

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat,
Directie Zeeland (PBZ)



Golfdrukken op talud ten gevolge van lange golven

Onderzoeksprogramma
Kennisleemtes Steenbekledingen

meetrapport

november 2003

H4329

WL | Delft Hydraulics

Decisive advice: from multidisciplinary
policy studies to design and technical
assistance on all water-related issues.

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl



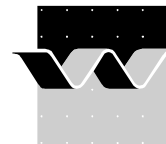
Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde



WL | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER:	RWS Directie Zeeland Project Bureau Zeeweringen						
TITEL:	Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen Golfdrukken op talud ten gevolge van lange golven Meetrapport						
SAMENVATTING:	<p>Op veel plaatsen langs de Nederlandse kust zijn de golven onder maatgevende condities minder steil dan de golven waarop voorgaande steenzettingsonderzoeken zich richtten.</p> <p>Met het kleinschalig modelonderzoek beschreven in dit <i>meetrapport</i> zijn databestanden gegenereerd die gebruikt kunnen worden voor de toetsing van de stabiliteit van steenzettingen bij een golfaanval met relatief lange golven.</p> <p>De data is verkregen door uitvoering van 2 series van 15 modelproeven met minimaal 1000 golven (Pierson Moskowitz) op taludhellingen van 1:3 en 1:4 in de Scheldegoot van WL Delft Hydraulics. Daarnaast zijn in dezelfde faciliteit 3 proeven uitgevoerd op het 1:4 talud met een dubbeltoppig golfspectrum. Gedurende deze proeven zijn de drukvariaties gemeten op 42 lokaties op het talud, zodanig gekozen dat drukvariaties ten gevolge van golfklappen zo goed mogelijk gemeten konden worden.</p> <p>De tweede fase van dit onderzoek (rapport : Golfdrukken op talud ten gevolge van lange golven) beschrijft de dataverwerking en gereedmaking van de golfbestanden voor gebruik in het computerprogramma Zsteen.</p>						
REFERENTIES:	contract : ZL-5755 Projectbegeleider DWW : R. 't Hart Projectbegeleider PBZ : Y. Provoost						
VER.	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING		
1	B. van Vossen	24-11-2003	definitief fase I	M.R.A. van Gent	W.M.K. Tilmans		
PROJECTNUMMER		H4329					
TREFWOORDEN:		steenzetting, golfaanval, dijken, zsteen					
AANTAL BLADZIJDEN		13					
VERTROUWELIJK		<input type="checkbox"/> JA, tot (datum)			<input checked="" type="checkbox"/> NEE		
STATUS:		<input type="checkbox"/> VOORLOPIG		<input type="checkbox"/> CONCEPT		<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF	

Inhoud

Lijst van Symbolen

1	Inleiding	1
2	Achtergrond van het onderzoek	2
3	Doel van het onderzoek	4
4	Fysisch-model proeven	5
4.1	De Scheldegoot en golfopwekking	5
4.2	Modelopzet	5
4.3	Bemonsteringsfrequentie	8
4.4	Testprogramma	8
5	Resultaten	11
	Referenties	A-1
A	Tabellen	A-2
A.1	Drukopnemers proeven talud 1:3	A-2
A.2	Drukopnemers proeven talud 1:4	A-3
B	Figuren	B-4
C	Overzicht van het onderzoeksprogramma “kennisleemtes steenbekledingen”	C-1

Lijst van Symbolen

Symbol	Eenheid	Betekenis
d_k	m	diepte op het talud, t.o.v. de stilwaterlijn, waar het hart van de golfklap neerkomt in regelmatige golven
g	m/s^2	gravitatie versnelling
h	m	waterstand ten opzichte van de gootbodem
$H_{1/3}$	m	significante golfhoogte, gedefinieerd als het gemiddelde van hoogste 1/3-deel
H_s	m	significante golfhoogte bij de teen van het talud
H_{m0}	m	significante golfhoogte op basis van golfenergie
L_{op}	m	golflengte, omgerekend naar diep water
N	-	aantal golven in de proef
s_{op}	-	golfsteilheid
T_m	s	gemiddelde golfperiode
$T_{m-1,0}$	s	spectrale golfperiode
T_p	s	golfperiode bij de piek van het spectrum
T_{pD}	s	golfperiode bij de piek van het spectrum
$X=0$	m	coördinaat langs de goot t.o.v de teen van de constructie
$+X$	m	coördinaat langs de goot t.o.v het golfschot
Y	m	coördinaat dwars op de goot t.o.v de gootwand
Z	m	coördinaat loodrecht op de gootbodem t.o.v de gootbodem
α	deg	hoek die het talud maakt met de gootbodem
ξ_{op}	-	brekerparameter gebaseerd op L_{op} en H_{m0}

I Inleiding

Ingevolge de Wet op de Waterkering dienen steenzettingen op waterkeringen vijfjaarlijks getoetst te worden. In de praktijk kan aan veel steenzettingen geen definitief toetsoordeel toegekend worden wegens een gebrek aan wetenschappelijke kennis.

In 2003 is daarom door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen opgestart. Doel van dit programma is het reduceren van deze kennisleemtes teneinde te komen tot scherpere toetsregels en daarmee sneller en vaker tot definitieve toetsresultaten.

In het kader van dit onderzoeksprogramma heeft voorliggend rapport betrekking op het deelonderzoek “Gezette steenbekledingen, deelplan 7.1.1, Invloed van lange golfperiodes op stabiliteit, kleinschalig modelonderzoek”.

Het totale overzicht van het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen, zoals bij aanvang van dat programma gepland was, is weergegeven in Bijlage C.

Met een brief (PZDT-B-03217 d.d. 26-09-2003) heeft RWS Directie Zeeland WL | Delft Hydraulics gevraagd een offerte in te dienen voor uitvoering van een aantal taken in het kader van dit onderzoeksprogramma. Op 10 Oktober 2003 kreeg WL | Delft Hydraulics opdracht (contract ZL-5755) de volgende vijf deelonderzoeken uit te voeren:

- A. Golfaanval met grote golfperiode;
- B. Stabiliteit van basalt;
- C. Golfklappen;
- D. Invloed van scheve golfaanval;
- E. Verificatie van ZSTEEN.

Dit rapport beschrijft de resultaten van onderdeel A van het onderzoek: Golfaanval met grote golfperiode. Dit onderzoek bestaat uit 2 fasen :

- 1) Modelproeven;
- 2) Dataverwerking.

Dit rapport beschrijft Fase 1 van het onderzoek. Hoofdstuk 2 behandelt de technische achtergrond en relevantie van het onderzoek. Hoofdstuk 3 beschrijft het onderzoeksdoel. Hoofdstuk 4 behandelt de modelopzet in de Scheldegoet, de instrumentatie en het testprogramma. In Hoofdstuk 5 worden de resultaten beschreven, en wordt vooruitlopend op de rapportage van Fase 2 een korte beschrijving gegeven van de dataverwerking.

2 Achtergrond van het onderzoek

Het steenzettingenonderzoek is tot nu toe vooral gericht geweest op de stabiliteit tijdens een golfaanval met relatief steile golven, namelijk $0,02 < H_s/L_{op} < 0,05$. Een dergelijke golfaanval op de meest gebruikelijke taludhellingen in Nederland levert een brekerparameter op van $1 < \xi_{op} < 2,5$, met:

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s / L_{op}}} = \text{brekerparameter (-)}$$

- $\tan \alpha$: taludhelling, in Nederland doorgaans 1:3 à 1:4 (-)
- H_s : significante golfhoogte bij de teen van het talud (m)
- L_{op} : $gT_p^2/(2\pi) =$ golflengte, omgerekend naar diep water (m)
- T_p : golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

Er zijn echter vele locaties langs de Nederlandse kust waar onder maatgevende condities de golven veel minder steil zijn (van Hijum, 2001). De brekerparameter van de golven kan waarden aannemen tot ongeveer 5 met uitschieters tot 7. Dit speelt vooral langs de Waddenzeekust van Friesland en Groningen.

De huidige toetsingsgereedschappen voor stabiliteit van steenzettingen zijn ANAMOS en ZSTEEN. ANAMOS is gebaseerd op empirische formules die zijn opgesteld aan de hand van proefresultaten met regelmatige golven. Het is vooral gericht op de steenzettingen met een relatief lage toplaag-doorlatendheid. Het toepassingsgebied van de formules is niet begrensd, waardoor ANAMOS ook bruikbaar is voor condities met een grote brekerparameter. Het valt dan echter op dat de stabiliteit bij toenemende brekerparameter steeds verder afneemt. Zeker voor de meer open toplagen, zoals basalt of Doornikse bloksteen, is het zeer te betwijfelen of dit juist is.

ZSTEEN is een programma dat beter toepasbaar is op steenzettingen met een meer open toplaag. Het programma maakt gebruik van gemeten drukken op het talud. Dergelijke drukbestanden zijn echter vooral beschikbaar in de range van $1 < \xi_{op} < 2,5$, nauwelijks in de range van $2,5 < \xi_{op} < 3,5$, en niet beschikbaar voor $\xi_{op} > 3,5$ (Kuiper, 2000).

Daarnaast is voor een aantal typen steenzettingen de stabiliteit bepaald met behulp van modelonderzoek (golfhoogte bij bezwijken). Al deze proeven, waarbij er met onregelmatige golven is gewerkt, zijn echter uitgevoerd in de range van $1 < \xi_{op} < 2,3$ (Klein Breteler en Kuiper, 2000).

Hieruit kan geconcludeerd worden dat er erg weinig bekend is over de stabiliteit van steenzettingen bij een golfaanval met $\xi_{op} > 2,5$ à $3,5$.

Vanuit theoretisch oogpunt is het te verwachten dat de aard van de belasting bij het groter worden van de brekerparameter gaat veranderen: bij kleine waarden van ξ_{op} zijn er zware golfklappen te verwachten, die in de range van $2 < \xi_{op} < 3$ sterk gaan afnemen, en zelfs vrijwel afwezig zijn bij zeer grote waarden van ξ_{op} . Het is daarom te verwachten dat er een

minimale stabiliteit is bij $1,5 < \xi_{op} < 2,5$, en een grotere stabiliteit bij zeer kleine waarden van ξ_{op} , maar ook bij grote waarden van ξ_{op} .

3 Doel van het onderzoek

Het doel van dit onderzoek is databestanden te genereren die gebruikt kunnen worden in het computerprogramma ZSTEEN voor toetsing van de stabiliteit van steenzettingen bij een golfaanval met $\xi_{op} > 2,5$ à $3,5$. De data is verkregen door middel van kleinschalig modelonderzoek in de Scheldegoet van WL | Delft Hydraulics, waarin series testen zijn uitgevoerd met taludhellingen van 1:3 en 1:4.

4 Fysisch-model proeven

4.1 De Scheldegoot en golfopwekking

De fysisch-model 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. Toepassing van tweede-orde sturing is vooral van belang voor relatief steile golven tot een golfsteilheid van $s_{op} = 9,3 \cdot 10^{-3}$, bij golfhoogten van $H_s = 0,2m$. Desalniettemin is bij alle proeven tweede-orde sturing gebruikt. De basis van dit golfopwekkingssysteem is beschreven in Klopman en Van Leeuwen (1990), Van Leeuwen en Klopman (1996), en Van Dongeren e.a. (2001). Daarnaast is de golfgenerator voorzien van een actief golfabsorptiesysteem om reflectie van golven op het golfschot te minimaliseren: het reflecteren van golven op het golfschot wordt voorkomen door naar het golfschot toelopende golven te meten en de beweging van het golfschot zodanig aan te passen dat aankomende golven geabsorbeerd worden.

4.2 Modelopzet

In de bovenbeschreven Scheldegoot is voor de proevenserie met het 1:3 talud een houten dijkmodel zonder bekleding gebouwd. De Figuren 1 en 2 tonen respectievelijk een langsdoorsnede en een dwarsdoorsnede van de proefopstelling. De houten constructie is inwendig verzaagd met betonblokken (Figuur 3) en loopt vanaf de gootbodem tot een hoogte van 1,5 m boven de gootbodem. Om hinderlijke trillingen te voorkomen is de constructie zo stijf mogelijk gemaakt. Het taludoppervlak bestaat uit een 25 mm multiplex plaat met daarin geïntegreerd een 8,3 mm aluminium plaat met gaten voor de drukopnemers. Plaatselijk zijn de gootwanden verhoogd met behulp van zijschotten. De kruin van de dijk was zodanig hoog dat er weinig of geen overslag was.

In de aluminiumplaat op het talud zijn 42 drukopnemers gemonteerd (zie Figuur 4). De meeste drukopnemers zijn dicht bijeengeplaatst in het gebied waar de golven breken, en wel zodanig dat de voet van het brekerfront én de golfklap voldoende nauwkeurig gemeten kunnen worden.

Voor de plaatsing van de drukopnemers op het talud is eerst als uitgangspunt de beschikbaarheid van totaal 42 drukopnemers genomen. Vervolgens is rekening gehouden met het feit dat ZSTEEN, dat rekt op basis van deze gemeten drukken, alleen goed werkt als ook in de oploopzone drukregistraties beschikbaar zijn. Daarom zijn 2 drukopnemers boven de waterlijn geplaatst, waardoor er nog 40 beschikbaar zijn voor de zone waarin de golven breken (onder de waterlijn). Deze drukopnemers zijn verdeeld over het gebied tussen

de verwachte locatie van de top van het brekerfront en de waterlijn. De locatie van de top van het brekerfront en die van de voet van het brekerfront zijn voor het gehele proevenprogramma geschat op basis van de formules uit Klein Breteler e.a. (1992) (recht front, zoals dat is opgenomen in ANAMOS) en De Waal e.a. (1995) (rond front). In beide gevallen is de aandacht geconcentreerd op het extreme brekerfront bij $H = 1,4H_s$ (recht front) en die met een overschrijdingsfrequentie van 2% (rond front). Ter plaatse van de voet van het brekerfront en in de zone waar de golfklap te verwachten is, zijn de drukopnemers wat dichter bij elkaar gezet. De locatie van de golfklap is gebaseerd op de volgende formule voor regelmatige golven (Coeveld 2003):

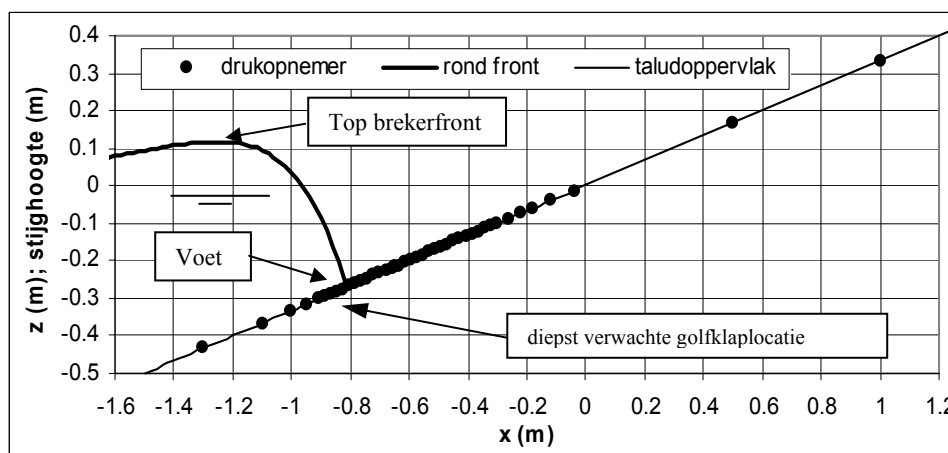
$$d_k/H_s = 0,3 \xi_{op}^{1,25} \quad \text{mits } \xi_{op} < 3$$

met: d_k = diepte op het talud, t.o.v. de stilwaterlijn, waar het hart van de golfklap neerkomt in regelmatige golven (m)

Deze formule is gebruikt voor de extreme golven in het golfveld: $H = 1,4H_s$.

Uit berekeningen is gebleken dat voor $H_s = 0,22$ m en $T_p = 3,6$ s op een talud van 1:3 het brekerfront het diepste komt. Bij elke proef die wordt uitgevoerd met andere golfcondities wordt echter weer een andere locatie van de top van het brekerfront, de voet van het brekerfront en de locatie van de golfklap gevonden. Wel zal de afstand tussen de top van het brekerfront en de locatie van de golfklap in al deze proeven kleiner zijn. Daarom is op grond van bovenstaande condities de instrumentatie zo uitgelegd, dat bij alle uitgevoerde proeven het hele brekerproces met de drukopnemers geregistreerd kon worden. Wel bleek het nodig te zijn om de waterstand geregeld aan te passen, zodanig dat het brekerproces goed bij de drukopnemers plaatsvindt.

In onderstaande figuur is het resultaat van de berekening met bovenstaande condities gegeven, en zijn de gekozen locaties van de drukopnemers getekend.



Locatie brekerfront en golfklap ten opzichte van drukopnemers op 1:3 talud

Een additioneel probleem in de voorbereidingen was dat de beschikbare formules niet geldig zijn voor grote waarden van de brekerparameter ξ_{op} . Om toch een schatting te krijgen van wat er te verwachten was, zijn de formules toch ook gebruikt voor $\xi_{op} > 3$. Steeds is bij de proeven visueel gecontroleerd of de golfklappen in het gebied van de instrumentatie plaatsvonden. Als dit niet het geval was, is de proef met een andere waterstand over gedaan.

Doorgaans bleek bij grote waarden van ξ_{op} het brekerproces verder onder water plaats te vinden, dan verwacht was op basis van de formules.

De gebruikte drukopnemers zijn niet allemaal van hetzelfde type vanwege beperkte beschikbaarheid, zie Tabel A1. In de opstelling zaten drie typen: Kulite, type HKM-134-374-1-BAR-VG (10 stuks), Druck type PDCR42 (21) en Druck PDCR10 (11), met een effectief meetoppervlak met een diameter van respectievelijk 4 mm, 4 mm en 6,5 mm. De meters hebben een bereik van -10V tot +10V, wat met de ingestelde 20 mbar/V overeenkomt met een bereik van -200mbar tot +200mbar t.o.v. de gemiddelde waterstand. De invloed van het gebruik van verschillende drukopnemers op het resultaat van de proeven wordt verwaarloosbaar klein ingeschat.

De constructie is gecontroleerd op stijfheid door middel van een Fourier analyse van meetdata, die verkregen zijn door bij vlakke waterstand (zonder golven) een klap te geven op de houten dekplaat van de constructie op een plaats boven een holte (niet direct ondersteunde plaats). Hiermee konden de eigentrillingen van de constructie gemeten worden. Dit leidde tot de conclusie dat de eigenfrequentie ongeveer 300 Hz was. Tijdens een testproef leek de constructie toch een ongewenste trilling van ca 30 Hz te maken. Deze ontstond bij ongeveer de helft van de golfklappen en duurde dan ongeveer 0,1 a 0,2 s. Daarom is het talud vervolgens extra verstijfd door het aanbrengen van dwarsbalken en dwarsplaten, die op hun beurt weer ondersteund werden door de betonblokken, zie Figuur 2 en 3. De verstijving had als resultaat dat de oscillaties met ca 30 Hz minder vaak en met een kleinere amplitude optraden. Het is opmerkelijk dat niet elke golfklap dergelijke oscillaties laat zien. Tevens zijn er oscillaties bij een veel hogere frequentie van ongeveer 200 à 400 Hz, maar die vallen buiten het interessegebied en kunnen eenvoudig weggefilterd worden. Het is denkbaar dat de oscillaties met ca 30 Hz een onderdeel vormen van het brekerproces. Ook in de Deltagoot zijn er aanwijzingen gevonden dat er oscillaties voorkomen, maar dan zelfs met een kleinere frequentie van 10 à 30 Hz. Het schaalverschil tussen deze faciliteiten kan dit verschil in frequentie verklaren. Deze oscillaties zouden een gevolg kunnen zijn van drukgolven die ontstaan door het comprimeren en expanderen van de opgesloten lucht onder de brekertong. Het is niet waarschijnlijk dat het verband houdt met trillingen van de faciliteit, want de Deltagoot is vele malen stijver dan de Scheldegoot en zou dan dus juist een veel hogere frequentie moeten laten zien.

Voor het talud van 1:4 is daarop gekozen voor een betontalud, omdat dit zeer stijf is en eenvoudiger te maken dan een extra verstijfde houten constructie. Het 1:4 talud is met grind opgezet en met 3 à 4 centimeter cementmortel afgesmeerd (Figuur 2 en Figuur 5). De drukopnemers zijn geïntegreerd in dezelfde aluminiumplaat als gebruikt bij de proeven op het 1:3 talud. De aluminiumplaat is bevestigd op een houten skelet dat verankerd is in het grind en beton van het talud.

Ook de proefresultaten op dit betontalud laten soms oscillaties zien na een golfklap.

Naast de drukken zijn de golven gemeten, zowel ver van de constructie als vlak voor de constructie. Hiervoor is gebruik gemaakt van 2 sets van 3 golfhoogtemeters, waarbij de eerste set geplaatst is op ongeveer 12 m van het golfschot en de tweede set golfhoogtemeters geplaatst is op de teen van de constructie. De tijdseries zijn gecorrigeerd voor gereflecteerde golven, gebruikmakend van de theorie van Mansard en Funke (1980).

4.3 Bemonsteringsfrequentie

De bemonsteringsfrequentie tijdens de proeven is bepalend voor de mate van detail waarmee tijdelijke drukvariaties kunnen worden gemeten. Vooral golfklappen duren bijzonder kort. Hoewel de golfklappen op deze kleine schaal beïnvloed worden door ongewenste schaaleffecten, is de bemonsteringsfrequentie toch zo gekozen dat ook golfklappen tot in detail gemeten worden. Op kleine schaal is de piekdruk tijdens de golfklap te groot en is de golfklapduur te kort, maar er wordt aangenomen dat de totale impuls van een golfklap wel goed op schaal wordt weergegeven. Het is denkbaar dat die impuls belangrijk is voor de stabiliteit van steenzettingen.

Het allerhoogste drukpiekje tijdens een extreme golfklap duurt bijzonder kort, orde 0,1 ms. Dit allerhoogste drukpiekje hoeft niet gemeten te worden, omdat deze metingen gebruikt worden voor een beoordeling van de stabiliteit van steenzettingen. De blokken in een steenzetting hebben een zodanige traagheid dat ze niet reageren op dergelijke korte piekjes. In overleg met de opdrachtgever is vastgesteld dat een bemonsteringsfrequentie van 400 Hz voor deze proeven ruim voldoende is.

Teneinde 'aliasing' te voorkomen is het noodzakelijk om te filteren met een laagdoorlaatfilter op een frequentie gelijk aan de helft van de bemonsteringsfrequentie. Dit is in dit geval 200 Hz. In het verleden werd hiervoor een analoog filter gebruikt dat tussen de drukopnemers en de computer was geschakeld. Een van de problemen daarbij is dat een dergelijk analoog filter niet alleen de hoge frequenties onderdrukt, maar ook een faseverschuiving geeft bij de lage frequenties. Naarmate er een hogere orde filter wordt gebruikt (met een steilere karakteristiek, waardoor het signaal boven de 200 Hz beter wordt gefilterd), wordt ook de ongewenste faseverschuiving groter.

Dit probleem is voor de huidige proeven op een nieuwe manier aangepakt. Er is met een lage orde filter gefilterd op 1 kHz en vervolgens is er op 2kHz bemonsterd. Deze signalen zijn opgeslagen voor toekomstig gebruik. Tevens zijn deze signalen digitaal bewerkt. Ten behoeve van het gebruik voor Zsteen zijn de signalen digitaal gefilterd met een hoge orde filter, dat echter geen faseverschuiving geeft, op 50 Hz, en vervolgens is het signaal uitgedund tot 100 Hz. Met de huidige snelheid van PC's kan met een zo opgebouwd bestand een Zsteen berekening gemaakt worden zonder dat dit vervelend lang gaat duren. Mochten de computers in de nabije toekomst sneller worden, dan kan er eenvoudig vanuit het originele bestand een file worden aangemaakt met meetfrequentie van bijvoorbeeld 400 Hz.

4.4 Testprogramma

Met beide opstellingen (talud 1:3 en 1:4) is een serie van 15 testen uitgevoerd waarin de ξ_{op} -waarde (teruggerekend naar diepwatercondities) toeneemt van $\xi_{op} = 2.5$ tot $\xi_{op} = 7$. De proeven zijn uitgevoerd met verschillende waterdiepten, om de zware golfklappen zo goed mogelijk te kunnen registreren in het gebied met de hoge dichtheid aan drukopnemers. Om schaaleffecten te minimaliseren is daarbij een zo groot mogelijke golfhoogte gebruikt. Per proef zijn in totaal minstens 1000 golven gegenereerd met een PIERSON MOSKOWITZ spectrum. De onderstaande tabellen tonen de gerealiseerde condities nabij het golfschot, ver van de teen van de constructie van beide testseries.

	h (m)	H_{m0} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_m (s)	T_{pD} (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	N (-)	ξ_{op} (-)
T301	0.75	0.216	0.211	2.016	2.815	2.579	1189	2.52
T302	0.75	0.220	0.212	2.138	3.080	2.832	1226	2.74
T303	0.75	0.221	0.216	2.317	3.416	3.029	1207	3.03
T304	0.80	0.220	0.215	2.396	3.542	3.202	1281	3.15
T305	0.80	0.197	0.193	2.467	3.565	3.240	1275	3.35
T306	0.75	0.171	0.168	2.445	3.573	3.224	1286	3.60
T307	0.80	0.173	0.168	2.600	3.805	3.395	1274	3.81
T308	0.80	0.173	0.169	2.727	3.999	3.569	1282	4.00
T309	0.75	0.147	0.144	2.699	3.995	3.500	1295	4.34
T310	0.75	0.148	0.144	2.642	4.052	3.615	1395	4.39
T311	0.75	0.120	0.117	2.740	4.004	3.525	1276	4.81
T312	0.75	0.121	0.122	2.957	4.297	3.767	1313	5.15
T313	0.75	0.095	0.093	2.979	4.080	3.741	1258	5.51
T314	0.75	0.096	0.095	3.106	4.601	3.921	1318	6.19
T315	0.75	0.098	0.098	3.276	5.293	4.139	1349	7.04

Tabel 1: Testprogramma met Pierson Moskowitz spectra op talud 1:3.

	h (m)	H_{m0} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_m (s)	T_{pD} (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	N (-)	ξ_{op} (-)
T401	0.83	0.197	0.192	2.413	3.433	3.105	1242	2.42
T402	0.83	0.197	0.194	2.537	3.784	3.373	1291	2.66
T403	0.83	0.172	0.167	2.590	3.811	3.395	1280	2.87
T404	0.83	0.146	0.142	2.644	3.805	3.374	1253	3.11
T405	0.83	0.146	0.144	2.751	4.037	3.587	1307	3.30
T406	0.83	0.120	0.116	2.755	4.037	3.549	1269	3.64
T407	0.83	0.120	0.118	2.924	4.102	3.720	1281	3.70
T408	0.83	0.122	0.119	3.024	4.516	3.908	1321	4.04
T409	0.83	0.094	0.093	3.037	4.096	3.773	1234	4.17
T410	0.83	0.095	0.093	3.178	4.514	3.932	1257	4.57
T411	0.83	0.095	0.094	3.322	4.529	4.096	1263	4.59
T412	0.80	0.097	0.099	3.536	5.779	4.338	1302	5.80
T413	0.80	0.081	0.078	3.199	5.572	4.415	1458	6.12
T414	0.80	0.076	0.076	3.753	5.789	4.533	1362	6.56
T415	0.75	0.074	0.075	3.986	6.343	4.750	1283	7.28

Tabel 2: Testprogramma met Pierson Moskowitz spectra op talud 1:4.

In deze tabellen zijn de volgende symbolen gebruikt:

h = waterstand t.o.v. de gootbodem (m)

H_{m0} = significante golfhoogte op basis van golfenergie (m)

$H_{1/3}$ = significante golfhoogte, gedefinieerd als het gemiddelde van hoogste 1/3-deel (m)

T_m = gemiddelde golfperiode (s)

T_{pD} = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

$T_{m-1,0}$ = spektrale golfperiode (s)

N = aantal golven in de proef (-)

ξ_{op} = brekerparameter gebaseerd op L_{op} en H_{m0} (-)

Met een korte derde serie proeven zijn de drukvariaties op het 1:4 talud veroorzaakt door golven met een dubbeltoppig spectrum gemeten met instellingen als gegeven in Tabel 3.

	h (m)	H_{m0} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_m (s)	T_{pD} (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	N (-)	ξ_{op} (-)
T501	0.74	0.142	0.133	1.369	3.028	1.856	1869	2.51
T502	0.74	0.147	0.137	1.645	4.193	2.333	2187	3.42
T503	0.77	0.157	0.145	1.857	3.048	2.790	2481	2.40

Tabel 3: Testprogramma met dubbeltoppige spectra op talud 1:4.

De ξ_{op} -waarden corresponderend met de proeven met dubbeltoppige spectra zijn minder representatief dan bij de proeven met de Pierson Moskowitz spectra. In de Figuren 6 t/m 8 zijn daarom de energiedichtheidsspectra en golfoverschrijdingskrommen gegeven zowel voor de locatie ver van de constructie als op de teen.

5 Resultaten

De signalen van de 42 drukopnemers zijn gefilterd met een laagdoorlaat 2^e orde filter op 1000 Hz en bemonsterd op 2000 Hz. Met behulp van een digitaal laagdoorlaatfilter zijn bovengenoemde 2000 Hz signalen gefilterd op 50 Hz, en gesampled op 100 Hz ten behoeve van de ZSTEEN bestanden in GEF-format. Zowel de 2000 Hz als de 100 Hz bestanden zijn bewaard voor toekomstige analyse.

Bij de controle van de resultaten is aan het licht gekomen dat er na sommige golfklappen drukfluctuaties geregistreerd worden met een frequentie van ongeveer 30 Hz. Deze drukfluctuaties bleven aanwezig ondanks dat het talud na enkele testproeven aanzienlijk was verstijfd, en bovendien werden ze ook gemeten bij het 1:4 talud dat van zeer stijf beton was gemaakt. Daarom is het zeer onwaarschijnlijk dat deze verband houden met de stijfheid van het talud. Dergelijke drukfluctuaties zijn ook waargenomen in de Deltagoot met een steenzetting op prototypeschaal. Daarom wordt voorlopig aangenomen dat deze drukfluctuaties een onvermijdelijk onderdeel vormen van het brekerproces in een goot.

Tabellen 1 t/m 3 (Hoofdstuk 4) tonen de gemeten golfparameters ver van de constructie voor proeven met een 1:3 talud en een 1:4 talud.

Tijdens alle proeven is de werking van de drukopnemers en golfhoogtemeters nauwkeurig gecontroleerd en er kan geconcludeerd worden dat alle proeven correct zijn uitgevoerd. Tijdens sommige proeven is gedurende enkele miliseconde de druk in een golfklap zo groot geweest dat het niet meer geregistreerd kon worden door de drukopnemer. Het maximale bereik van de drukopnemers was namelijk beperkt tot 2 m waterkolom (ca 20 à 40 m waterkolom op prototypeschaal!). Dit duurde echter zo kort, dat wanneer het signaal is gefilterd en uitgedund naar een voor Zsteen bruikbaar signaal, deze beperking geen invloed meer heeft.

Referenties

Coeveld, M. (2003); Invloed van golf klappen op stabiliteit: literatuurstudie, WL / Delft Hydraulics, conceptverslag H4134, september 2003.

Hijum, E. van (2001), *Voorstudie lange T*, Infram, verslag i454, november 2001.

Klein Breteler, M., e.a. (1992); Taludbekledingen van gezette steen, stabiliteit van de toplaag, M1795 / H195 deel XX, band A, WL / Delft Hydraulics, april 1992.

Klein Breteler, M., en C. Kuiper (2000), *Blackbox model voor stabiliteit van steenzettingen*, WL / Delft Hydraulics, conceptverslag H3272, juli 2000.

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. (2000), *Databestand ZSTEEN*, WL / Delft Hydraulics, verslag H3753, november 2000.

Mansard, E. and E. Funke (1980), *The measurement of incident and reflected spectra using a least-square method*, ASCE proc pp.154-172, ICCE'80, Sydney.

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 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.

Waal, J.P. de, M. Klein Breteler, en H. den Adel (1995); Taludbekledingen van gezette steen, golfdruk op het talud, deel B: verbetering van het analytische model en Steenzet; WL / Delft Hydraulics, verslag H195, December 1995.

A Tabellen

A.1 Drukopnemers proeven talud 1:3

TALUD 1:3						
NR	Type	+X (m)	Y (m)	Z (m)	langs talud (m)	X=0 (m)
DR01	Kulite	38.390	0.50	0.317	1.001	0.950
DR02	Kulite	38.590	0.50	0.383	1.212	1.150
DR03	Kulite	38.690	0.50	0.417	1.318	1.250
DR04	Kulite	38.740	0.50	0.433	1.370	1.300
DR05	PDCR42	38.780	0.49	0.447	1.412	1.340
DR06	PDCR42	38.801	0.51	0.454	1.435	1.361
DR07	PDCR42	38.822	0.49	0.461	1.457	1.382
DR08	PDCR42	38.843	0.51	0.468	1.479	1.403
DR09	PDCR42	38.864	0.49	0.475	1.501	1.424
DR10	PDCR42	38.885	0.51	0.482	1.523	1.445
DR11	PDCR42	38.906	0.49	0.489	1.545	1.466
DR12	PDCR42	38.927	0.51	0.496	1.567	1.487
DR13	PDCR42	38.948	0.49	0.503	1.590	1.508
DR14	PDCR42	38.969	0.51	0.510	1.612	1.529
DR15	PDCR42	38.990	0.49	0.517	1.634	1.550
DR16	PDCR42	39.011	0.51	0.524	1.656	1.571
DR17	PDCR42	39.032	0.48	0.531	1.678	1.592
DR18	PDCR42	39.042	0.50	0.534	1.689	1.602
DR19	PDCR42	39.052	0.52	0.537	1.699	1.612
DR20	PDCR42	39.073	0.49	0.544	1.721	1.633
DR21	PDCR42	39.094	0.51	0.551	1.743	1.654
DR22	PDCR42	39.115	0.49	0.558	1.766	1.675
DR23	PDCR10	39.136	0.51	0.565	1.788	1.696
DR24	PDCR42	39.157	0.49	0.572	1.810	1.717
DR25	PDCR10	39.178	0.51	0.579	1.832	1.738
DR26	PDCR42	39.199	0.49	0.586	1.854	1.759
DR27	PDCR10	39.220	0.51	0.593	1.876	1.780
DR28	PDCR42	39.241	0.49	0.600	1.898	1.801
DR29	PDCR10	39.262	0.51	0.607	1.921	1.822
DR30	Kulite	39.283	0.49	0.614	1.943	1.843
DR31	Kulite	39.304	0.51	0.621	1.965	1.864
DR32	Kulite	39.325	0.49	0.628	1.987	1.885
DR33	Kulite	39.346	0.51	0.635	2.009	1.906
DR34	Kulite	39.367	0.49	0.642	2.031	1.927
DR35	Kulite	39.388	0.51	0.649	2.053	1.948
DR36	PDCR10	39.428	0.50	0.663	2.096	1.988
DR37	PDCR10	39.468	0.50	0.676	2.138	2.028
DR38	PDCR10	39.508	0.50	0.689	2.180	2.068
DR39	PDCR10	39.570	0.50	0.710	2.245	2.130
DR40	PDCR10	39.650	0.50	0.737	2.330	2.210
DR41	PDCR10	40.190	0.50	0.917	2.899	2.750
DR42	PDCR10	40.690	0.50	1.083	3.426	3.250

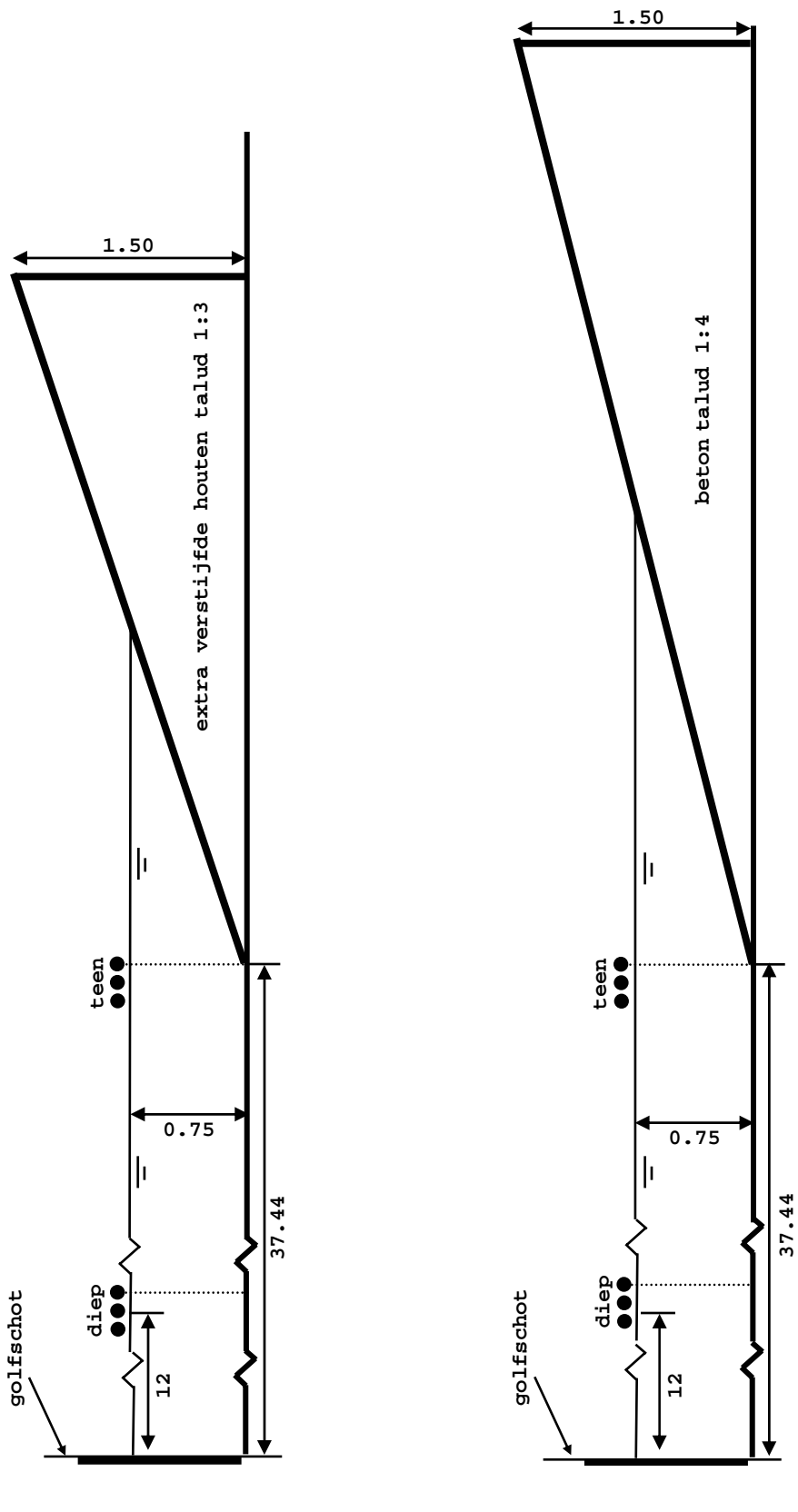
Tabel A1 : Talud 1:4 : Typen en coördinaten t.o.v. golfshot (x-coördinaat langs goot, y dwars, z in hoogterichting) van drukopnemers genummerd als in Fig.4. Coördinaten in laatste twee kolommen zijn gemeten vanaf de teen v/d constructie .

A.2 Drukopnemers proeven talud 1:4

TALUD 1:4						
NR	Type	+X (m)	Y (m)	Z (m)	langs talud (m)	X=0 (m)
DR01	Kulite	39.111	0.50	0.418	1.722	1.671
DR02	Kulite	39.315	0.50	0.469	1.933	1.875
DR03	Kulite	39.417	0.50	0.494	2.038	1.977
DR04	Kulite	39.469	0.50	0.507	2.091	2.029
DR05	PDCR42	39.509	0.49	0.517	2.133	2.069
DR06	PDCR42	39.531	0.51	0.523	2.155	2.091
DR07	PDCR42	39.552	0.49	0.528	2.177	2.112
DR08	PDCR42	39.574	0.51	0.533	2.200	2.134
DR09	PDCR42	39.595	0.49	0.539	2.222	2.155
DR10	PDCR42	39.617	0.51	0.544	2.244	2.177
DR11	PDCR42	39.638	0.49	0.550	2.266	2.198
DR12	PDCR42	39.660	0.51	0.555	2.288	2.220
DR13	PDCR42	39.681	0.49	0.560	2.310	2.241
DR14	PDCR42	39.703	0.51	0.566	2.332	2.263
DR15	PDCR42	39.724	0.49	0.571	2.354	2.284
DR16	PDCR42	39.746	0.51	0.576	2.377	2.306
DR17	PDCR42	39.767	0.48	0.582	2.399	2.327
DR18	PDCR42	39.777	0.50	0.584	2.409	2.337
DR19	PDCR42	39.788	0.52	0.587	2.420	2.348
DR20	PDCR42	39.809	0.49	0.592	2.442	2.369
DR21	PDCR42	39.831	0.51	0.598	2.464	2.391
DR22	PDCR42	39.852	0.49	0.603	2.486	2.412
DR23	PDCR10	39.873	0.51	0.608	2.508	2.433
DR24	PDCR42	39.895	0.49	0.614	2.530	2.455
DR25	PDCR10	39.916	0.51	0.619	2.553	2.476
DR26	PDCR42	39.938	0.49	0.624	2.575	2.498
DR27	PDCR10	39.959	0.51	0.630	2.597	2.519
DR28	PDCR42	39.981	0.49	0.635	2.619	2.541
DR29	PDCR10	40.002	0.51	0.641	2.641	2.562
DR30	Kulite	40.024	0.49	0.646	2.663	2.584
DR31	Kulite	40.045	0.51	0.651	2.685	2.605
DR32	Kulite	40.067	0.49	0.657	2.708	2.627
DR33	Kulite	40.088	0.51	0.662	2.730	2.648
DR34	Kulite	40.110	0.49	0.667	2.752	2.670
DR35	Kulite	40.131	0.51	0.673	2.774	2.691
DR36	PDCR10	40.172	0.50	0.683	2.816	2.732
DR37	PDCR10	40.213	0.50	0.693	2.858	2.773
DR38	PDCR10	40.254	0.50	0.703	2.900	2.814
DR39	PDCR10	40.317	0.50	0.719	2.966	2.877
DR40	PDCR10	40.399	0.50	0.740	3.050	2.959
DR41	PDCR10	40.951	0.50	0.878	3.619	3.511
DR42	PDCR10	41.463	0.50	1.006	4.146	4.023

Tabel A2 : Talud 1:4 : Typen en coördinaten t.o.v. golfshot (x-coördinaat langs goot, y dwars, z in hoogterichting) van drukopnemers genummerd als in Fig.4. Coördinaten in laatste twee kolommen zijn gemeten vanaf de teen v/d constructie.

B Figuren



Langsdoorsnede Scheldegootproeven met talud 1:3 en 1:4
maten in meters

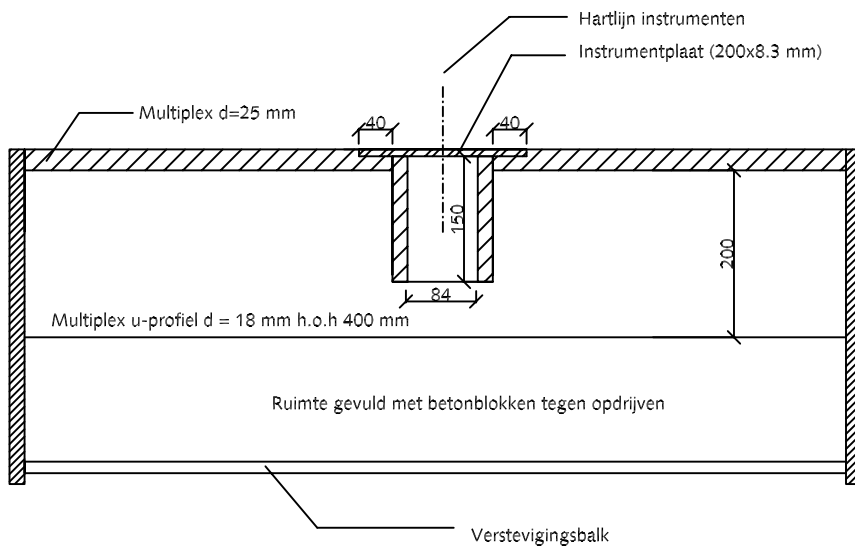
H4329

29-10-2003

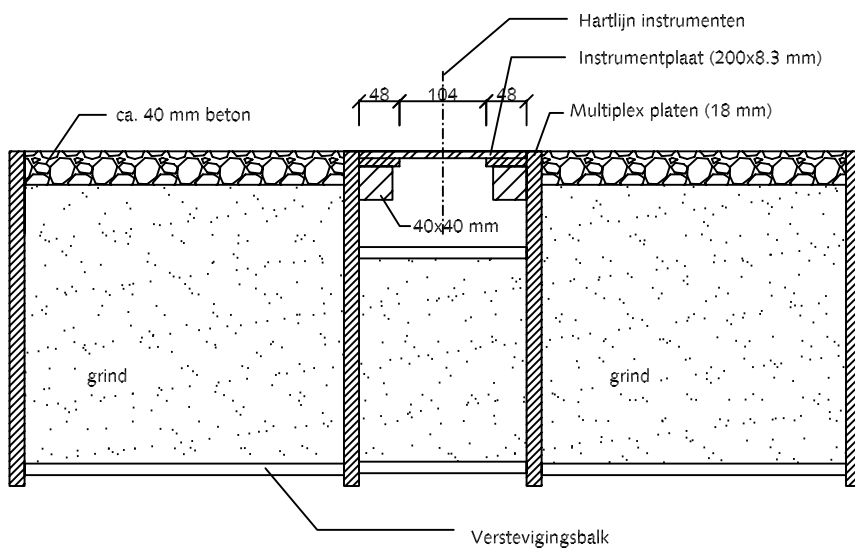
Steenzetting onderzoek
deel A : lange golfperiodes

WL | DELFT HYDRAULICS

FIG. I



Dwarsdoorsnede talud 1:3



Dwarsdoorsnede talud 1:4

Dwarsdoorsnede constructie
talud 1:3 en 1:4

BY: ck
Date: 24-11-03

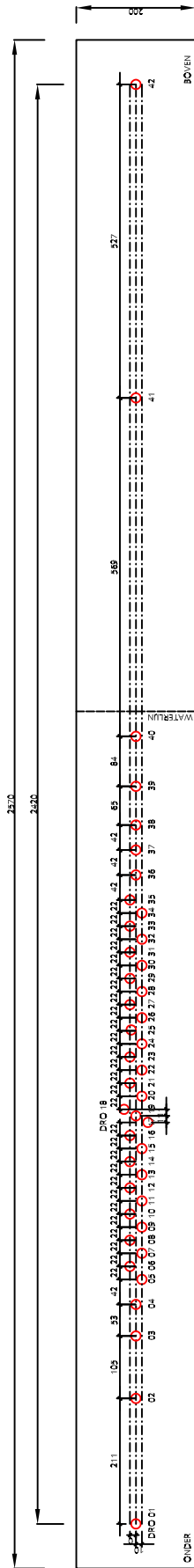


**Verzwaren van het 1:3 talud met verstijvingsribben
(boven / vooraanzicht open talud)**

H4329

29-10-2003

Steenzetting onderzoek
deel A : lange golfperiodes



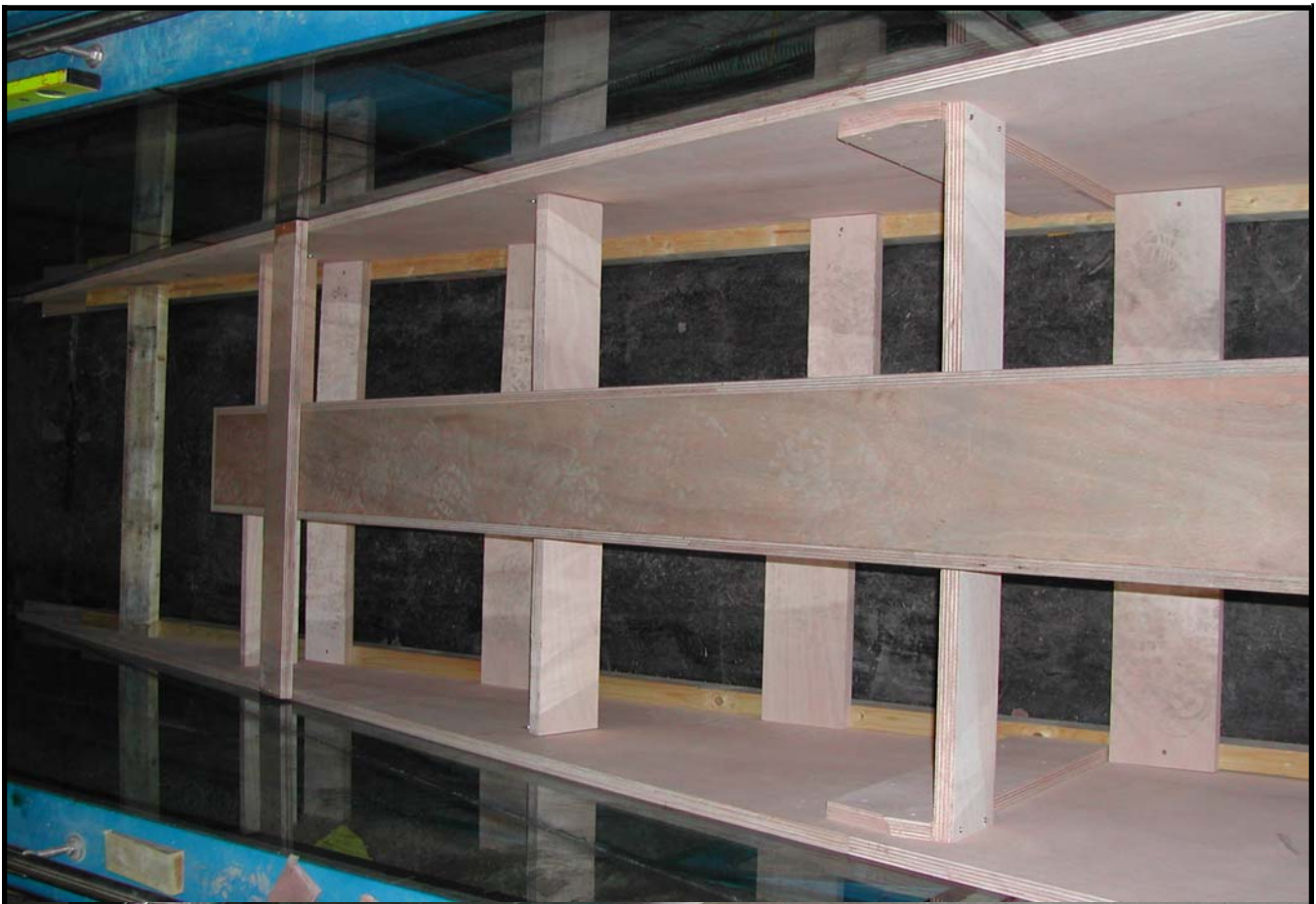
Locatie van de drukopnemers als in Tabel 1 en 2
in de Scheldegoot (talud 1:3 en 1:4)

BY: ck
Date: 06-10-03

WL| Delft Hydraulics

H 4329

FIG. 4



boven (rechts) inwendige houten constructie met tijdelijke afdekplaat voor het betonsmeren.
 Onder (links) Constructie van het 1:4 talud met de betonnen deklaag

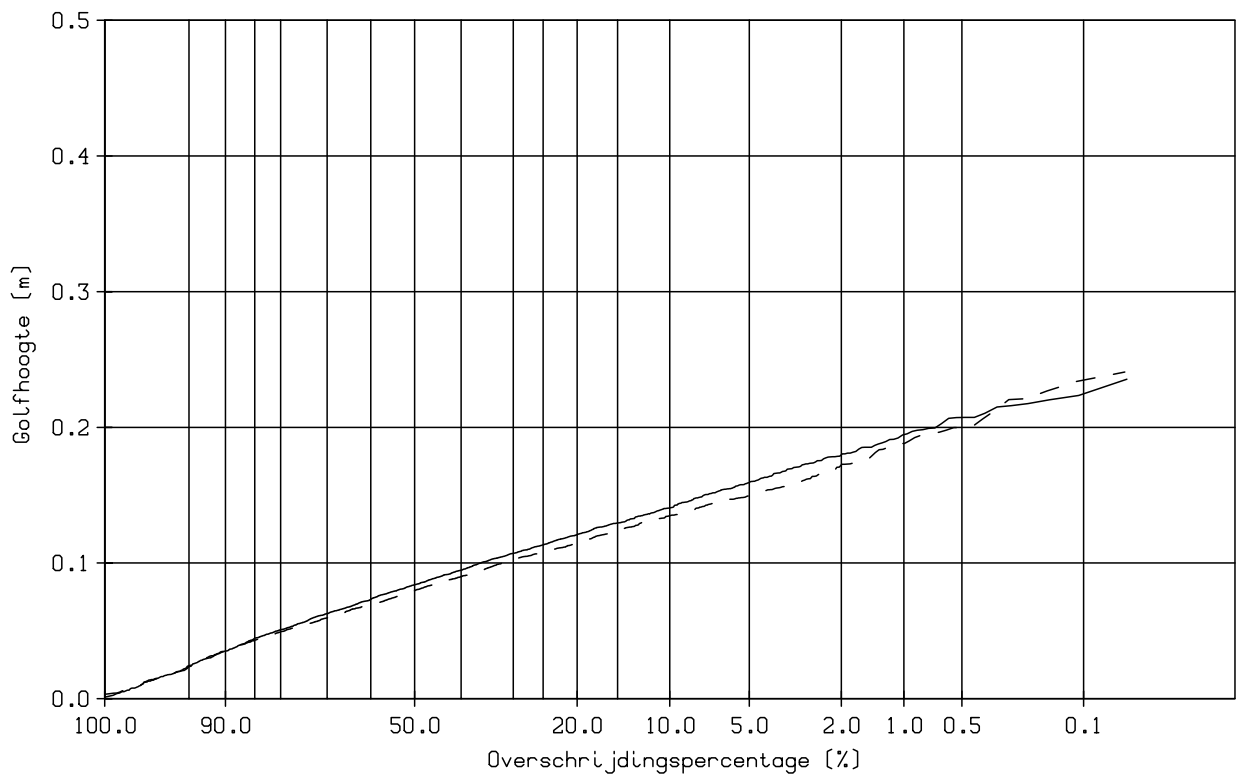
H4329

07-11-2003

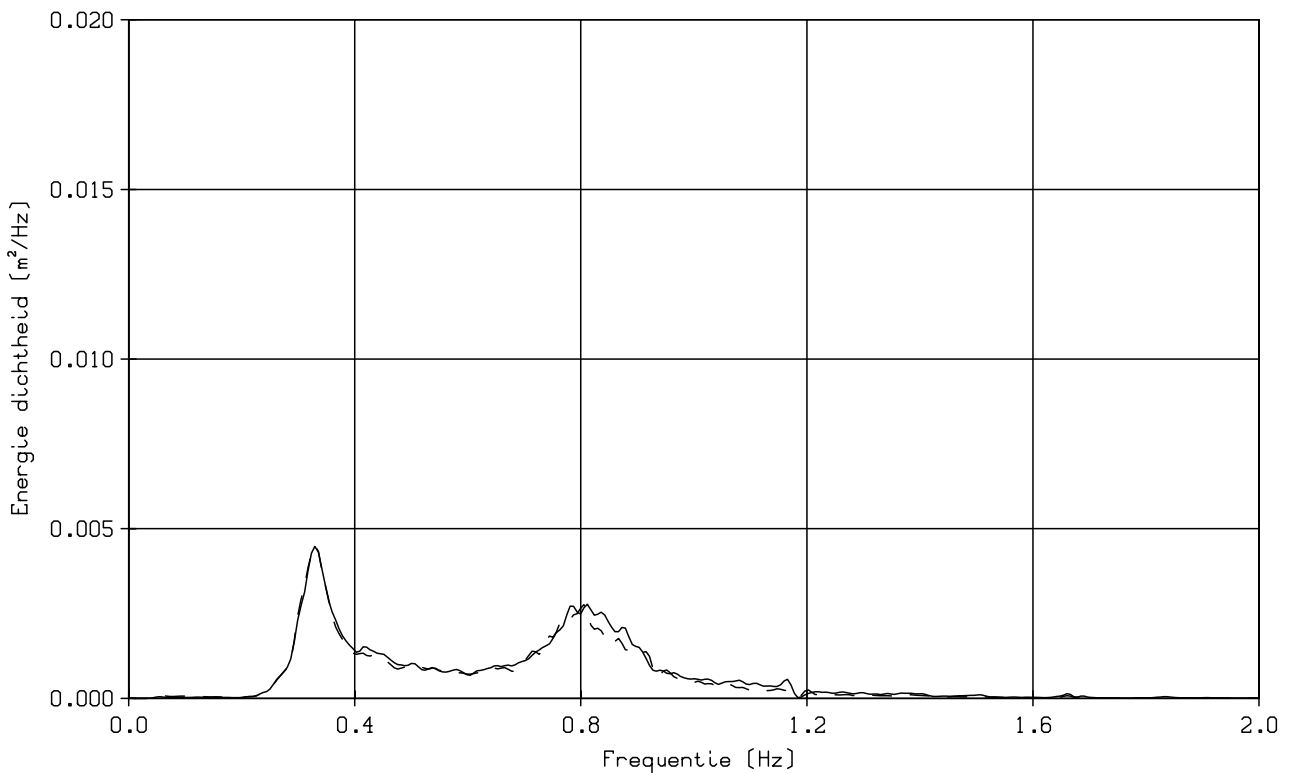
Steenzetting onderzoek
 deel A : lange golfperioden

WL | DELFT HYDRAULICS

FIG. 5



— Inkomend(golfschot)
 - - - Inkomend(teen)



Golfoverschrijdingskrommen en
 gemeten dubbeltoppige spectra

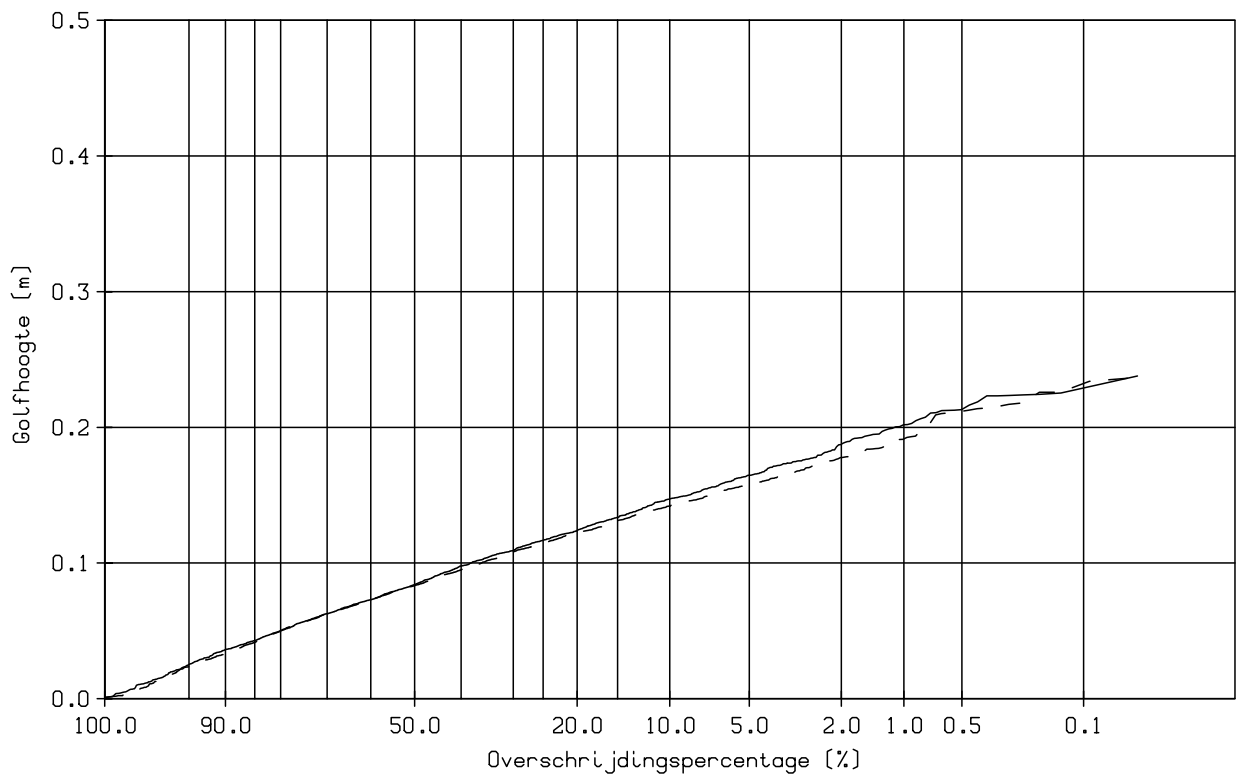
t501

Inkomend signaal

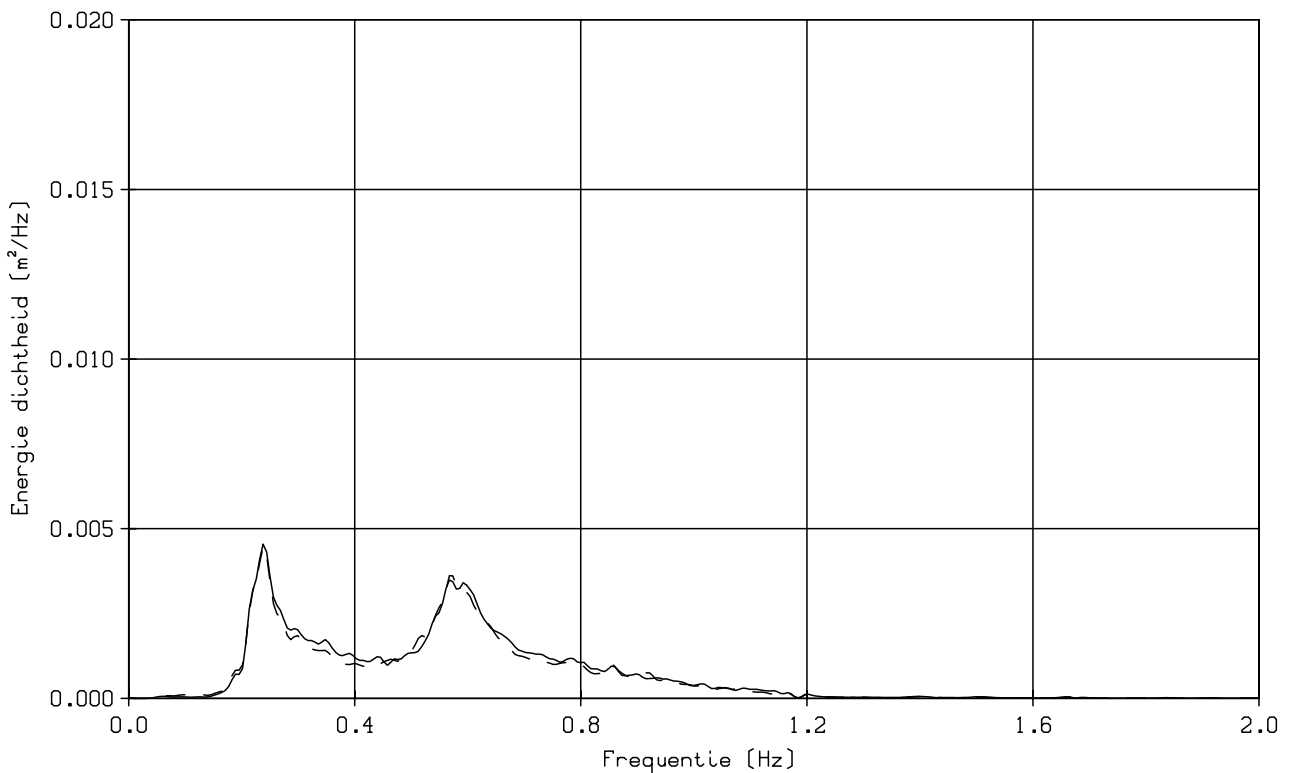
WL | delft hydraulics

H4329

FIG. 06



— Inkomend(golfschot)
 - - - Inkomend(teen)



Golfoverschrijdingskrommen en
 gemeten dubbeltoppige spectra

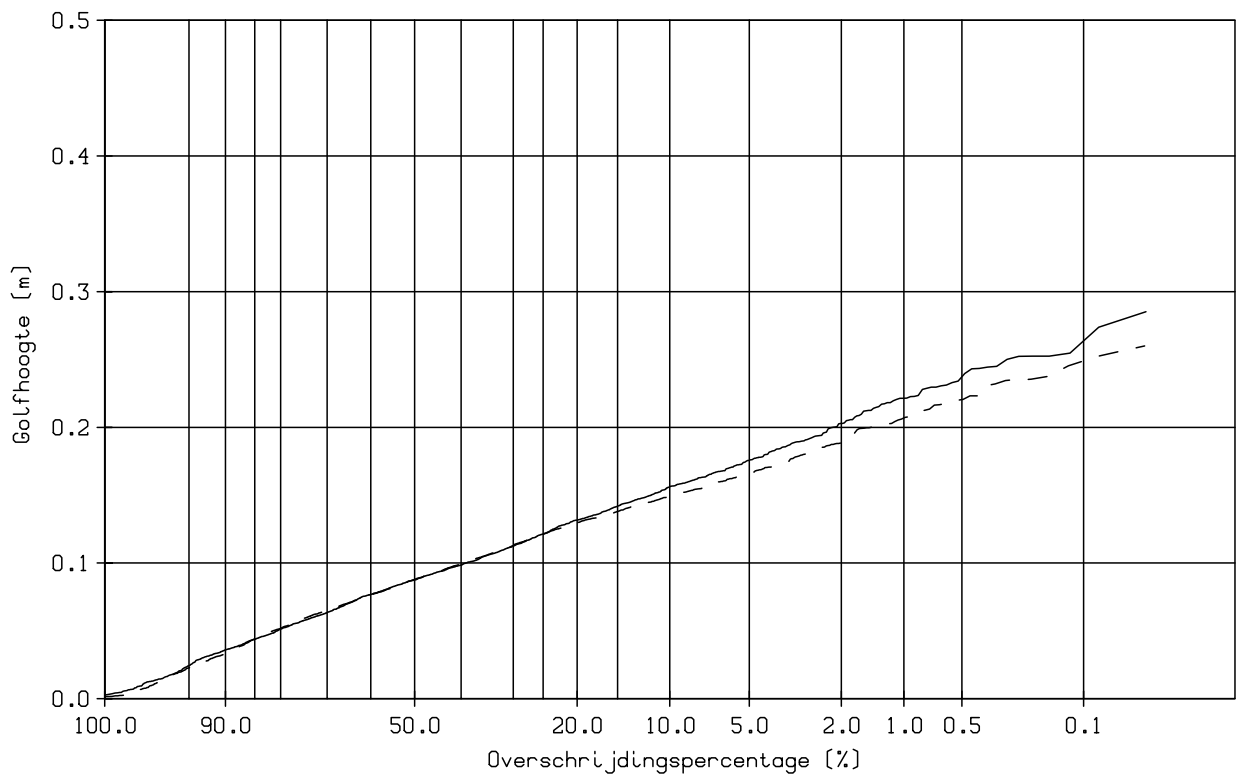
t502

Inkomend signaal

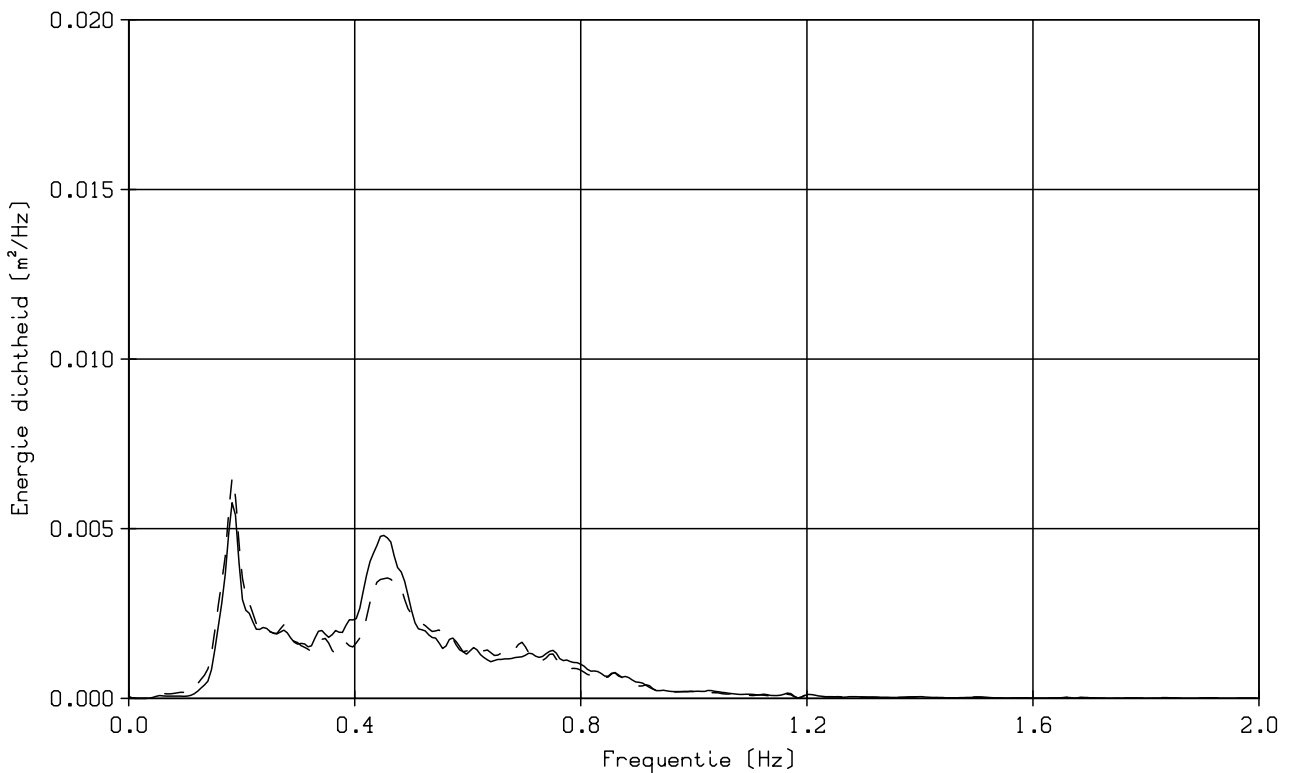
WL | delft hydraulics

H4329

FIG. 07



— Inkomend(golfschot)
 - - - Inkomend(teen)



Golfoverschrijdingskrommen en
 gemeten dubbeltoppige spectra

t503

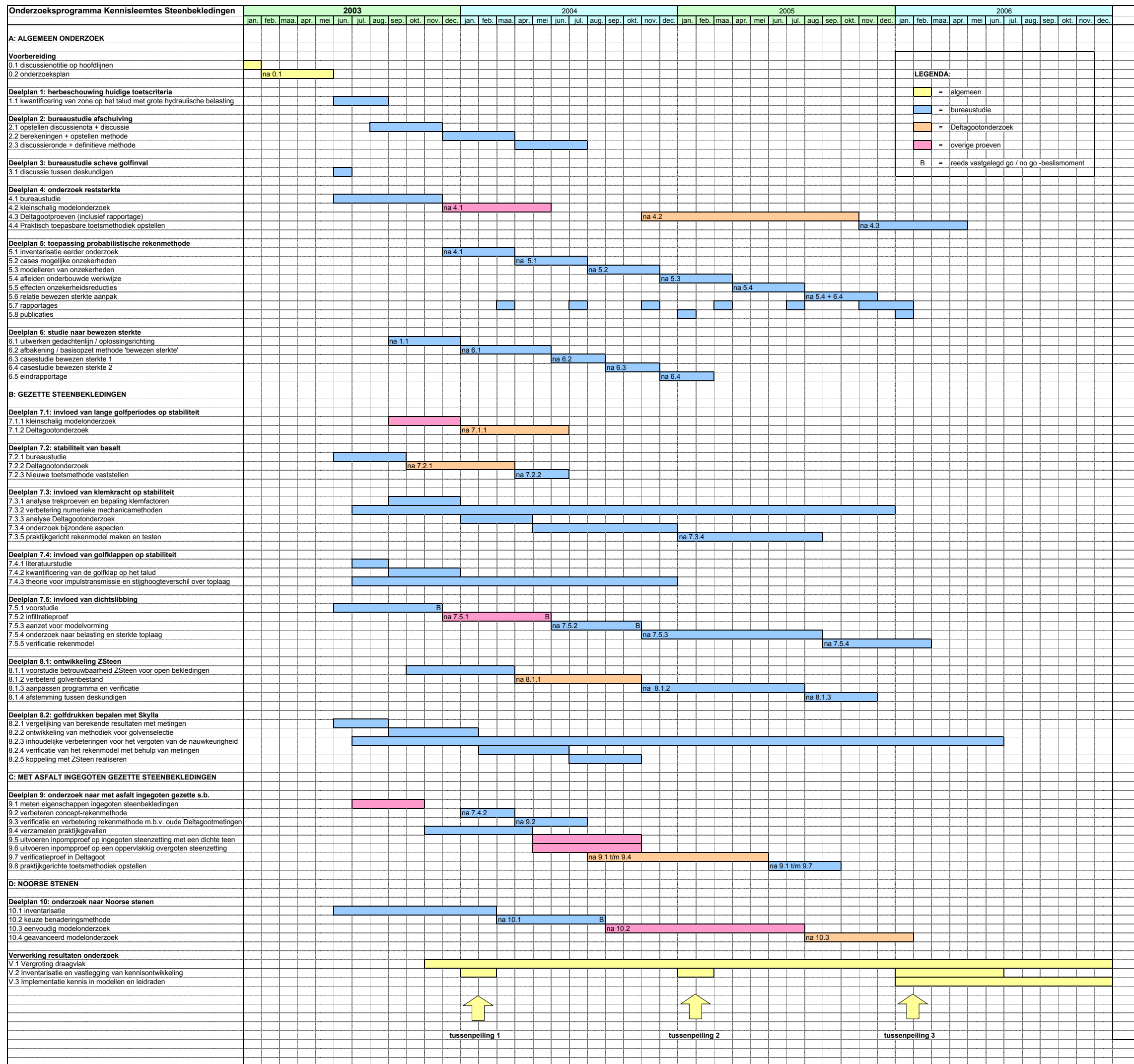
Inkomend signaal

WL | delft hydraulics

H4329

FIG. 08

C Overzicht van het onderzoeksprogramma “kennisleemtes steenbekledingen”



LEGENDA:

- = algemeen
- = bureaustudie
- = Deltagootonderzoek
- = overige proeven
- B = reeds vastgelegd go / no go -beslismoment