

---

Opdrachtgever:

Bouwdienst, Rijkswaterstaat

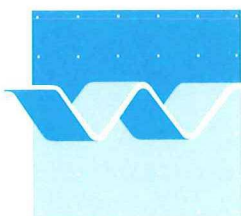
## Havendammen van IJmuiden

2D modelonderzoek naar de stabiliteit van ontwerpvarianten  
(Proevenserie B)

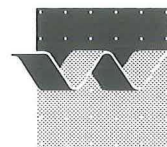
C. Kuiper en M.R.A. van Gent

Rapport

maart 2006



**wl | delft hydraulics**



OPDRACHTGEVER:	Rijkswaterstaat, Bouwdienst				
TITEL:	Havendammen van IJmuiden; 2D modelonderzoek naar de stabiliteit van ontwerpvarianten (Proevenserie B)				
SAMENVATTING:	<p>De Bouwdienst van Rijkswaterstaat heeft WL   Delft Hydraulics opdracht gegeven voor het uitvoeren van 2D fysisch modelonderzoek ten behoeve van een mogelijke renovatie van de havendammen van IJmuiden. Het betreft enerzijds modelonderzoek om meer inzicht te verkrijgen in mogelijk optredende schademechanismen bij de huidige constructie (Proevenserie A) en anderzijds modelonderzoek ten behoeve van de afweging tussen drie verschillende overlappingsvarianten (Proevenserie B). Proevenserie A is beschreven in een ander verslag, namelijk Kuiper en Van Gent (2006).</p> <p>Ten behoeve van de onderlinge afweging van overlappingsvarianten zijn drie varianten getest:</p> <ol style="list-style-type: none"><li>Variant 3b; Nieuwe toplaag bestaande uit een <i>enkele laag hoge dichtheid kubussen</i>, waarbij de ruimte tussen de oude toplaag en de nieuwe toplaag is uitgevuld met breuksteen.</li><li>Variant 4; Nieuwe toplaag bestaande uit een <i>dubbele laag hoge dichtheid kubussen</i>, waarbij de ruimte tussen de oude toplaag en de nieuwe toplaag is uitgevuld met breuksteen</li><li>Nieuwe toplaag bestaande uit een <i>dubbele laag hoge dichtheid kubussen</i>, waarbij de ruimte tussen de oude toplaag en de nieuwe toplaag <i>niet</i> is uitgevuld.</li></ol> <p>Het belangrijkste doel van de modelproeven voor de overlappingsvarianten was om de stabiliteit van de toplaag, de teen en de bodembescherming van de drie varianten te vergelijken.</p> <p>In dit rapport zijn de resultaten en analyse van Proevenserie B beschreven.</p>				
REFERENTIES:	offerte met kenmerk MCI-10855/H4648/BH d.d. 13 juni 2005 overeenkomst BDX7981 d.d. 13 juli 2005				
VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
01	C. Kuiper M.R.A. van Gent	december 2005	concept	B. Hofland	W.M.K. Tilmans
02	C. Kuiper M.R.A. van Gent	januari 2006	concept II	B. Hofland	W.M.K. Tilmans
03	C. Kuiper M.R.A. van Gent	maart 2006	definitief	B. Hofland	W.M.K. Tilmans
PROJECTNUMMER:	H4648				
TREFWOORDEN:	IJmuiden, havendammen, kubussen, verhangen				
AANTAL BLADZIJDEN:					
VERTROUWELIJK:	<input type="checkbox"/> JA		<input checked="" type="checkbox"/> NEE		
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG		<input type="checkbox"/> CONCEPT		<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF



# Inhoud

## Lijst van Tabellen

## Lijst van Figuren

## Lijst van Foto's

## Lijst van Symbolen

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1</b>
1.1	Achtergrond .....	1
1.2	Doel.....	1
1.3	Leeswijzer.....	2
<b>2</b>	<b>Opzet model.....</b>	<b>3</b>
2.1	Schematisaties.....	3
2.1.1	Voorland.....	3
2.1.2	Variant 3b: Enkele laag kubussen .....	6
2.1.3	Variant 4: Dubbele laag kubussen met uitvullaag.....	8
2.1.4	Variant 4b: Dubbele laag kubussen zonder uitvullaag .....	9
2.2	Modelschaal en materialen .....	10
2.3	Proevenprogramma.....	13
2.4	Faciliteit en metingen.....	14
2.4.1	Faciliteit .....	14
2.4.2	Metingen .....	14
<b>3</b>	<b>Resultaten .....</b>	<b>16</b>
3.1	Gemeten golfcondities .....	16
3.2	Stabiliteit kubussen.....	16
3.2.1	Beschrijving schadeontwikkeling .....	16

---

3.2.2	Analyse van de stabiliteit dubbele laag kubussen.....	21
3.2.3	Analyse van de stabiliteit enkele laag kubussen.....	22
3.3	Stabiliteit teenconstructie.....	22
<b>4</b>	<b>Conclusies &amp; aanbevelingen .....</b>	<b>24</b>
4.1	Conclusies.....	24
4.2	Aanbevelingen .....	27

---

## **Literatuur**

## **Bijlagen**

**A**     **Tabellen**

**B**     **Figuren**

**C**     **Foto's**

## Lijst van Tabellen

### *In rapport:*

Tabel 2.1	De voor dit onderzoek toegepaste kubussen met prototype gewichten
Tabel 2.2	Karakteristieken van het model en prototype materiaal
Tabel 2.3	Geteste golfcondities op de NAP -20 m dieptelijn

### *In Bijlage A 'Tabellen':*

Tabel A.1	Proevenprogramma Proevenserie B
Tabel A.2	Resultaten Variant 3b
Tabel A.3	Resultaten Variant 4
Tabel A.4	Resultaten Variant 4b

## Lijst van Figuren

### *In rapport:*

- Figuur 2.1 Bodemligging in m ten opzichte van NAP rond de havendammen van IJmuiden.
- Figuur 2.2 Gemeten en ingebouwd profiel van het voorland voor de Zuiderhavendam van IJmuiden
- Figuur 2.3 *Links:* schematische weergave overgang van de dubbele naar de enkele laag; *Rechts:* foto van de overgang na inbouw in het model.
- Figuur 2.4 Schematische weergave aanbrengen minimale uitvullaag Variant 4b
- Figuur 3.1 Aansluiting van de kubussen op het kruinelement

### *In Bijlage B 'Figuren':*

- Figuur B.1 Modelopstelling 2D model Proevenserie B
- Figuur B.2 Vergelijking gebruikte energiedichtheidsspectra
- Figuur B.3 Modelconstructie voor Variant 3b
- Figuur B.4 Modelconstructie voor Variant 3b met dunne uitvullaag
- Figuur B.5 Modelconstructie voor Variant 4
- Figuur B.6 Modelconstructie voor Variant 4 met 50% dikkere uitvullaag
- Figuur B.7 Modelconstructie voor Variant 4b
- Figuur B.8 Zeefkrommen van de gebruikte steenmaterialen Proevenserie B (model)
- Figuur B.8a Zeefkrommen van de gebruikte steenmaterialen Proevenserie B
- Figuur B.9 Gemeten golfoverschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra voor waterstand NAP +4.0 m
- Figuur B.10 Gemeten golfoverschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra voor waterstand NAP +2.0 m
- Figuur B.11 Gemeten golfoverschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra voor waterstand NAP +0.0 m
- Figuur B.12 Stabiliteit van de kubussen
- Figuur B.13 Stabiliteit van de kubussen met theoretische lijnen
- Figuur B.14 Stabiliteit van de teen (breuksteen 10 – 15 ton)



## Lijst van Foto's

- Foto C.1 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie A01 - A06
- Foto C.2 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie A11 - A16
- Foto C.3 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie A21 - A26
- Foto C.4 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie A31 - A36
- Foto C.5 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie A41 - A46
- Foto C.6 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie A51 - A56
- Foto C.7 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie A61 - A66
- Foto C.8 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie A71 - A76
- Foto C.9 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie A81 - A86
- Foto C.10 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie B01 - B06
- Foto C.11 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie B11 - B16
- Foto C.12 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie B21 - B26
- Foto C.13 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie B31 - B36
- Foto C.14 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie B41 - B46
- Foto C.15 Proevenserie B; Stabiliteit van het opvulmateriaal voor Proevenserie C0
- Foto C.16 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie C01 - C06
- Foto C.17 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie C11 - C16
- Foto C.18 Proevenserie B; Stabiliteit van de constructie voor serie C21 - C26

## Lijst van Symbolen

<i>Symbol</i>	<i>Eenheid</i>	<i>Omschrijving</i>
$B_{test}$	(m)	breedte van de testsectie in het model ( $B_{test} = 1$ m)
$D$	(m)	afmeting van een kubus
$D_{n50}$	(m)	nominale steendiameter die door 50% van de korrels wordt onderschreden
$D_n$	(m)	nominale afmeting van een steen
$Fr$	(-)	Froude getal
$g$	(m/s <sup>2</sup> )	versnelling van de zwaartekracht = 9.81 m/s <sup>2</sup>
$h$	(m)	waterdiepte
$H$	(m)	golfhoogte
$h_t$	(m)	waterdiepte op de teen
$H_s$	(m)	significante golfhoogte; in dit rapport de spectrale significante golfhoogte $H_{m0}$
$H_{m0}$	(m)	spectrale significante golfhoogte; $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$
$i$	(-)	verhang op de bodem op basis van gemeten drukken
$k_t$	(-)	laagdikte coëfficiënt
$L$	(m)	lengte
$L_{op}$	(m)	diepwater golflengte $L_{op} = g/(2\pi) \cdot T_p^2$
$M$	(kg)	massa van de gebruikte stenen/kubussen
$m_0$	(m <sup>2</sup> )	spectraal moment; oppervlak onder het energiedichtheidsspectrum
$N$	(-)	aantal golven
$n$	(%)	porositeit van de toplaag
$n_L$	(-)	aantal lagen kubussen in de toplaag
$N_{od}$	(-)	schadegetal; aantal verplaatste units in een strip met een breedte van 1 unit diameter
$n_{verplaatst}$	(-)	aantal verplaatste stenen/kubussen (verplaatsingen groter dan 1 diameter)
$Re$	(-)	Reynoldsgetal
$s_{op}$	(-)	golfsteilheid op diep water; $s_{op} = H_s / L_{op}$
$t$	(uur)	stormduur
$T$	(s)	golfperiode
$T_{m-1,0}$	(s)	spectrale periodemaat
$T_p$	(s)	golfperiode behorend bij de golfrequentie bij de top van het energiedichtheidsspectrum
$W$	(ton)	gewicht van de kubussen
<i>Griekse tekens:</i>		
$\Delta$	(-)	relatieve soortelijke massa van toplaagelementen onder water (beton, breuksteen)
$\nu$	(m <sup>2</sup> /s)	kinematische viscositeit van water (= 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)
$\rho_s$	(kg/m <sup>3</sup> )	soortelijke massa van toplaagelementen (beton, natuursteen)
$\rho_w$	(kg/m <sup>3</sup> )	soortelijke massa van water

Subscripts  $p$  en  $m$  verwijzen naar respectievelijk *prototype* en *model* waarden.

# I Inleiding

De Bouwdienst van Rijkswaterstaat heeft WL | Delft Hydraulics opdracht gegeven voor het uitvoeren van 2D fysisch modelonderzoek ten behoeve van een mogelijke renovatie van de havendammen van IJmuiden. Het betreft modelonderzoek om enerzijds meer inzicht te verkrijgen in mogelijk optredende schademechanismen bij de huidige constructie (Proevenserie A) en anderzijds het verkrijgen van inzicht in de sterkte van een aantal overlagingvarianten (Proevenserie B). Dit rapport beschrijft het model, de resultaten en de analyse van Proevenserie B. De resultaten van Proevenserie A zijn in een apart rapport beschreven (Kuiper en Van Gent, 2006). Het modelonderzoek is uitgevoerd in de Scheldegoet van WL | Delft Hydraulics in de periode augustus tot en met november 2005.

Het project is vanuit de Bouwdienst begeleid door de heer ir. K. Dorst. Bij WL | Delft Hydraulics zijn de proeven uitgevoerd door ing C. Kuiper, dr ir B. Hofland, de heer J.J. Molenaar en de heer P.A. Pasterkamp onder leiding van dr ir M.R.A. van Gent.

## I.1 Achtergrond

Op het ogenblik behoeven de havendammen van IJmuiden veel onderhoud, vooral omdat de kubussen op de asfaltlaag en de asfaltlaag zelf niet stabiel blijken. Op dit moment wordt nagedacht over een mogelijke versterking van de havendammen. De stabiliteit van de kubussen is te laag. Ook zijn er twijfels over de stabiliteit van de teen, de stabiliteit van de asfaltlaag zelf, en de stabiliteit van de zandbodem onder de filterlaag.

De Bouwdienst van Rijkswaterstaat heeft varianten opgesteld voor versterking van de havendammen. Een aantal varianten daarvan betreffen 'overlagingvarianten' waarbij aan de zeezijde een nieuw talud wordt aangebracht zonder het oude zeewaartse talud (geheel) te verwijderen. In het modelonderzoek zijn drie van deze overlagingvarianten met kubussen met beton van hoge dichtheid onderling vergeleken. Hierbij is gekeken naar de stabiliteit van de kubussen, waarbij ook de gevoeligheden van een andere plaatsingsmethode, de plaatsingsdichtheid, de invloed van een andere dichtheid van de kubussen en de dikte van de uitvullaag zijn onderzocht.

Voor de modelproeven is gekozen om één doorsnede, representatief voor het westelijk deel van de Zuidelijke havendam te kiezen. Alle proeven in dit rapport zijn uitgevoerd voor deze doorsnede. Er zijn ook 3D effecten, zoals scheve golfaanval en de invloed van een diepe ontgrondingskuil voor de havendam, die in een later stadium nader onderzocht zouden moeten worden.

## I.2 Doel

Het doel van het modelonderzoek is om informatie te verkrijgen ten behoeve van de onderlinge afweging van drie geselecteerde **overlagingvarianten** ter versterking van de huidige havendammen. Dit betreft het testen van de stabiliteit van kubussen in de nieuwe



toplaag, de bovenste kubussen op het binnentalud en de stabiliteit van de teen. Dit is gebeurd voor drie varianten:

- *Variant 3b*; Nieuwe toplaag bestaande uit een *enkele* laag kubussen, waarbij de ruimte tussen de oude toplaag en de nieuwe toplaag is uitgevuld met breuksteen (zie Figuur B.3). Bij de proeven voor deze variant is tevens gekeken naar de gevoeligheid met betrekking tot:

- Het plaatsingspatroon van de kubussen.
- De dikte van de uitvullaag.

- *Variant 4*; Nieuwe toplaag bestaande uit een *dubbele* laag kubussen, waarbij de ruimte tussen de oude toplaag en de nieuwe toplaag is uitgevuld met breuksteen (zie Figuur B.5). Bij de proeven voor deze variant is tevens gekeken naar de gevoeligheid met betrekking tot:

- De dikte van de uitvullaag.

- *Variant 4b*; Nieuwe toplaag bestaande uit een *dubbele* laag kubussen, waarbij de ruimte tussen de oude toplaag en de nieuwe toplaag *niet* is uitgevuld (zie Figuur B.7).

Proevenserie B betreft proeven ten behoeve van de afweging van de overlappingsvarianten met betrekking tot stabiliteit.

### 1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 zal de opzet van het model, met de gebruikte materialen en de aannames voor de modellering voor Proevenserie B worden besproken. In Hoofdstuk 3 worden de resultaten en de analyse van de resultaten gegeven voor Proevenserie B met de conclusies in Hoofdstuk 4.

Alle maten in dit rapport zijn teruggerekend naar prototype waarden, tenzij anders vermeld.



## 2 Opzet model

### 2.1 Schematisaties

Voor de mogelijke renovatie van de havendammen van IJmuiden heeft de Bouwdienst enkele overlagingvarianten ontworpen. Deze overlagingvarianten bestaan uit een enkele en/of dubbele toplaag van kubussen van beton met een hoge dichtheid. Vanwege een aantal onzekerheden in deze ontwerpen zijn in dit onderzoek 2D modelproeven uitgevoerd voor 3 overlagingvarianten:

1. **Variant 3b:** Enkele laag kubussen (32 ton kubussen met  $\rho_{s;p} = 2700$  en 36 ton kubussen met  $\rho_{s;p} = 3800 \text{ kg/m}^3$ ) op een talud uitgevuld met breuksteen. De doorsnede van deze variant is weergegeven in Figuur B.3 van Bijlage B.
2. **Variant 4:** Dubbele laag kubussen (30 ton kubussen met  $\rho_{s;p} = 2800$ ) op een talud uitgevuld met breuksteen. De doorsnede van deze variant is weergegeven in Figuur B.5 van Bijlage B.
3. **Variant 4b:** Dubbele laag kubussen (36 ton kubussen met  $\rho_{s;p} = 3800 \text{ kg/m}^3$ ) op een talud *zonder uitvullaag*. De doorsnede van deze variant is weergegeven in Figuur B.7 van Bijlage B.

De belangrijkste aandachtspunten van het modelonderzoek in deze proevenserie zijn de stabiliteit van de toplaag, de stabiliteit van het de bovenste rijen kubussen op het binnentalud en de stabiliteit van het filtermateriaal na eventuele schade aan de toplaag.

Daarnaast is voor de drie varianten aandacht gegeven aan de volgende ontwerpaspecten:

- Stabiliteit van de teen.
- Overgang van de kubussen op het talud naar de kubussen op de kruin.
- Aansluiting van de kubussen op het kruinelement.
- Stabiliteit van het opvulmateriaal

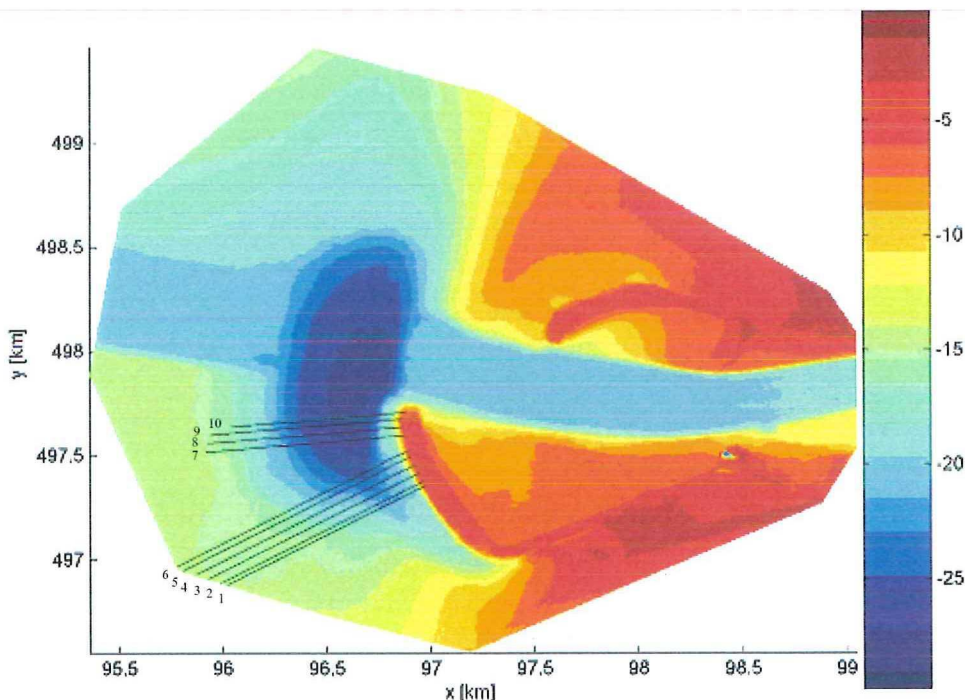
Voor Variant 3b is daarnaast nog gekeken naar de plaatsingsmethode van de kubussen. Voor Variant 3b en Variant 4 is de invloed van de dikte van de uitvullaag op de stabiliteit van de kubussen onderzocht

#### 2.1.1 Voorland

De havendammen van IJmuiden liggen in relatief ondiep water. Voor de kop van de Zuiderhavendam ligt een erosiekuil. Hierdoor beïnvloedt het voorland de golven die op de constructie aankomen. In Figuur 2.1 zijn de bodemdieptes rond de havendammen ten opzicht van NAP weergegeven, zoals deze zijn toegeleverd door de Bouwdienst. Door deze

complexe vooroever zullen de golven onderhevig zijn aan 3D effecten zoals refractie en golfrichtingspreiding.

Voor de huidige 2D proeven is gekozen om een geschematiseerde vooroever te construeren, die representatief is verondersteld om de golfvoortplanting naar de havendam te modelleren. Hiervoor zijn 10 profielen (zie Figuur 2.1) op de meest maatgevende delen van de havendam bekeken om het maatgevende voorland te bepalen. De bodemgegevens zijn toegeleverd door de Bouwdienst en zijn gebaseerd op recente metingen van Rijkswaterstaat, Dienst Noord Holland.



Figuur 2.1 Bodemligging in m ten opzichte van NAP rond de havendammen van IJmuiden.

In Figuur 2.2 zijn de 10 profielen uit Figuur 2.1 weergegeven en tevens het geschematiseerde voorlandprofiel dat is ingebouwd in het model. De overgang van de huidige teen naar de zandbodem is in het model op NAP -12 m gekozen. Deze diepte was ongeveer de laagste aanlegdiepte bij het westelijk deel van de Zuiderhavendam. Vanaf deze dieptelijn loopt het voorland onder een steile helling van 1:3 tot een diepte van circa NAP – 18,5 m tot de rand van de erosiekuil. Vervolgens is zeewaarts van deze steile helling een talud van 1:30 aangebracht tot de bodem van de erosiekuil op een diepte van NAP -38 m. Onder het voorland lagen twee PVC-buizen. Deze buizen moeten er voor zorgen dat het water dat over de constructie slaat weer teruggevoerd kan worden naar de zeewaartse zijde, zodat de waterstand voor en achter de havendam tijdens de proeven gelijk blijft. De PVC-buizen zijn onder een helling van 1:30 (gelijk met het 1:30 voorlandtalud) afgezaagd, zodat de invloed van de buizen wordt geminimaliseerd. Een tekening van de modelopstelling in de Scheldegoot is weergegeven in Figuur B.1 in Bijlage B.

Er is voor gekozen om niet de hele erosiekuil in het huidige model te schematiseren. De invloed van de ondiepere bodem voor de kuil op de golven is wel zo goed mogelijk



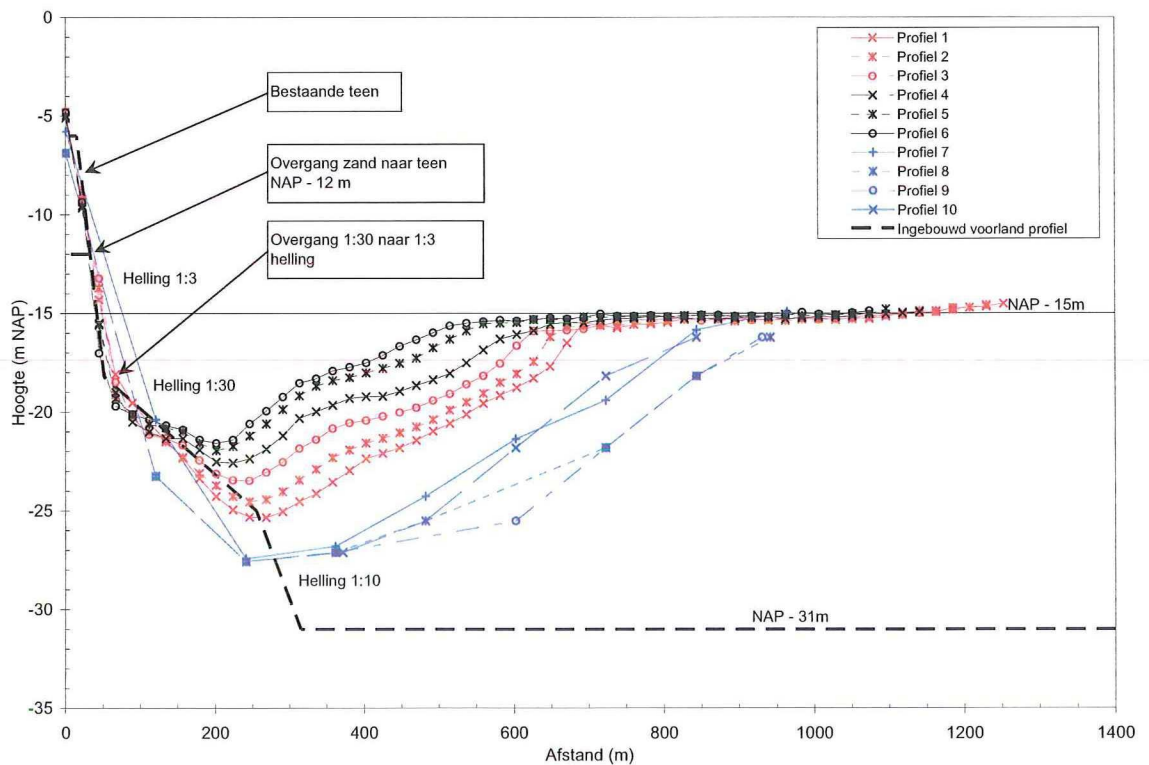
meegenomen door het opgegeven spectrum bij het golfschot aan te passen, zodat de golven die op de constructie aankomen zo goed mogelijk gemodelleerd zijn. De proeven zijn daarom uitgevoerd met een TMA spectrum. Dit is een JONSWAP-spectrum waarbij een (beperkte) invloed van de ondiepte (oorspronkelijke bodem) een kilometer voor de dam (bodem op ca. NAP -15 m) in rekening gebracht kan worden. In Figuur B.2 in Bijlage B zijn in de bovenste figuur zowel een JONSWAP als een TMA-spectrum geplot aan de rand van de erosiekuil (NAP -15 m dieptelijn). Hier is te zien dat bij een TMA-spectrum een deel van de energie naar de hogere frequenties wordt getransporteerd.

In het model is getracht de golfcondities op de NAP -20 m lijn (net voor de teen) goed te hebben. Uitgangspunt blijft dat de golven Rayleigh verdeeld zijn. In werkelijkheid zullen op de ondiepte de golven breken. Echter, door de lengte van de erosiekuil zal de golfhoogteverdeling zich in de erosiekuil weer herstellen tot een Rayleigh-verdeling. Hiervoor zijn de volgende bewerkingen uitgevoerd om het spectrum voor het golfschot te bepalen:

1. Uitgangspunt was het standaard TMA-spectrum op een diepte van NAP -15 m, net voor de erosiekuil.
2. Dit standaard spectrum is op basis van lineaire golftheorie vertaald (de-shoaling) naar een spectrum op de NAP -20 m contour net voor de havendam in de erosiekuil (met de aanname dat de groepsnelheid van de golven goed geschaald wordt).
3. Vervolgens is het spectrum op een diepte van NAP -20 m op basis van lineaire golftheorie vertaald naar een diepte van NAP -38 m. Dit is de diepte van de bodem in het model voor het golfschot.

Met deze benadering is getracht de vorm van het spectrum zo goed mogelijk te benaderen. Afwijkingen door de vorm van het spectrum zijn hier beschouwd als verwaarloosbaar voor het huidige onderzoek.

De golfhoogteverdeling, die op de relatief ondiepe oorspronkelijke bodem een aangepaste golfhoogteverdeling zal krijgen, zal zich in de diepere erosiekuil weer herstellen naar een Rayleigh-verdeling die ook in de goot wordt opgewekt. De golfhoogteverdeling is daarmee conform wat verwacht mag worden bij een doorsnede die zich bevindt bij de erosiekuil. Voor locaties die zich *niet* bij de erosiekuil bevinden zal de golfhoogteverdeling in werkelijkheid afwijken van wat in de huidige proeven wordt gebruikt. De rand van de erosiekuil, waar de golfhoogteverdeling zich weer enigszins zal aanpassen door de beperkte diepte, is vervolgens goed gemodelleerd met het geschematiseerde 1:30 voorland.



Figuur 2.2 Gemeten en ingebouwd profiel van het voorland voor de Zuiderhavendam van IJmuiden

Gezien de complexe bodem en de sterk 3D gerelateerde effecten op de golfvoortplanting wordt aanbevolen voor het definitieve ontwerp de geteste golfcondities te verifiëren met een gedetailleerde numerieke golfklimaatstudie. Het vaststellen van de golfcondities was geen onderdeel van deze studie.

Het voorland dat gebruikt is voor Proevenserie B komt overeen met het voorland dat gebruikt is voor Proevenserie A, zoals beschreven in Kuiper en Van Gent (2006).

### 2.1.2 Variant 3b: Enkele laag kubussen

Bij deze variant zijn de kubussen op het bovenste deel van het bestaande talud verwijderd, zodat het steenasfalt bloot komt te liggen. Het bestaande talud met de kubussen onder op het talud is vervolgens uitgevuld met breuksteen (60 – 300 kg) onder een helling van 1:1.75. De bestaande kubussen zijn gemodelleerd door 4 rijen kubussen (onregelmatig geplaatst) aan de onderzijde van de steenasfaltlaag vast te lijmen. Hierover is een filterlaag met breuksteen (1 - 3 ton) aangebracht met een dikte van 2 m. De nieuwe teen bestaat uit breuksteen van 10 – 15 ton. De bovenzijde van de teen ligt op NAP -6.0 m en de teenbreedte aan de bovenzijde was 6 m. Door het toepassen van de uitvullagen zal de havendam breder worden dan de huidige constructie. De teen zal daarom op veel plaatsen over de rand van de erosiekuil verdwijnen. Daarom is in het ontwerp voor deze variant opvulmateriaal aangebracht aan de rand van de erosiekuil. De proeven in Proevenserie B zijn in eerste instantie uitgevoerd om de stabiliteit van de teen en de toplaag op het buitentalud te onderzoeken. Daarom is besloten om voor de proeven van Variant 3b het opvulmateriaal vast te leggen met gaas, zodat de stabiliteit van de teen en de kubussen niet wordt beïnvloed door schade aan het



opvulmateriaal. De geteste doorsnede van Variant 3b is weergegeven in Figuur B.3 in Bijlage B.

De ondoorlatende steenasfaltlaag en het kruinelement zijn gemodelleerd door een houten plaat. De bovenzijde van dit kruinelement ligt op NAP +4.0 m.

Bij Variant 3b zijn kubussen (32 ton;  $\rho_{s,p} = 2700 \text{ kg/m}^3$ ) in een enkele laag op de uitvullaag geplaatst. Uit verschillende onderzoeken is gebleken dat met een enkele laag kubussen een hoge stabiliteit behaald kan worden. Er is gekozen om de toplaag in eerste instantie relatief netjes aan te leggen met de kubussen met een vlakke kant op de uitvullaag en ribbes evenwijdig aan het talud (in 'halfsteensverband').

Naast de *plaatsingsmethode* is ook de *plaatsingsdichtheid* (in de rest van het rapport uitgedrukt als porositeit) belangrijk bij een enkele toplaag. In Van Gent *et al.* (1999, 2001) zijn voor verschillende waarden van de porositeit proeven uitgevoerd en op basis van de resultaten van dat onderzoek is besloten om in eerste instantie een porositeit van maximaal 30% toe te passen.

Voor Variant 3b zijn verschillende onderdelen van de constructie gevarieerd om de effecten hiervan op de stabiliteit te onderzoeken. In de proeven voor Variant 3b zijn de volgende onderdelen van de constructie gevarieerd.

1. De *dichtheid van de kubussen*; op basis van het resultaat van de eerste proef zijn kubussen toegepast met een hogere dichtheid ( $\rho_{s,p} = 3800 \text{ kg/m}^3$ , 36 ton kubussen) in plaats van  $\rho_{s,p} = 2700 \text{ kg/m}^3$  (32 ton kubussen). Het oorspronkelijke ontwerp was gemaakt met 36 tons kubussen. In de voorbereidingsfase is vanwege vele onzekerheden gekozen om de modelproeven te starten met de 32 tons kubussen. Het proevenprogramma was zo opgesteld dat op basis van de resultaten van de eerste proeven besloten kon worden of naar lichtere kubussen overgegaan kon worden of dat alsnog de 36 tons kubussen getest zouden gaan worden.
2. De *gevoeligheid van plaatsingspatroon*; op basis van eerdere onderzoeken zijn de kubussen in eerste instantie regelmatig geplaatst, met ribbes evenwijdig aan het talud ('halfsteensverband'). Daarnaast is ook gekeken naar:
  - a) De invloed op de stabiliteit als 10% van de kubussen scheef (ofwel niet evenwijdig aan het talud) geplaatst werden. De porositeit is hetzelfde gehouden (30%)
  - b) De invloed op de stabiliteit als de porositeit verlaagd werd naar 25%, waarbij de kubussen weer regelmatig geplaatst waren.
  - c) De invloed op de stabiliteit als de kubussen in een 'wybertjespatroon' geplaatst worden. Hierbij zijn de punten van de kubussen naar beneden geplaatst. De porositeit werd hierbij 15%.
3. De *dikte van de uitvullaag*; voor deze proeven is de dikte van de uitvullaag geminimaliseerd. De dikte van de uitvullaag bovenop de bestaande kubussen bedraagt circa één  $D_{n50}$  (circa 1 m). Deze dikte is nodig om het talud uit te vullen zodat de kubussen nog netjes geplaatst kunnen worden op een vlakke ondergrond. De doorsnede van deze variant is weergegeven in Figuur B.4 in Bijlage B.

Alle kubussen zijn in den droge geplaatst met de hand. Het complete proevenprogramma is beschreven in Paragraaf 2.3.

Op de achterzijde van het talud is een enkele laag kubussen (22 ton met  $\rho_{s,p} = 2500 \text{ kg/m}^3$ ) aangebracht. De kubussen zijn regelmatig geplaatst met een plaatsingsdichtheid van 30%. Voor het bepalen van de stabiliteit zijn alleen de bovenste drie lagen beschouwd. De stabiliteit van de binnenberm is niet opgenomen in het onderzoeksprogramma. Hiervoor is een standaard beschikbare steengradering (11 – 16 mm modelschaal) gebruikt, die tijdens de proeven stabiel was om de resultaten van het onderzoek niet te beïnvloeden.

De overgang van het talud naar de kruin is een bijzonder punt bij een toplaaag met een enkele laag kubussen; door zetting van kubussen in de toplaaag kan een hogere pakkingsdichtheid (kleinere porositeit) ontstaan waardoor op de overgang talud-kruin het filter bloot kan komen te liggen. In het model is hieraan extra aandacht besteed door op de overgang een ronding (met een straal van ongeveer 9 m) aan te brengen in de uitvullaag.

### 2.1.3 Variant 4: Dubbele laag kubussen met uitvullaag

Bij Variant 4 zijn voor de uitgangssituatie dezelfde onderlagen en teen aangebracht als toegepast bij Variant 3b. Bij deze variant is ook opvulmateriaal aangebracht dat wederom is vastgelegd. Op de uitvullaag op het talud is een dubbele laag kubussen aangebracht (30 ton;  $\rho_{s,p} = 2800 \text{ kg/m}^3$ ), terwijl op de kruin een enkele laag kubussen (36 ton;  $\rho_{s,p} = 3800 \text{ kg/m}^3$ ) is geplaatst. De geteste doorsnede is weergegeven in Figuur B.5 in Bijlage B. De kubussen op de kruin (bovenzijde van de kubussen op NAP +4.6 m) zijn regelmatig geplaatst, met de platte zijde op de uitvullaag en ribbes evenwijdig aan het talud. De porositeit van de enkele laag kubussen op de kruin bedroeg 30%. De plaatsing van de dubbele laag kubussen op het talud was onregelmatig. De porositeit van de dubbele laag kubussen was circa 47% (bij een laagdiktecoëfficiënt van  $k_r = 1.1$ ). Deze porositeit wordt aanbevolen in de Coastal Engineering Manual (2003). Het aantal kubussen dat per rij geplaatst is, is bepaald volgens onderstaande vergelijking.

$$N_{kubus} = B_{test} n_L k_r (1 - n) / D_n \quad (2.1)$$

waarin:

$B_{test}$  : breedte van de testsectie (1 m in model) (m)

$n_L$  : aantal lagen (-)

$k_r$  : laagdikte coëfficiënt (gebruikt  $k_r = 1.1$ ) (-)

$n$  : porositeit (%)

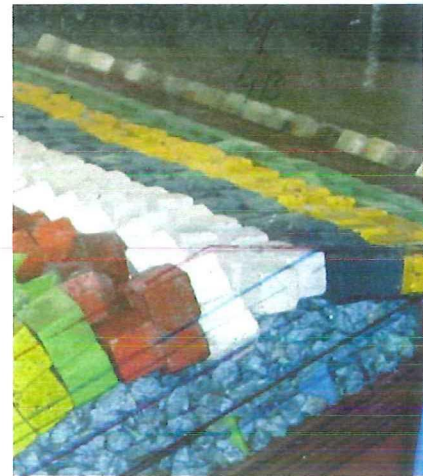
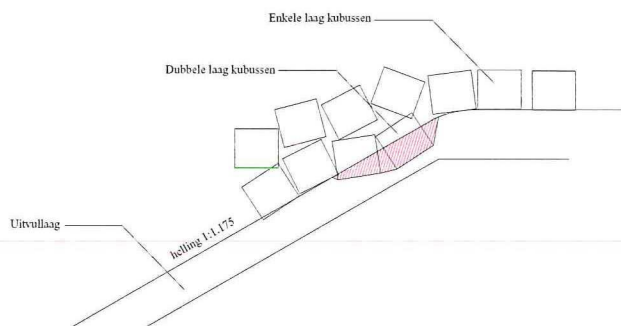
$D_n$  : nominale afmeting van de kubus (m)

In Tabel A.2 tot en met Tabel A.4 zijn het totaal aantal kubussen dat in het model geplaatst is vermeld.

Bij de plaatsing van de kubussen is speciale aandacht gegeven aan de overgang van de dubbele laag kubussen op het talud en de enkele laag op de kruin. In het model is geprobeerd de bovenzijde van de kubussen uit de dubbele laag over te laten lopen met de bovenzijde van de kubussen uit de enkele laag. Dit is gedaan door de onderste kubussen van



de bovenste 2 rijen van de dubbele laag enigszins te laten verzinken in de uitvullaag zoals schematisch weergegeven in Figuur 2.3.



Figuur 2.3 *Links*: schematische weergave overgang van de dubbele naar de enkele laag; *Rechts*: foto van de overgang in het model.

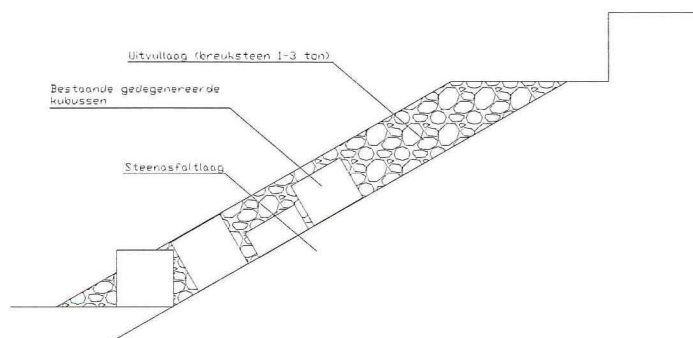
Op het restant van de oude teen (1 - 6 ton breuksteen) is een nieuwe teen aangebracht van breuksteen (10 – 15 ton). De bovenzijde van de teen lag op NAP -6.0 m en de teenbreedte aan de bovenzijde was 6 m. Op het talud aan de havenzijde is een enkele laag kubussen (22 ton) aangebracht. De kubussen zijn regelmatig geplaatst met een plaatsingsdichtheid van 30%. Voor het bepalen van de stabiliteit zijn alleen de bovenste 3 rijen beschouwd. Voor de binnenberm is wederom een grove stabiele steengradering gebruikt (11 – 16 mm modelschaal).

Om de invloed van de dikte van de uitvullaag op de stabiliteit van de kubussen te onderzoeken is gekozen om op basis van de resultaten van de uitgangssituatie de uitvullaag voor twee series 50% (1 m) dikker te maken. Het opvulmateriaal is over dezelfde afstand verbreed. De aangepaste doorsnede van Variant 4 is weergegeven in Figuur B.6 in Bijlage B. Het plaatsingspatroon en de plaatsingsdichtheid van de kubussen is niet veranderd ten opzichte van de eerste drie series.

Alle kubussen zijn in den droge geplaatst met de hand. Het complete proevenprogramma voor Variant 4 wordt beschreven in Paragraaf 2.3.

#### 2.1.4 Variant 4b: Dubbele laag kubussen zonder uitvullaag

De derde geteste overlappingsvariant betreft Variant 4b. Bij deze variant wordt de huidige havendam met een dubbele laag kubussen (36 ton;  $\rho_{s,p} = 3800 \text{ kg/m}^3$ ) overlaagd op een minimaal uitgevuld talud. De onderlagen waren hetzelfde als voor de vorige twee varianten. Echter, voor het modelleren van de bestaande kubussen op de steenasfaltlaag zijn nu ook de gedegenereerde kubussen aangebracht (model units zijn doorgezaagd). De dikte van de minimale uitvullaag (breuksteen 1 – 3 ton) was maximaal zo groot als 1 bestaande kubus om het talud uit te vlakken, zoals weergegeven in Figuur 2.4.



Figuur 2.4 Schematische weergave aanbrengen minimale uitvullaag Variant 4b

De dubbele laag kubussen is onregelmatig geplaatst en de plaatsingsdichtheid bedroeg circa 47%, bepaald volgens Vergelijking 2.1. Op de kruin (bovenzijde van de kubussen op NAP +4.6 m) zijn nog circa 2 à 3 rijen kubussen in een enkele laag geplaatst (dezelfde als op het talud). De plaatsingsdichtheid van deze kubussen bedroeg 30% en deze kubussen zijn onregelmatig geplaatst. De geteste doorsnede is weergegeven in Figuur B.7 in Bijlage B.

In één van de proevenseries voor Variant 4b is de stabiliteit van het opvulmateriaal (breuksteen 300 – 1000 kg) getest. Op basis van de resultaten van deze serie is besloten om voor de resterende proevenseries opvulmateriaal weer vast te leggen zoals gedaan is bij alle andere proeven.

De teen en het binnentalud zijn gemodelleerd zoals voor Variant 4.

Alle kubussen zijn in den droge geplaatst met de hand. Het complete proevenprogramma voor Variant 4b wordt beschreven in Paragraaf 2.3.

## 2.2 Modelschaal en materialen

De modelproeven voor Proevenserie B zijn uitgevoerd op een geometrische schaal van 1:87. De keuze van deze relatief kleine schaal is gebaseerd op basis van de beschikbaarheid van de modelunits en de opzet van het proevenprogramma (zie Paragraaf 2.3). Het proevenprogramma is zo opgesteld dat op basis van de resultaten gekozen kon worden voor kubussen met een grotere dan wel een kleiner soortelijk gewicht. Bij de gekozen modelschaal waren kubussen beschikbaar van het gewenste gewicht met een soortelijk gewicht van zowel  $\rho_{s,m} = 2350 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_s = 2700 \text{ kg/m}^3$  en  $\rho_{s,m} = 4000 \text{ kg/m}^3$ .

Om de modelresultaten om te rekenen naar prototypewaarden moet rekening gehouden worden met enkele schaalregels die hier nader toegelicht zullen worden. In dit rapport zijn alle resultaten omgerekend naar prototype waarden.

### *Geometrische schaling*

Een belangrijke schaalregel is dat de verhouding van de belangrijkste aandrijvende krachten in het model (zwaartekracht en massa-traagheidsmomenten) in het model gelijk zijn aan die in prototype. Dit uitgangspunt vormt de basis van de schalingswet van Froude, waarbij het



Froude getal ( $Fr^2 = v^2/(gL)$ ) in prototype gelijk moet zijn aan het Froude getal in het model. Deze schaling houdt onder andere in dat de geometrische afmetingen worden geschaald met dezelfde geometrische schaal,  $n_L = 40$ .

$$n_L = \frac{L_p}{L_m} \quad (2.2)$$

Waarbij  $L_p$  een lengtemaat in prototype is en  $L_m$  de lengtemaat in het model. Gebaseerd op deze schalingswet zijn de volgende parameters als volgt geschaald:

Golfhoogte $H$ (m)	: $n_H = n_L$
Golfperiode $T$ (s)	: $n_T = n_L^{0.5}$
Stormduur $t$ (uur)	: $n_t = n_L^{0.5}$
Gewicht $M$ (kg)	: $n_M = n_L^3$

### *Schaling van stabiliteitsgetal*

Voor het bepalen van de stabiliteit is het belangrijk dat het stabiliteitsgetal  $H_s/\Delta D$ , goed geschaald wordt. Over het algemeen wordt gesteld dat de stabiliteit van de toplaag goed geschaald is als het stabiliteitsgetal in het model overeenkomt met het stabiliteitsgetal in prototype. De massa van de stenen en kubussen in het model kunnen op basis van deze aanname geschaald worden volgens onderstaande vergelijking:

$$n_L = \frac{\Delta_p}{\Delta_m} \left( \frac{M_p}{M_m} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\rho_{s;m}}{\rho_{s;p}} \right)^{1/3} \quad (2.3)$$

Waarbij de subscript  $m$  en  $p$  staan voor respectievelijk *model* en *prototype*.

- $\Delta$  : relatieve dichtheid onder water (-);  $\Delta = \rho_s/\rho_w - 1$
- $M$  : massa van de stenen/kubussen (kg)
- $\rho_s$  : soortelijk gewicht van de stenen/kubussen ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\rho_w$  : soortelijk gewicht van water ( $\text{kg/m}^3$ )

Op basis van deze schaling kunnen afwijkingen ontstaan in de afmetingen tussen het model en prototype. Echter, voor de stabiliteit is vooral het gewicht van de stenen en/of kubussen van belang zolang de afwijkingen op de geometrische schaal maar niet te groot worden. Bij deze schaling is belangrijk dat het Reynoldsgetal voldoende groot is (turbulente stroming). Volgens Dai en Kamel (1969) wordt voldaan aan deze eis als geldt dat:

$$Re = \frac{\sqrt{gH_s} \cdot D_n}{\nu} > 3 \cdot 10^4 \quad (2.4)$$

met:

- $Re$  : Reynoldsgetal (-)
- $g$  : versnelling van de zwaartekracht ( $\text{m/s}^2$ )
- $H_s$  : golfhoogte (m)
- $D_n$  : nominale diameter van de stenen (m)

$\nu$  : kinematische viscositeit van water ( $= 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

**Schaling van de verhangen (doorlatendheid)**

De stijghoogte schaal met de geometrische schaal, dus het verhang (stijghoogteverschil gedeeld door een lengte) dient gelijk te zijn in het model en in het prototype, oftewel:

$$n_i = 1$$

Dit betekent dat de Forchheimer weerstand van materialen in de kern,  $i = au + bu^2$  ( $u$  is de stroomsnelheid in het filter en  $a$  en  $b$  zijn de Forchheimer coëfficiënten) gelijk moet zijn aan die in prototype. In prototype is de laminaire term verwaarloosbaar, dus moet er gelden:

$$b_p u_p^2 = a_m u_m + b_m u_m^2 \tag{2.5}$$

In het model is deze laminaire term niet meer verwaarloosbaar, omdat de laminaire term een deel van de turbulente weerstand (in prototype) voor zijn rekening neemt. Aangezien de snelheid varieert in de tijd en de ruimte, varieert de schaal die hieruit zou volgen ook in de tijd en de ruimte. Er is daarom een gemiddelde waarde voor genomen.

In Tabel 2.1 worden de beschikbare kubussen met de karakteristieke eigenschappen bij deze schaal weergegeven. In de kolom ‘Gewicht (prototype)’ staat het gewicht van de in dit onderzoek gebruikte kubussen omgerekend naar prototypeschaal op basis van schaling op stabiliteit. In de laatste kolommen staat per variant aangeven met een kruisje welke kubussen zijn gebruikt en voor welk onderdeel, van de havendam (Talud, Kruin of Talud havenzijde). Opgemerkt moet worden dat Kubus nummer 2 en Kubus nummer 3 in het model dezelfde kubussen waren. Door het toepassen van een ander soortelijk gewicht in prototype wordt echter een ander blokgewicht in verkregen.

	D [mm]	$\rho_{s,m}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{s,p}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Gewicht (prototype) [ton]	Variant 3b			Variant 4			Variant 4b			
					T*	K*	H*	T	K	H	T	K	H	
1	22	4000	3800	36	x	x			x			x	x	
2	25	2700	2800	27				x						
3	25	2700	2700	32	x	x								
4	25	2350	2500	22			x			x				x

Tabel 2.1 De voor dit onderzoek toegepaste kubussen met prototype gewichten

- \* T : kubussen op het talud
- K : kubussen op de kruin
- H : kubussen op het talud aan de havenzijde

Kubus nummer 1 wordt gebruikt om de kubussen van 36 ton met een dichtheid van 3800 kg/m<sup>3</sup> te modelleren; het gerealiseerde gewicht is dan 36 ton. Dit komt overeen met het gewenste gewicht. Kubus nummer 2 wordt gebruikt om de kubussen van 30 ton met een dichtheid van 2800 kg/m<sup>3</sup> te modelleren. Bij Variant 3b wordt tevens onderzocht wat de veiligheidsmarge is ten aanzien van de stabiliteit van de kubussen. Het bleek namelijk dat proeven met kubussen van 36 ton tot (nagenoeg) geen schade leidden (Kubus nummer 1). Om wel inzicht te krijgen in de sterkte van de constructie worden ook lichtere kubussen toegepast, namelijk kubussen met een dichtheid van 2700 kg/m<sup>3</sup> in prototype. In het model is hiervoor Kubus nummer 3 gebruikt die 32 ton kubussen representeert.

Hieruit blijkt dat de kubussen met een soortelijk gewicht van  $\rho_{s,m} = 2700 \text{ kg/m}^3$  een prototype gewicht hebben dat circa 10% lager ligt (27 ton) dan het gewenste gewicht van 30 ton. Echter, de afwijkingen in de verhouding  $H_s/\Delta D$  in model en prototype waren voor alle kubussen kleiner dan 3%.

Voor de kubussen aan de *havenzijde* is op basis van de beschikbare kubussen een dichtheid in prototype aangenomen van  $2500 \text{ kg/m}^3$ , opdat het prototype gewicht van deze kubussen 22 ton was. Als voor de kubussen op de achterzijde eveneens beton met een hogere dichtheid toegepast gaat worden (bijvoorbeeld  $\rho_{s,p} = 2800 \text{ kg/m}^3$ ) dan moet in acht genomen worden dat door de dichtheidsverschillen in model en prototype het gewicht van de geteste kubussen lager is (voor het genoemde voorbeeld zal het gewicht van de geteste kubussen dan 13.5 ton bedragen in plaats van 22 ton).

Voor de gebruikte steenmaterialen van de uitvullagen, de kern en het opvulmateriaal is gebruik gemaakt van de schalingsregels zoals beschreven in deze paragraaf. In Tabel 2.2 zijn de karakteristieken van de gebruikte materialen vermeld.

Beschrijving onderdeel	Gradering	Soort schaling	$\rho_{s,p}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{s,m}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Delta_p$ [-]	$\Delta_m$ [-]	$D_{n50,p}$ [m]	$D_{n50,m}$ [mm]
Kubussen (30 ton)	-	Stabiliteit	2800	2700	1.73	1.70	2.20	25
Kubussen (22 ton)	-	Stabiliteit	2500	2350	1.44	1.35	2.06	25
Kubussen (36 ton)	-	Stabiliteit	3800	4000	2.71	3.00	2.12	22
Uitvullaag	1 - 3 ton	Stabiliteit	2650	2700	1.59	1.70	0.91	7.9
Teen	10 - 15 ton	Stabiliteit	2650	2700	1.59	1.70	1.68	17.5
Kern	300 - 1000 kg	Doorlatendheid	2650	2700	1.59	1.70	0.63	10.9
Grind	40 - 110 mm	Doorlatendheid	2650	2700	1.59	1.70	0.08	10.9
Quarry run	0.1 - 300 kg	Doorlatendheid	2650	2700	1.59	1.70	0.38	5.5
Bodembescherming	300 - 1000 kg	Stabiliteit	2650	2700	1.59	1.70	0.63	5.5

Tabel 2.2 Karakteristieken van het prototype en modelmateriaal

De zeefkrommes van de gebruikte steenmaterialen zijn weergegeven in Figuur B.8 en Figuur B.8a in Bijlage B. De zeefkrommes zijn bepaald op basis van de gewichten van de individuele stenen.

## 2.3 Proevenprogramma

Net als in Proevenserie A zijn de proeven in Proevenserie B uitgevoerd met een TMA-spectrum (Kuiper en Van gent, 2006). De geteste golfcondities zijn toegeleverd door de Bouwdienst. Ten tijde van deze studie waren de exacte ontwerpcondities nog niet bekend.

De testcondities zijn weergegeven in Tabel 2.3. Voor iedere proef is een ingolfproef uitgevoerd om de eerste zettingen van de constructie niet in de schade tot uitdrukking te laten komen. De ingolfproef is uitgevoerd met een golfhoogte die overeenkomt met circa 50% van de eerste proef. De resultaten van deze ingolfproef zullen niet meegenomen worden in de verdere bespreking van de resultaten.



Nr.	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$S_{op}$ [-]
1	4.0	8.6	0.035
2	5.0	9.6	0.035
3	6.5	10.9	0.035
4	7.5	11.7	0.035
5	7.5	13.9	0.025
6	9.0	12.8	0.035

Tabel 2.3 Geteste golfcondities op de NAP -20 m dieptelijn

De proefduur van elke proef komt overeen met een stormduur van 3 uur (prototype). In totaal is de constructie bij iedere waterstand dus getest voor een opbouwende storm van circa 18 uur, exclusief een ingolfproef van 3 uur.

Voor elke variant zijn proeven uitgevoerd voor drie waterstanden, NAP +0.0 m, NAP +2.0 m en NAP +4.0 m. Het complete uitgevoerde proevenprogramma is weergegeven in Tabel A.1 in Bijlage A.

## 2.4 Faciliteit en metingen

### 2.4.1 Faciliteit

De proeven zijn uitgevoerd in de Scheldegoot van WL | Delft Hydraulics. Deze golfgoot heeft een lengte van 55 m, een breedte van 1 m, en een hoogte van 1.2 m. De faciliteit is voorzien van een golfschot voor het opwekken van regelmatige (monochromatische) en onregelmatige (random) golven. De proeven zijn uitgevoerd met gebruikmaking van een tweede-orde methode voor golfopwekking. Dat wil zeggen dat in de sturing van het golfschot de tweede-orde effecten van de eerste hogere en eerste lagere harmonische componenten van het golfveld zijn verdisconteerd. De basis van dit golfopwekkingssysteem is beschreven in Klopman en Van Leeuwen (1990), Van Leeuwen en Klopman (1996), en Van Dongeren *et al.* (2001). Daarnaast is de golfgenerator voorzien van een actief golfabsorptiesysteem (ARC) om re-reflectie van golven op het golfschot te minimaliseren: het re-reflecteren van golven op het golfschot wordt voorkomen door naar het golfschot toelopende gereflecteerde golven te meten en de beweging van het golfschot zodanig aan te passen dat aankomende golven geabsorbeerd worden.

### 2.4.2 Metingen

#### *Golven*

De golven zijn voor alle uitgevoerde proeven van Proevenserie B gemeten op de NAP -20 m dieptelijn. Hiervoor is gebruik gemaakt van een set van 3 golfhoogtemeters om de inkomende en gereflecteerde golven te scheiden. De gemeten spectra van de inkomende en gereflecteerde golven zijn gescheiden, gebruikmakend van de theorie van Mansard en Funke (1980). Alle spectrale gemeten golfparameters zijn gecorrigeerd voor gereflecteerde golven. De bepaalde golfparameters in de tabellen zijn gebaseerd op een spectrale analyse.

### ***Bemonsteringsfrequentie***

Tijdens de proeven zijn alle instrumenten bemonsterd met een bemonsteringsfrequentie van 25 Hz (modelschaal) en vervolgens gefilterd met een analoog filter op 12 Hz. Deze standaard bemonsteringsfrequentie is voldoende voor de gebruikte golfhoogtemeters.

### ***Stabiliteit van de kubussen***

De kubussen zijn geplaatst in kleurenbanden, waarbij elke kleur bestond uit 2 lagen kubussen. Na elke proef is het aantal verplaatste kubussen (over meer dan één kubusdiameter) geteld. De schade na elke proef in een proevenserie is niet hersteld. Daarmee is de cumulatieve schade bepaald voor de hele proevenserie (6 proeven). Op basis van het aantal verplaatste kubussen is het schadegetal  $N_{od}$  bepaald volgens Vergelijking 2.6. Na iedere proevenserie is de constructie (teen en kubussen) opnieuw opgebouwd.

$$N_{od} = \frac{n_{verplaatst}}{B_{test} / D_n} \quad (2.6)$$

Waarbij:

$n_{verplaatst}$	: aantal verplaatste stenen met meer dan 1 diameter (-)
$B_{test}$	: breedte van de testsectie (= 1 m) (m)
$D_n$	: nominale diameter van de kubus (m)

Het schadegetal,  $N_{ods}$ , is bepaald voor elk relevant constructiedeel, zoals de dubbele laag kubussen, de enkele laag kubussen op de kruin en de kubussen op het binnentalud. Voor het falen van de toplaag van de kubussen worden de volgende criteria genoemd:

Dubbele laag kubussen	: $N_{od} = 2$	(Van der Meer, 1988)
Enkele laag kubussen	: $N_{od} = 0.2$	(Van Gent <i>et al.</i> , 1999, 2001)

Een ander criterium voor het falen van de toplaag is wanneer de filterlaag bloot komt te liggen en daardoor bloot wordt gesteld aan rechtstreekse golfaanval. De gaten tussen de blokken moeten in dat geval wel zo groot te zijn dat het filtermateriaal kan uitspoelen ( $> 1.3D_{n50}$ ).

Voor de stabiliteit van de kubussen aan de havenzijde van de havendam is alleen gekeken naar de bovenste 3 rijen.

### ***Stabiliteit van de teen***

Voor iedere variant is de stabiliteit van de teen (breuksteen 10 – 15 ton) bepaald. Na iedere proef is het aantal verplaatste stenen (meer dan één diameter) geteld. Voor de analyse van de stabiliteit van de teen is het stabiliteitsgetal  $N_{od}$  bepaald volgens Vergelijking 2.6.

In de Coastal Engineering Manual (CEM, 2004) worden de volgende criteria gehanteerd die een richtlijn kunnen zijn voor de stabiliteit van de teen:

$N_{od} = 0.5$	geen schade
$N_{od} = 1$	acceptabele schade
$N_{od} = 4$	falen

## 3 Resultaten

### 3.1 Gemeten golfcondities

Tijdens alle proeven voor Proevenserie B zijn de golven gemeten op de NAP -20 m dieptelijn. In Tabel A.2 tot en met Tabel A.3 in Bijlage A zijn de gerealiseerde golfcondities weergegeven. De gemeten golfoverschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra voor de waterstanden NAP +4.0 m, NAP +2.0 m en NAP +0.0 m zijn respectievelijk weergegeven in de Figuren B.42 (Proevenserie A3), Figuur B.10 (Proevenserie A1) en Figuur B.11 (Proevenserie A2). De instellingen van de golfmachine die voor de gepresenteerde proevenseries gebruikt zijn, zijn voor alle andere proevenseries voor de overeenkomstige waterstanden herhaald.

### 3.2 Stabiliteit kubussen

#### 3.2.1 Beschrijving schadeontwikkeling

##### *Variant 3b*

De schadegetallen voor de kubussen op het zeewaartse talud en de kubussen op het talud aan de havenzijde voor Variant 3b zijn weergegeven in Tabel A.2 in Bijlage A. De doorsnede van Variant 3b is weergegeven in Figuur B.3 van Bijlage B.

Na het uitvoeren van de *Proevenserie A0* (32 ton kubussen;  $\rho_{s,p} = 2700 \text{ kg/m}^3$ ) bij een waterstand van NAP +2.0 m bleek de schade na de laatste proef (Proef A06) groter te zijn dan  $N_{od} = 0.2$  ( $N_{od} = 0.23$ ). De porositeit van de kubussen in de enkele laag voor deze serie was 30%. In Van Gent *et al.* (1999, 2001) worden voor kubussen in een enkele laag schadegetallen  $N_{od} > 0.2$  als 'falen' gekenmerkt. In Foto C.1 in Bijlage C is de constructie voor aanvang van de proeven en na de laatste proef weergegeven. De grootste schade trad op rond de waterlijn en op de ronding die een overgang vormde van het talud naar de kruin. Op basis van de resultaten van de eerste proevenserie is besloten om het soortelijk gewicht van de kubussen voor Proevenserie A1 te verhogen naar  $\rho_{s,p} = 3800 \text{ kg/m}^3$  (36 ton), maar de plaatsingsdichtheid hetzelfde te houden (30% porositeit). De schade aan de enkele laag kubussen aan de havenzijde was  $N_{od} = 0.05$ . Hierbij trad de schade op aan de bovenste rij kubussen.

Voor de proeven met deze zwaardere kubussen (*Proevenserie A1*) zijn golfcondities getest die vergelijkbaar waren met die in de vorige proevenserie. In Proevenserie A1 met de 36 ton kubussen waren er geen kubussen uit het talud verplaatst ('geen schade'). Op de onderste foto van Foto C.2 in Bijlage C is echter te zien dat rond de waterlijn en de overgang van het talud naar de kruin redelijk veel ruimte tussen de kubussen is ontstaan door herschikking van de kubussen. Deze ruimte zorgde ervoor dat het filtermateriaal (1 – 3 ton) blootgesteld werd aan rechtstreekse golfaanval. Tijdens de proeven is niet geconstateerd dat filtermateriaal is uitgespoeld. Echter, in prototype zal het wenselijk zijn dergelijke schade te



repareren om de sterkte van de havendam op peil te houden. Gezien de locatie van de schade is dit niet eenvoudig. De schade aan de kubussen op het binnentalud (havenzijde) kwam overeen met Proevenserie A0 ( $N_{od} = 0.05$ ).

In *Proevenserie A2* en *Proevenserie A3* zijn de 36 ton kubussen getest bij een waterstand van respectievelijk NAP + 0.0 m en NAP +4.0 m. Voor Proevenserie A2 gold dat er geen kubussen uit de toplaag zijn gespoeld ( $N_{od} = 0$ ) en in Proevenserie A3 was 1 kubus uitgespoeld tijdens Proef A35 ( $N_{od} = 0.02$ ). De schadegetallen zijn dus wederom laag, maar zowel bij de hoge als bij de lage waterstand is veel ruimte ontstaan tussen de kubussen op het zeewaartse talud (zie ook Foto C.3 en Foto C.4). Tijdens Proef A36 (waterstand NAP + 4.0 m) is filtermateriaal uitgespoeld. Voor deze hoge waterstand zijn tevens de bovenste rijen 22 ton kubussen op het talud aan de havenzijde (binnentalud) bijna volledig weggespoeld. De schade na Proef A33 was reeds  $N_{od} = 0.4$ , wat beschouwd kan worden als 'falen' van de enkele laag kubussen op het binnentalud.

Bij *Proevenserie A4* is circa 10% van de kubussen in de rij niet evenwijdig aan het talud geplaatst (3 à 4 kubussen per rij) om de invloed van de plaatsingspatroon nader te onderzoeken (zie bovenste foto in Foto C.5 van Bijlage C). De resultaten van deze proevenserie kunnen het best vergeleken worden met Proevenserie A1, omdat de golfcondities en de waterstand van deze beide series hetzelfde waren. Op basis van de uitgevoerde proeven was het schadepatroon voor Proevenserie A4 niet anders dan voor Proevenserie A1. Wederom was het schadegetal  $N_{od} = 0$ , maar is veel ruimte ontstaan tussen de kubussen. Tevens is nu filtermateriaal uitgespoeld tijdens Proef A46. Geconcludeerd kan worden dat wanneer circa 10% van de kubussen niet regelmatig geplaatst wordt de stabiliteit van de bekleding niet duidelijk verandert bij de geteste condities.

Bij *Proevenserie A5* is de plaatsingsdichtheid op het zeewaartse talud aangepast (porositeit verkleind). De porositeit van de kubussen was voor aanvang van de proevenserie 25% (zie bovenste foto van Foto C.6 in Bijlage C). In vergelijking met zowel Proevenserie A1 als Proevenserie A4, waarbij de testcondities ongeveer gelijk waren, gaf deze plaatsingsdichtheid een significante verbetering in de totale stabiliteit van de kubussen. Deze verhoogde stabiliteit kwam niet tot uitdrukking in het schadegetal (geen kubussen uit het talud verplaatst, dus  $N_{od}$  was nog steeds gelijk aan 0), maar de opgetreden zettingen waren na de laatste proef duidelijk minder in vergelijking met de andere twee vergelijkbare proevenseries, zoals te zien is in de onderste foto van Foto C.6.

Bij *Proevenserie A6* zijn de kubussen op het zeewaartse talud met de punt naar beneden geplaatst ('Wybertjes' patroon). Deze plaatsingsmethode komt voort uit eerder onderzoek, uitgevoerd door Van den Berg (2004). In dit onderzoek zijn kubussen vanaf de waterlijn gestort. Voor Proevenserie A6 zijn de kubussen met de hand geplaatst ('in den droge') in een zelfde soort regelmatig 'wybertjes' patroon, dat echter regelmatiger is dan in het onderzoek van Van den Berg. Het bleek erg moeilijk om onregelmatigheden aan te brengen in de plaatsing met de hand, omdat bij aanbrengen van een volgende rij (extra bovenbelasting) de kubussen in elkaar schoven. De plaatsing van de kubussen voor aanvang van het proevenprogramma (na de ingolfproef) is weergegeven in de bovenste foto van Foto C.7. De aansluiting op het kruinelement is kritisch bij de manier van plaatsen. Een detail foto van de aansluiting in het model is weergegeven in Foto C.7. Door de hoge plaatsingsdichtheid (porositeit is circa 15%) is tijdens de proeven nauwelijks verplaatsing van de kubussen opgetreden ( $N_{od} = 0$ ).

Omdat tijdens Proevenserie A5 met de kleinere porositeit een stabielere constructie verkregen werd is op basis van die resultaten in *Proevenserie A7* en *Proevenserie A8* de uitvullaag geminimaliseerd in combinatie met deze lagere porositeit (25%). De dikte van de uitvullaag onder de kubussen op het zeewaartse talud is teruggebracht tot circa 1 m ( $\approx 1D_{n50}$ ), bovenop de bestaande kubussen (zie ook Figuur B.4). Beide proevenseries (waterstanden waren respectievelijk NAP +2.0 m en NAP +4.0 m) hadden geen verplaatste kubussen (schade getal  $N_{od} = 0$ ) en de zetting van de kubussen was minimaal zoals te zien is op Foto C.8 en Foto C.9 in Bijlage C. Het beeld van de constructie is vergelijkbaar met Proevenserie A.5. Geconcludeerd kan worden dat voor de geteste condities de invloed van de dikte van de uitvullaag binnen de geteste range verwaarloosbaar is. Voor Proevenserie A8 (waterstand NAP +4.0 m) was de schade aan de kubussen op het talud aan de havenzijde groot ( $N_{od} = 0.5$  na de laatste proef). Deze schadegetallen komen ongeveer overeen met de gevonden schadegetallen na Proevenserie A3 bij dezelfde waterstand.

Op basis van de uitgevoerde proeven kan geconcludeerd worden dat voor een waterstand van NAP +4.0 m de kubussen (22 ton) op de bovenste drie rijen van het talud aan de havenzijde niet stabiel zijn voor de geteste condities.

Op basis van de uitgevoerde proeven kan tevens geconcludeerd worden dat voor Variant 3b een enkele laag kubussen stabiel is bij een gewicht van 36 ton ( $\rho_{s,p} = 3800 \text{ kg/m}^3$ ) en een porositeit van 25%, op een uitvullaag van circa 1 m boven de bestaande kubussen (zoals weergegeven in Figuur B.4 van Bijlage B). Het plaatsen van kubussen in een ‘wybertjes’ patroon levert ook een stabiele constructie op, alleen is het aantal benodigde kubussen in dat geval veel hoger door de kleinere porositeit (15%).

Een ander aspect wat een rol speelt bij de bouw van de onderzochte alternatieven is de aansluiting van de kubussen op het kruinelement. De aansluiting van de kubussen op het kruinelement bleek niet erg belangrijk voor de stabiliteit van de kubussen op de kruin. Tijdens de bouw van de constructie is de top laag steeds opnieuw opgebouwd, waarbij de aansluiting steeds iets anders uitkwam door net een andere plaatsing van de kubussen. Hierdoor bleef de ene keer een spleet over tussen de laatste rij kubussen en het kruinelement (maximaal circa  $\frac{1}{4}D$ ) en kon een volgende keer precies de laatste rij kubussen tegen het kruinelement geplaatst worden. Voor Proevenserie A7 (waterstand NAP +2.0 m) was de spleet groter dan  $\frac{1}{4}D$ . Voor die proevenserie is een extra rij kubussen ingevoegd en deze is geïntegreerd met de rij daarnaast, zoals in te zien is in Figuur 3.1. De verschillende aansluitingen leverde in gevallen waarbij de aansluiting minder goed was weliswaar meer beweging van de kubussen op (herschikking), maar deze relatief kleine bewegingen ( $< \frac{1}{4}D$ ) hadden geen invloed op de schade aan de top laag.



Figuur 3.1 Aansluiting van de kubussen op het kruinelement



#### *Variant 4*

Voor Variant 4 is voor het bepalen van de stabiliteit van de kubussen een onderscheid gemaakt tussen de dubbele laag kubussen op het talud (30 ton  $\rho_{s,p} = 2800 \text{ kg/m}^3$ ), de stabiliteit van de enkele laag kubussen op de kruin (36 ton; porositeit 30%;  $\rho_{s,p} = 3800 \text{ kg/m}^3$ ) van het zeewaartse talud en de stabiliteit van de bovenste 3 rijen kubussen (22 ton) in een enkele laag op het binnentalud aan de havenzijde (Figuur B.5 in Bijlage B). De resultaten voor deze variant zijn weergegeven in Tabel A.3 in Bijlage A. Het faalcriterium voor de een top laag met kubussen in een dubbele laag ligt bij  $N_{od} = 2$ .

Voor *Proevenserie B0* tot en met *Proevenserie B2* is de constructie getest voor drie waterstanden, respectievelijk NAP +0.0 m, NAP +2.0 m en NAP +4.0 m. De schade is voor alle uitgevoerde series aanzienlijk, zoals ook blijkt uit Foto C.10 tot en met Foto C.12 in Bijlage C. Voor *Proevenserie B1* (waterstand NAP +2.0 m) was de schade na de laatste proef ( $H_s = 9 \text{ m}$ ) groter dan  $N_{od} = 2$  ('falen'). Tevens was de filterlaag zichtbaar zoals weergegeven in Foto C.11. Bij een waterstand van NAP +4.0 m was een groot aantal kubussen over het kruinelement geslagen en verplaatst naar de berm aan de havenzijde, zoals weergegeven in Foto C.12. Voor de lagere waterstanden was het grootste deel van de kubussen juist naar beneden verplaatst en op de zeewaartse teen terecht gekomen. Hierdoor ontstond een verflauwing van het talud. De onregelmatige plaatsing droeg grotendeels bij aan het ontstaan van de schade. Door deze plaatsing hadden golven beter grip op de kubussen. Na een paar proeven (3 à 4) uit een proevenserie ontstond rond de waterlijn een soort enkele laag die redelijk stabiel was, maar waarbij wel ook het filter bloot kwam te liggen.

Op basis van de resultaten van de eerste drie proevenseries is besloten om *Proevenserie B3* (waterstand NAP +2.0 m) en *Proevenserie B4* (NAP +4.0 m) uit te voeren met een dikkere uitvullaag (1 m prototype), zoals weergegeven in Figuur B.6 in Bijlage B. Voor beide proevenseries werden iets hogere schadegetallen gevonden dan voor een constructie met een dunnere uitvullaag. Voor *Proevenserie B3* werd het faalcriterium ( $N_{od} > 2$ ) al bereikt bij een golfhoogte van  $H_s = 7.7 \text{ m}$ . Blijkbaar is er een invloed van de uitvullaag als is deze klein; de invloed van de ondoorlatende onderlaag is relatief veel belangrijker.

De enkele laag kubussen op de kruin (36 ton) vertoonde alleen schade voor de Proevenseries B3 en B4. De schade ontstond bij beide proevenseries op de overgang van de dubbele laag op het zeewaartse talud en de enkele laag op de kruin. Omdat kubussen uit de dubbele laag verdwenen waren (zie Foto C.14 in Bijlage C) hadden kubussen op de kruin onvoldoende ondersteuning, waardoor voor beide proevenseries schadegetallen van  $N_{od} = 0.1$  gevonden werden.

De enkele laag kubussen (22 ton) op de bovenste 3 rijen van het binnentalud (havenzijde) gaven redelijk grote schade voor een waterstand van NAP +4.0 m ( $N_{od} = 0.1$ ). Echter, deze schadegetallen zijn aanzienlijk lager dan gevonden tijdens de proeven voor Variant 3b. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt doordat de overslag verminderd werd door een combinatie van een ruwer talud als gevolg van de dubbele laag en de bredere kruin door de uitvullaag.

Op basis van de uitgevoerde proeven voor Variant 4 kan geconcludeerd worden dat de stabiliteit van de dubbele laag 30 ton kubussen ( $\rho_{s,p} = 2800 \text{ kg/m}^3$ ) van deze variant niet voldoet. De kubussen op de kruin lieten redelijk grote schadegetallen zien, maar dit wordt



veroorzaakt door het falen van de kubussen op het talud. De schade aan de kubussen op het binnentalud was redelijk groot ( $N_{od} = 0.1$ ), maar bleef beperkt tot de bovenste rij.

#### **Variant 4b**

Voor Variant 4b is de uitvulling geminimaliseerd en de aangebrachte dikte was gelijk aan 1 kubus dikte. De toplaag bestond uit een dubbele laag kubussen (36 ton;  $\rho_{s,p} = 3800 \text{ kg/m}^3$ ) met op de kruin enkele rijen kubussen in een enkele laag. De kubussen op de kruin waren dezelfde als in de dubbele laag en zijn onregelmatig geplaatst met een porositeit van circa 30%. Op het binnentalud (havenzijde) zijn wederom kubussen (22 ton) in een enkele laag geplaatst. De constructie is weergegeven in Figuur B.7 van Bijlage B en de resultaten voor Variant 4b zijn weergegeven in Tabel A.4 in Bijlage A.

Voor Proevenserie C0 is de stabiliteit van het opvulmateriaal onder de teen (300 – 1000 kg) getest. Op Foto C.15 en Foto C.16 is de ontwikkeling van de schade aan het opvulmateriaal weergegeven. Na proef C01 is geen schade aan het opvulmateriaal geconstateerd. Tijdens Proef P02 zijn 103 stenen verplaatst. Na Proef C03 is veel materiaal van het opvulmateriaal over de kubussen op het zeevaartse talud verspreid. Een paar steentjes zijn over de constructie naar de havenzijde verplaatst. In de volgende proeven verslechterde de situatie en kan geconcludeerd worden dat al bij Proef C03 ( $H_s = 6.8 \text{ m}$  en  $T_p = 10.9 \text{ s}$ ) de stabiliteit van het opvulmateriaal onvoldoende is. De schade was na Proef C03 dusdanig groot dat het niet meer mogelijk was de schade kwantitatief vast te stellen, omdat steentjes van het opvulmateriaal tussen de kubussen en de stenen van de teen zijn terechtgekomen. Hierdoor was het helaas niet mogelijk een betrouwbare schadecurve voor het opvulmateriaal op te stellen.

De schade aan de kubussen voor *Proevenserie C0* (waterstand NAP +0.0 m) was behoorlijk groot ( $N_{od} = 1.0$  na Proef C05). Na de laatste proef (Proef C06 met  $H_s = 9.1 \text{ m}$ ) was het faalcriterium overschreden ( $N_{od} > 2$ ). Uit visuele observatie blijkt dat de grote schade aan het opvulmateriaal de schade aan de kubussen versneld te hebben. Omdat dit materiaal tussen de kubussen kwam te liggen was de ‘interlocking’ tussen de kubussen een stuk minder en leken de kubussen eerder uit het talud te verplaatsen dan tijdens andere proevenseries. Dit is in tegenspraak met bevindingen die gedaan zijn in het onderzoek van Van den Berg (2004). Na deze proevenserie is besloten om het opvulmateriaal te fixeren zoals gebeurd is voor de andere proevenseries in Proevenserie B. Dit is gedaan omdat dit de resultaten voor de stabiliteit van de toplaag en de teen dan niet beïnvloedde.

Ook voor de *Proevenserie C1* en *Proevenserie C2* was de schade aan de kubussen op het zeevaartse talud aanzienlijk, maar werd het faalcriterium net niet overschreden ( $N_{od} = 1.8$  en  $N_{od} = 1.1$  respectievelijk na Proef C16 en Proef C26). Tijdens Proef C26 (waterstand NAP +4.0 m) is schade ontstaan aan de kubussen op het binnentalud (havenzijde). De schade na deze proef was  $N_{od} = 0.1$ . Dit is weergegeven op de onderste foto van Foto C.18. Voor waterstand NAP +2.0 m is geen schade geconstateerd aan de kubussen (22 ton) op het binnentalud.

### 3.2.2 Analyse van de stabiliteit dubbele laag kubussen

In Figuur B.12 in Bijlage B zijn alle schadegetallen voor de kubussen in een dubbele laag op het zeewaartse talud van Variant 4 en Variant 4b, alsmede de schadegetallen van de proeven voor een enkele laag (Variant 3b) uitgezet tegen het stabiliteitsgetal  $H_s/\Delta D$ . In Figuur B.12 zijn de resultaten voor Variant 4 ( $\rho_{s,p} = 2800 \text{ kg/m}^3$ ) weergegeven als open markers en de resultaten van Variant 4b ( $\rho_{s,p} = 3800 \text{ kg/m}^3$ ) als sterretjes. Hieruit blijkt dat geen duidelijk onderscheid valt waar te nemen tussen de curves voor de kubussen met de hoge dichtheid en de lagere dichtheid (na het verdisconteren van de dichtheid in het schadegetal  $H_s/\Delta D$ ). In Figuur B.13 is als referentie de ontwerpformule van Van der Meer (1988) voor een dubbele laag kubussen ingetekend voor 1000 golven en een golfsteilheid van  $s_{op} = 0.035$ . De formule is hieronder gegeven:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = (6.7 N_{od}^{0.4} / N^{0.3} + 1.0) s_{op}^{-0.1} \quad (3.1)$$

waarin:

- $N$  : aantal golven (-)
- $s_{op}$  : golfsteilheid  $H_s / L_{op}$  (-)
- $L_{op}$  : golflengte op diep water (m)

Tevens is de ontwerplijn in Figuur B.13 aangegeven, zoals afgeleid door Hudson. De lijn is gebaseerd op Vergelijking 3.2, waarbij in dit geval van IJmuiden gerekend is met een  $K_D$ -waarde van  $K_D = 6.5$  (brekende golven op het talud):

$$M = \frac{\rho_s H_s^3}{K_D \Delta^3 \cot \alpha} \Rightarrow \frac{H_s}{\Delta D} = (K_D \cot \alpha)^{\frac{1}{3}} \quad (3.2)$$

waarin:

- $K_D$  : Hudson coëfficiënt ( $K_D = 6.5$  voor brekende golven) (-)
- $\cot \alpha$  : cotangens van de hoek van het zeewaartse talud (-)

Deze beide ontwerplijnen zijn gebaseerd op een dubbele laag kubussen op doorlatende onderlagen en constructies die geen overslag geven. Uit Figuur B.13 blijkt dat bovenstaande vergelijkingen de optredende schade onderschatten. Dit wordt vooral veroorzaakt door de ondoorlatende steenasfalt onderlaag. Tevens lijkt een trend aanwezig dat de snelheid waarmee de schade toeneemt, wordt onderschat wanneer een ondoorlatende onderlaag aanwezig is. Op basis van de beschikbare data (relatief weinig data met veel spreiding) is, op basis van Vergelijking 3.1, een conservatievere fit verkregen die specifiek voor de situatie voor IJmuiden bruikbaar is. Dit is gedaan door de huidige coëfficiënten aan te passen op basis van een visuele fit om het effect van de ondoorlatende steenasfaltlaag beter in rekening te brengen. Deze eerste inschatting, die alleen gebaseerd is op de metingen uit dit rapport, is weergegeven in Figuur B.13 als 'Van der Meer (Aangepast)' en de vergelijking wordt weergegeven in Vergelijking 3.3.



$$\frac{H_s}{\Delta D} = (8N_{od}^{0.4} / N_{golven}^{0.35} + 0.9)s_{op}^{-0.05} \quad (3.3)$$

Deze lijn is alleen bruikbaar voor een dubbele laag kubussen. Deze aangepaste formule is alleen gebaseerd op de resultaten van de in deze studie uitgevoerde proeven met een dubbele laag kubussen. Dit zijn relatief weinig punten (40 proeven), derhalve is de betrouwbaarheid minder groot dan de bestaande formulering van Van der Meer (Vergelijking 3.1) of Hudson (Vergelijking 3.2). Omdat het hier echter wel gaat om een specifieke constructie is geprobeerd op basis van de beschikbare informatie een conservatieve, maar toch meer toegespitste formulering op te stellen voor de stabiliteit van een dubbele laag kubussen.

### 3.2.3 Analyse van de stabiliteit enkele laag kubussen

Op basis van de resultaten voor een de geteste constructies met een enkele toplaag is het niet mogelijke een betrouwbare schadecurve op te stellen. In Figuur B.12 en B.13 is te zien dat het begin van schade later optreedt ( $H_s/\Delta D = 2.1$ ) dan voor een dubbele laag ( $H_s/\Delta D \approx 1.5$ ). Deze resultaten zijn overeenkomstig de resultaten van modelonderzoek dat is uitgevoerd en gerapporteerd in Van Gent *et al.* (1999, 2001). Daarnaast werd op basis van de resultaten geconcludeerd dat voor een enkele laag de plaatsingsdichtheid van de kubussen erg belangrijk was. Aanbevolen wordt om een porositeit van 25% toe te passen. Omdat de filterlaag onder een enkele laag kubussen eerder bloot komt te liggen aan rechtstreekse golfaanval wordt aanbevolen om de verhouding tussen de kubusafmetingen en de korrelafmeting van het filter ongeveer tussen  $D/D_{n50} = 1.8 - 2.5$  te ontwerpen.

## 3.3 Stabiliteit teenconstructie

De stabiliteit van de teen (breuksteen 10 – 15 ton) is bepaald voor de drie varianten. De schade aan de teen is weergegeven als een stabiliteitsgetal  $N_{od}$  in Tabel A.2, Tabel A.3 en Tabel A.4 van Bijlage A respectievelijk voor Variant 3b, Variant 4 en Variant 4b. Hoewel de teen tijdens de uitgevoerde proeven redelijk veel schade vertoonde (zie ook de foto's in Bijlage C) werd het faal criterium ( $N_{od} > 4$ ) alleen overschreden tijdens de laatste proef in twee proevenseries (Proef C06 en Proef A26) met de laagste waterstand (NAP +0.0 m). Deze waarden zijn vetgedrukt weergegeven. De stabiliteit van de kubussen werd niet bedreigd door de schade aan de teen.

De resultaten van de stabiliteit van de teen zijn voor alle proeven samengevat in Figuur B.14 van Bijlage B. Als referentie zijn de ontwerprijnen weergegeven voor 3 waterstanden, zoals voorgesteld door Van der Meer *et al.* (1995), Van der Meer (1998) en Burcharth *et al.* (1995) weergegeven. De vergelijking van deze ontwerpformules zijn hieronder weergegeven:

Teenstabiliteit volgens Van der Meer *et al.* (1995)

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \left( 0.24 \frac{h_t}{D_{n50}} + 1.6 \right) N_{od}^{0.15} \quad (3.4)$$



Teenstabiliteit volgens Van der Meer (1998)

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \left( 6.2 \left( \frac{h_t}{h} \right)^{2.7} + 2.0 \right) N_{od}^{0.15} \quad (3.5)$$

Teenstabiliteit volgens Burcharth *et al.* (1995)

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \left( 0.4 \frac{h_t}{\Delta D_{n50}} + 1.6 \right) N_{od}^{0.15} \quad (3.6)$$

waarin:

$h_t$  : waterdiepte op de teen (m)

$h$  : waterdiepte voor de teen (in deze studie waar de golven zijn gemeten dus op NAP -20 m) (m)

Op basis van Figuur B.14 blijkt dat ontwerpformules van Van der Meer *et al.* (1995) en Burcharth *et al.* (1995) de teenstabiliteit redelijk goed voorspellen. De ontwerprijn van Van der Meer (1998) is conservatief.

## 4 Conclusies & aanbevelingen

In Proevenserie B zijn drie overlappingsvarianten getest waarbij kubussen van beton met een hoge dichtheid zijn toegepast:

1. **Variant 3b:** Enkele laag kubussen (32 ton met  $\rho_{s,p} = 2700 \text{ kg/m}^3$  en 36 ton met  $\rho_{s,p} = 3800 \text{ kg/m}^3$ ) op een talud uitgevuld met breuksteen. De doorsnede van deze variant is weergegeven in Figuur B.3 van Bijlage B.
2. **Variant 4:** Dubbele laag kubussen (30 ton met  $\rho_{s,p} = 2800 \text{ kg/m}^3$ ) op een talud uitgevuld met breuksteen. De doorsnede van deze variant is weergegeven in Figuur B.5 van Bijlage B.
3. **Variant 4b:** Dubbele laag kubussen (36 ton met  $\rho_{s,p} = 3800 \text{ kg/m}^3$ ) op een talud *zonder uitvullaag*. De doorsnede van deze variant is weergegeven in Figuur B.7 van Bijlage B.

De resultaten van de modelproeven zijn samengevat in Tabel A.2 tot en met Tabel A.4 van Bijlage A.

### 4.1 Conclusies

Op basis van de resultaten van de Proevenserie B kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

#### **Variant 3b**

- Een enkele laag kubussen zoals getest voor Variant 3b is stabiel bij een gewicht van 36 ton en  $\rho_{s,p} = 3800 \text{ kg/m}^3$  met een *porositeit van de toplaag van 25%*, op een uitvullaag van minimaal 1 m boven de bestaande kubussen (Figuur B.4 van Bijlage B). Een enkele laag kubussen met een gewicht van 32 ton ( $\rho_{s,p} = 2700 \text{ kg/m}^3$ ) met een porositeit van de toplaag van 30% bleek niet stabiel genoeg. De combinatie van 32 ton kubussen met een porositeit van de toplaag van 25% is niet getest. Het plaatsen van kubussen in een “wybertjespatroon” levert ook een stabiele constructie op, alleen is het aantal benodigde kubussen in dat geval veel hoger door de kleinere porositeit. Door deze kleinere porositeit is de ruimte tussen de kubussen op de overgang van het talud naar de kruin, die bij veel van de geteste constructies aanwezig was, nauwelijks ontstaan. Deze spleet ontstond door herschikking van de evenwijdig geplaatste kubussen onder invloed van golfaanval. Door de herschikking zakten de kubussen in elkaar en ontstond bovenaan het talud extra ruimte. Deze ruimte was het duidelijkst aanwezig bij een porositeit van 30% en evenwijdige plaatsing van de kubussen. Bij een porositeit van 25% trad dit nauwelijks op.
- De schade aan de teen (breuksteen 10 – 15 ton) is vrij groot voor de geteste condities. Voor de lage waterstand NAP +0.0 m werd voor de laatste proef ( $H_s = 9.1 \text{ m}$  en  $T_p = 12.9 \text{ s}$ ) een schade gemeten die groter is dan het faalcriterium ( $N_{od} > 4$ ). Echter, voor alle

uitgevoerde proeven is de stabiliteit van de kubussen niet in gevaar geweest, door schade aan de teen.

- Op basis van de uitgevoerde proeven kan geconcludeerd worden de kubussen (22 ton) op de bovenste rijen van het *binnentalud* (havenzijde) niet stabiel zijn voor een waterstand van NAP +4.0 m voor golfhoogtes die groter zijn dan  $H_s = 6.5$  m.

#### **Variant 4**

- Op basis van de uitgevoerde proeven voor Variant 4 kan geconcludeerd worden dat de stabiliteit van de dubbele laag 30 tons kubussen ( $\rho_{s,p} = 2800 \text{ kg/m}^3$ ) op het zeewaartse *talud* van Variant 4 niet voldoet voor golfhoogten groter dan  $H_s = 7.7$  m ( $T_p = 11.5$  s) en een waterstand van NAP +2.0 m.
- De enkele laag kubussen van 36 ton op de *kruin* ( $\rho_s = 3800 \text{ kg/m}^3$ ) waren stabiel voor de geteste condities. Er werden voor Proevenseries B3 en B4 wel vrij hoge schadegetallen gevonden, maar deze werden veroorzaakt door het falen van de dubbele laag kubussen op het zeewaartse talud.
- De schade aan de teen is vrij groot voor de geteste condities. Voor de lage waterstand (NAP +0.0 m) is voor de zwaarste golfconditie ( $H_s = 9.2$  m en  $T_p = 12.8$  s) de grootste schade ( $N_{od} = 3.0$ ) gemeten. Echter, voor alle uitgevoerde proeven is de stabiliteit van de kubussen, door de grote schade aan de teen, niet in gevaar geweest.
- Er trad vrij grote schade ( $N_{od} = 0.1$ ) op in de bovenste 3 rijen van het talud aan de havenzijde (binnentalud) met kubussen (22 ton) in een enkele laag bij een waterstand van NAP +4.0 m. Echter, deze schadegetallen zijn lager dan gevonden tijdens de proeven voor Variant 3b. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt doordat de overslag verminderd werd door een combinatie van een ruwer zeewaartse talud ten opzichte van het relatief gladde talud van de enkele laag kubussen en de bredere kruin als het gevolg van de uitvullagen.

#### **Variant 4b**

- De schade aan de 36 tons kubussen ( $\rho_{s,p} = 3800 \text{ kg/m}^3$ ) is bij deze variant behoorlijk groot. Voor de lage waterstand (NAP +0.0 m) wordt bij de zwaarste golfconditie ( $H_s = 9.1$  m en  $T_p = 12.8$  s) het faal criterium overschreden ( $N_{od} > 2$ ). Uit visuele waarnemingen lijkt deze hoge schade te zijn veroorzaakt door de schade aan het opvulmateriaal dat was aangebracht onder de teen. Voor de waterstanden NAP +2.0 m en NAP + 4.0 m is de schade na de zwaarste golfconditie behoorlijk groot, maar wordt het faal criterium niet bereikt. Voor deze variant is de filterlaag niet bloot komen te liggen.
- De schade aan de teen (breuksteen 10 – 15 ton) was bij deze variant vrij groot voor de geteste condities. Voor de lage waterstand NAP +0.0 m wordt voor de zwaarste golfconditie ( $H_s = 9.1$  m en  $T_p = 12.8$  s) een schade aan de teen gemeten die groter is dan het faal criterium ( $N_{od} > 4$ ). Echter, voor alle uitgevoerde proeven is de stabiliteit van de kubussen, door het falen van de teen, niet in gevaar geweest.



- De enkele laag kubussen (22 ton) op de bovenste 3 rijen van het talud aan de havenzijde (binnentalud) gaven vrij grote schade ( $N_{od} = 0.1$ ) bij een waterstand van NAP +4.0 m. Deze schadegetallen komen overeen met de schadegetallen die zijn bepaald voor Variant 4. Echter, het schade criterium ( $N_{od} = 0.2$ ) werd voor de geteste condities niet bereikt.
- Het opvulmateriaal (300 – 1000 kg) is niet stabiel voor golfcondities die zwaarder zijn dan  $H_s = 6.8$  m en  $T_p = 10.9$  s. Bij Proef C01 is geen schade geconstateerd ( $H_s = 4$  m;  $T_p = 8.6$  s). Helaas bleek door de grote schade die al vrij snel optrad tijdens Proef C02 en Proef C03, dat het niet mogelijk was een betrouwbare schadecurve voor het opvulmateriaal op te stellen.

### Algemeen

- Op basis van de uitgevoerde proeven kan geconcludeerd worden dat de enkele laag kubussen op het zeewaartse talud van Overlagingsvariant 3b over het algemeen de meest stabiele toplaag was. Dit geldt met name voor de varianten met de kubussen (36 ton;  $\rho_{s,p} = 3800$  kg/m<sup>3</sup>) geplaatst in een “wybertjespatroon” en de kubussen evenwijdig geplaatste kubussen met een porositeit van 25%. Bij deze laatste variant bleek dat dikte van de uitvullaag niet erg belangrijk is. Hierdoor kan deze uitvullaag geminimaliseerd worden tot een dikte van  $1D$  van de bestaande kubussen (om talud uit te vlakken).
- De bovenste 3 rijen kubussen op het talud aan de havenzijde (binnentalud) vertoonde met name voor een waterstand van NAP +4.0 m veel schade. Voor de waterstanden NAP +2.0 m en NAP +0.0 m was het schadegetal in alle gevallen kleiner dan  $N_{od} = 0.2$  (schade criterium). In de praktijk zal deze schade redelijk eenvoudig hersteld kunnen worden omdat het hier de bovenste lagen betreft.
- Uit de uitgevoerde proeven blijkt geen waarneembare invloed van de dichtheidsverschillen van de kubussen. Hierdoor kan geconcludeerd worden dat de dimensieloze stabiliteitsparameter,  $H_s/\Delta D$ , een geschikte parameter is om de stabiliteit van de toplagen met hoge dichtheid kubussen te beschrijven.
- Voor het bepalen van de steengradering voor de *teen* kan gebruik gemaakt worden van de bestaande relatie (zie Vergelijking 3.4) van Van der Meer (1995). Op basis van de testresultaten blijkt dat deze ontwerpformule over het algemeen conservatieve steendiameters oplevert.
- Voor het ontwerpen van een *dubbele laag kubussen* met een uitvullaag blijken de bestaande ontwerpformules van Van der Meer (1988) en Hudson (Vergelijking 3.1 en Vergelijking 3.2) te onveilige resultaten op te leveren. Op basis van de proefresultaten uit deze studie is een aangepaste ontwerpformule gemaakt op basis van die van Van der Meer (1988). Deze aangepaste formule geeft een conservatievere beschrijving van het verloop van het schadeniveau, zoals waargenomen werd tijdens de testen. Deze aangepaste formule is alleen gebaseerd op basis van de huidige proefresultaten en kan daarom niet algemeen toepasbaar worden verklaard. De aangepaste ontwerpformule is weergegeven in Vergelijking 3.3 en in Figuur B.13.

## 4.2 Aanbevelingen

Bij een keuze voor een variant waarbij er een overgang is van een dubbele laag kubussen op een enkele laag kubussen wordt aanbevolen om dit overgangspunt extra aandacht te geven. Hierbij moet erop gelet worden dat de uitvullaag/filterlaag een ronding (straal  $> 10$  m) krijgt, zodat de invloed van zakkingen van de kubussen op het talud verminderd wordt (in verband met ruimte die tussen kubussen zou kunnen ontstaan door zetting). Dit geldt ook voor de overgang van het talud op de kruin bij een enkele laag kubussen. Tevens moet bij een dubbele laag kubussen de bovenzijde van de kubussen op het talud zo vloeiend mogelijk overgaan in de bovenzijde van de kubussen op de kruin. In het model zijn hiervoor redelijke oplossingen gevonden.

Het wordt aanbevolen om na te gaan of voor Variant 3b kubussen in ‘halfsteensverband’ met een gewicht van 30 ton bij een porositeit van 25% wellicht ook zouden kunnen voldoen.

Door de kleinere porositeit van de plaatsing van kubussen in een ‘wybertjespatroon’ kunnen de kubussen bij plaatsing in een ‘wybertjespatroon’ wellicht in een dunnere laag worden toegepast om dezelfde stabiliteit te verkrijgen als bij evenwijdige plaatsing met een grotere porositeit.

De erosiekuil en andere 3D effecten beïnvloeden de golfaanval op de constructie. Het wordt aanbevolen om de invloed van 3D effecten, inclusief scheve golfaanval, te bestuderen in een 3D fysisch model. Dit geldt ook voor de koppen van de havendammen.

## Literatuur

- Burcharth H. F., Frigaard, P., Uzcanga, J., Berenguer, J. M., Madrigal, B. G., and Villanueva, J. (1995). '*Design of the Ciervana Breakwater, Bilbao*', Proceedings of the Advances in Coastal Structures and Breakwaters Conference, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London, UK, pp 26-43.
- CEM (2004), Coastal engineering manual, 2003 (digital version), US Army Corps of Engineers
- Dai, Y.B. and Kamel, A.M. (1969), *Scale effect tests for rubble-mound breakwaters*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of engineers, December 1969, Vicksburg, Mississippi.
- Klopman, G. and P.J. van Leeuwen (1990), *An efficient method for the reproduction of nonlinear random waves*, ASCE, Proc. ICCE'90, Vol.1, pp.478-488, Delft.
- Kuiper, C en Van Gent, M.R.A. (2006), *Havendammen van IJmuiden; 2D modelonderzoek naar mogelijke schademechanismen van de huidige situatie en een ontwerpvariant (Proevenserie A)*, WL | Delft Hydraulics rapport H4648, maart 2006.
- Mansard, E. and E. Funke (1980), '*The measurement of incident and reflected spectra using a least-square method*', Proc. ICCE'80, ASCE, pp.154-172, Sydney.
- US Army Corps of Engineers (1984). Shore Protection Manual.
- Van den Berg, S.G. (2004), '*Single toplayer of cubes with granular joint filling*', Master of Science thesis TU Delft, October 2004.
- Van der Meer, J.W., d'Angremond, K. and Gerding, E. (1995), '*Toe structure stability of Rubble mound structures*', Proceedings Coastal structures & breakwaters conference, Institution of Civil engineers, Thomas Telford Publishing. London pp 308 - 321
- Van der Meer, J.W. (1988), '*Stability of Cubes, Tetrapodes and Accropode*', Proceedings Breakwaters conference 1988 Eastborn. Institution of Civil engineers, Thomas Telford Publishing. London pp 71 – 80.
- Van der Meer, J.W. (1998). '*Geometrical design of coastal structures*'. Infram publication Nr. 2.
- Van Dongeren, A., G. Klopman, A. Reniers and H. Petit (2001), High-quality laboratory wave generation for flumes and basins, ASCE, Waves 2001 Conference, San Francisco.
- Van Gent, M.R.A., G.B.H. Spaan, S.E. Plate, E. Berendsen, J.W. van der Meer, K. d'Angremond (1999), '*Single-layer rubble mound breakwaters*', Balkema, Proc. International Conference Coastal Structures, Santander, Spain, Vol.1, pp.231-239.
- Van Gent, M.R.A., Plate, S.E., Berendsen, E., Spaan, G.B.H., Van der Meer, J.W. en d'Angremond, K. (1999), '*Single-layer rubble mound breakwaters*'. ASCE, Proc. Coastal Structures'99, Santander.
- Van Gent, M.R.A., d'Angremond, K., Triemstra, R. (2001), '*Rubble mound breakwaters: single armour layer and high-density concrete units*'. Proc. Coastlines, Structures, and Breakwaters. ICE, Londen.
- Van Leeuwen, P.J. and G. Klopman (1996), *A new method for the generation of second-order random waves*, Ocean Engineering, Elsevier, Vol. 23, No.2, pp.167-192.



## **A Tabellen**

Seriennaam*	Variant	Waterstand [m +NAP]	$\rho_{s,m}$ (zeewaarts talud) [kg/m <sup>3</sup> ]	Porositeit kubussen [%]	Beschrijving
<b>Variant 3b</b>					
A0	Variant 3b	2.0	2700	30	Soortelijk gewicht aangepast op basis van resultaten Serie A0
A1	Variant 3b	2.0	4000	30	
A2	Variant 3b	0.0	4000	30	
A3	Variant 3b	4.0	4000	30	
A4	Variant 3b	2.0	4000	30	10% van de kubussen onregelmatig geplaatst
A5	Variant 3b	2.0	4000	25	Plaatsingsdichtheid verlaagd van 30% naar 25%
A6	Variant 3b	2.0	4000	15	Kubussen in wybertjespatroon
A7	Variant 3b	2.0	4000	25	Uitvullaag dunner dan uitgangssituatie (1D <sub>n50</sub> )
A8	Variant 3b	4.0	4000	25	Uitvullaag dunner dan uitgangssituatie (1D <sub>n50</sub> )
<b>Variant 4</b>					
B0	Variant 4	0.0	2700 (talud) + 4000 (kruin)	47 + 30**	
B1	Variant 4	2.0	2700 (talud) + 4000 (kruin)	47 + 30**	
B2	Variant 4	4.0	2700 (talud) + 4000 (kruin)	47 + 30**	
B3	Variant 4	2.0	2700 (talud) + 4000 (kruin)	47 + 30**	Uitvullaag 50% dikker dan de uitgangssituatie
B4	Variant 4	4.0	2700 (talud) + 4000 (kruin)	47 + 30**	Uitvullaag 50% dikker dan de uitgangssituatie
<b>Variant 4b</b>					
C0	Variant 4b	0.0	4000	47 + 30**	
C1	Variant 4b	2.0	4000	47 + 30**	
C3	Variant 4b	4.0	4000	47 + 30**	

Tabel A.1 Proevenprogramma Proevenserie B

\* Voor iedere serie zijn 6 proeven uitgevoerd met oplopende golfhoogte

\*\* Eerst genoemde waarde is de porositeit van de kubussen in de dubbele laag op het talud; de tweede waarde van de enkele laag op de kruin

	Test	Golfcondities op NAP -20m					Kubussen zeezijde				Kubussen havenzijde			Teen		OPMERKINGEN
		SWL [+m NAP]	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	$H_s/\Delta D$ [-]	Porositeit [%]	Aantal* kubussen	$\rho_{s,m}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$N_{od}$ [-]	Porositeit [%]	W [ton]	$N_{od}$ [-]	$H_s/\Delta D_{n50}$ [m]	$N_{od}$ [-]	
STABILITEIT	A01	2.0	3.3	8.5	7.9	0.89	30	420	2700	0.00	30	22	0.00	1.43	0.02	
	A02	2.0	5.0	9.5	9.2	1.35	30	420	2700	0.00	30	22	0.00	2.16	0.19	
	A03	2.0	6.6	10.8	10.5	1.79	30	420	2700	0.00	30	22	0.00	2.86	0.94	
	A04	2.0	7.7	11.5	11.2	2.08	30	420	2700	0.00	30	22	0.00	3.34	1.27	
	A05	2.0	8.3	13.8	12.4	2.25	30	420	2700	0.10	30	22	0.03	3.60	2.22	
	A06	2.0	9.1	12.7	12.2	2.45	30	420	2700	<b>0.23</b>	30	22	0.05	3.92	2.84	Schade groter dan $N_{od} > 0.2$
	A11	2.0	3.8	8.5	8.2	0.67	30	512	4000	0.00	30	22	0.00	1.66	0.05	
	A12	2.0	5.0	9.6	9.2	0.88	30	512	4000	0.00	30	22	0.00	2.18	0.14	
	A13	2.0	6.7	10.8	10.5	1.16	30	512	4000	0.00	30	22	0.00	2.88	0.64	
	A14	2.0	7.7	11.5	11.2	1.34	30	512	4000	0.00	30	22	0.00	3.34	1.59	
	A15	2.0	8.0	13.8	12.3	1.39	30	512	4000	0.00	30	22	0.03	3.46	2.59	
	A16	2.0	9.1	12.7	12.2	1.58	30	512	4000	0.00	30	22	0.05	3.94	3.20	Filtermateriaal bloot
	A21	0.0	4.0	8.6	8.4	0.69	30	512	4000	0.00	30	22	0.00	1.72	0.00	
	A22	0.0	5.1	9.6	9.4	0.89	30	512	4000	0.00	30	22	0.00	2.22	0.19	
	A23	0.0	6.8	10.9	10.7	1.18	30	512	4000	0.00	30	22	0.00	2.94	1.25	
	A24	0.0	7.7	11.5	11.3	1.34	30	512	4000	0.00	30	22	0.03	3.32	2.59	
	A25	0.0	7.9	13.8	12.5	1.38	30	512	4000	0.00	30	22	0.05	3.43	3.58	
	A26	0.0	9.1	12.9	12.1	1.59	30	512	4000	0.00	30	22	0.05	3.96	<b>5.14</b>	Filtermateriaal bloot
A31	4.0	4.0	8.6	8.2	0.69	30	512	4000	0.00	30	22	0.00	1.72	0.00		
A32	4.0	5.0	9.5	9.3	0.87	30	512	4000	0.00	30	22	0.08	2.16	0.02		
A33	4.0	6.5	10.9	10.4	1.14	30	512	4000	0.00	30	22	0.43	2.82	0.59		
A34	4.0	7.6	11.5	11.1	1.32	30	512	4000	0.00	30	22	0.43	3.27	1.11		
A35	4.0	7.5	13.7	12.3	1.31	30	512	4000	0.02	30	22	0.48	3.26	1.37		
A36	4.0	9.0	12.8	12.0	1.57	30	512	4000	0.02	30	22	0.63	3.91	2.28	Filter materiaal uitgespoeld (5x)	
A41	2.0	3.8	8.5	8.2	0.67	30	512	4000	0.00	30	22	0.00	1.66	0.05		
A42	2.0	5.0	9.6	9.2	0.87	30	512	4000	0.00	30	22	0.00	2.16	0.12		
A43	2.0	6.6	10.8	10.5	1.15	30	512	4000	0.00	30	22	0.00	2.87	0.62		
A44	2.0	7.7	11.5	11.2	1.34	30	512	4000	0.00	30	22	0.00	3.32	1.37		
A45	2.0	7.9	13.8	12.3	1.38	30	512	4000	0.00	30	22	0.03	3.44	2.36		
A46	2.0	9.2	12.8	12.2	1.60	30	512	4000	0.00	30	22	0.05	3.98	3.17	Filter materiaal uitgespoeld (3x)	
A51	2.0	3.8	8.5	8.1	0.67	25	544	4000	0.00	30	22	0.00	1.66	0.00		
A52	2.0	4.9	9.5	9.2	0.86	25	544	4000	0.00	30	22	0.00	2.14	0.05		
A53	2.0	6.6	10.8	10.5	1.16	25	544	4000	0.00	30	22	0.00	2.88	0.33		
A54	2.0	7.7	11.5	11.2	1.33	25	544	4000	0.00	30	22	0.03	3.32	1.05		
A55	2.0	8.0	13.8	12.2	1.39	25	544	4000	0.00	30	22	0.03	3.45	1.84		
A56	2.0	9.1	12.8	12.2	1.58	25	544	4000	0.00	30	22	0.03	3.93	2.37	Weinig schade	
A61	2.0	3.8	8.5	8.2	0.67	15	621	4000	0.00	30	22	0.00	1.66	0.00		
A62	2.0	5.0	9.5	9.2	0.86	15	621	4000	0.00	30	22	0.00	2.15	0.19		
A63	2.0	6.7	10.8	10.5	1.17	15	621	4000	0.00	30	22	0.00	2.90	0.77		
A64	2.0	7.7	11.5	11.1	1.35	15	621	4000	0.00	30	22	0.00	3.35	1.45		
A65	2.0	7.9	13.8	12.2	1.38	15	621	4000	0.00	30	22	0.00	3.44	1.84		
A66	2.0	9.2	12.6	12.2	1.60	15	621	4000	0.00	30	22	0.00	3.98	3.06	Weinig schade	
A71	2.0	3.8	8.5	8.1	0.66	25	487	4000	0.00	30	22	0.00	1.51	0.00		
A72	2.0	4.9	9.5	9.2	0.86	25	487	4000	0.00	30	22	0.00	1.95	0.03		
A73	2.0	6.6	10.8	10.5	1.15	25	487	4000	0.00	30	22	0.00	2.63	0.39		
A74	2.0	7.6	11.5	11.2	1.33	25	487	4000	0.00	30	22	0.03	3.03	0.80		
A75	2.0	8.0	13.7	12.3	1.39	25	487	4000	0.00	30	22	0.03	3.17	1.16		
A76	2.0	9.1	12.8	12.2	1.58	25	487	4000	0.00	30	22	0.08	3.61	1.53		
A81	4.0	4.0	8.6	8.3	0.69	25	482	4000	0.00	30	22	0.00	1.57	0.00		
A82	4.0	5.0	9.5	9.3	0.87	25	482	4000	0.00	30	22	0.00	1.97	0.03		
A83	4.0	6.5	11.0	10.4	1.13	25	482	4000	0.00	30	22	0.00	2.57	0.36		
A84	4.0	7.5	11.5	11.1	1.30	25	482	4000	0.00	30	22	0.30	2.97	0.55		
A85	4.0	7.5	13.8	12.3	1.31	25	482	4000	0.00	30	22	0.35	2.98	0.70		
A86	4.0	9.1	12.8	12.1	1.58	25	482	4000	0.00	30	22	0.45	3.60	0.89		

Tabel A.2 Resultaten Variant 3b (Proevenserie B)

De vetgedrukte waarden geven aan dat de schade getallen groter zijn dan het faalcriterium

\* Aantal kubussen dat voor aanvang van de proeven aanwezig was op zowel het talud als de kruin



	Test	Golfcondities op NAP -20m					Kubussen dubbele laag zeezijde				Kubussen enkele laag zeezijde				Kubussen havenzijde			Teen	
		SWL [+m NAP]	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	$H_s/\Delta D$ [-]	Porositeit [%]	Aantal* kubussen	$\rho_{s,m}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$N_{od}$ [-]	Porositeit [%]	Aantal* kubussen	$\rho_{s,m}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$N_{od}$ [-]	Porositeit [%]	W [ton]	$N_{od}$ [-]	$H_s/\Delta D_{n50}$ [m]	$N_{od}$ [-]
STABILITEIT	B01	0.0	4.0	8.6	8.5	1.08	47	517	2700	0.0	47	224	4000	0	30	22	0.0	1.59	0.0
	B02	0.0	5.2	9.6	9.4	1.40	47	517	2700	0.0	47	224	4000	0	30	22	0.0	2.05	0.2
	B03	0.0	6.9	10.9	10.5	1.86	47	517	2700	0.2	47	224	4000	0	30	22	0.0	2.73	0.6
	B04	0.0	7.7	11.6	11.2	2.08	47	517	2700	0.8	47	224	4000	0	30	22	0.0	3.05	1.3
	B05	0.0	7.9	13.8	12.5	2.13	47	517	2700	1.1	47	224	4000	0	30	22	0.0	3.13	1.7
	B06	0.0	9.2	12.8	12.2	2.48	47	517	2700	1.2	47	224	4000	0	30	22	0.0	3.64	3.0
	B11	2.0	3.9	8.6	8.0	1.06	47	517	2700	0.0	47	224	4000	0	30	22	0.0	1.55	0.0
	B12	2.0	5.0	9.5	9.2	1.34	47	517	2700	0.1	47	224	4000	0	30	22	0.0	1.96	0.0
	B13	2.0	6.8	10.8	10.5	1.83	47	517	2700	0.4	47	224	4000	0	30	22	0.0	2.68	0.6
	B14	2.0	7.8	11.5	11.1	2.10	47	517	2700	1.3	47	224	4000	0	30	22	0.0	3.08	1.2
	B15	2.0	7.9	13.8	12.3	2.15	47	517	2700	1.6	47	224	4000	0	30	22	0.0	3.15	1.7
	B16	2.0	9.1	12.6	12.2	2.47	47	517	2700	2.1	47	224	4000	0	30	22	0.0	3.62	1.8
	B21	4.0	4.0	8.6	8.2	1.08	47	517	2700	0.0	47	224	4000	0	30	22	0.0	1.58	0.0
	B22	4.0	5.1	9.5	9.2	1.37	47	517	2700	0.0	47	224	4000	0	30	22	0.0	2.00	0.0
	B23	4.0	6.5	10.7	10.3	1.77	47	517	2700	0.2	47	224	4000	0	30	22	0.0	2.59	0.1
	B24	4.0	7.7	11.5	11.0	2.09	47	517	2700	0.6	47	224	4000	0	30	22	0.0	3.06	0.3
B25	4.0	7.4	13.8	12.3	2.01	47	517	2700	0.8	47	224	4000	0	30	22	0.0	2.94	0.6	
B26	4.0	9.0	12.9	12.1	2.43	47	517	2700	1.3	47	224	4000	0	30	22	0.1	3.56	0.9	
50% DIKKERE UITVULLAAG	B31	2.0	3.8	8.5	8.2	1.04	47	470	2700	0.0	47	288	4000	0	30	22	0.0	1.52	0.0
	B32	2.0	5.0	9.5	9.2	1.35	47	470	2700	0.2	47	288	4000	0	30	22	0.0	1.98	0.1
	B33	2.0	6.7	10.8	10.5	1.81	47	470	2700	1.2	47	288	4000	0	30	22	0.0	2.66	0.2
	B34	2.0	7.7	11.5	11.1	2.09	47	470	2700	2.4	47	288	4000	0	30	22	0.0	3.07	0.6
	B35	2.0	8.0	13.8	12.3	2.16	47	470	2700	2.7	47	288	4000	0.0	30	22	0.0	3.16	0.8
	B36	2.0	9.1	12.6	12.2	2.46	47	470	2700	2.9	47	288	4000	0.1	30	22	0.0	3.61	1.2
	B41	4.0	4.0	8.5	8.2	1.07	47	470	2700	0.0	47	288	4000	0	30	22	0.0	1.57	0.0
	B42	4.0	5.0	9.5	9.3	1.35	47	470	2700	0.1	47	288	4000	0	30	22	0.0	1.99	0.0
	B43	4.0	6.5	10.9	10.4	1.76	47	470	2700	0.3	47	288	4000	0	30	22	0.0	2.58	0.4
	B44	4.0	7.5	11.5	11.0	2.03	47	470	2700	0.8	47	288	4000	0	30	22	0.0	2.98	0.6
B45	4.0	7.5	13.8	12.3	2.03	47	470	2700	1.1	47	288	4000	0	30	22	0.0	2.97	0.9	
B46	4.0	9.0	12.9	12.0	2.43	47	470	2700	2.0	47	288	4000	0.1	30	22	0.1	3.57	1.3	

Tabel A.3 Resultaten Variant 4 (Proevenserie B)

De vetgedrukte waarden geven aan dat de schade getallen groter zijn dan het faal criterium

\* Aantal kubussen dat voor aanvang van de proeven aanwezig was

	Test	Golfcondities op NAP -20m					Kubussen dubbele laag zeezijde					Kubussen havenzijde			Teen		OPMERKINGEN
		SWL [+m NAP]	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	$H_s/\Delta D$ [-]	Porositeit [%]	Aantal* kubussen	$\rho_{s,m}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$D_n$ [m]	$N_{od}$ [-]	Porositeit [%]	W [ton]	$N_{od}$ [-]	$H_s/\Delta D_{n50}$ [m]	$N_{od}$ [-]	
STABILITEIT	C01	0.0	4.0	8.6	8.4	1.22	47	776	4000	0.022	0.0	30	22	0.0	1.58	0.0	Veel schade aan de bodembescherming
	C02	0.0	5.1	9.6	9.4	1.58	47	776	4000	0.022	0.0	30	22	0.0	2.04	0.1	
	C03	0.0	6.8	10.9	10.7	2.08	47	776	4000	0.022	0.4	30	22	0.0	2.68	0.7	
	C04	0.0	7.7	11.6	11.2	2.36	47	776	4000	0.022	0.7	30	22	0.0	3.05	2.2	
	C05	0.0	7.9	13.8	12.5	2.42	47	776	4000	0.022	1.0	30	22	0.0	3.12	3.0	
	C06	0.0	9.1	12.8	12.2	2.81	47	776	4000	0.022	2.2	30	22	0.0	3.63	4.1	
	C11	2.0	3.9	8.6	8.1	1.18	47	776	4000	0.022	0.0	30	22	0.0	1.53	0.0	Bodembescherming vastgelegd
	C12	2.0	5.0	9.5	9.2	1.52	47	776	4000	0.022	0.1	30	22	0.0	1.97	0.1	
	C13	2.0	6.7	10.8	10.5	2.05	47	776	4000	0.022	0.6	30	22	0.0	2.64	0.4	
	C14	2.0	7.7	11.5	11.2	2.37	47	776	4000	0.022	1.6	30	22	0.0	3.06	0.7	
	C15	2.0	8.0	13.8	12.2	2.45	47	776	4000	0.022	1.6	30	22	0.0	3.16	0.9	
	C16	2.0	9.1	12.6	12.2	2.81	47	776	4000	0.022	1.8	30	22	0.0	3.62	1.0	
	C21	4.0	4.0	8.5	8.2	1.22	47	776	4000	0.022	0.0	30	22	0.0	1.57	0.0	Bodembescherming vastgelegd
	C22	4.0	5.1	9.5	9.3	1.56	47	776	4000	0.022	0.0	30	22	0.0	2.01	0.0	
C23	4.0	6.6	10.8	10.4	2.03	47	776	4000	0.022	0.3	30	22	0.0	2.62	0.3		
C24	4.0	7.6	11.5	11.0	2.34	47	776	4000	0.022	0.4	30	22	0.0	3.02	0.6		
C25	4.0	7.6	13.7	12.3	2.33	47	776	4000	0.022	0.6	30	22	0.0	3.00	0.8		
C26	4.0	9.1	12.8	12.0	2.79	47	776	4000	0.022	1.1	30	22	0.1	3.61	0.5		

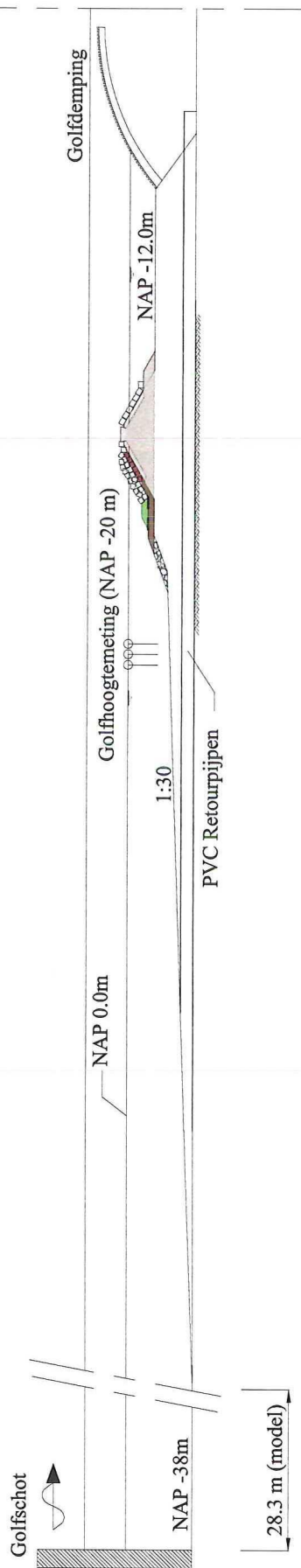
Tabel A.4 Resultaten Variant 4b (Proevenserie B)

De vetgedrukte waarden geven aan dat de schade getallen groter zijn dan het faalcriterium

\* Aantal kubussen dat voor aanvang van de proeven aanwezig was op het talud en op de kruin

## **B Figuren**





Modelopstelling IJmuiden

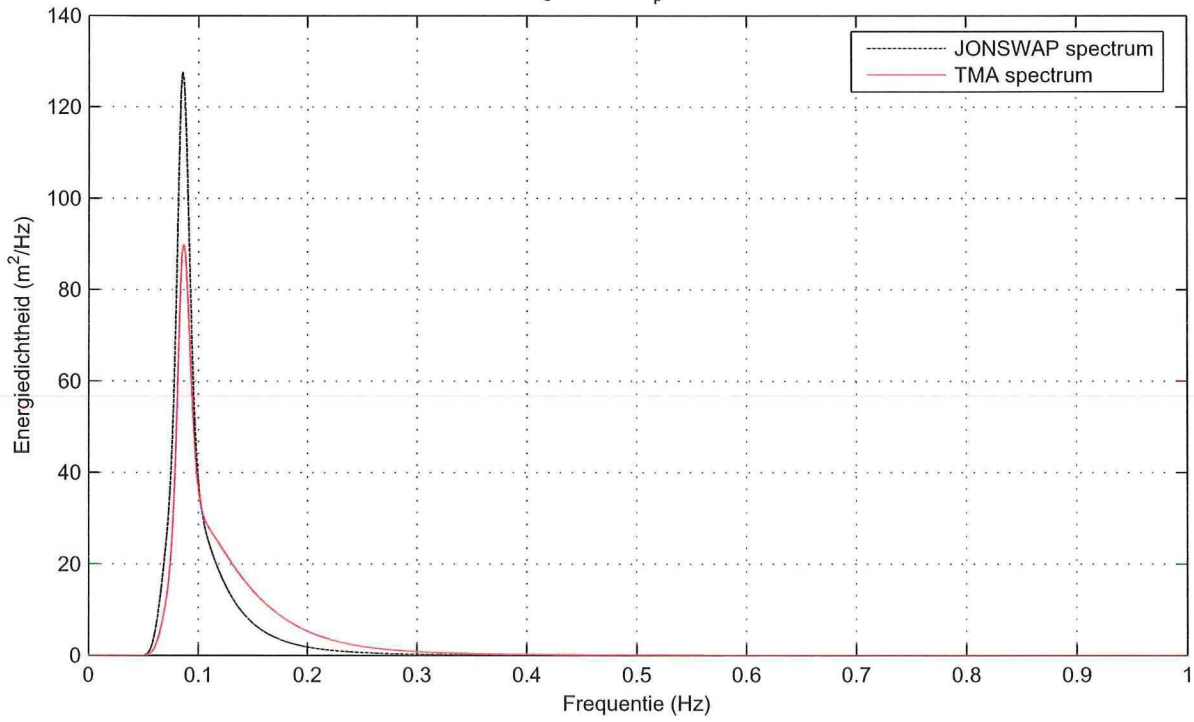
Proevenserie B

WL| Delft Hydraulics

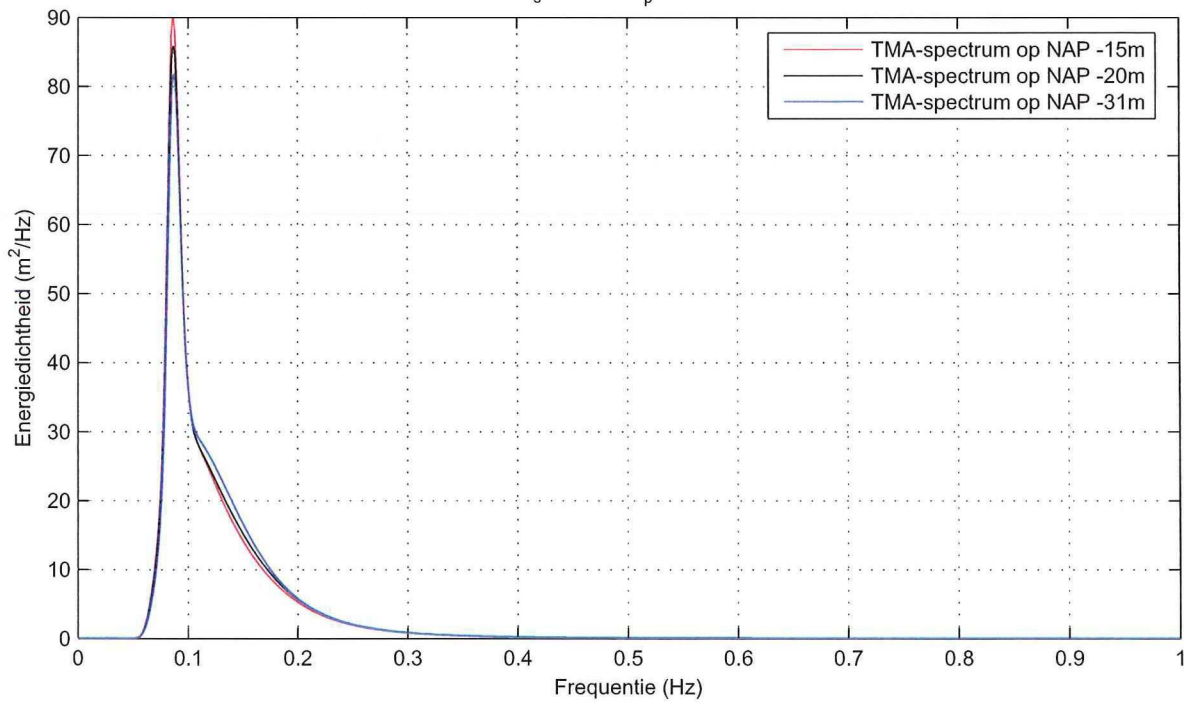
H4648

FIG. B.1

$H_s = 7.5 \text{ m}$ ,  $T_p = 11.7 \text{ s}$  op NAP -20 m dieptelijn

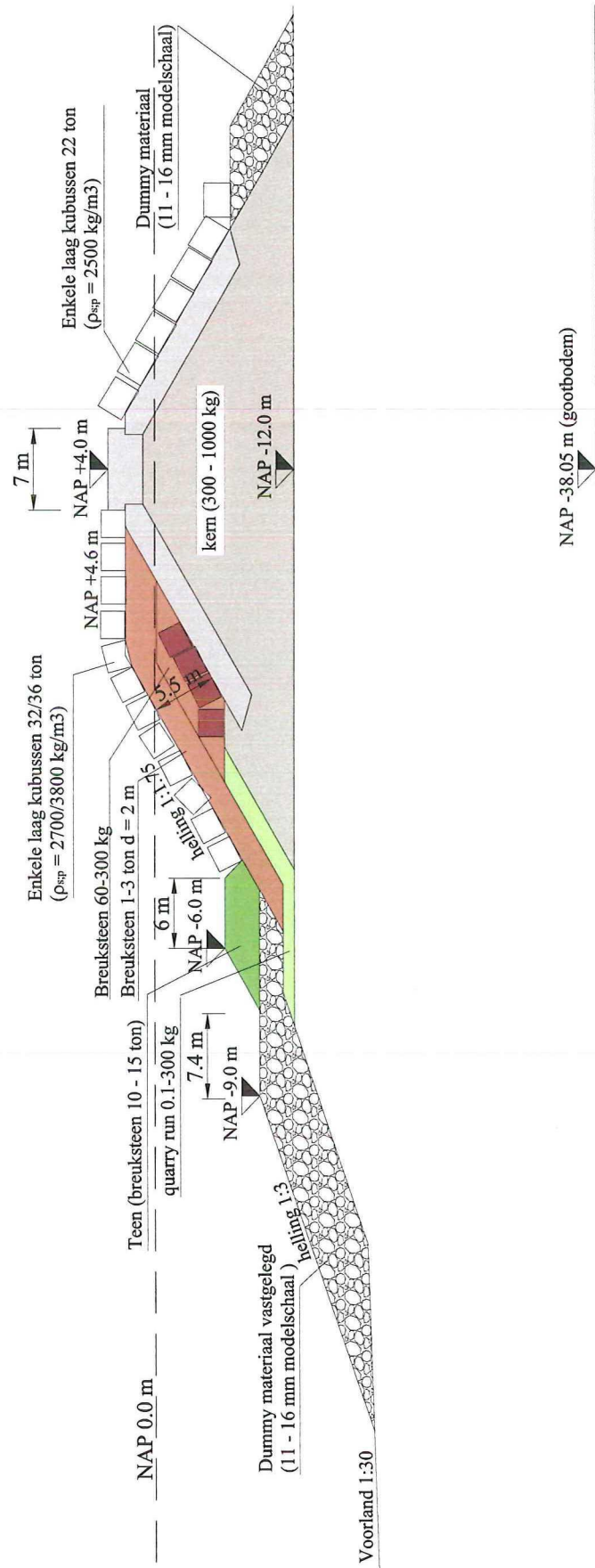


$H_s = 7.5 \text{ m}$ ,  $T_p = 11.7 \text{ s}$



Vergelijking gebruikte energiedichtheidspectra

Waterstand NAP +0.00 m



Modelconstructie voor Overlagingsvariant 3b  
Proevenserie B

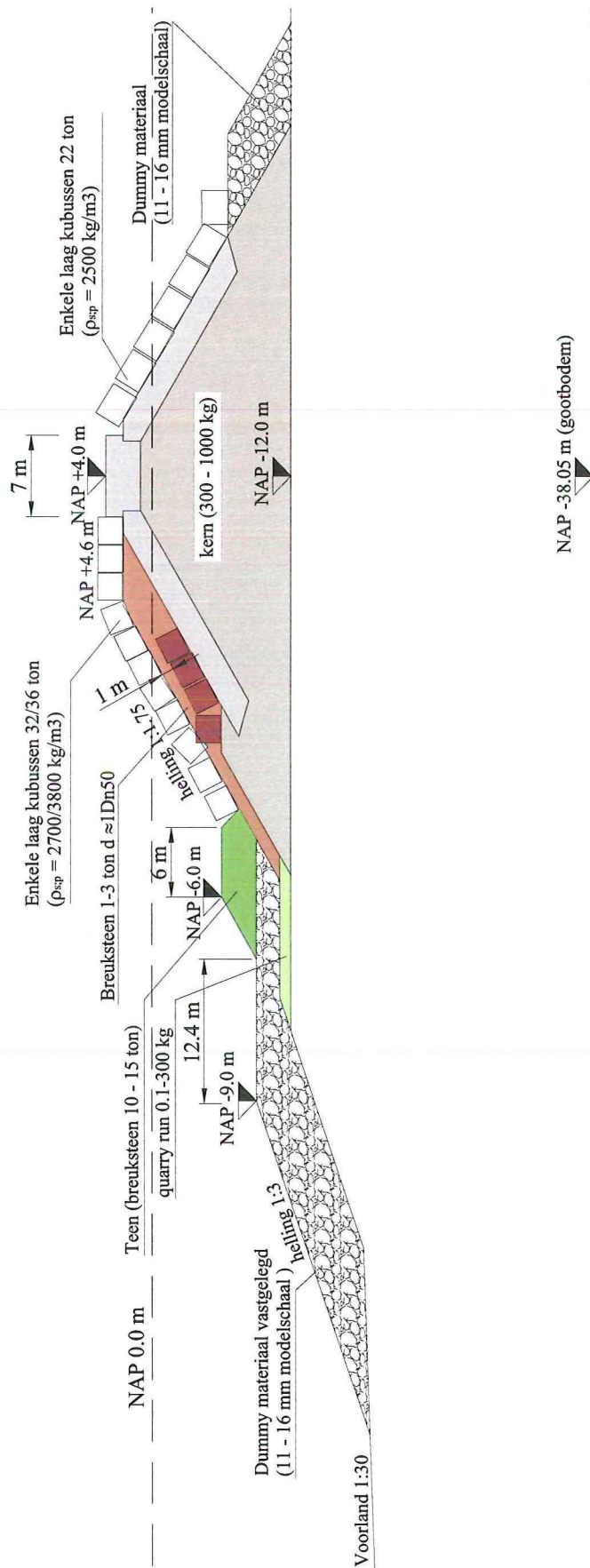
Variant 3b

WLJ Delft Hydraulics

H4648

FIG. B.3

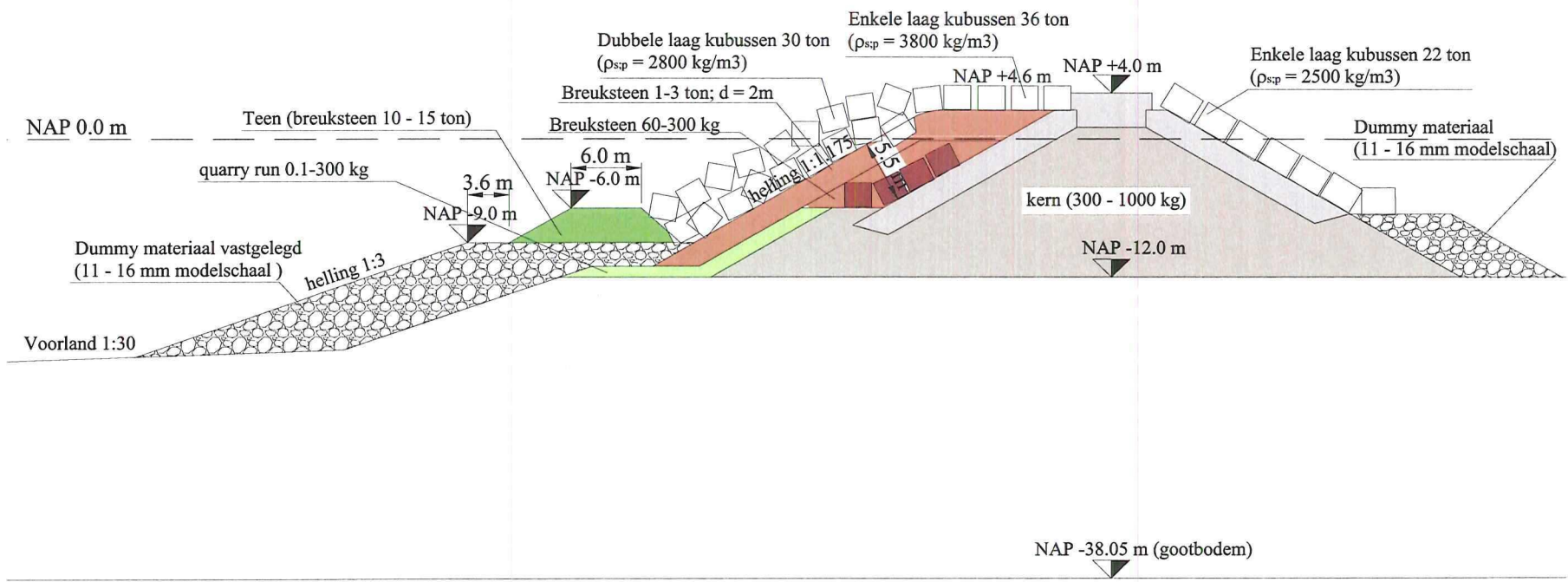




Modelconstructie voor Overlagingsvariant 3b  
dunnere uitvullaag (d = 1Dn50) voor Proevenserie B

Variant 3b

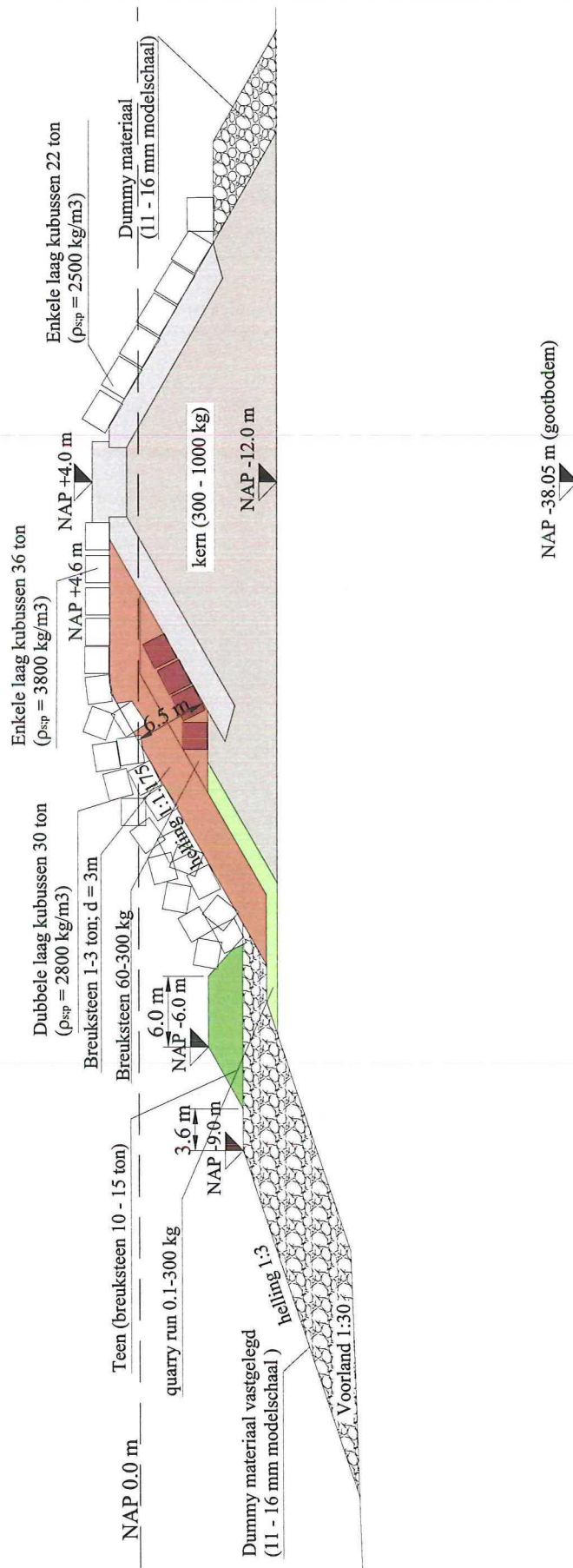
Modelconstructie voor Overlagingsvariant 4  
Proevenserie B



H4648

Variant 4

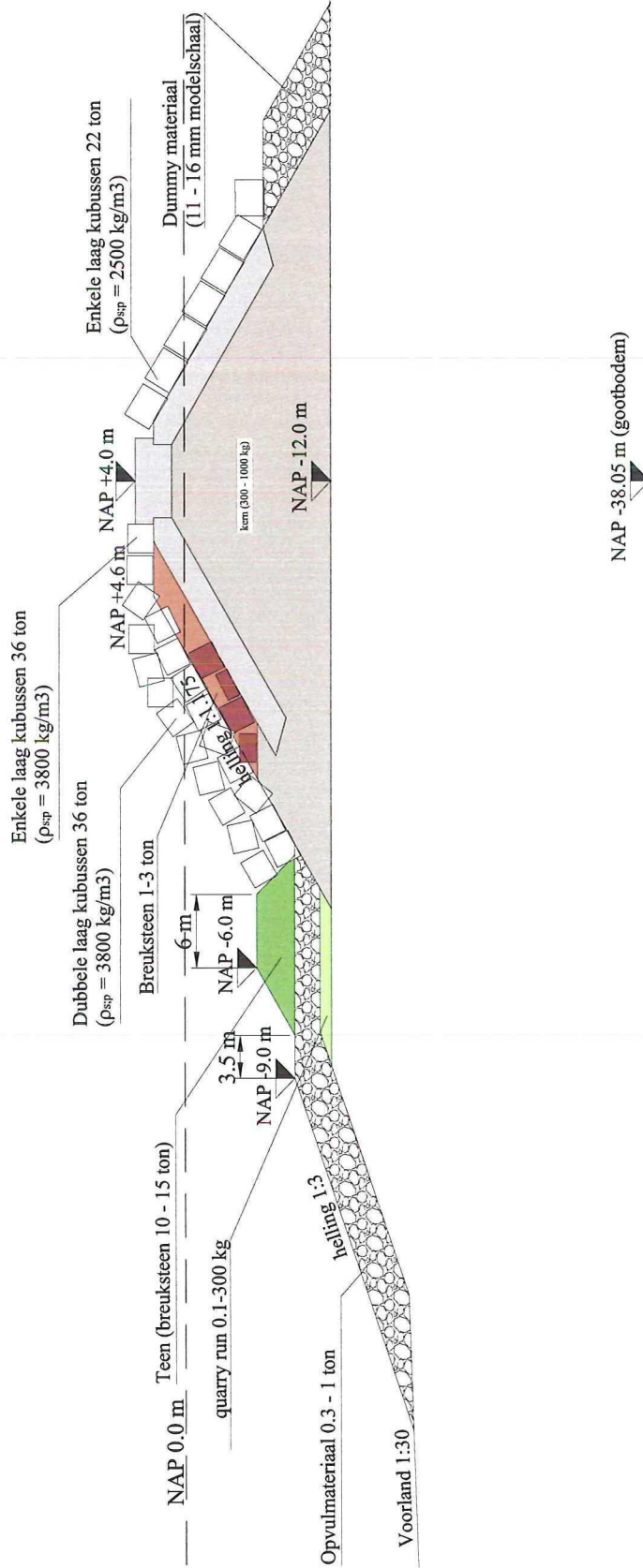
FIG. B.5



Modelconstructie voor Overlagingsvariant 4  
50% dikkere uitvulling (d = 3 m) voor Proevenserie B

Variant 4





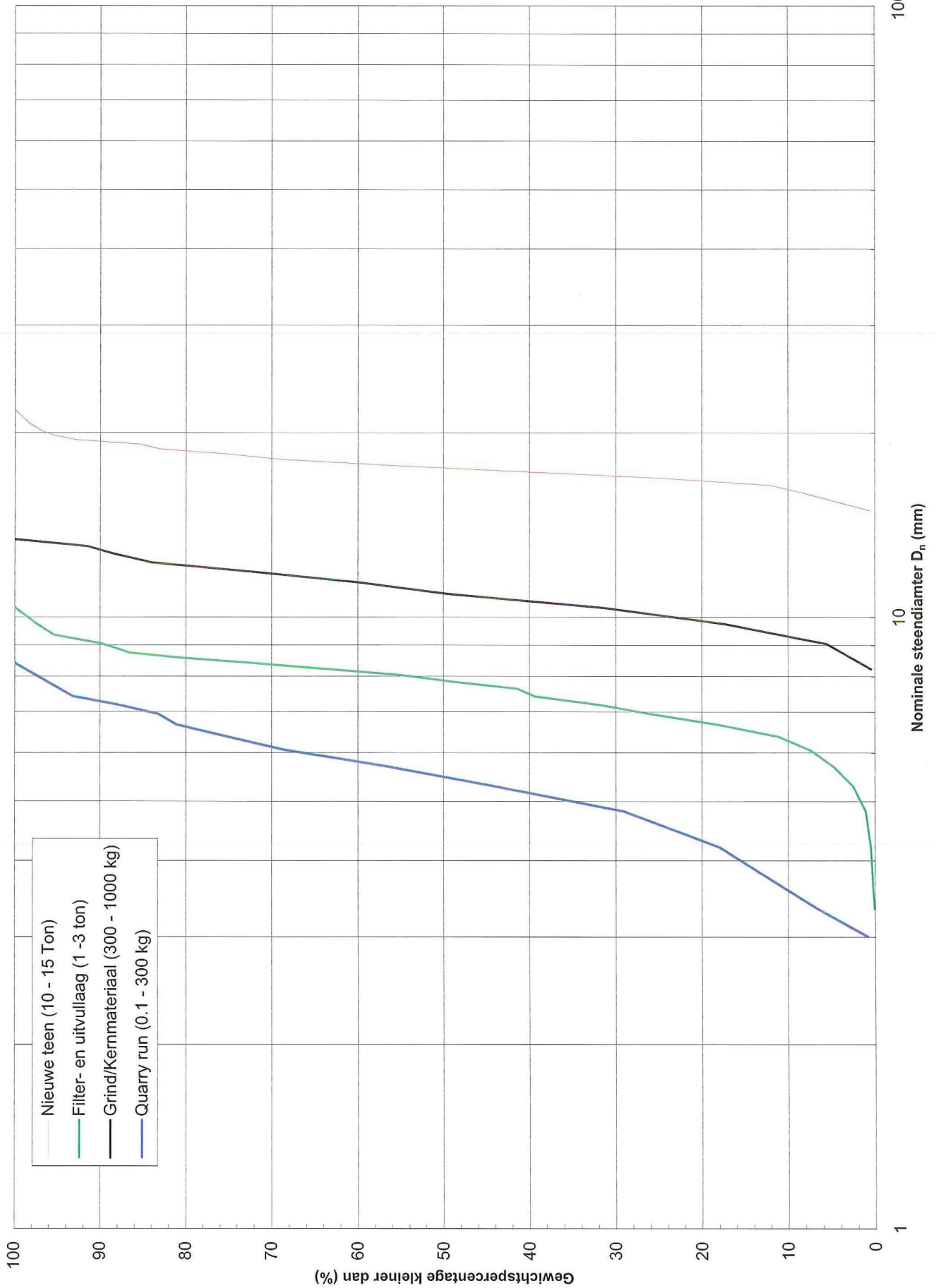
Modelconstructie voor Overlagingsvariant 4b  
Proevenserie B

Variant 4b

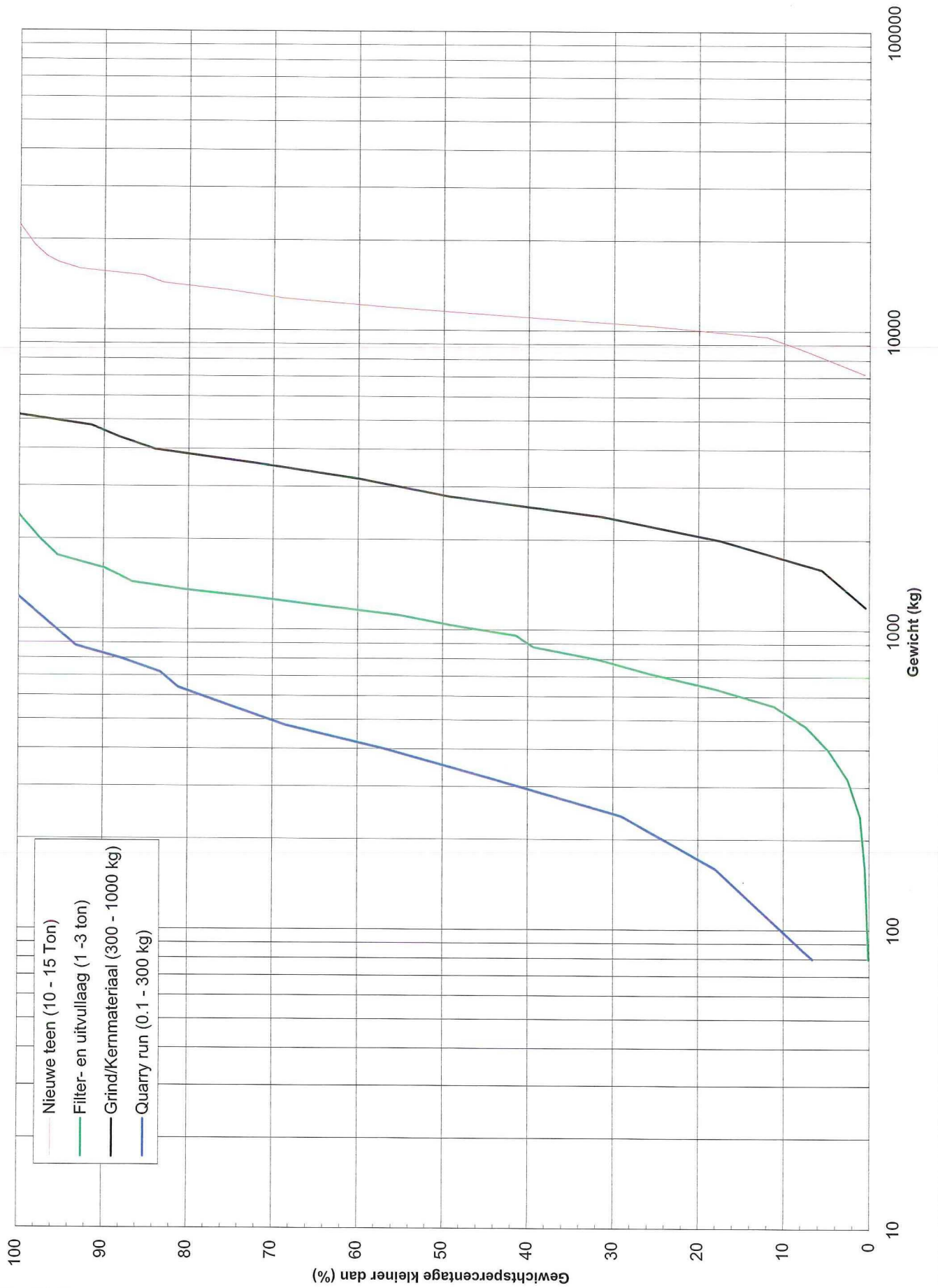
WL| Delft Hydraulics

H4648

FIG. B.7

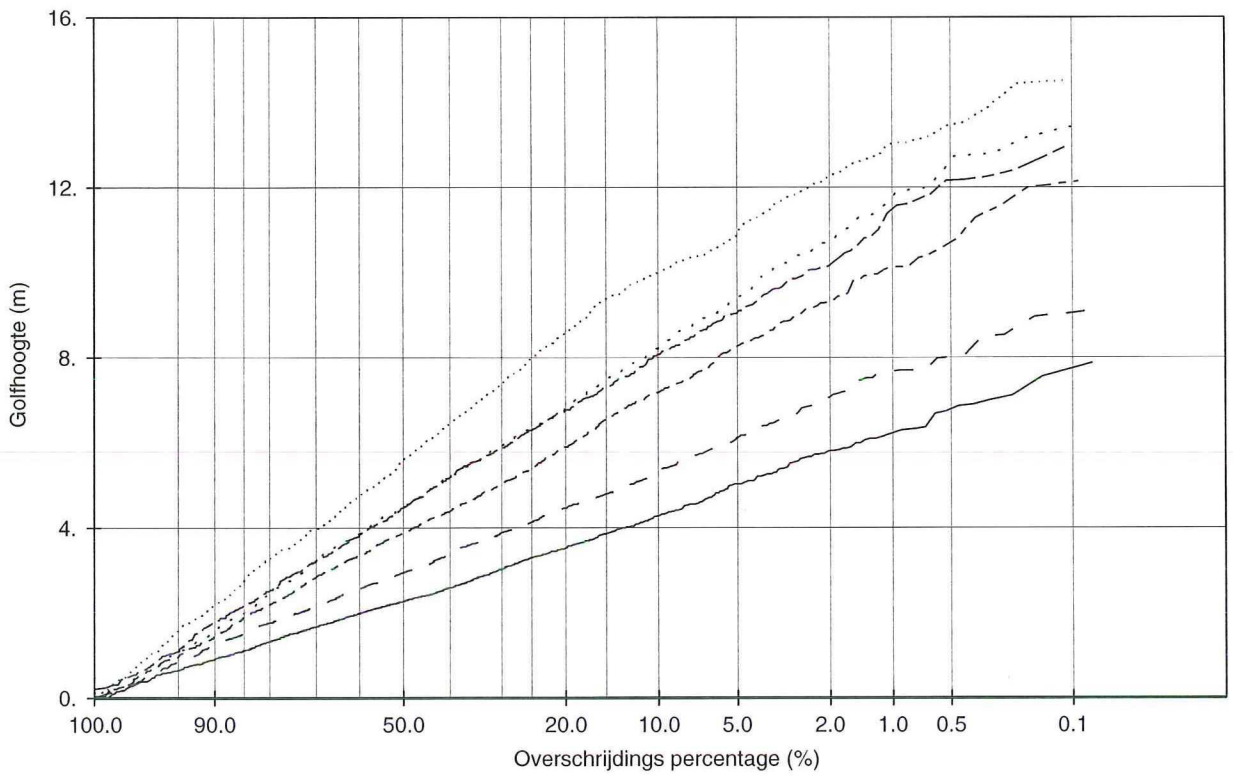


Zeeffrommes gebruikte steenmaterialen voor Proevenserie B  
(modelmaten)

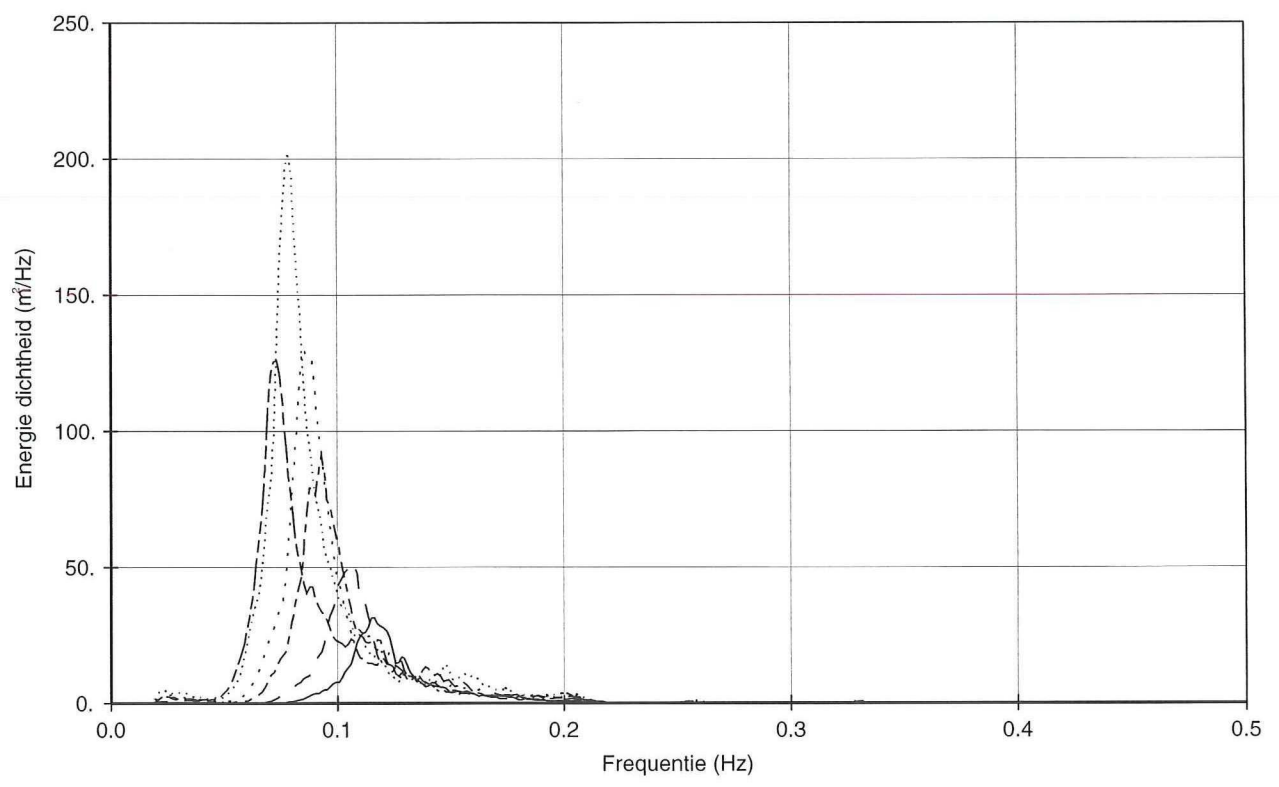


Zeefkrommes gebruikte steenmaterialen voor Proevenserie B



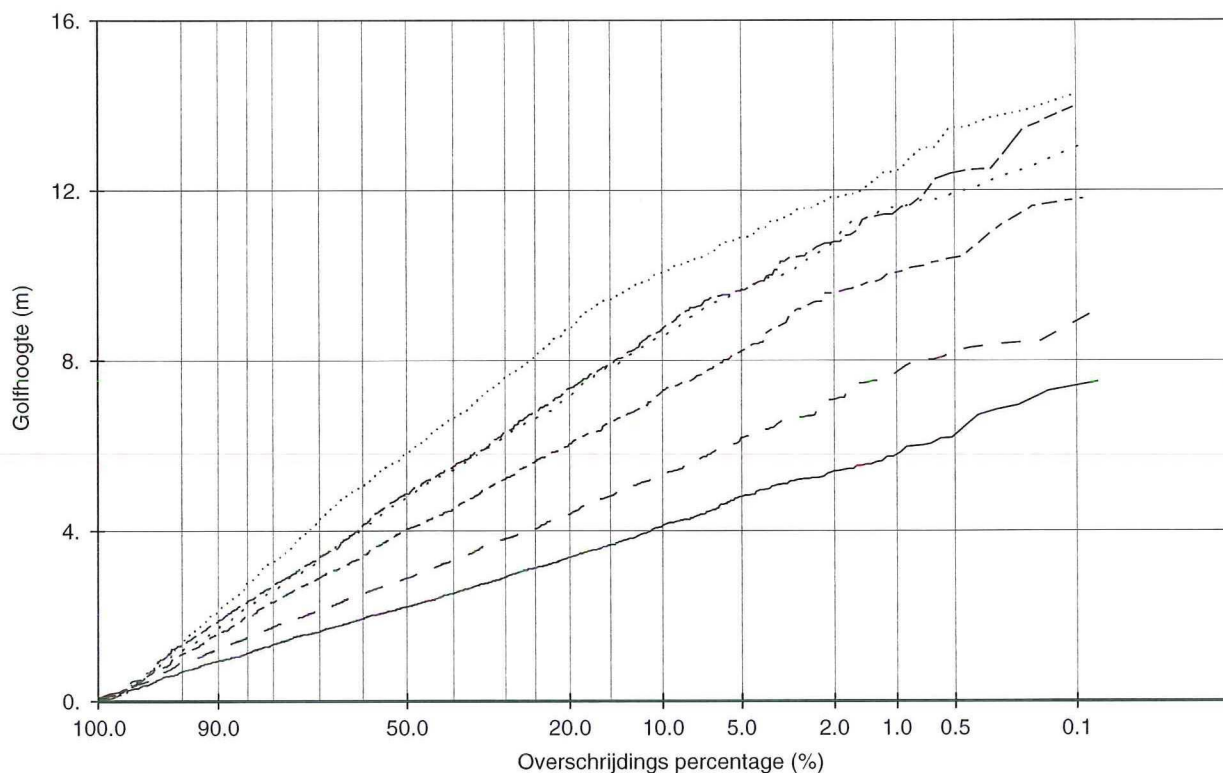


- A31
- - - A32
- - - A33
- ..... A34
- - - A35
- ..... A36

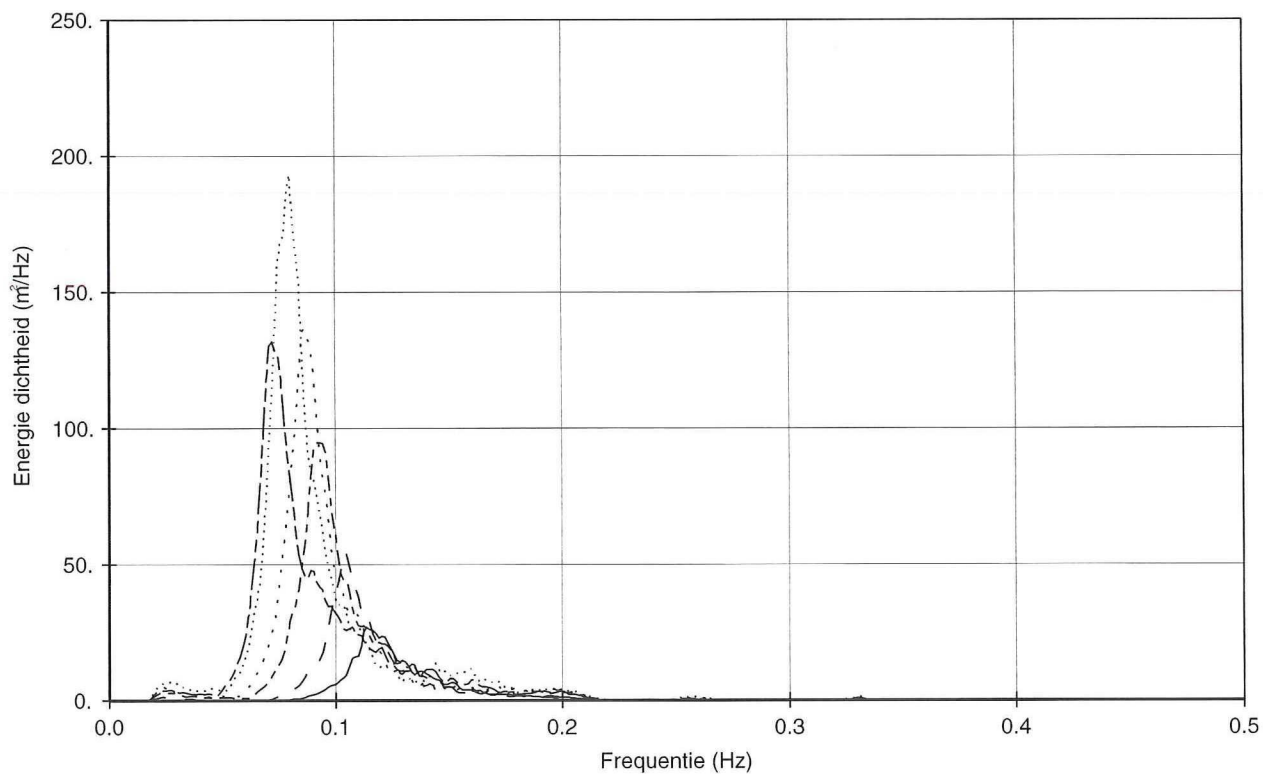


GOLFHOOGTE OVERSCHRIJDINGSKROMMES EN  
ENERGIE DICHTHEIDSSPECTRA (OP NAP-20 m LIJN)

waterstand NAP+4.0 m

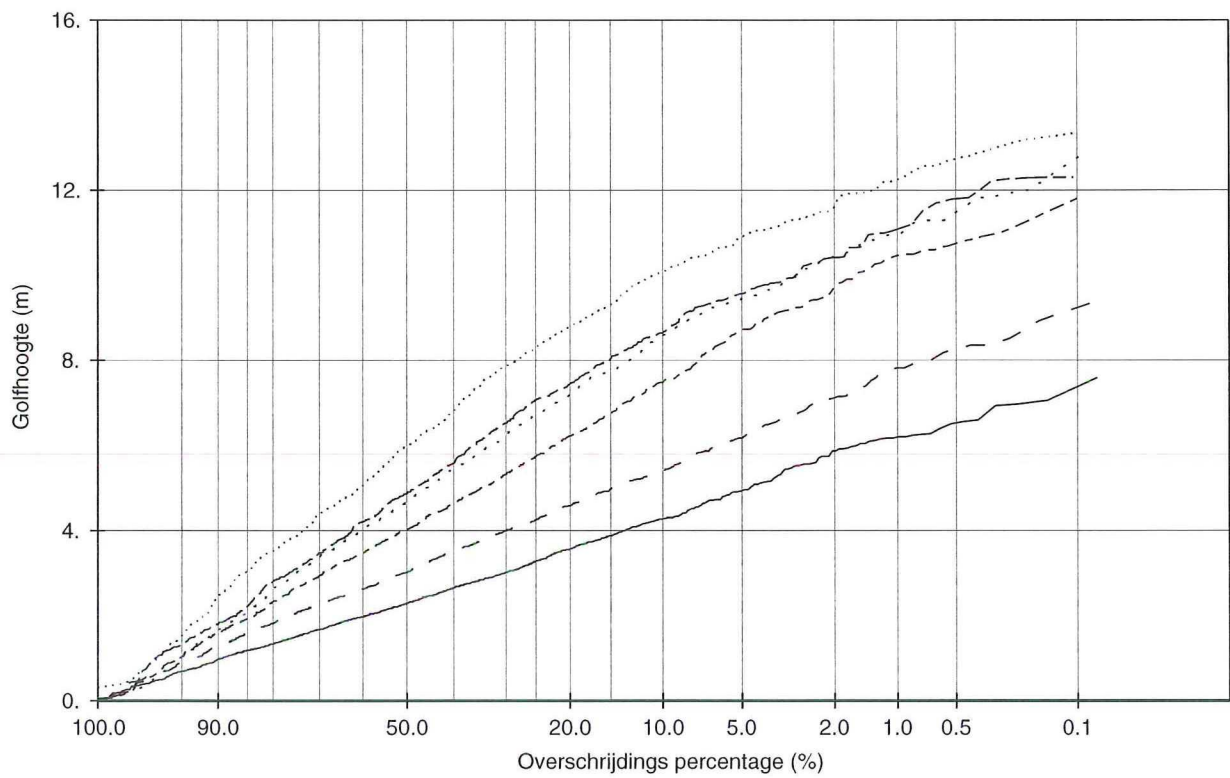


- A11
- - - A12
- - - A13
- ..... A14
- - - A15
- ..... A16

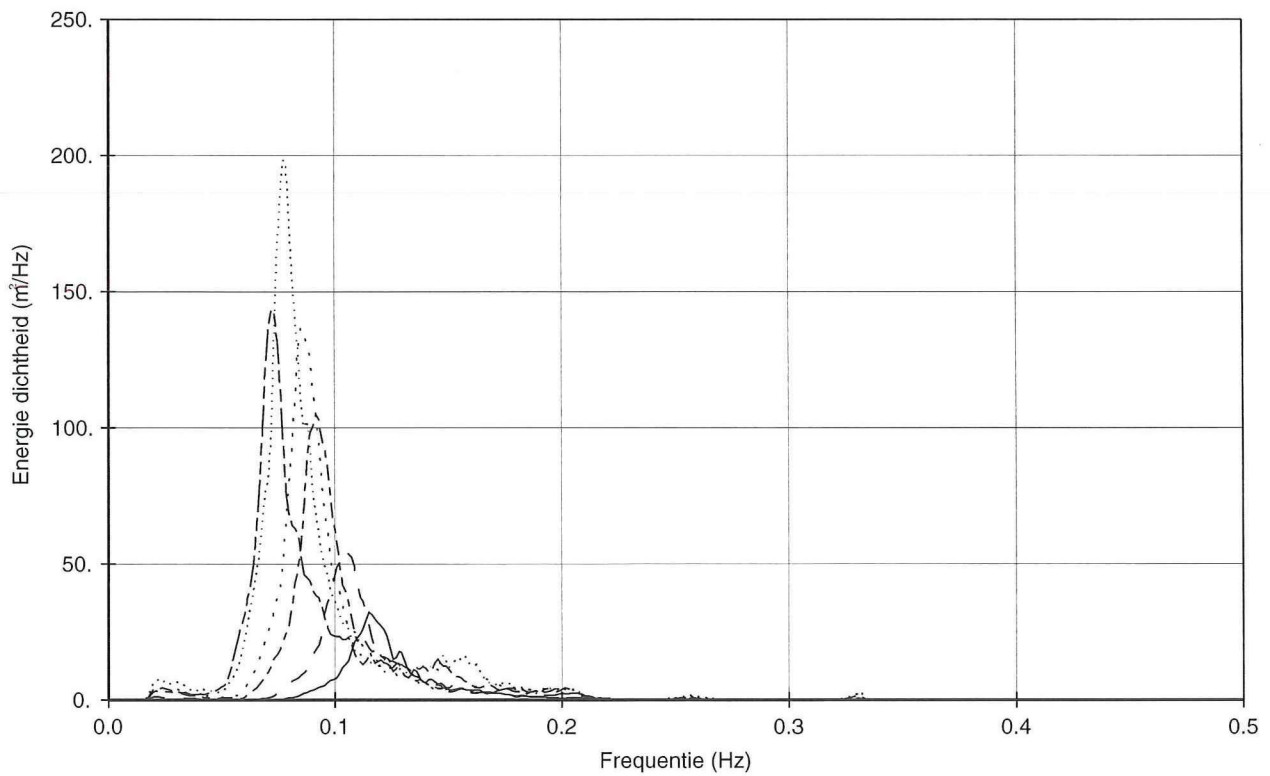


GOLFHOOGTE OVERSCHRIJDINGSKROMMES EN  
ENERGIE DICHTHEIDSSPECTRA (OP NAP-20 m LIJN)

waterstand NAP+2.0 m



- A21
- - - A22
- - - A23
- ..... A24
- - - A25
- ..... A26

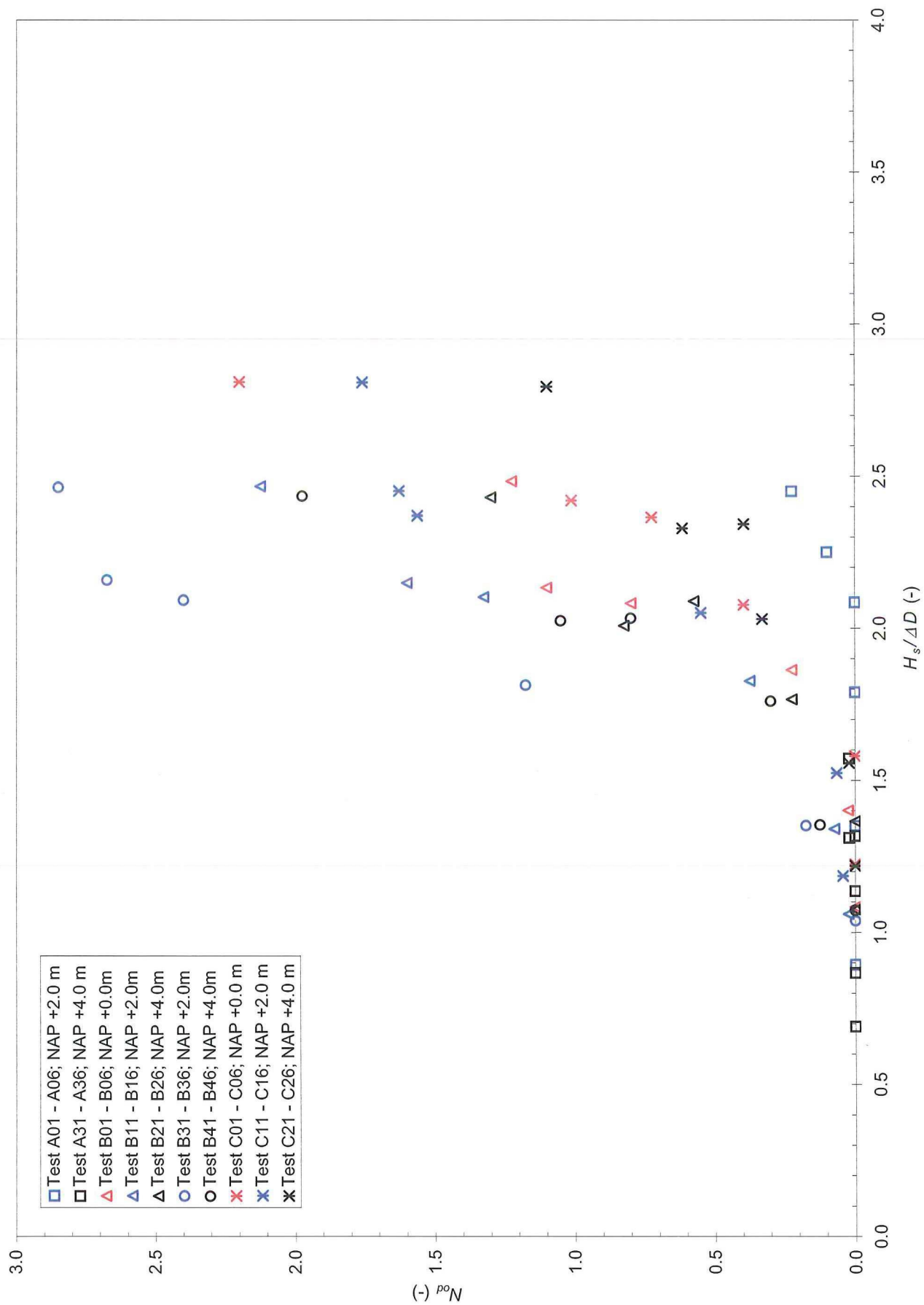


GOLFHOOGTE OVERSCHRIJDINGSKROMMES EN  
ENERGIE DICHTHEIDSSPECTRA (OP NAP-20 m LIJN)

waterstand NAP+0.0 m



Variant 4 + Variant 4b; STABILITEIT KUBUSSEN



Stabiliteit van de dubbele laag kubussen

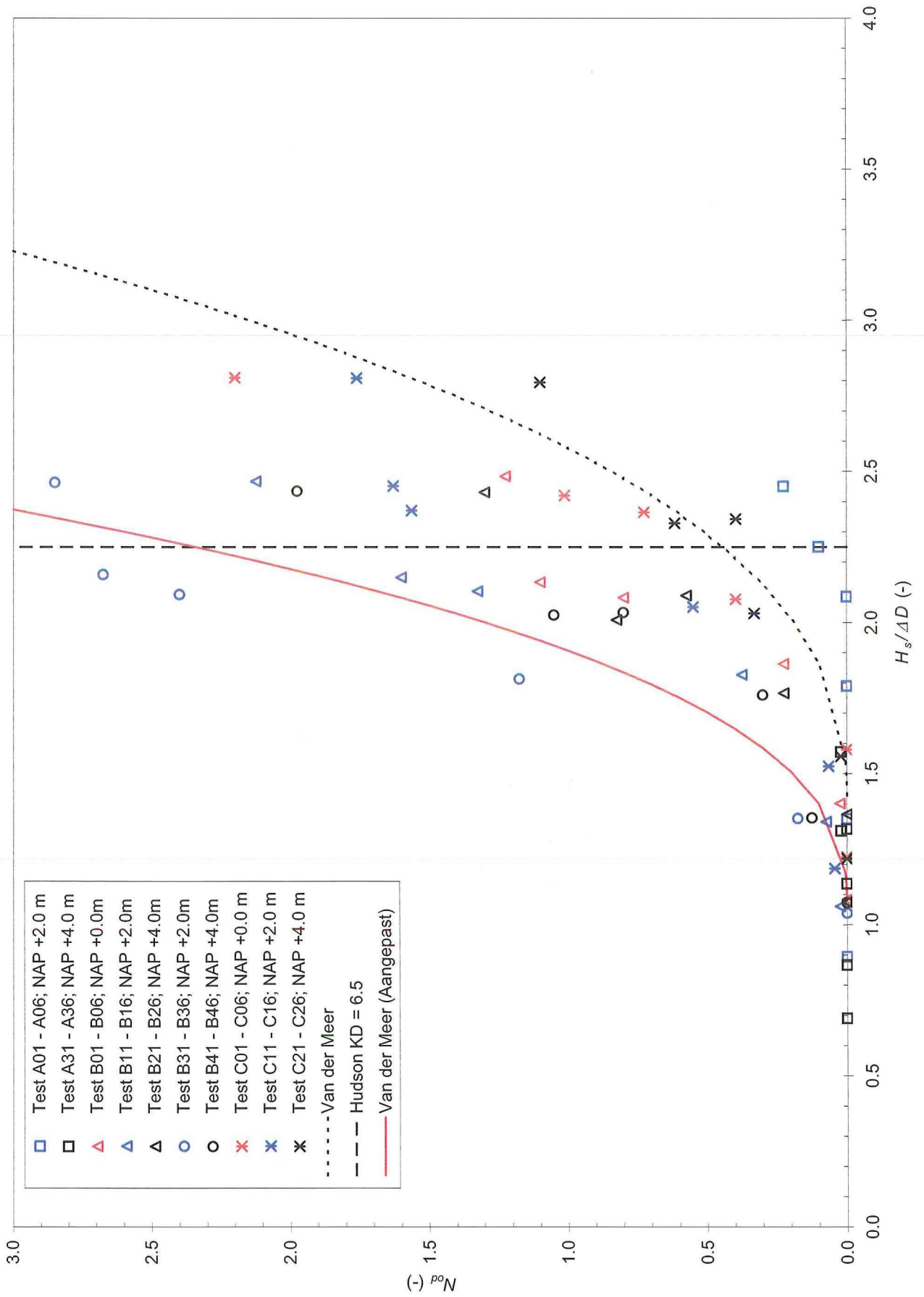
Variant 4 en Variant 4b

WL | Delft Hydraulics

H4648

FIG. B.12

Variant 4 + Variant 4b; STABILITEIT KUBUSSEN



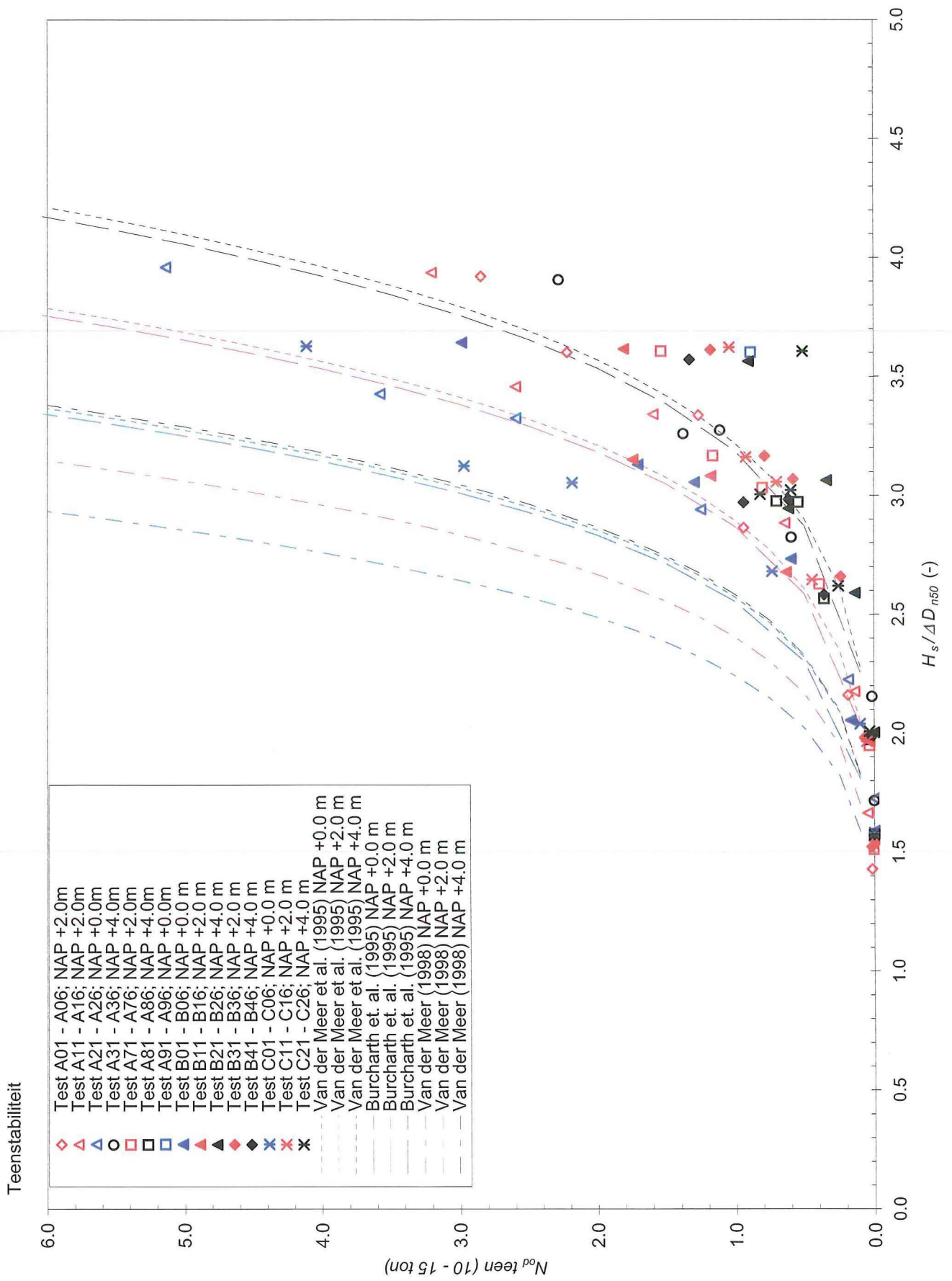
Stabiliteit van de dubbele laag kubussen

Variant 4 en Variant 4b

WL | Delft Hydraulics

H4648

FIG. B.13



Stabiliteit van de stenen op de teen

Proevenserie B

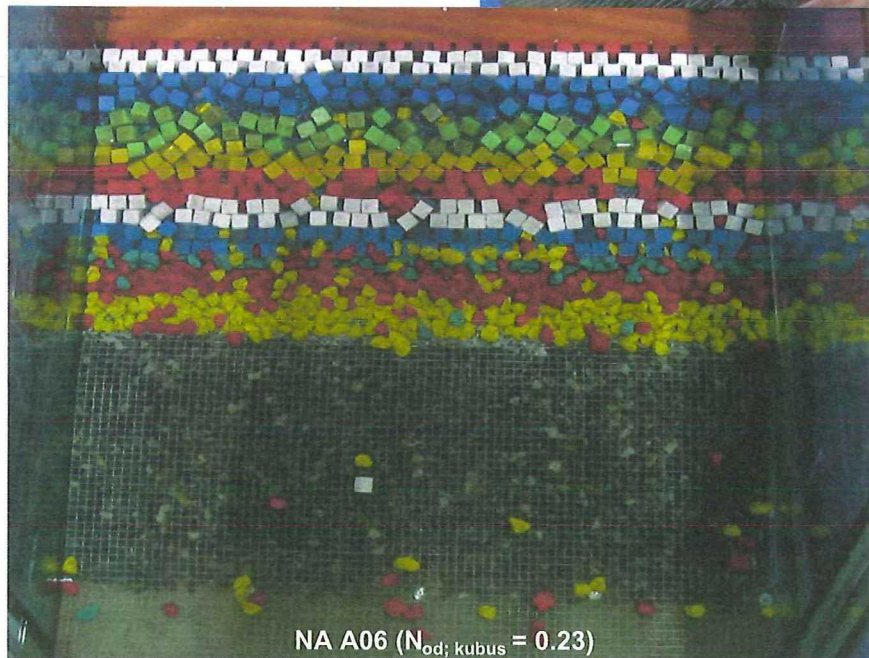
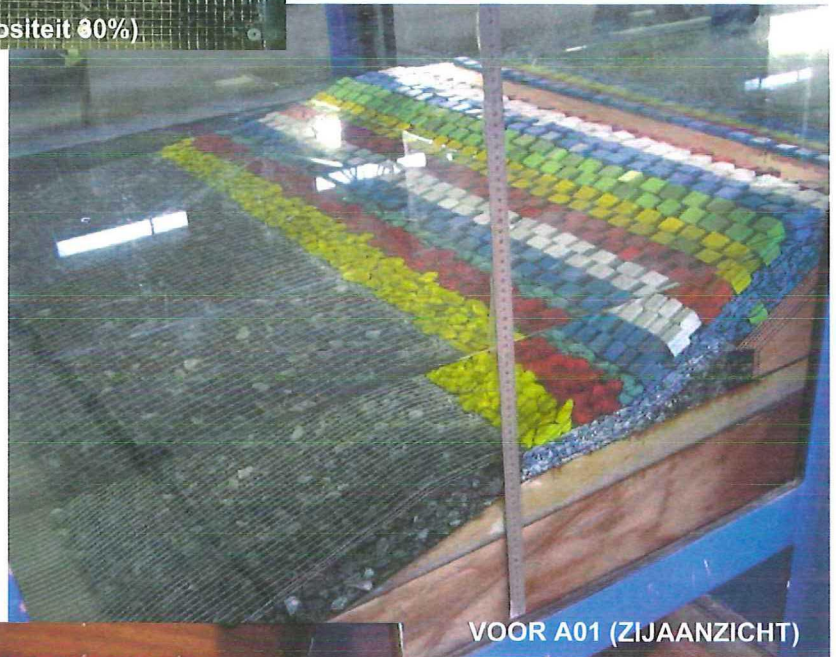
WL | Delft Hydraulics

H4648

FIG. B.14



## **C Foto's**



Stabiliteit van de constructie voor serie  
 A01 - A06

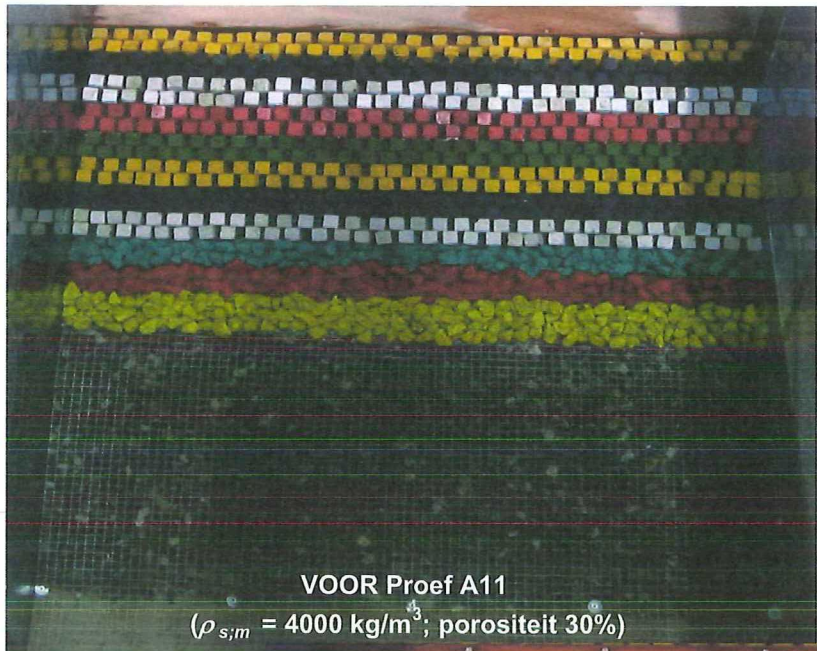
VARIANT 3b

WL | Delft Hydraulics

H4648

Foto C.1



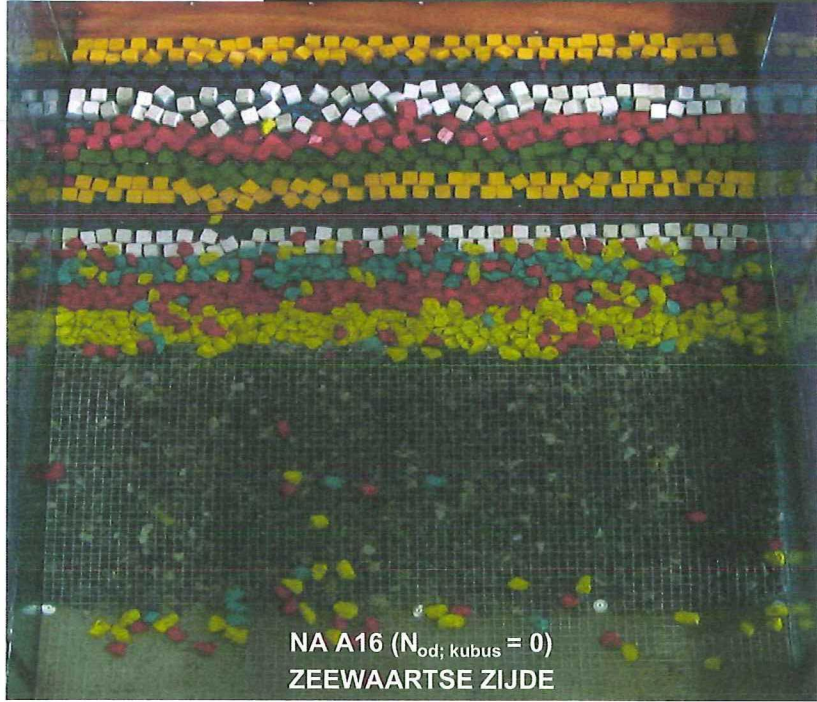


VOOR Proef A11  
 ( $\rho_{s,m} = 4000 \text{ kg/m}^3$ ; porositeit 30%)



TEENMATERIAAL (ZEEZIJDE)

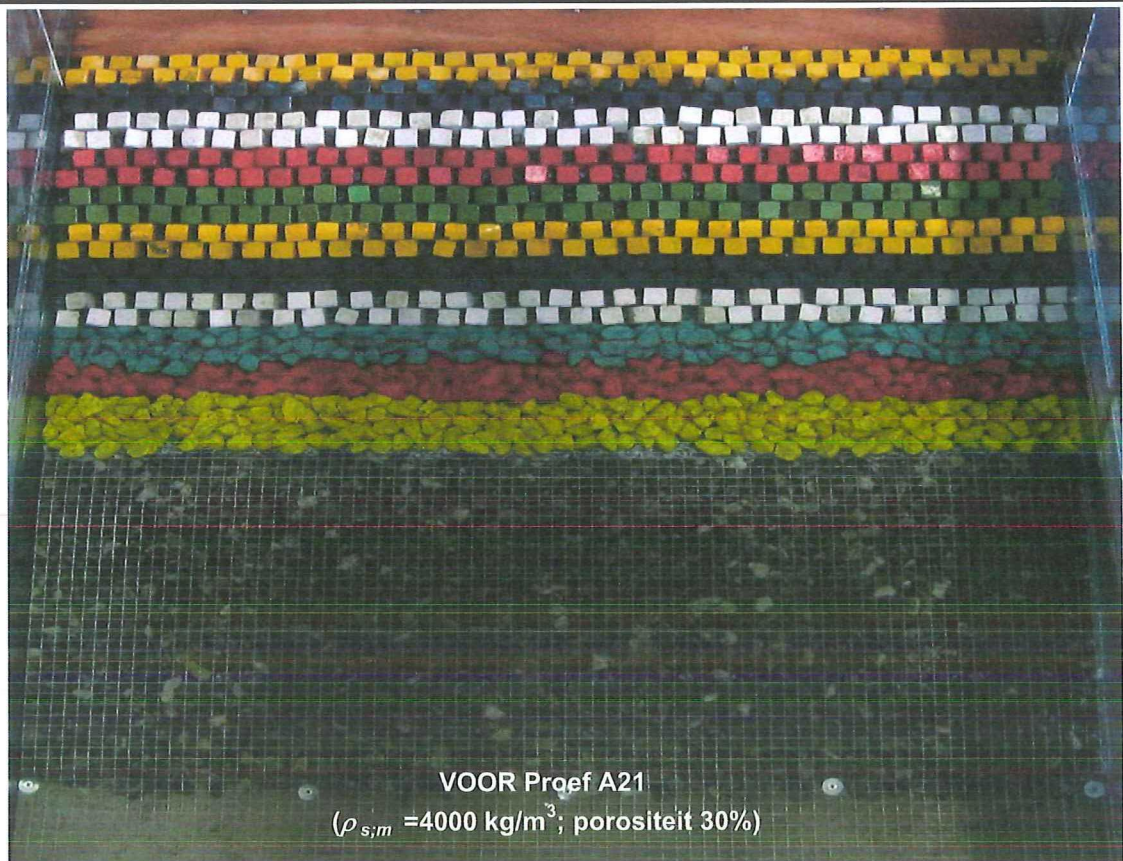
NA A16  
 HAVENZIJDE



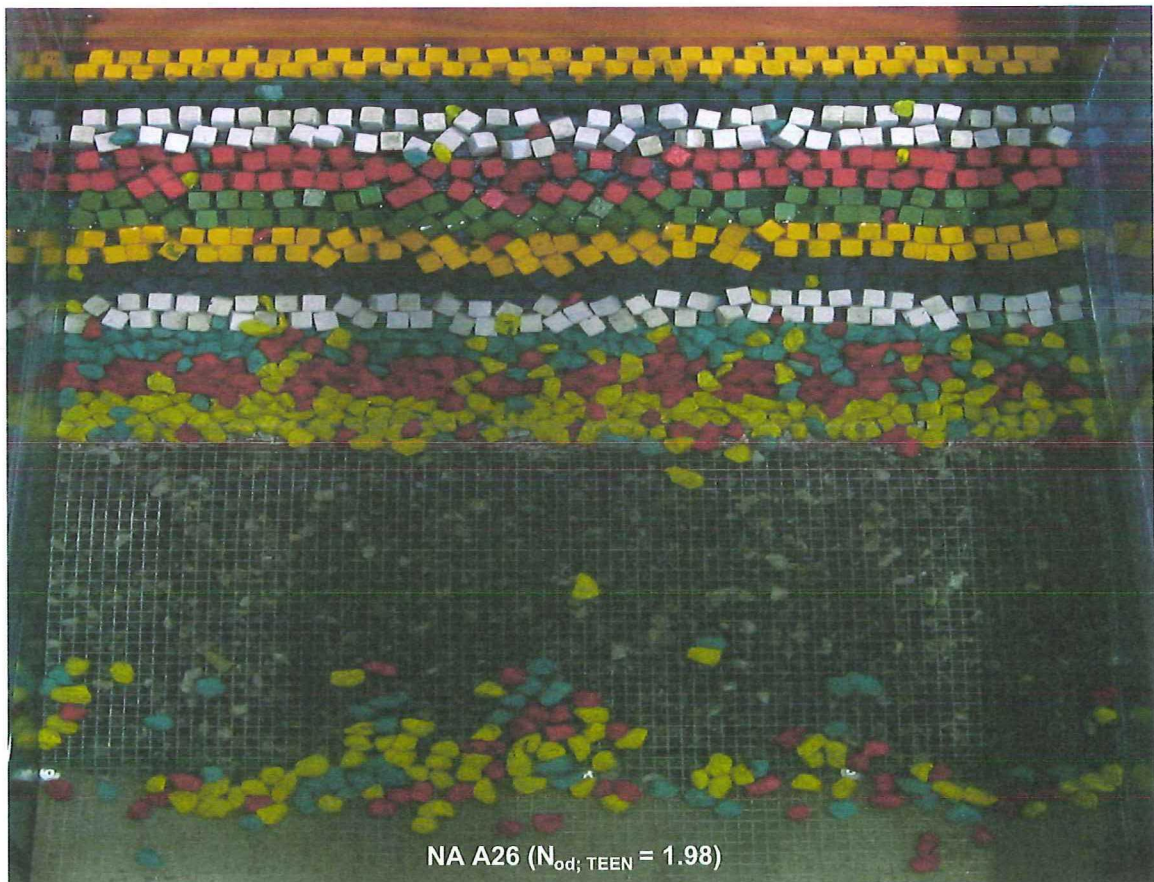
NA A16 ( $N_{od; kubus} = 0$ )  
 ZEEWAARTSE ZIJDE

Stabiliteit van de constructie voor serie A11 - A16		
	VARIANT 3b	
<b>WL   Delft Hydraulics</b>	H4648	Foto C.2





VOOR Proef A21  
 ( $\rho_{s,m} = 4000 \text{ kg/m}^3$ ; porositeit 30%)



NA A26 ( $N_{od, TEEN} = 1.98$ )

Stabiliteit van de constructie voor serie  
 A21 - A26

VARIANT 3b

WL | Delft Hydraulics

H4648

Foto C.3

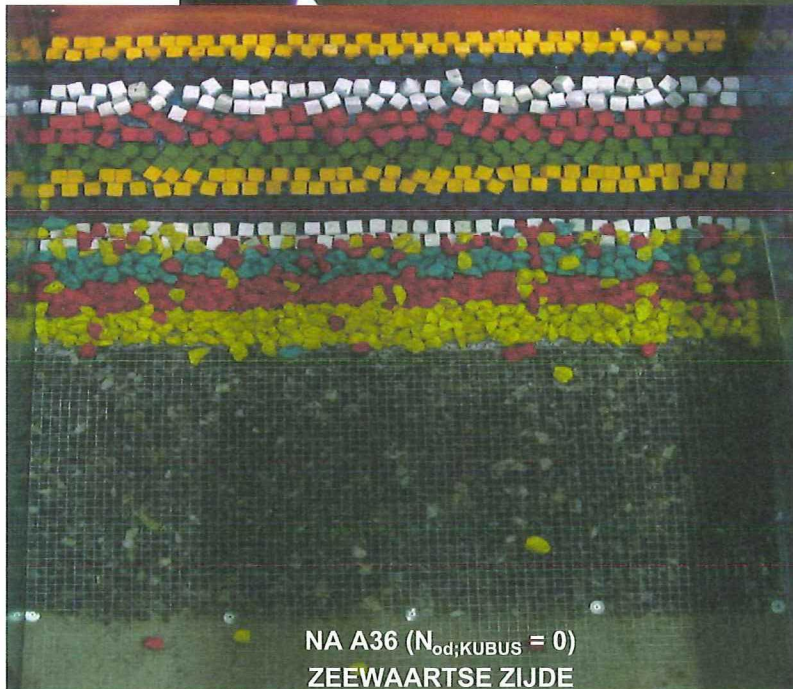




VOOR A31 porositeit = 30%  
(ZEEWAARTSE ZIJDE)



NA A36 ( $N_{od;KUBUS} = 0.63$ )  
HAVENZIJDE



NA A36 ( $N_{od;KUBUS} = 0$ )  
ZEEWAARTSE ZIJDE

Stabiliteit van de constructie voor serie  
A31 - A36

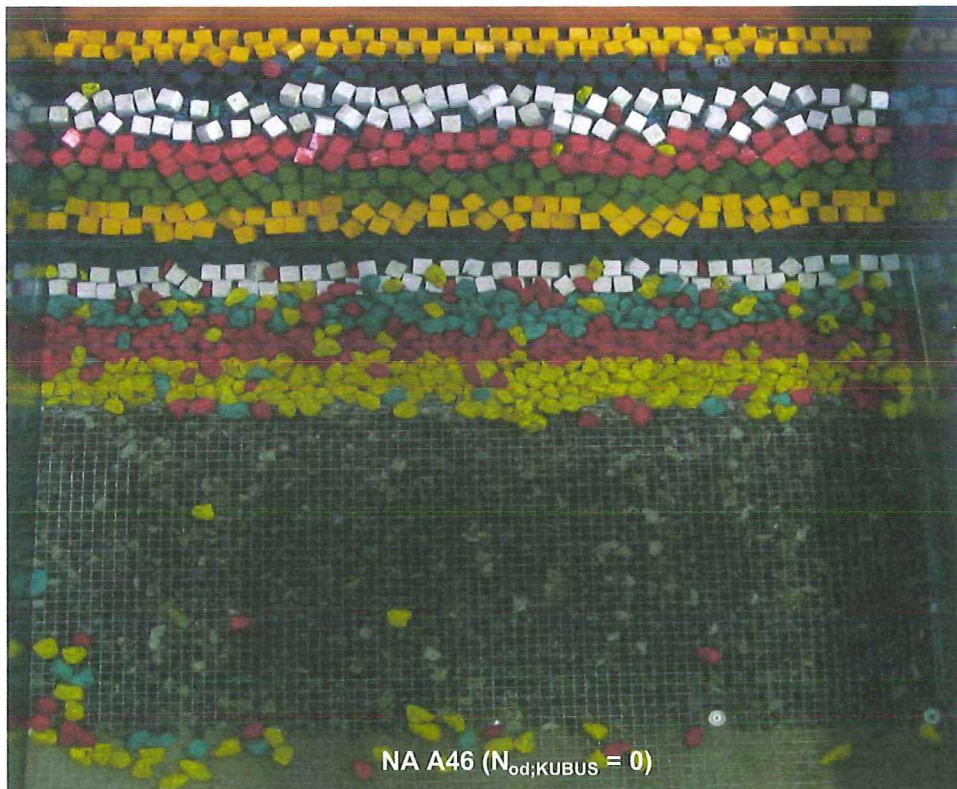
VARIANT 3b

WL | Delft Hydraulics

H4648

Foto C.4





Stabiliteit van de constructie voor serie  
A41 - A46

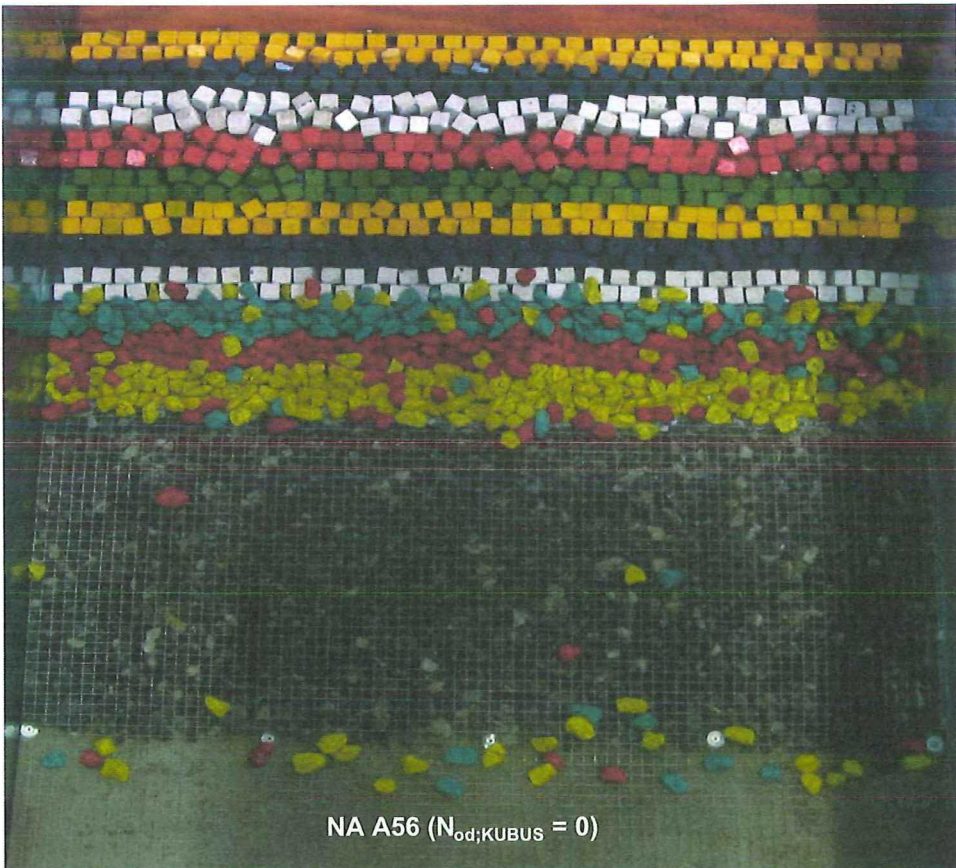
VARIANT 3b

WL | Delft Hydraulics

H4648

Foto C.5





Stabiliteit van de constructie voor serie A51 - A56		
	VARIANT 3b	
<b>WL   Delft Hydraulics</b>	H4648	Foto C.6

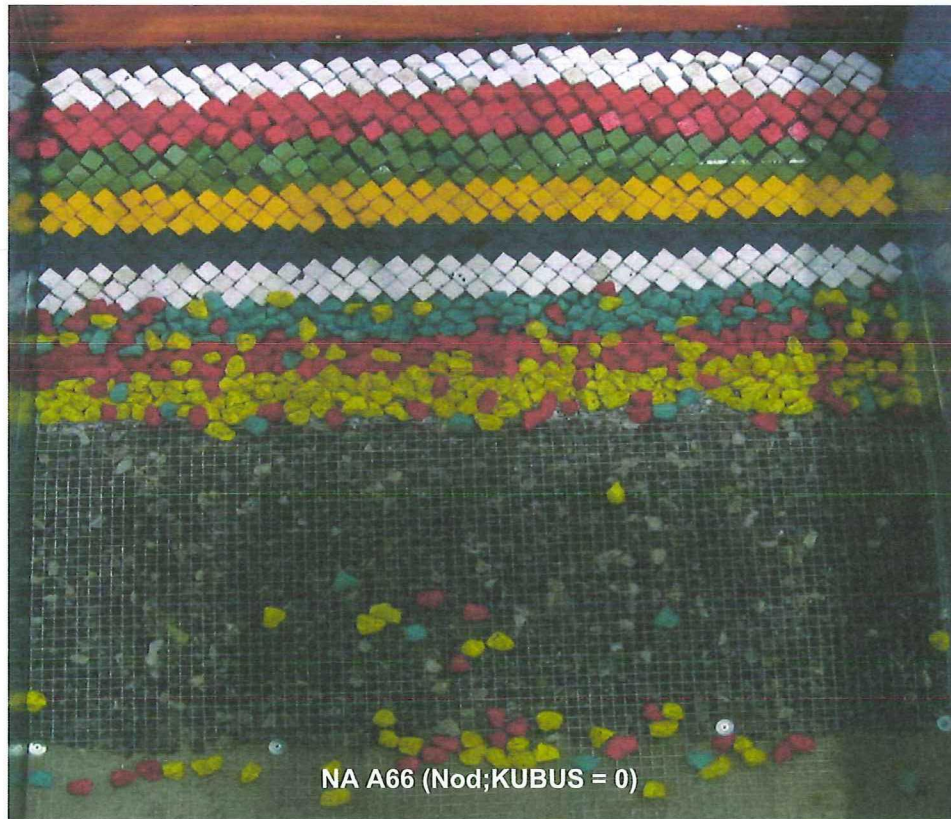




VOOR A61 (WYBERTJESPATROON)



DETAIL AANSLUITING KRUIJN VOOR AANVANG TESTEN



NA A66 (Nod;KUBUS = 0)

Stabiliteit van de constructie voor serie  
A61 - A66

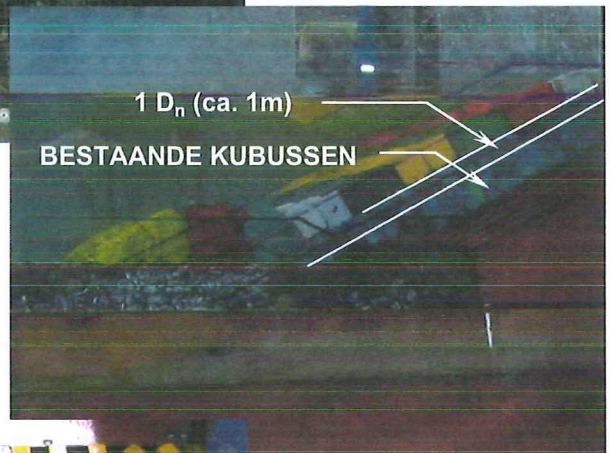
VARIANT 3b

WL | Delft Hydraulics

H4648

Foto C.7





Stabiliteit van de constructie voor serie  
A71 - A76

VARIANT 3b

WL | Delft Hydraulics

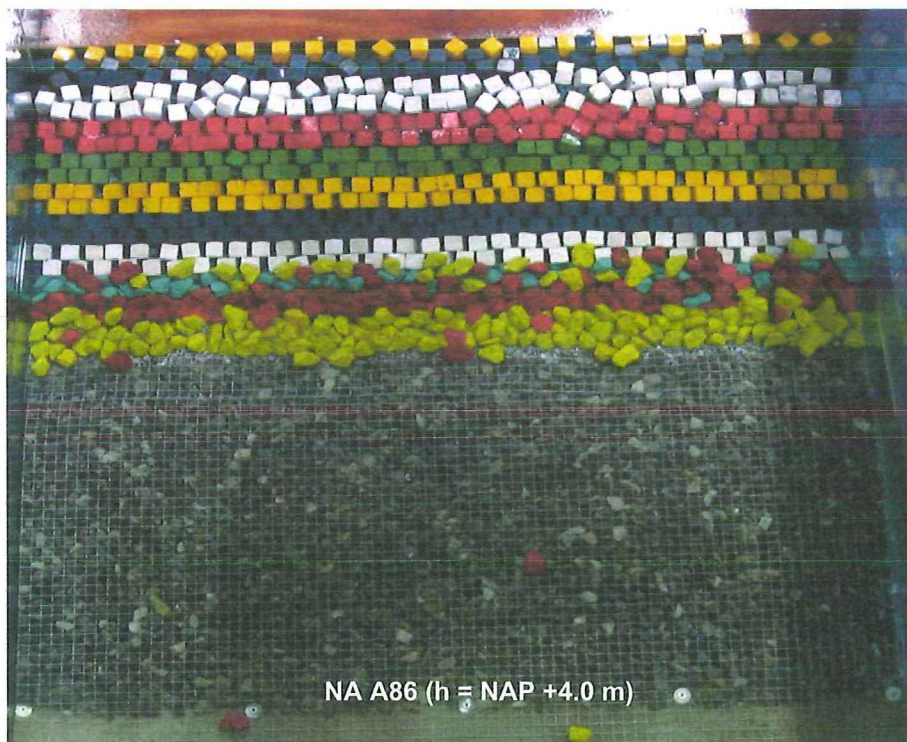
H4648

Foto C.8





VOOR A81 (DUNNE UITVULLAAG)



NA A86 (h = NAP +4.0 m)

Stabiliteit van de constructie voor serie  
A81 - A86

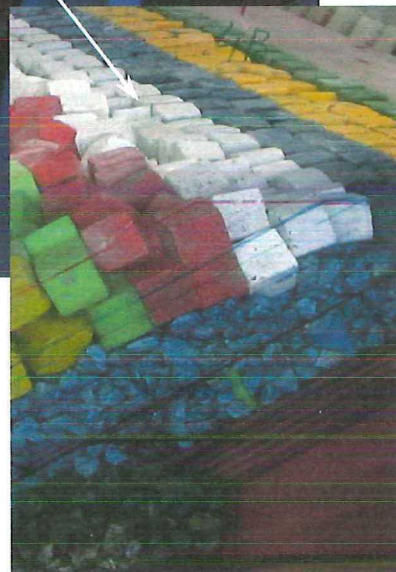
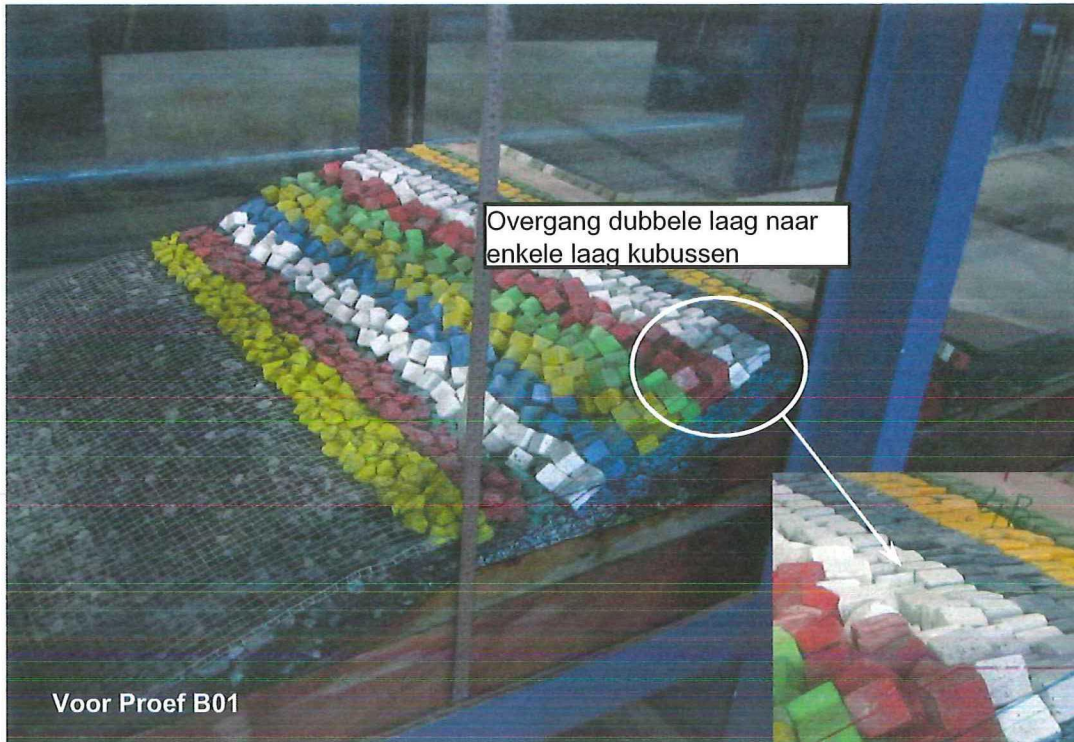
VARIANT 3b

WL | Delft Hydraulics

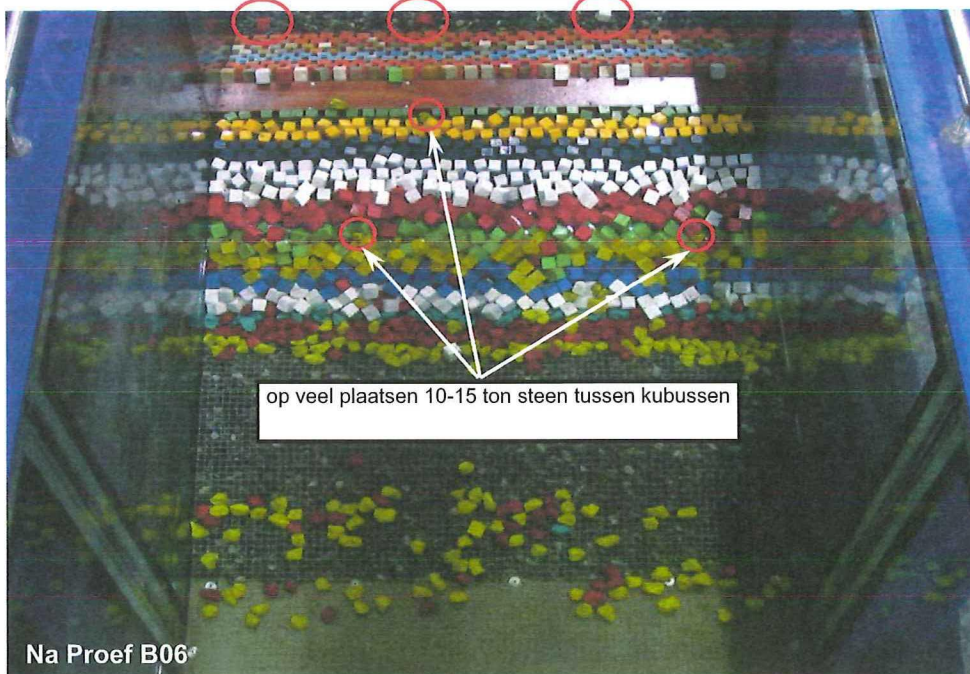
H4648

Foto C.9



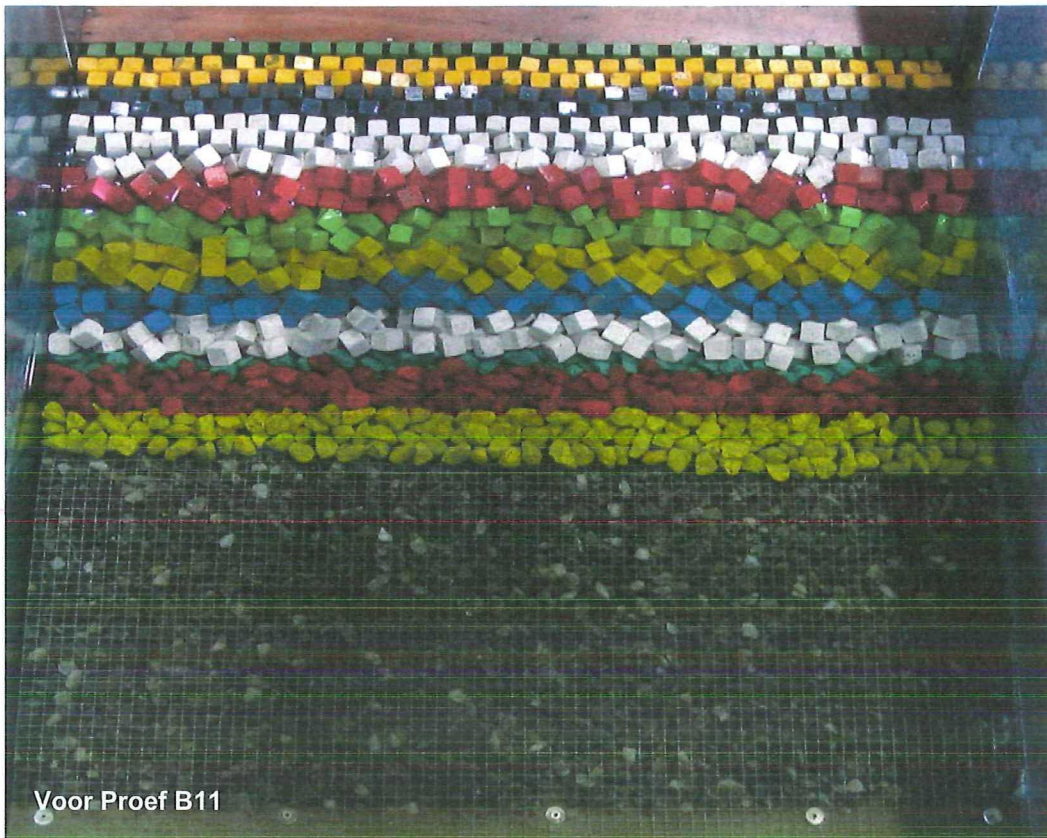


Kubussen over de kruin geslagen



Stabiliteit van de constructie voor serie B01 - B06	NAP +0.0m	
	VARIANT 4	
WL   Delft Hydraulics	H4648	Foto C.10





Voor Proef B11



Filter zichtbaar onder de dubbele laag

Na Proef B16

Stabiliteit van de constructie voor serie  
B11 - B16

NAP +2.0m

VARIANT 4

WL | Delft Hydraulics

H4648

Foto C.11

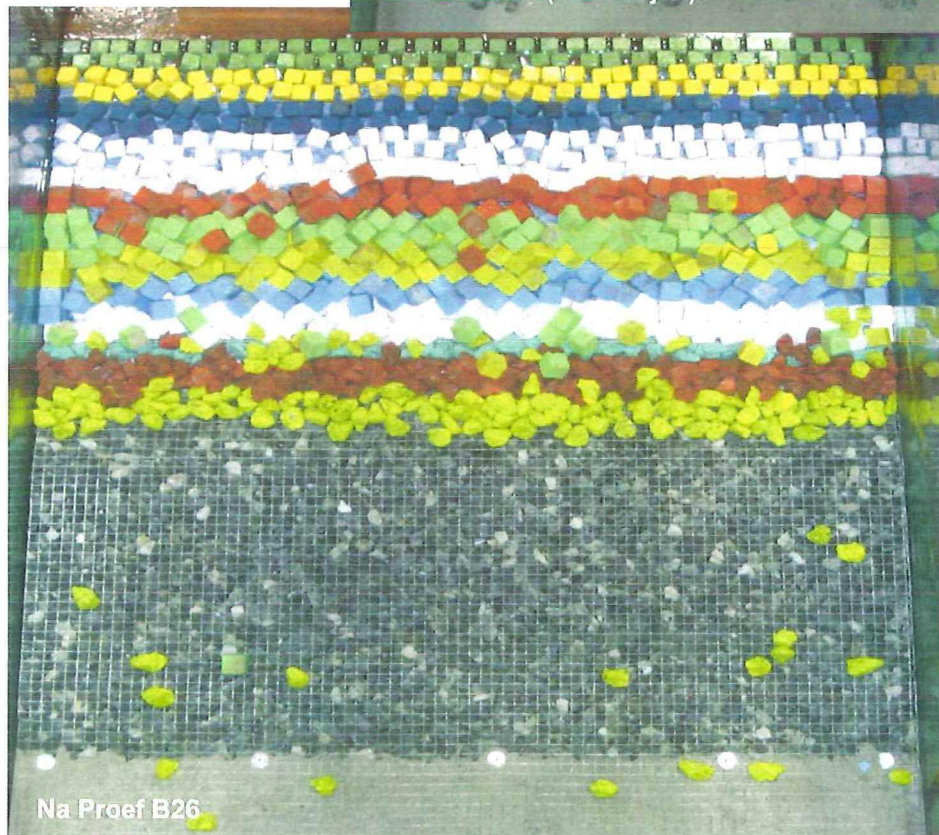




Voor Proef B21



Na Proef B26 (havenzijde)



Na Proef B26

Stabiliteit van de constructie voor serie  
B21 - B26

NAP +4.0m

VARIANT 4

WL | Delft Hydraulics

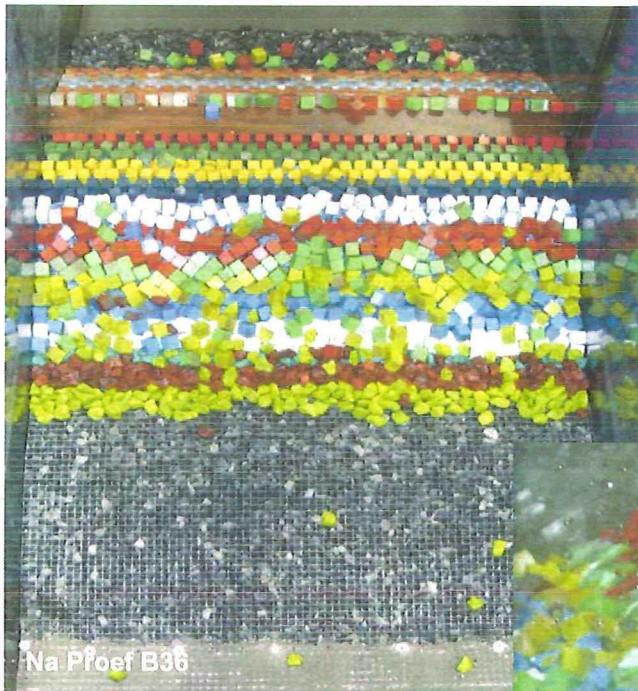
H4648

Foto C.12

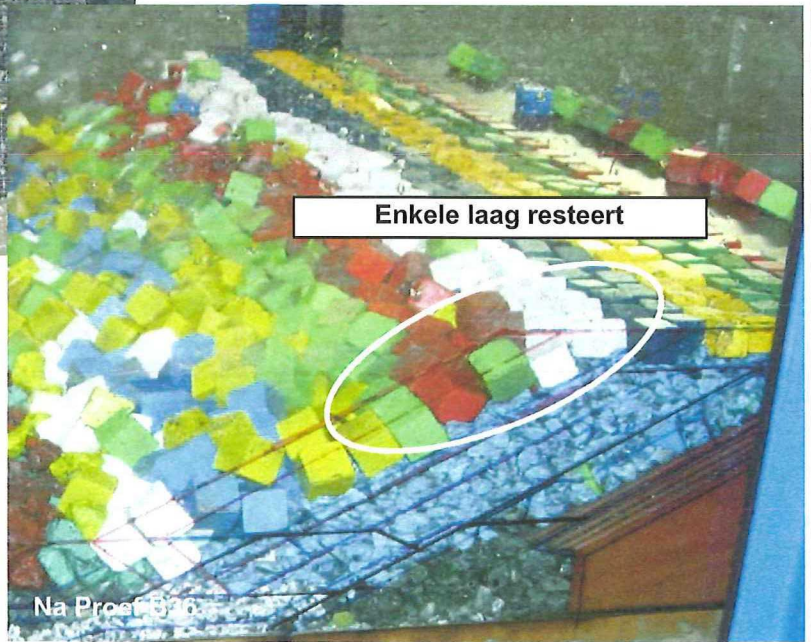




Voor Proef B31



Na Proef B36



Enkele laag resteert

Na Proef B36

Stabiliteit van de constructie voor serie  
B31 - B36 (50% dikkere uitvullaag)

NAP +2.0m

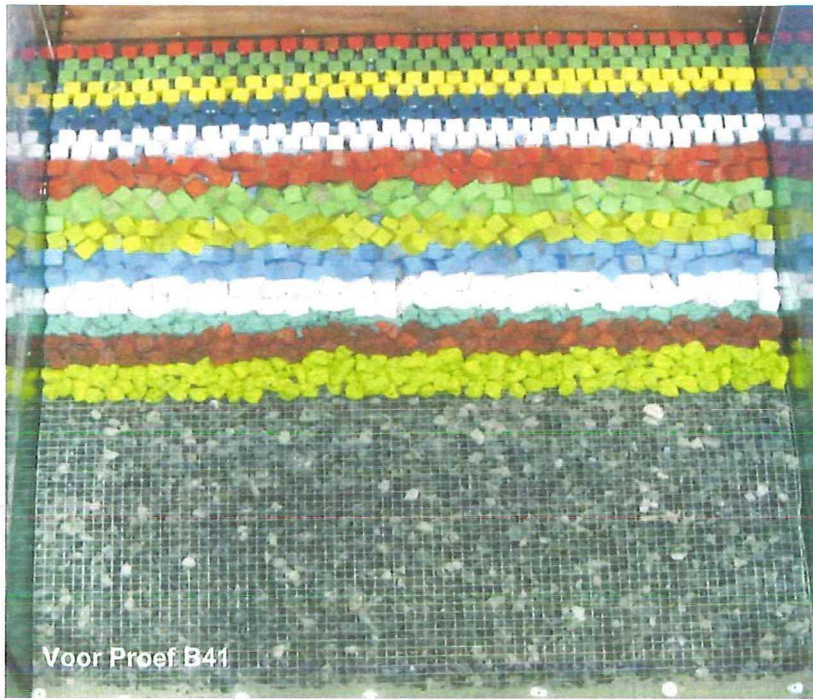
VARIANT 4

WL | Delft Hydraulics

H4648

Foto C.13



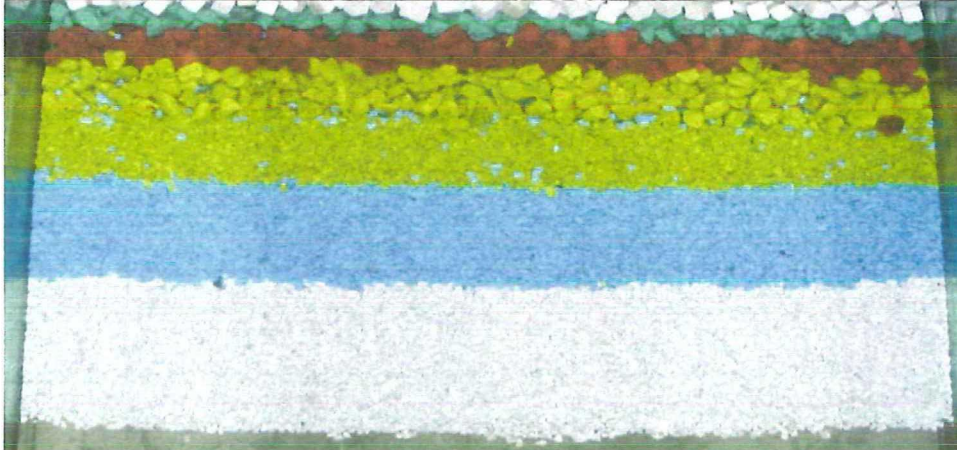


Stabiliteit van de constructie voor serie B41 - B46 (50% dikkere uitvullaag)	NAP +4.0m	
	VARIANT 4	
WL   Delft Hydraulics	H4648	Foto C.14

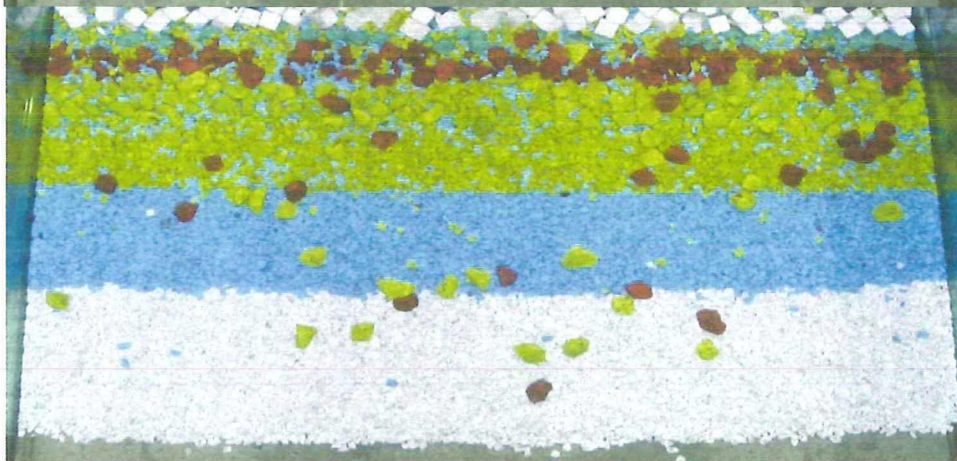




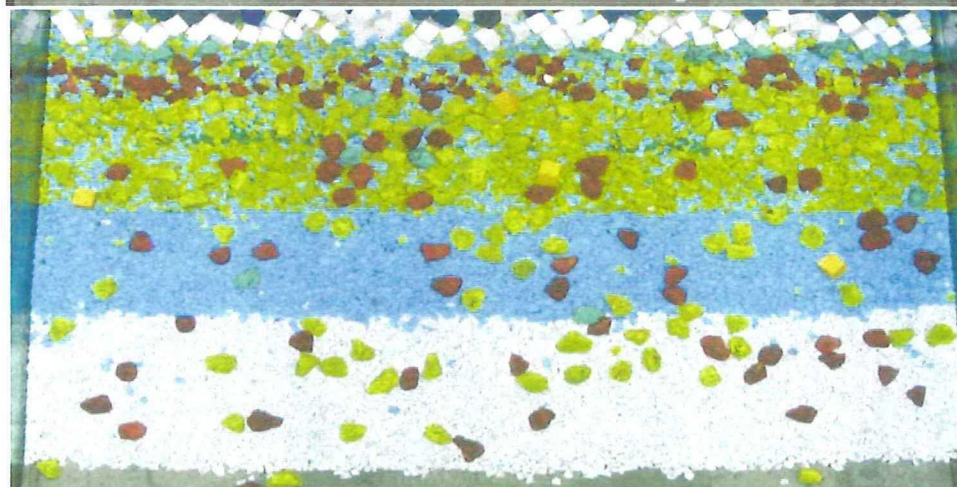
Na Proef C01



Na Proef C02



Na Proef C03



Na Proef C04

Stabiliteit van de bodembescherming  
Proeven serie C1

NAP +0.0m

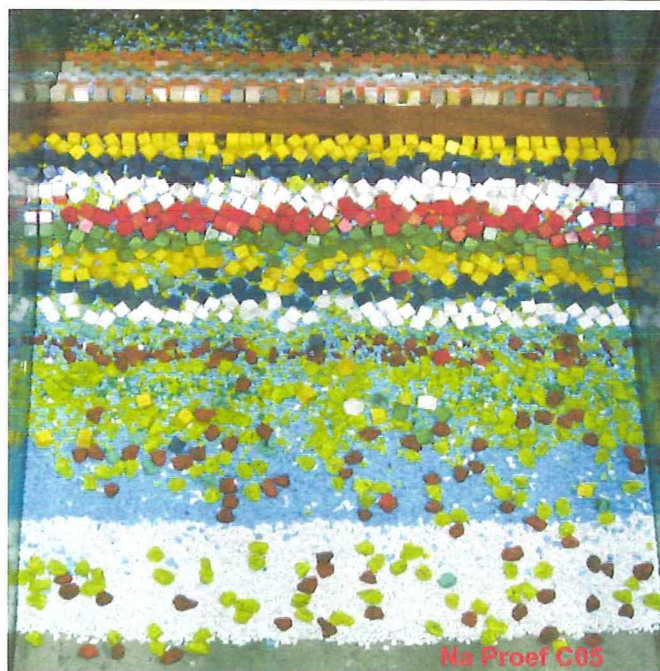
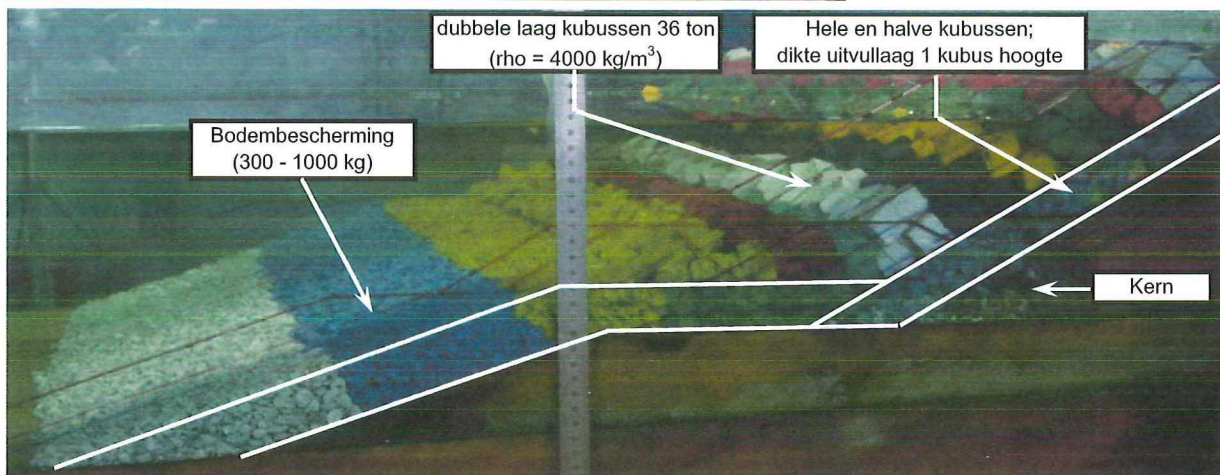
VARIANT 4b

WL | Delft Hydraulics

H4648

Foto C.15





Stabiliteit van de constructie voor serie  
C01 - C06

NAP +0.0m

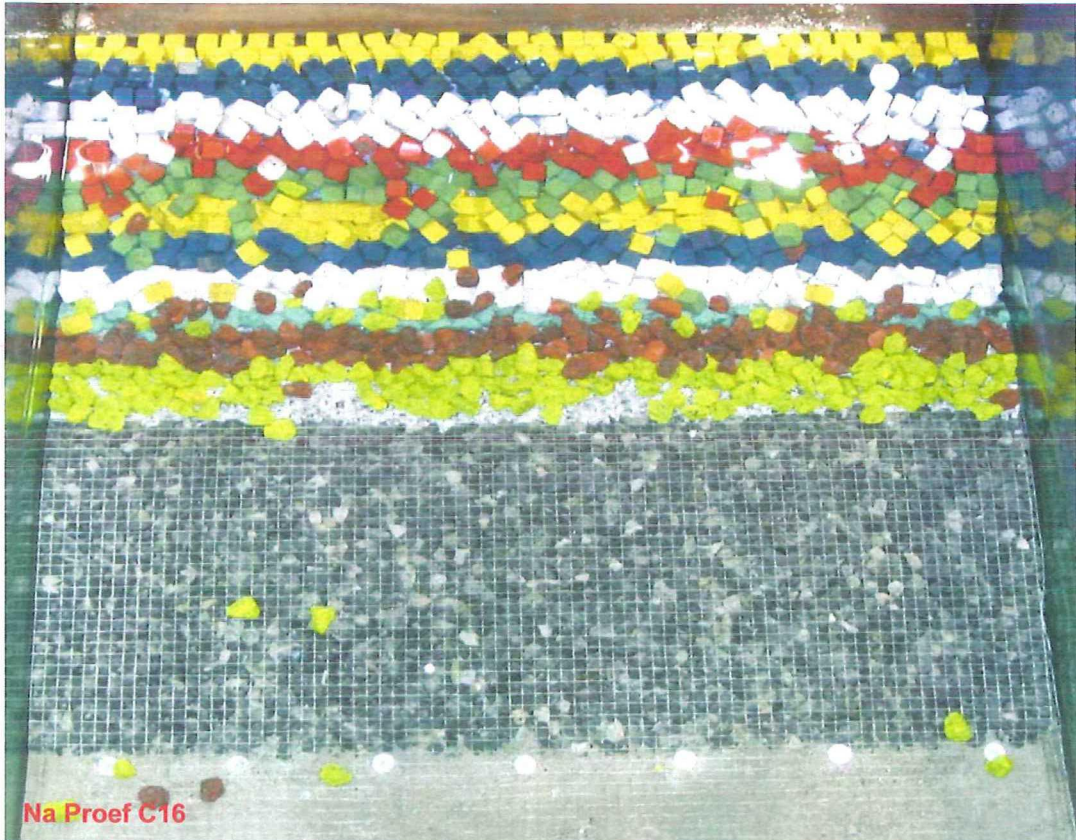
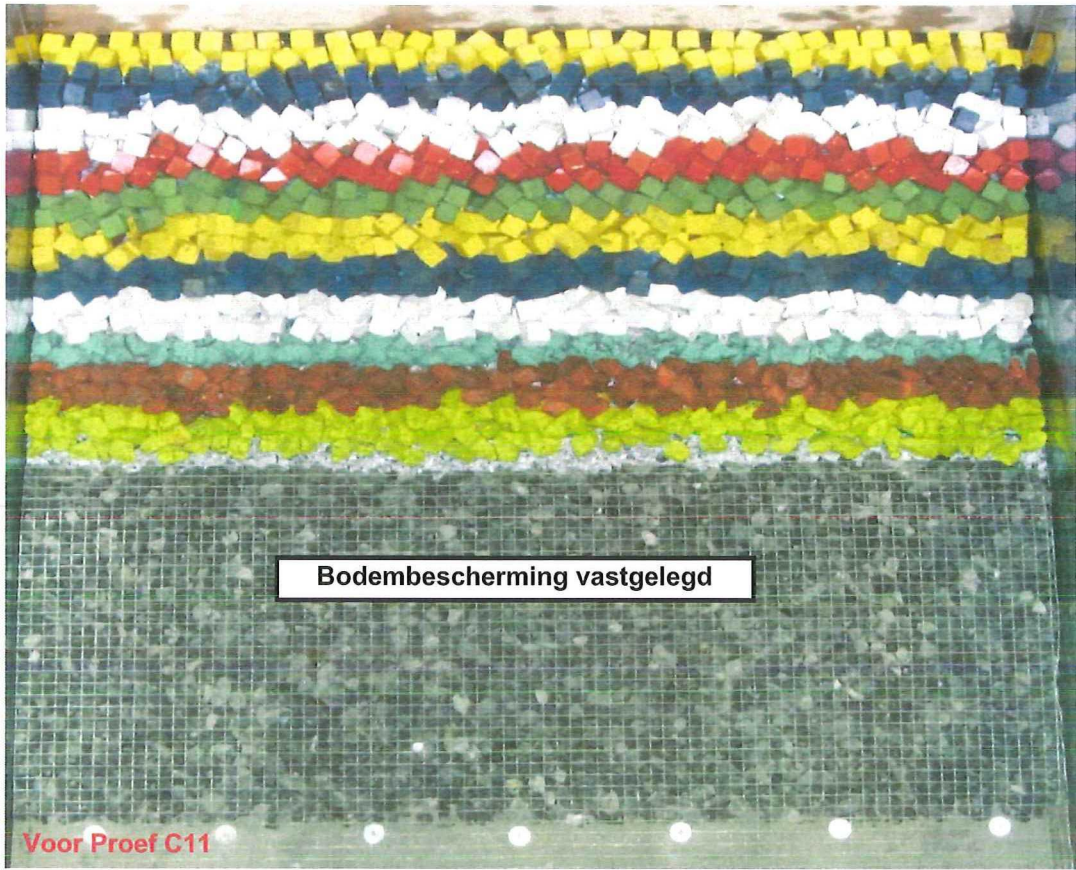
VARIANT 4b

WL | Delft Hydraulics

H4648

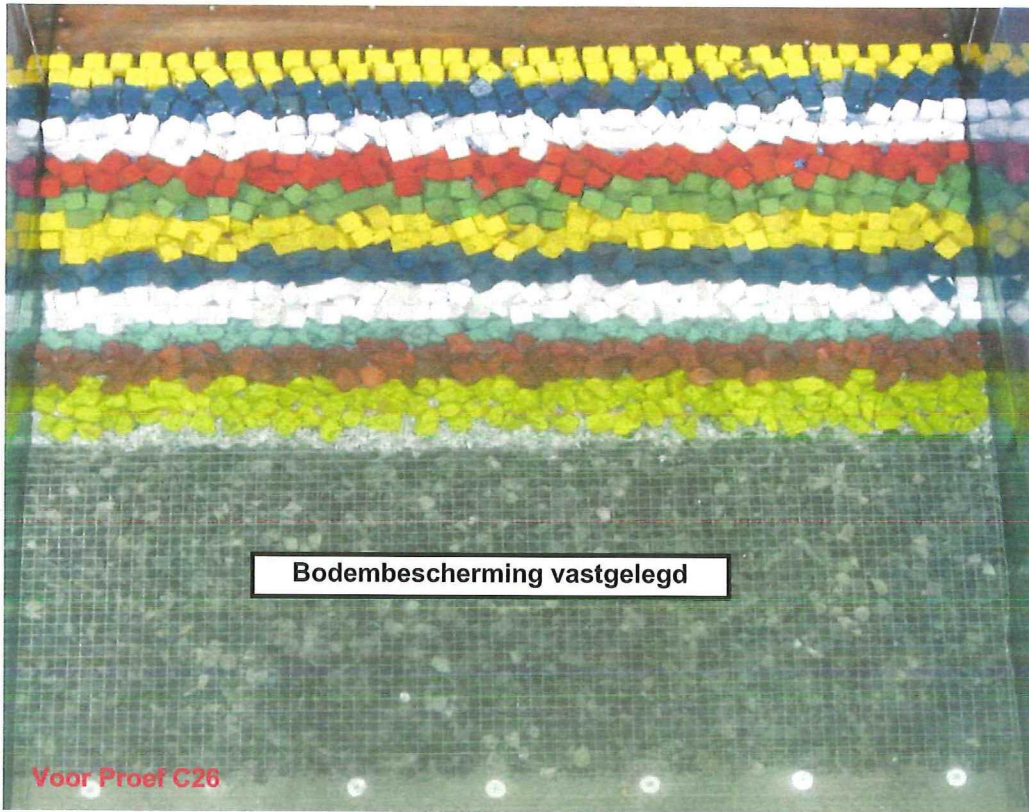
Foto C.16





Stabiliteit van de constructie voor serie C11 - C16	NAP +2.0m	
	VARIANT 4b	
<b>WL   Delft Hydraulics</b>	H4648	Foto C.17





Voor Proef C26



Na Proef C26

Stabiliteit van de constructie voor serie  
C21 - C26

NAP +4.0m

VARIANT 4b

WL | Delft Hydraulics

H4648

Foto C.18