan(phi)	K_a	K_p
			29.05	0.507	2.6	10.8	<b>0.7</b>	0	17	0.577	0.33	3
K	Vary: loop 2	Select value 0,3 < K < 3, such that phi_mob maximum and Fh* - Fh = 0	0.45	0.684	1.27	2.66	3					
hh/b_o	Vary: loop 3	Start with end value of previous stage; enlarge until Fh*-Fh = 0	0.601	0.601	0.601	0.601	0.601					
theta,degr	Vary: loop 4	Start with previous theta; enlarge till no value of hh/b_0 can be found any more with each condition a, b and c met	43.9	46.97	51.7	56.54	<b>57.16</b>					
theta-theta0,degr			14.85	17.92	22.65	27.49	28.11					
theta0,rad		radians(C7)	0.7662	0.8198	0.9023	0.9868	0.9976					
gamma'		16-7*C11*C17/\$G4	15.30814	15.003	14.438	13.756	13.662					
b_o	5.1=3.1=4.1	2*\$F4*SIN(C9-\$E4)	1.332705	1.6	2.0025	2.4003	<b>2.4501</b>					
G	5.2=3.2	C10*\$G4	165.3279	162.03	155.93	148.56	147.55					
theta*,degr	5.11=3.8=4.9	C7+6*C18/C17	45.83344	49.367	54.939	60.914	61.709					
theta*,rad		RADIANS(C13)	0.799945	0.8616	0.9589	1.0632	1.077					
Fn	5.13=3.10=4.110,5	C12/(COS(C14)+\$H4*SIN(C14))	68.95164	68.515	67.947	67.661	67.661					
Fh	5.14=3.11=4.12	C15*(SIN(C14)-\$H4*COS(C14))	15.83094	20.763	28.295	36.104	37.132					
hb	5.12a=3.9a=4.1	-0,5*C11*TAN(C9)+SQRT(0,25*C11*C11*TAN(C9)*TAN(C9)+(\$G4-C11*C18)*TAN(C9))	2.485582	2.4073	2.2294	1.9788	1.942					
hh		C6*C11	0.800956	0.9616	1.2035	1.4426	1.4725					
z0	5.17d	C11/(2*C5*C22)	2.566348	2.027	1.3664	0.7819	0.7077					
Fh*	5.18a	C5*C10*C19*C19*(EXP(-C17/C19)+C17/C19-1)	15.79638	20.769	28.32	36.025	37.122					
Fh*-Fh		<b>C20-C16</b>	<b>-0.03457</b>	<b>0.0056</b>	<b>0.0245</b>	<b>-0.08</b>	<b>-0.0104</b>					
tan(phi_mob)	Vary: loop 1	Select = tan(phi)	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577					
Ft	5.19a	C22*C20	9.11451	11.983	16.34	20.786	21.419					
qs	5.15=4.13	C10*C17-2*C23/C11	24.37143	21.137	15.869	9.8999	9.0467					
T	5.16=3.12=4.140,5	C11*(C24+C10*C18)	24.4102	28.451	33.287	35.697	35.726					
S*	5.21=3.15=4.172	C11+2*C18+2*C17*(1/SIN(C9)+1/TAN(C9))	16.60237	16.204	15.615	15.045	14.975					
S-S*		\$J4-C26	0.397635	0.796	1.3848	1.955	2.0252					
qs(alternative)	5.17a	C10*C19*(1-EXP(-C17/C19))	24.37143	21.137	15.869	9.8999	9.0467					
Condition a)	5.20a:	phi_mob C22-\$K4 moet = 0	0	0	0	0	0					
Condition b)	5.20b	bulge cur C18/1,1/SIN(C9)-2*C17/TAN(C9)-C11 moet < 0	-5.44841	-4.8986	-4.13	-3.444	-3.3637					
Condition c)	5.20c	slip geote C25-C15*(\$H4+\$K4) moet < 0	-63.641	-59.043	-53.48	-50.71	-50.677					
	3 5.20d	0,5*C10*C17*C17*\$L4-C16 moet < 0	-0.05879	-6.2634	-16.33	-27.12	-28.539					