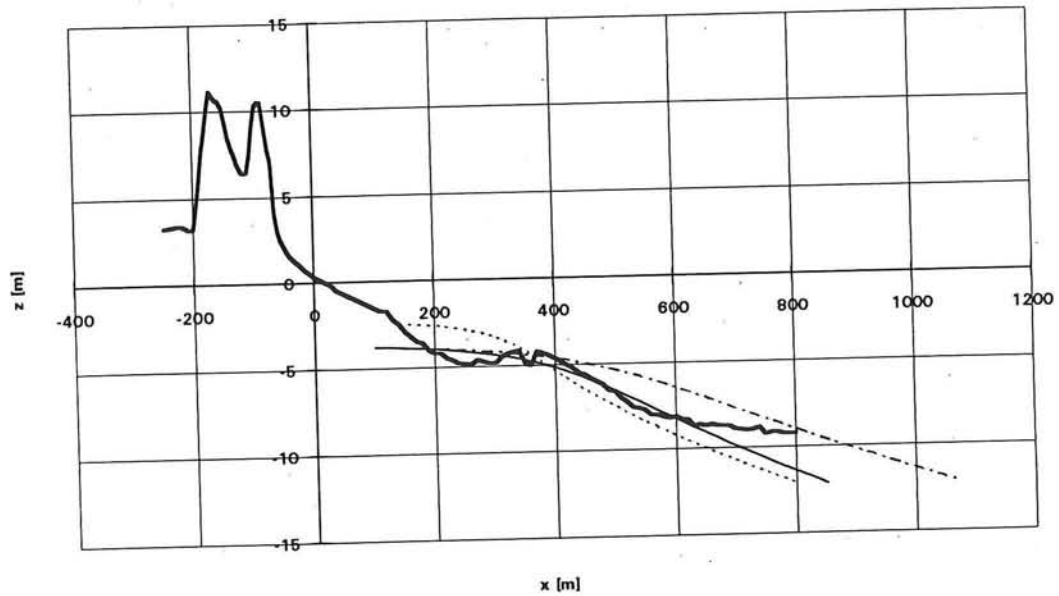


Zanddiodes voor Delfland

Onderzoek naar de invloed van drijvende Offshore golfbrekers op de Delflandse kust



Door: H-J van Engelen

Zanddiodes voor Delfland

**Onderzoek naar de invloed van drijvende offshore golfbrekers op de
Delflandse kust**

H-J van Engelen

Augustus 1995

Afstudeercommissie:

Prof. ir. K. d'Angremond

Ir. W.T. Bakker

W.W. Massie MSc.

Prof. dr. ir. J.A. Pinkster

**T.U. Delft, Faculteit der Civiele Techniek,
Vakgroep Waterbouwkunde, Sectie Kustwaterbouw**

Voorwoord

In het kader van mijn afstuderen heb ik onderzocht hoe de kust reageert op het gebruik van drijvende golfbrekers op enige afstand uit de kust. Het grootste gedeelte van het onderzoek heeft bestaan uit het onderzoeken van morfologische processen en modellen. Hierbij wil ik ir W.T. Bakker noemen vanwege zowel zijn grote deskundigheid op het gebied van de morfologie als zijn hulp bij het onderzoek. Als voorzitter van mijn afstudeercommissie wil ik prof. ir. K. d'Angremond bedanken.

Naast de morfologie is ook de golftransmissie van de drijvende golfbreker zelf onderzocht. Dit onderzoek is gedaan aan de faculteit der Maritieme Techniek. Mijn dank gaat uit naar prof. dr. ir. J.A. Pinkster en ir. A. Versluis, die mij geholpen hebben met het programma Delfrac.

Delft, augustus 1995

Hendrik-Jan van Engelen

Samenvatting

Langs de kust vindt een aanwas en -erosieproces plaats. De kust gaat op bepaalde plekken achteruit terwijl elders de kust juist weer vooruit komt. Is het mogelijk om op een zodanige manier in dit transportproces in te grijpen, dat het aanwas- en erosieproces beheersbaar en bestuurbaar, desgewenst omgedraaid wordt?

Om deze vraag te beantwoorden zijn er twee doelstellingen geformuleerd. Doordat zand voor de kust voortdurend heen en weer gestuurd wordt is er sprake van een wisselstroom. Per jaar blijft er een netto transportstroom over die erosie of aanwas veroorzaakt. Is het mogelijk om voor deze wisselstroom een diode te ontwerpen? Als tweede is tot doel gesteld om de mogelijkheid te onderzoeken of grootschalige landaanwinningsprojecten, zoals bijv. plan Waterman, realiseerbaar zijn volgens het zanddiode-principe.

Om de werking te zien van het zanddiode-principe in te zien, is zowel voor het langtransport als het dwarstransport, een mathematisch model toegepast op de Delflandse kust.

Uit de berekeningen van het langtransport kwam naar voren, dat het mogelijk was om het netto langtransport van zand iedere gewenste richting op te sturen en dat ook de grootte hiervan beïnvloed kan worden. Wanneer golven uit alle richtingen gedempt worden, door ze evenwijdig met de kust te leggen, dan neemt de grootte van het netto transport af. Wanneer echter golven die zorgen voor een Noordelijk gericht zandtransport gedempt worden, dan is het mogelijk om het netto transport Zuidwaarts te laten gaan en in grootte te doen toenemen.

Uit de berekeningen van het dwarstransport kwam naar voren, dat wanneer de golven systematisch gedempt zouden worden, er een profielkanteling optreedt. Zand wordt van de onderkant van het kustprofiel naar de bovenkant vervoerd. Dit doet de kust vooruit komen. Op deze manier is het mogelijk om landaanwinst te creëren.

Uit de berekeningen van langs- en dwarstransport zijn een aantal voorwaarden geformuleerd waaraan een golfbreker moet voldoen om een zanddiode te zijn. Het blijkt dat een golfbreker gevoelig moet zijn voor golven met een hoogte tussen $0,9 < H_{sig} < 2,7$ m en lengte van tussen de $40 < L < 50$ m. De golfbreker zou op een waterdiepte moeten komen te liggen van $h = 10$ m. De afstand uit de kust bedraagt dan ongeveer 1,5 kilometer. Op deze afstand speelt de wederopbouw van de golfhoogte na de golfbreker geen rol van betekenis.

Voor de invulling van de golfbreker is het VA-ponton genomen. Dit betreft een drijvende golfbreker, die speciaal door Vrijhof Ankers ontwikkeld is om het zandtransport te beïnvloeden. Eerder gedane modeltests in een laboratorium zijn vergeleken met de uitkomsten van het golfdiffractie-programma Delfrac. Het VA-ponton voldoet goed aan de voorwaarden, die gesteld zijn vanuit de morfologie.

Door een rij van VA-pontons evenwijdig met de kust te leggen blijkt dat het netto langtransport niet alleen kleiner wordt maar ook dat de richting ervan omdraait. Ook de profielkanteling wordt veroorzaakt, zodat gesproken kan worden van een succesvolle aanpak van het erosieprobleem. Het blijkt echter dat gezien de prijs van het VA-ponton, dit geen goed alternatief is om als zanddiode te gebruiken.

Bij een hoekverdraaiing van de rij VA-pontons met de kust kunnen weliswaar de grootte en richting van het netto transport geregeld worden, alleen er bereiken teveel golven ongestoord het strand. Dit betekent dat de profielkanteling niet optreedt. Het zand moet dus ergens anders vandaan komen. De vraag is dan of er elders geen andere erosie problemen gecreëerd worden.

Het gebruik van het zanddiode-principe voor grootschalige landaanwinningsprojecten, zoals plan Waterman, is minder bruikbaar. Weliswaar is men in staat het netto langtransport flink toe te

laten nemen. De vraag blijft waar dit zand vandaan moet komen en of dat niet leidt tot erosieproblemen elders. De bijdrage van dwarstransport aan het winnen van zand vormt slechts een geringe bijdrage aan het geheel.

Als algemene conclusie kan gezegd worden dat het zanddiode-principe werkt tegen erosieproblemen bij de kust. Wanneer er echter grote veranderingen optreden in het zandtransport moet men zich wel afvragen waar het benodigde zand vandaan gehaald kan worden. Dit kan namelijk leiden tot erosieproblemen elders.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	I
Samenvatting	III
Inhoudsopgave	V
Lijst met figuren.....	VIII
Lijst met tabellen	VIII
Lijst met symbolen	IX
1. Inleiding	1
1.1 Probleemomschrijving	1
1.2 Doelstelling	1
1.2.1 Hoofddoel	1
1.2.2 Subdoel	1
1.3 Methode van aanpak.....	1
1.3.1 Parameters	1
1.3.2 De kust.....	2
1.3.3 De golfbreker	2
2. Langtransport bij Scheveningen	5
2.1 Inleiding.....	5
2.2 Berekeningswijze.....	5
2.2.1 Afleiding formules	5
2.2.2 Berekening van de brekerdiepte D_{br}	6
2.2.3 De golfgegevens	8
2.3 Resultaten Controle berekening.....	9
2.3.1 Controle van eerdere berekening (1969)	9
2.4 Resultaten berekeningen met recentere gegevens.....	12
2.4.1 Verschillen in golfgegevens	12
2.4.2 Definitie parameters en hoek van inval	13
2.4.3 Berekening langtransport.....	14
2.5 Vergelijken met Dijkman	15
2.5.1 Berekeningsmethode	15
2.5.2 Aangebrachte veranderingen in de golfgegevens	16
2.5.3 Langtransport met aangepaste golfgegevens.....	17
2.6 Het effect op het langtransport bij verlaging van de golfhoogte.....	18
2.7 Conclusie	19
3. Verandering van het Evenwichtprofiel.....	21
3.1 Inleiding.....	21
3.2 Uitwerkingen van evenwichtshellingen	21
3.2.1 Evenwichtsprofielen voor verschillende perioden	21
3.2.2 Geldige diepte evenwichtprofielen	25

3.3 Vergelijken met Jarkusbestanden	27
3.3.1 Inleiding	27
3.3.2 Evenwichtprofiel vs. Jarkus	27
3.4 De aanwinst van zand bij verlaging van de golfhoogte	29
3.5 Conclusie	32
4. Te stellen voorwaarden aan de golfbreker	35
4.1 Inleiding	35
4.2 Morfologische voorwaarden	35
4.2.1 Maatgevende golflengte	35
4.2.2 Maatgevende golfhoogte	36
4.2.3 Maatgevende waterdiepte	37
4.2.4 Afstand uit de kust m.b.t. golfregeneratie	38
4.3 Andere voorwaarden	41
4.3.1 tussenafstand	41
4.3.2 lokale beperkingen	41
4.3.3 levensduur	41
4.4 Conclusie	42
5. De Golfbreker	43
5.1 Inleiding "Het Vrijhof Ankers-ponton"	43
5.2 Modeltests	43
5.2.1 Inleiding	43
5.2.2 Geometrie VA-ponton	43
5.2.3 Modeltesten en Resultaten	44
5.3 Delfrac	45
5.3.1 Inleiding	45
5.3.2 Invoer	45
5.3.3 Uitvoer en resultaten	49
5.4 Vergelijken Coëfficiënten	50
5.5 Kostprijsbenadering	52
5.5 Conclusie	53
6. Het effect van het VA-ponton	55
6.1 Inleiding	55
6.2 Doorgerkende cases	55
6.2.1 Golfbrekers evenwijdig met de kust	55
6.2.2 Maximaal transport richting het Zuiden	56
6.3 Conclusie	57
7. Plan Waterman	59
7.1 Inleiding	59
7.2 Het probleem Zuid-Holland	59
7.3 Deelplan 1: De Delflandse kust	59
7.3.1 Huidige kustlijn	59
7.3.2 Beschrijving Deelplan 1	60
7.4 Uitvoering van deelplan 1	60
7.4.1 Inleiding	60
7.4.2 Fasering van kustuitbreiding	61
7.4.3 Bouwen door de natuur	61
7.5 Zanddiode en plan Waterman ?	62

8. Algemene conclusies en aanbevelingen	63
8.1 Kostprijsvergelijking	63
8.2 Het zanddiode-principe	63
8.2.1 Het langstransport	63
8.2.2 Het dwarstransport	63
8.2.3 Het VA-ponton als zanddiode	64
8.2.4 Conclusie	64
8.3 Plan Waterman	64
8.3.1 Zanddiodes en grootschalige projecten	64
8.3.2 Conclusie	64
8.4 Aanbevelingen	64
Referentielijst	67
Bijlage A, B, C, D, E	AI, BI, CI, DI, EI
Appendices I, II	a, h

Lijst met figuren

Nummer:	blz.
1.1 Erosie en aanwas van de Hollandse kust	1
2.1 Energiestroom tussen twee golfstralen	7
2.2 Definitie hoek van inval	9
2.3 Berekening langstransport 1	10
2.4 Berekening langstransport met afgeronde B_T -waarden	11
2.5 Nieuwe definitie hoek van inval	14
2.6 Berekening langstransport 2	14
2.7 Berekening langstransport met aangepaste gegevens van tabel 2.4	17
2.8 Demping alle golven met 70 %	18
2.9 Demping Westelijke golven met 70 %	19
3.1 Evenwichtprofiel voor golven met $T = 4s$	22
3.2 Evenwichtprofiel voor golven met $T = 5s$	23
3.3 Evenwichtprofiel voor golven met $T = 6s$	23
3.4 Evenwichtprofiel voor golven met $T = 8s$	24
3.5 Invloed golfperiode en -hoogte op de hoogte van de brandingsrug	24
3.6 Q_b als functie van kh en s_0	25
3.7 Maximale invloedsdiepte voor de orbitaalbeweging	26
3.8 Vergelijken evenwichtprofielen en Jarkus (1)	28
3.9 Vergelijken evenwichtprofielen en Jarkus (2)	30
3.10 Benadering bovengrens Jarkusprofiel	31
3.11 Benadering Jarkusprofiel bij golfdemping van 70 %	31
3.12 Verandering in bovengrensbenadering	32
4.1 Langstransport per periode	36
4.2 Langstransport per golfhoogteklasse	37
4.3 Golfhoogtegroei bij $h = 24$ m	39
4.4 Vergelijken golfhoogtegroei	40
5.1 Dwarsdoorsnede VA-ponton	44
5.2 Ligging van de golfbrekers t.o.v. de kust	46
5.3 Vergelijking transmissiewaarden standaard situatie	51
5.4 Vergelijking transmissiewaarden oblique situatie	52
6.1 Verschil in langstransport ($\psi = 0^\circ$)	56
6.2 Verschil in langstransport ($\psi = 20^\circ$)	57
6.3 Vorm van volumewinst aan zand	58
7.1 Fasen in drie stappen	61

Lijst met tabellen

Nummer:	blz.
2.1 B_T - waarden	11
2.2 Voorbeeld golfgegevens gepresenteerd door Roskam	13
2.3 "Nieuwe B_T - waarden"	13
2.4 Resultaat ENDEC - berekening	17
3.1 Waarden voor $h_{\max}$	28
4.1 Golflengtes bij $h = 12$ m en diep water	36
5.1 Ideale hoek van inval op diep water	48
5.2 Ideale hoek van inval bij $h = 12$ m	48
5.3 Keuze berekeningen met $\varphi = 0^\circ$	48

5.4	Keuze berekeningen met $\psi = 0^\circ$	48
5.5	Numerieke waarden (%) voor transmissiecoëfficiënten 1	49
5.6	Definitie deelgebieden	49
5.7	Numerieke waarden (%) voor transmissiecoëfficiënten 2	50

Lijst met symbolen

De belangrijkste symbolen, die in de tekst zijn gebruikt worden hieronder opgenoemd. De variabelen die slechts plaatselijk gebruikt worden zijn hier niet opgenomen. Alle symbolen worden op de plaats waar ze geïntroduceerd worden eveneens gedefinieerd.

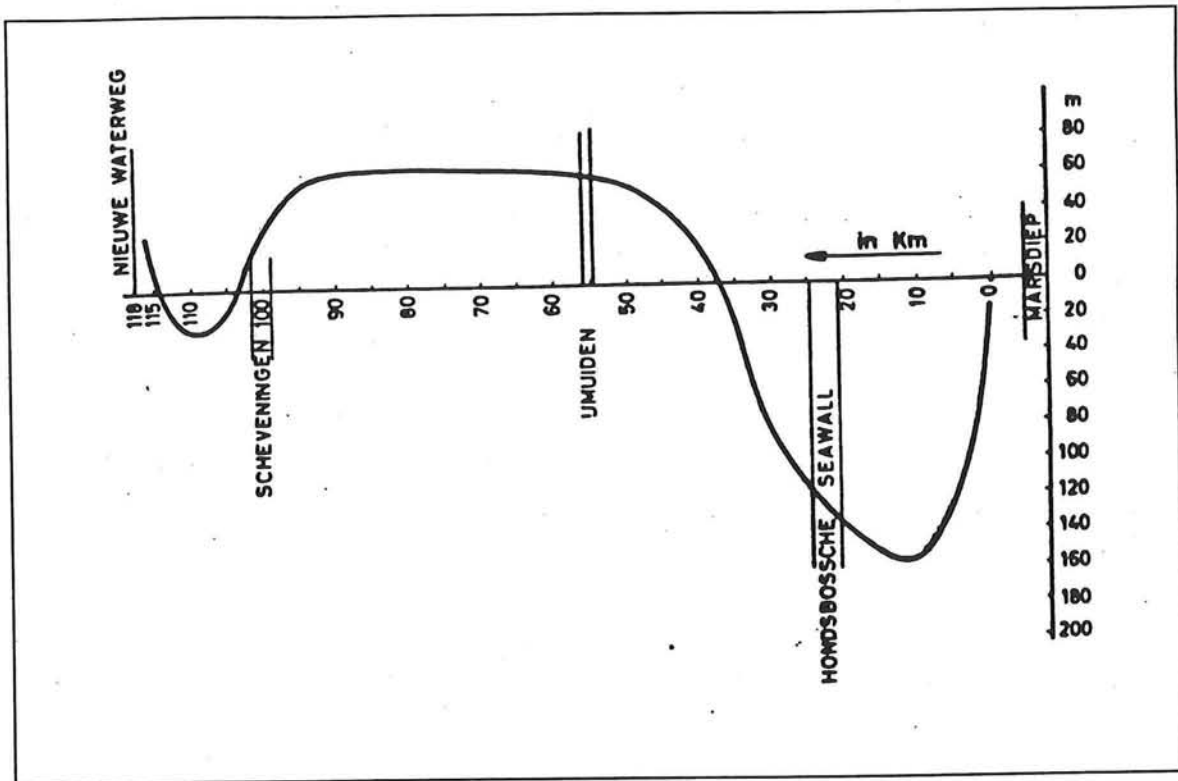
a	amplitude van de golfbeweging	[m]
B_T	tussenvariabele (zie vgl 2.15)	[m ^{0.2}]
c	fasesnelheid	[m/s]
c_0	fasesnelheid op diep water	[m/s]
c_{gr}	groepsnelheid	[m/s]
C_t	transmissiecoëfficiënt	[-]
D_{br}	brekerdiepte	[m]
F	strijklengte	[m]
g	zwaartekrachtversnelling	[m/s ²]
h	locale diepte	[m]
H_0	golfhoogte op diep water	[m]
H_{br}	golfhoogte op de brekerlijn	[m]
H_{rms}	root-mean-square golfhoogte	[m]
H_{sig}	significante golfhoogte	[m]
k	golfgetal	[m ⁻¹]
k_0	golfgetal op diep water	[m ⁻¹]
K_3	evenredigheidsconstante	[m ⁴ /W.jaar]
KK	kompasrichting	[°]
L	golflengte	[m]
L_0	golflengte op diep water	[m]
P_1	de langs de kust gerichte component van het energieverlies	[W/m]
Q_b	fractie van golven die breken	[-]
s_0	golfsteilheid op diep water	[-]
S_{xx}	radiationstress in de richting loodrecht op de kust	[N/m]
T	golfperiode	[s]
T_{eq}	equivalente golfperiode	[s]
u	snelheid in x - richting	[m/s]
$\tilde{u}$	tijdsveranderlijk deel van de snelheid in de x - richting	[m/s]
$\underline{u}$	gemiddelde retourstroom bij de bodem	[m/s]
u_e	stroming in de x - richting door brekende golven	[m/s]
u_s	stroming in de x-richting door niet-brekende golven	[m/s]
U_a	windsnelheid	[m/s]
w	valsnelheid sedimentdeeltje in water	[m/s]
x_e	horizontale coördinaat evenwichtprofiel	[m]
z	verticale coördinaat	[m]
β	hellingshoek talud	[°]
β_e	evenwichtshellingshoek talud	[°]
γ	invalshoek met de normaal van de golfbreker	[°]
φ	invalshoek golven met de kust	[°]
φ_0	invalshoek golven met de kust op diep water	[°]
φ_{br}	invalshoek golven met de brekerlijn	[°]

η	uitwijking wateroppervlak door golven	[m]
ρ	dichtheid water	[kg/m ³]
τ_b	schuifspanning bij de bodem	[N/m ²]
ψ	hoekverdraaiing golfbrekers t.o.v. de kust	[°]
ω	hoekfrequentie	[rad/s]
ζ	set-up	[m]

1. Inleiding

1.1 Probleemomschrijving

Langs de kust vindt een aanwas- en erosieproces plaats. De kust gaat op bepaalde plekken achteruit terwijl elders de kust juist weer vooruit komt. Kennelijk wordt er langs de kust zand verplaatst van de ene naar de andere locatie. Dit wordt geïllustreerd met figuur 1.1 van Edelman [15]. Hierin is het erosie- en aanwasverloop van de Hollandse kust tussen Hoek van Holland en Den Helder te zien van 1860 tot 1960.



Figuur 1.1: Gemiddelde bewegingen van de duinvoet van 1860 tot 1960 van de Hollandse kust

Duidelijk is te zien in, dat in een tijd van honderd jaar zand vanuit de Delflandse kust naar het Noorden is verdwenen. De Delflandse kust is achteruitgegaan terwijl de kust direct ten Noorden naar voren is gekomen. Het meeste zand dat voor deze landaanwinst heeft gezorgd is echter afkomstig van het stuk van de kust een aantal kilometers ten Noorden van IJmuiden.

Het betreft dus een transportprobleem. In het algemeen wordt een vooruitgang van de kust nooit erg gevonden, terwijl een achteruitgang van de kust als verlies wordt ervaren. Is het mogelijk om dit proces zodanig te beïnvloeden, dat het aanwas- en erosieproces beheersbaar en bestuurbaar wordt, desgewenst omgedraaid wordt?

1.2 Doelstelling

1.2.1 Hoofddoel

De erosie en aanwas is het gevolg van een proces, waarbij zand door de zee voor de kust heen en weer gestuurd wordt. Op jaarbasis blijft er een netto transport over dat op de ene plaats voor erosie zorgt en op de andere plaats juist voor aanwas. Het doel van dit afstudeerwerk is nu om een middel te vinden dat ingrijpt in deze wisselstroom van sediment langs de kust. Dit is het principe van een zanddiode. Net als in de elektronica wordt door een diode wisselstroom maar

naar één kant door gelaten, zodat gelijkstroom ontstaat. Door hetzelfde te doen bij het zandtransport langs de kust, kan zo het transport een gewenste richting op gestuurd worden. Met het zanddiode-concept heeft men nu een middel ter beschikking om erosie- en aanwasproblemen langs de kust min of meer op te lossen.

1.2.2 Subdoel

Kan de zanddiode ook gebruikt worden voor de aanwinst van grote stukken land? Gedacht hierbij wordt bijvoorbeeld aan het aanzandingspatroon, dat bij IJmuiden heeft plaatsgevonden. Hier heeft de natuur zelf en stuk land gecreëerd tegen de golfbrekers aan. Kan zo'n stuk land ook elders volgens het diodeprincipe gerealiseerd worden?

1.3 Methode van aanpak

1.3.1 Parameters

Het erosie- en aanwasprobleem betreft een transportprobleem. Welke transporten vinden er bij de kust plaats en welke parameters zijn hierop van invloed?

Bij de kust vinden twee soorten van transport plaats. Transport, dat langs de kust gericht is, zorgt voor verplaatsing van zand van de ene locatie naar een andere locatie. Dit is het langstransport. Er vindt ook transport van zand plaats loodrecht op de kust. Dit is het dwarstransport. Het dwarstransport verplaatst zand in het dwarsprofiel van de kust en bepaalt zo de vorm van dit profiel. Een voorbeeld hiervan is duinafslag na een storm. Tijdens een storm komen er lange en hoge golven voor. Deze verplaatsen zand van de bovenkant van het kustprofiel naar diepere gedeeltes. Na een storm zorgen de kleinere golven er weer voor dat de kust weer wordt opgebouwd.

Om te kunnen bepalen, welke parameters van belang zijn in de aandrijving van langs- en dwarstransport zijn in hoofdstuk 2 en 3 mathematische modellen beschreven. Bij langstransport is bekend, dat het transport t.g.v. getijdestromen verwaarloosbaar is t.o.v. het transport dat veroorzaakt wordt door golven. De invloed van het getij op het langstransport wordt dan ook buiten beschouwing gelaten. Parameters, die van belang zijn voor het langstransport, zijn naast de golfhoogte H en de golfperiode T , de hoek van inval van golven met de kust φ en de groepssnelheid van golven c_{gr} .

Bij het vormen van een kustprofiel door het dwarstransport zijn niet alleen de golfhoogte H en periode T van belang, maar ook de diepte h , en de valsnelheid van het zand w .

Welke van deze parameters is nu op de een of ander manier beïnvloedbaar? Het blijkt, dat alleen de golfhoogte met succes beïnvloed kan worden. De groepssnelheid van golven is, net zoals hun lengte, gerelateerd aan de golfperiode T . De periode van een golf kan moeilijk beïnvloed worden. De hoek van inval van golven met de kust wordt bepaald door de windrichting. Ook de wind laat zich niet beïnvloeden. Uit zand is een kust opgebouwd. De valsnelheid w is gerelateerd aan de korrelgrootte D_{50} . Deze is niet te beïnvloeden. Ook aan het verloop van de diepte h kan niets gedaan worden. Er kan natuurlijk wel op kunstmatige manier zand aan toegevoegd of weggehaald worden m.b.v. baggerschepen, maar dat is niet de bedoeling. Om in te kunnen grijpen in het transport is dus de golfhoogte H de enige parameter, die hiervoor geschikt is. De golfhoogte kan dan echter alleen maar kleiner gemaakt worden door een soort golfdemper. Voor het uitvoeren van de zanddiode wordt gekozen voor een golfbreker.

Het model van het langstransport zal getoetst worden door het te vergelijken met andere studies naar de grootte van het langstransport. Hierdoor is bekend, wat de orde van grootte van het langstransport is. Het model van het dwarstransport is getoetst aan reële kustprofielen. Op basis

van de uiteindelijke resultaten zijn de randvoorwaarden, waarbinnen de golfbreker moet opereren, geformuleerd.

1.3.2 De kust

Voor het toetsen van modellen voor het dwars- en langstransport is een kust nodig waarbij de invloed van een zanddiode gemakkelijk is in te zien. Gekozen is om de Delflandse kust te beschouwen. Dit is een kust met evenwijdige dieptelijnen, wat de berekening van het langstransport vergemakkelijkt. In het dwarsprofiel van deze kust komen nauwelijks brandingsruggen voor. Ook dit zorgt ervoor dat een verandering van het kustprofiel snel in te zien is.

Voor deze kust is door Waterman [27] een grootschalig plan uitgewerkt voor kustuitbreiding. Het plan Waterman voorziet in een wigvormige kustuitbreiding tussen Hoek van Holland en Scheveningen van circa $3 \cdot 10^3$ ha. De kust zal dan bij Scheveningen enkele honderden meters vooruit gaan en bij Hoek van Holland zelfs enkele kilometers.

Het idee is om m.b.v. dwarstransport zand naar de bovenkant van het kustprofiel te transporteren. Dit zand kan dan gebruikt worden om m.b.v. het langstransport naar het zuiden af te voeren, zodat daar een grotere landaanwinst gecreëerd kan worden. Beredeneerd wordt of door de gevolgen van het ingrijpen in langs- en dwarstransport, een deel van het plan Waterman voor de Delflandse kust gerealiseerd kan worden.

1.3.3 De golfbreker

Golfbrekers komen in diverse vormen voor. Zo zijn er bijvoorbeeld golfbrekers gemaakt van stortsteen. Er kan een zandrif aangelegd worden. Een aparte categorie vormt de drijvende golfbrekers. Tot deze laatste categorie beperkt zich dit afstudeerwerk. Vroeger was het grote probleem van een drijvende golfbreker zijn verankering. De golfbrekers sloegen gemakkelijk los van hun ankers en dreven of los rond op zee of zij strandden op de kust. Vandaag de dag is de verankerings techniek aanzienlijk verbeterd. Dit is te danken aan de ontwikkeling van de offshore technologie. Dit betekent dat de drijvende golfbreker in ere hersteld kan worden. Het voordeel van een drijvende golfbreker t.o.v. een vaste golfbreker is, dat zij in alle gewenste hoeken met de kust kan worden gelegd en op die manier de golven op steeds een andere manier kan beïnvloeden. Terwijl een vaste golfbreker slechts in een hoek met de kust kan komen te liggen en zo altijd moet blijven liggen. In hoofdstuk 4 wordt uitgewerkt aan welke randvoorwaarden zo'n golfbreker moet voldoen indien zij met succes in kan grijpen in het zandtransport.

Een ontwerp voor een drijvende golfbreker is bijvoorbeeld het VA-ponton (Vrijhof Ankers-ponton). Dit VA-ponton is ontworpen door Ing. R. van den Haak, speciaal om zandtransporten te beïnvloeden. Een model hiervoor is in 1993 getest in het Laboratorium van Vloeistofmechanica aan de T.U. Delft. De uitkomsten m.b.t. golftransmissie en verankeringskrachten waren veel belovend. In hoofdstuk 5 wordt de invloed van het VA-ponton op de golfhoogte nader onderzocht. Dit is gedaan m.b.v. een golfdiffractieprogramma Delfrac dat de golftransmissie rondom een drijvende constructie kan uitrekenen. Deze berekeningen met Delfrac zijn gedaan in samenwerking met de faculteit der Maritieme Techniek.

In hoofdstuk 6 volgt het effect van een zanddiode op het langstransport bij de Delflandse kust. Hier wordt bepaald hoe groot de netto transportstroom langs de kust kan worden.

In hoofdstuk 7 worden de hoofdlijnen van het plan Waterman voor de Delflandse kust beschreven. En beredeneerd wordt in hoeverre realisatie daarvan m.b.v. het zanddiode-concept tot de mogelijkheden behoort.

Tot slot volgen in hoofdstuk 8 de algemene conclusies en aanbevelingen.

2. Langtransport bij Scheveningen

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een model voor het langtransport beschreven. Het wordt uitgewerkt voor de kust van Scheveningen, aangenomen wordt dat dit representatief is voor de Delflandse kust. Gekozen is een eerdere studie van Bakker [2] (1969) naar het langtransport bij Scheveningen te controleren. Dit model is gekozen, omdat het een snel inzicht verschaft in de gevolgen van kleine veranderingen in de golfgegevens. Bij deze veranderingen moet gedacht worden aan een verlaging van de golfhoogtes. De controleberekening is gedaan door het model om te zetten in een spreadsheets programma en de berekeningen op basis van de gegevens uit 1969 nogmaals uit te voeren. De verschillen met de toenmalige uitkomsten worden besproken. Hierna is de berekening over gedaan met meer recente golfgegevens (1988).

2.2 Berekeningswijze

2.2.1 Afleiding formules

In dit rapport wordt uitgegaan van de theorie van Svašek [25]. Deze gaat uit van de CERC-formule waarin het langtransport evenredig gesteld wordt met de langs de kustgerichte component van de energiestroom van een golf. Deze theorie breidt Svašek uit door te zeggen dat het langtransport tussen twee dieptelijnen evenredig is met de langs de kust gerichte component van het energieverlies P_l [W/m] tussen deze twee dieptelijnen. In formulevorm geldt nu voor de waarde van P_l :

$$P_l = N_{br} \cos \varphi_{br} \sin \varphi_{br} \quad (2.1)$$

Hierin is φ_{br} de hoek van inval van een golf op de brekerlijn. De energiestroom N_{br} is gelijk aan:

$$N_{br} = \frac{1}{8} \rho_w g H_{br}^2 [c_{gr}]_{br} \quad (2.2)$$

Hierin is:

H_{br}	de brekerhoogte [m]
$[c_{gr}]_{br}$	de groepssnelheid van golven in de brekerzone [m/s]
ρ_w	de dichtheid van zeewater [kg/m ³]
g	zwaartekrachtversnelling [m/s ²]

Om de waarde voor het jaarlijkse sedimenttransport te vinden wordt P_l vermenigvuldigd met de evenredigheidsconstante K_3 . Deze constante wordt gebruikt om het volume van het transport te calibreren met de werkelijkheid. Dit gebeurt door een zandbalans op te stellen over het beschouwde kustvak. Door erosie en aanzanding op verschillende plaatsen in het kustvak met elkaar te vergelijken kan een indruk worden verkregen over het volume van het langtransport. De constante K_3 heeft hier een waarde van $K_3 = 2 \cdot 10^3$. Voor de afleiding van deze waarde voor K_3 wordt verwezen naar Bakker [2].

Om de berekening handzamer te maken wordt vergelijking 2.1 uitgedrukt in termen van D_{br} , dit is de brekerdiepte, en de verhouding $\frac{\sin \varphi_0}{c_0}$, waarin φ_0 en c_0 respectievelijk de hoek van inval en fasesnelheid van golven op diep water zijn. Hierbij zal rekening worden gehouden met de volgende aannames:

- De significante golfhoogte in de brekerzone is 0,4 maal de brekerdiepte.

$$(H_{sig})_{br} = 0,4 D_{br} \quad (2.3)$$

- De voortplantingssnelheid in de brekerzone is gelijk gesteld aan de groepssnelheid in de brekerzone, waarbij uitgegaan wordt van solitary wave theory:

$$c_{br} = \sqrt{g(D_{br} + H_{br})} = \sqrt{g(1,4 D_{br})} \quad (2.4)$$

- Wanneer wordt aangenomen, dat het spectrum smal is dan geldt:

$$\overline{H_{br}^2} = \frac{1}{2} (H_{sig})_{br}^2 \quad (2.5)$$

In deze vergelijking geldt voor de waarde van de golfhoogte H_{sig} , het gemiddelde van de hoogste een derde golven uit een registratie. De golfhoogte wordt hier gemeten tussen drie op- of neergaande nuldoorgangen.

- Alle dieptelijnen zijn evenwijdig.
- In de brekerzone wordt $\cos \varphi_{br} = 1$ gesteld. Dit impliceert, dat golven in de totale brekerzone loodrecht op de kust af komen. In werkelijkheid zal een golf bij het begin van de brekerzone nog een hoek van inval met de kust maken, terwijl in theorie de golven pas bij het strand loodrecht op het strand afkomen. Dit brengt een kleine onnauwkeurigheid met zich mee. Bedacht moet echter worden dat de geschatte nauwkeurigheid van de berekening met de aannames 2.3 t/m 2.5 een factor 2 bedraagt. Dit rechtvaardigt de beslissing om enige nauwkeurigheid in te leveren.

Voor een kust met evenwijdige dieptelijnen kan de wet van Snellius gebruikt worden, zodat er voor $\sin \varphi_{br}$ geschreven kan worden:

$$\sin \varphi_{br} = c_{br} \frac{\sin \varphi_0}{c_0} \quad (2.6)$$

Nu kan met de vergelijkingen 2.2 en 2.6 en $\cos \varphi_{br} = 1$, vergelijking 2.1 herschreven worden als:

$$P_l = \frac{1}{8} \rho_w g \overline{H_{br}^2} c_{br}^2 \frac{\sin \varphi_0}{c_0} \quad (2.7)$$

Wanneer nu vergelijkingen 2.3 t/m 2.5 ingevuld worden in vergelijking 2.7 dan wordt, met voor $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ en $\rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$, voor P_l gevonden:

$$P_l = 1380 D_{br}^3 \frac{\sin \varphi_0}{c_0} \quad (2.8)$$

2.2.2 Berekening van de brekerdiepte D_{br}

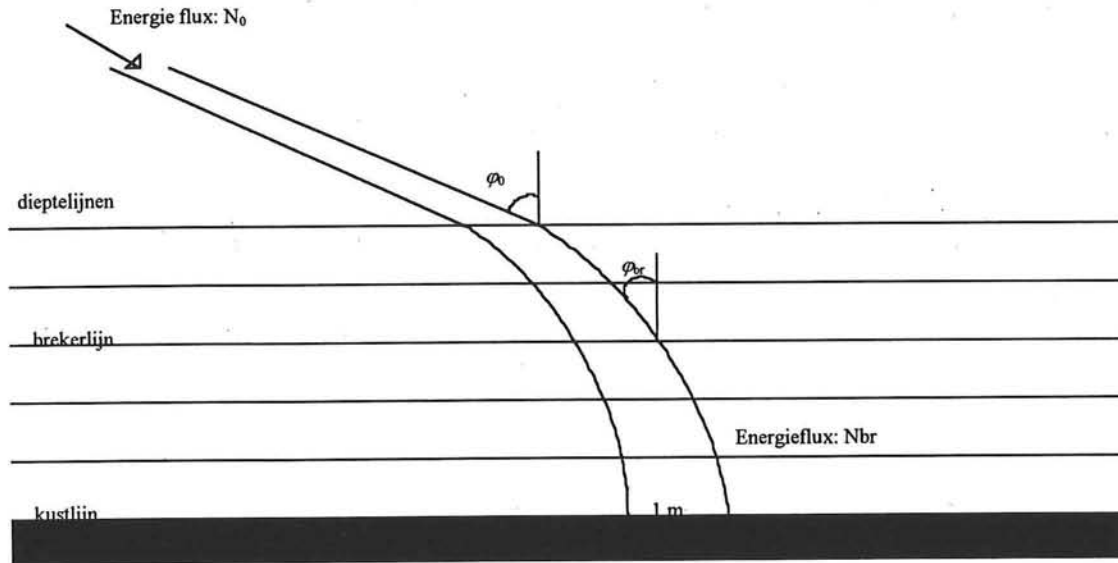
De waarde van P_l kan nu berekend worden wanneer er drie variabelen bekend zijn.

$$P_l = f(D_{br}, \varphi_0, c_0) \quad (2.9)$$

De golfgegevens zoals gepresenteerd door Dorrestein [14] of Roskam [22] geven meteen waarden voor φ_0 samen met de waarde voor de periode T [s]. De waarde voor c_0 is eenvoudig te bepalen met:

$$c_0 = \frac{gT}{2\pi} \quad (2.10)$$

De enige onbekende variabele in vergelijking 2.8 is nu de waarde voor de brekerdiepte D_{br} . Beschouw om deze te bepalen twee golfstralen, die bij de kust een afstand l uit elkaar liggen. zie figuur 2.1.



Figuur 2.1: Energiestroom tussen twee golfstralen

De energiestroom hiertussen bedraagt op diep water:

$$N_0 \cos \varphi_0 = \frac{1}{16} \rho_w g \overline{H_0^2} c_0 \cos \varphi_0 \quad (2.11)$$

Voor de energiestroom net buiten de brandingszone kan samen met vergelijkingen 2.3 t/m 2.5 geschreven worden:

$$N_{br} \cos \varphi_{br} = \frac{1}{8} \rho_w g \overline{H_{br}^2} c_{br} \cos \varphi_{br} = \frac{1}{8} \frac{1}{2} (0,4)^2 \sqrt{1,4} \rho_w g^{3/2} D_{br}^{5/2} \cos \varphi_{br} \quad (2.12)$$

Gesteld wordt dat de maximale hoeveelheid energie die zich door de brandingszone kan bewegen dit ook doet. Dan kan N_0 gelijk gesteld worden aan N_{br} . Uit deze uitdrukking kan dan een vergelijking voor D_{br} gehaald worden.

$$D_{br} = \left[\frac{H_{sig}^2 c_0 \cos \varphi_0}{2(0,4)^2 \sqrt{1,4} g \cos \varphi_{br}} \right]^{2/5} \quad (2.13)$$

Om D_{br} te berekenen, wordt als tussenstap eerst een benadering voor de brekerdiepte D'_{br} berekend, waarbij $\cos \varphi_{br} = 1$ wordt gesteld.

$$D'_{br} = B_T H_{sig}^{4/5} \cos^{2/5} \varphi_0 \quad (2.14)$$

Waarvoor voor B_T geldt:

$$B_T = \left[\frac{c_{gr}}{(0,4)^2 \sqrt{1,4g}} \right]^{2/5} \quad (2.15)$$

Met deze D'_{br} kan nu de $\cos \varphi_{br}$ berekend worden en uiteindelijk de D_{br} .

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{br} &= \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_{br}} = \sqrt{1 - \frac{c_{br}^2}{c_0^2} \sin^2 \varphi_0} \Leftrightarrow \\ \cos \varphi_{br} &= \sqrt{1 - \frac{1,4gD'_{br}}{c_0^2} \sin^2 \varphi_0} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Voor D_{br} geldt nu uiteindelijk:

$$D_{br} = \frac{D'_{br}}{\cos^{2/5} \varphi_{br}} \quad (2.17)$$

Door de gevonden waarde voor D_{br} in te vullen in vergelijking 2.8 kan de waarde van P_l te bepaald worden. In de volgende paragraaf wordt het langstransport voor Scheveningen uitgewerkt met golfgegevens van Dorrestein. Daarna wordt het totale langstransport bepaald met recentere golfgegevens van Roskam.

2.2.3 De golfgegevens

Voordat er gerekend kan worden zijn er eerst golfgegevens nodig. De golfgegevens die in eerste instantie gebruikt worden zijn afkomstig van Dorrestein [14]. Deze golfgegevens verkregen van de lichtschepen mogen niet zonder meer toegepast worden op de formules. Op het Lichteiland Goeree (LEG) werden golfhoogtes, -perioden en -richtingen visueel geschat. Bovendien zijn zij gemeten op enige afstand uit de kust bij een waterdiepte van 24 meter. Aangezien het transport in de brandingszone plaatsvindt is het van belang om de golfhoogte hier te kennen. Op het booreiland Triton ter hoogte van Kijkduin zijn ook golfhoogtes en -perioden gemeten. De diepte bij Triton bedraagt slechts 10 meter, hetgeen dicht bij de brandingszone is. Bovendien zijn de gegevens van Triton m.b.v. een stappenbaak gemeten. Met behulp van correlatiegrafieken van golfgegevens tussen LEG en Triton (Harreveld [17]) kan de significante golfhoogte bij LEG bepaald worden voor een diepte van $h = 10$ meter. Uit het onderzoek van Harreveld blijkt dat de gemiddelde periode T_m , gemeten uit het aantal opwaartse nuldoorgangen een factor 1,5 kleiner is dan de visueel gemeten golfperiode op Goeree T_{ge} .

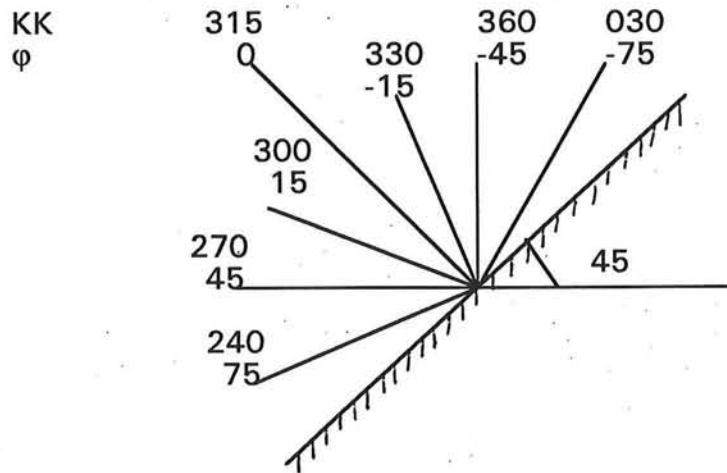
Uit analyse van Battjes [7] blijkt dat de periode die het golfbeeld zo goed mogelijk beschrijft, de equivalent periode T_{eq} , die periode is waarbij de energie/oppervlak en het energietransport/ m^1 van een enkelvoudige golf gelijk zijn aan die van het golfbeeld. Battjes vindt nu voor deze periode $T_{eq} = 1,23 T_m$.

Nu wordt :

$$T_{eq} = \frac{1,23}{1,5} T_{ge} = 0,82 T_{ge} \quad (2.18)$$

Daarmee zijn de golfgegevens van LEG volledig getransformeerd naar een diepte van $h = 10$ m.

De hoek van inval φ_0 met de kust wordt zoals aangegeven in figuur 2.2 gedefinieerd samen met de gegeven windrichtingen. Dit zijn dezelfde windrichtingen, die Dorrestein gebruikt. De kust bij Scheveningen is gedefinieerd als een rechte lijn die een hoek van 45° met het noorden (360°) maakt.



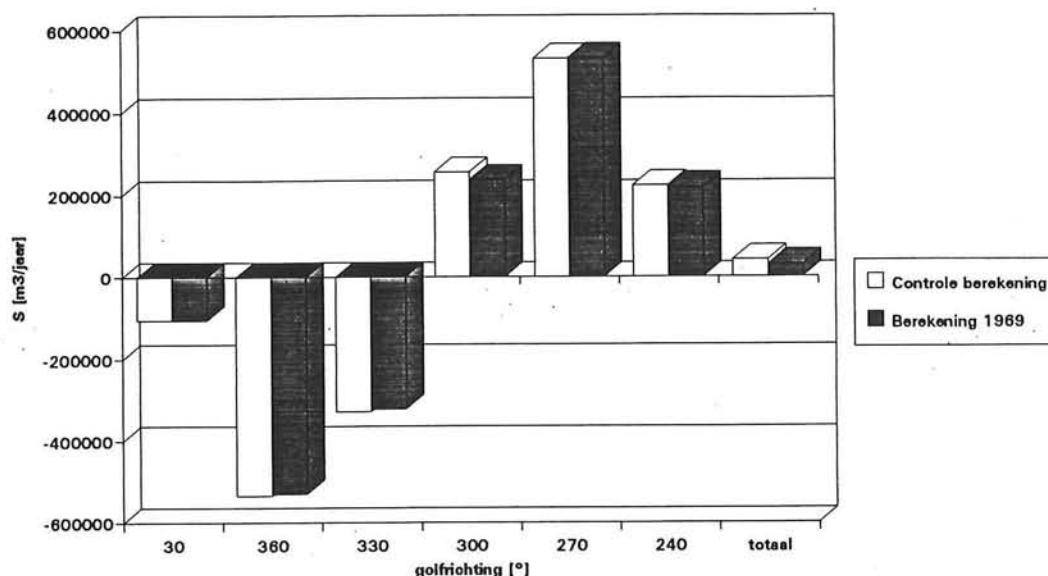
Figuur 2.2: Definitie hoek van inval

2.3 Resultaten controle berekening

2.3.1 Controle van eerdere berekening (1969)

De berekening gaat nu als volgt. Voor elke windrichtingsklasse wordt per golfhoogte en per golfperiode de waarde voor P_l berekend. Deze wordt vermenigvuldigd met de kans op voorkomen, zoals gevonden in Dorrestein. Alle gevonden waarden bij elkaar opgeteld vormen de totale waarde voor P_l . Om de waarde voor het jaarlijks zandtransport in $m^3/jaar$ te vinden wordt P_l vermenigvuldigd met calibratiefactor $K_3 = 2 \cdot 10^3$. Het jaarlijks transport per golfrichting staat in tabel a1 van bijlage A1 weergegeven. In bijlage A5 zijn tabellen van de controle-berekening opgenomen. Hierin staan voor elke golfhoogteklasse en periode de waarde voor H_{sig} , D_{br} , P_l en de kans vermeld.

In figuur 2.3 is het resultaat van de controleberekening uitgezet samen met de berekening uit 1969. Langs de x-as is het transportrichting per golfrichting uitgezet. De waarden langs de y-as geven de grootte van het transport per golfrichting. Een positieve waarde duidt op een Noordelijk gericht transport en een negatieve waarde duidt op een Zuidelijk gericht transport. De laatste kolom geeft de waarde van het netto transport per jaar.



Figuur 2.3: Berekening langstransport I

Het totale transport volgens de controleberekening bedraagt circa $43 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Het totale transport dat gevonden is in 1969 bedraagt circa $30,6 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$.

Ondanks het feit dat voor beide berekeningen dezelfde golfgegevens en methode gebruikt zijn, wordt een verschil geconstateerd in de waarde van het netto transport van circa $10 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Bedacht moet worden, dat een netto transport van orde grootte $30 \cdot 10^3$ a $43 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ zand op jaarbasis, op morfologisch gebied gezien een klein getal is. De Noordelijke en Zuidelijke gerichte componenten van de transportstroom zijn van dezelfde orde van grootte. Het totaal noordelijk transport bedraagt in de controleberekening $10,1 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{jaar}$ (zie tabel a1 uit bijlage A1). Terwijl dit in de berekening van 1969 een volume heeft $9,89 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{jaar}$ (tabel a2 uit bijlage A2). Het verschil hiertussen bedraagt 1% van het totale transport in Noordelijke richting. Voor de Zuidelijk gerichte component van het transport bedraagt deze afwijking slechts 2 %. Geconstateerd kan worden, dat de controleberekening en de eerdere berekening nauwelijks van elkaar verschillen.

Waar komt het optredende verschil dan toch vandaan, aangezien de berekeningsmethode en de golfgegevens hetzelfde waren. Als mogelijke oorzaak voor de optredende verschillen worden de afrondingen van de tussenberekeningen gezien. In 1969 zijn veel waarden noodzakelijkerwijs op 2 of 3 cijfers achter de komma afgerond. De nieuwe berekeningen zijn echter uitgevoerd met het spreadsheet programma Ex-cel 4.0. Dit programma rekt met een veel grotere nauwkeurigheid. De kleine veranderingen die voorkomen in de tussenberekeningen zorgen voor verschillen in de berekening voor de uiteindelijke brekerdiepte. Dit leidt tot grote verschillen in de waarde van het langstransport, aangezien de brekerdiepte D_{br} tot de derde macht in vergelijking 2.13 voorkomt.

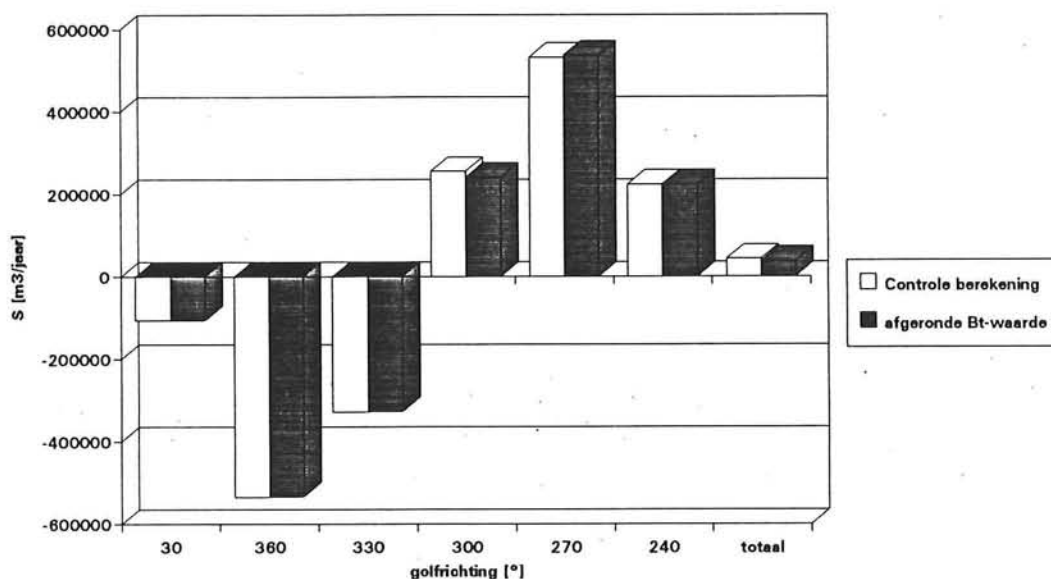
Om dit te testen is de afgeronde waarde voor B_T , zoals gebruikt in [2], gesubstitueerd in de berekeningen. Nu wordt B_T in Ex-cel ingevoerd als een constante met 3 cijfers achter de komma in plaats van vergelijking 3.15. Voor de numerieke waarde van B_T is die van 1969 aangehouden. Het verschil in de waarde voor B_T wordt geïllustreerd door tabel 2.1.

Golfperiode, gemeten op de lichtschepen.	T_{eq} [sec]	B_T , volgens [2]	B_T , nieuw
$T < 5$ s	4	1,944	1,944
$5s < T < 7s$	5	2,130	2,125
$7s < T < 9s$	6	2,321	2,322
$T > 9s$	8	2,720	2,720

Tabel 2.1: B_T -waarden

Voor berekening van de waarde B_T voor een periode van $T_{eq} = 6s$ en $T_{eq} = 8s$ is rekening gehouden met het feit dat deze golven op de plaats van meten de bodem nog voelen. Dit is het geval wanneer de waterdiepte kleiner is dan de helft van de golflengte op diep water. In vergelijking 2.4 is hier de waarde voor de groepssnelheid op diep water ($c_0/2$) vervangen door c_{gr} op 24 meter waterdiepte. Dit is de waterdiepte bij lichteiland Goeree. Golven met een periode van $T_{eq} = 4$ en $5s$ hebben geen last meer van de bodem aangezien de helft van hun golflengte resp. $\frac{1}{2}L_0 = 12,5m$ en $\frac{1}{2}L_0 = 19,5m$ is tegen een diepte van $h = 24$ meter. Voor deze perioden is voor de groepssnelheid, die op diep water genomen.

In figuur 2.4 volgt het resultaat van deze berekening. De overige vergelijkingen en waarden zijn hetzelfde gebleven.



Figuur 2.4: Berekening langstransport met afgeronde B_T -waarden

Het netto langstransport met afgeronde B_T -waarden bedraagt circa $37 \cdot 10^3$ m³/jaar. Het afzonderlijke transport in Noordelijke of Zuidelijke richting is weer van dezelfde orde grootte. Uit de verschillen die optreden in de verschillende berekeningen kan geconcludeerd worden dat de uitkomst van de gevolgde methode afhankelijk is van de numerieke invoer van constanten zoals bijvoorbeeld de B_T -waarde. Bovendien is de nauwkeurigheid van de zandtransportformule, zoals eerder vermeld een factor 2.

Als ijkingswaarde voor deze waarde stelt Bakker in [2] een zandbalans op voor het kustvak Scheveningen - IJmuiden. Bakker vindt voor het netto langstransport bij IJmuiden een waarde van circa $321 \cdot 10^3$ m³/jaar Zuidwaarts. Dit betekent, dat er jaarlijks in het kustvak circa $350 \cdot 10^3$ m³ zand bijkomt. Dit volume aan zand komt redelijk overeen met het volume aan zand, dat nodig is voor de

jaarlijkse aangroei van de kust in dit kustvak. Een andere studie van het netto langstransport bij Scheveningen (Dijkman [12, 13]) van latere datum vindt eveneens uit kuberingen van zand langs de kust een netto langstransport van dezelfde grootte orde.

In de volgende paragraaf worden de berekeningen uitgevoerd met golfgegevens van Roskam [22]. Deze zijn van recentere datum (1988) dan die van Dorrestein (1952). Het resultaat van netto langstransport wordt vergeleken met een studie van Dijkman, die met dezelfde golfgegevens het kustgedrag langs de Hollandse kust in kaart bracht.

2.4 Resultaten berekeningen met recentere gegevens

2.4.1 Verschillen in golfgegevens

Zoals eerder vermeld, zijn de gegevens afkomstig van Dorrestein enigszins gedateerd. Roskam [22] heeft in 1988 nieuwe golfgegevens gepubliceerd. Een berekening met deze gegevens zou een recenter beeld van het langstransport moeten geven.

De golfhoogtes en -perioden, die door Dorrestein gebruikt, zijn in die tijd op het oog geschat door mensen die werkzaam waren op lichtschepen en -eilanden. Dit in tegenstelling tot de golfgegevens die Roskam gebruikt om een golfklimaat af te leiden. Deze zijn afgeleid van diverse golfspectra, eveneens afkomstig van LEG. De spectra zijn bepaald uit drie-uurlijkse reeksen die zijn gemeten in het tijdvak 1979 - 1986. Uit de spectra zijn de waarde voor H_{m0} en T_{m01} berekend. Dit zijn resp. de uit het energiedichtheidspectrum geschatte significante golfhoogte en de uit het spectrum geschatte gemiddelde periode.

De meeste golfgegevens die Roskam gebruikt, zijn verkregen door zgn. waverider boeien. Deze boeien hebben de beperking, dat zij alleen oppervlakte-uitwijkingen kunnen meten. De golfrichting kan derhalve niet bepaald worden. Dit levert problemen op bij de bepaling van de verschijningskansen van een bepaalde golf. In eerste instantie is dit opgelost door voor de verschijningskansen van golfrichtingen die van de windrichtingen te nemen. Echter golven hoeven niet altijd uit dezelfde richting als de wind te komen. De laatste jaren is men met behulp van Wavec-boeien in staat geweest om ook de richtingen van golven te kunnen meten. Deze boeien zijn echter pas vanaf 1985 geïnstalleerd. Daar ook de registratiedichtheid verre van 100% is, ze vielen nog al eens uit, is het onmogelijk om een redelijk nauwkeurig golfklimaat te bepalen. Toch is hiermee een correlatie tussen golf- en windrichting op verschillende plaatsen langs de kust bepaald. Met behulp van deze correlatie kan het verschil tussen golf- en windrichting gecorrigeerd worden. Ten aanzien van de verdeling van golven over de richtingen tussen het gecorrigeerde en ongecorrigeerde klimaat blijkt een aanzienlijk verschil te bestaan, hetgeen moet worden toegeschreven aan de invloed van deining en refractie. In bijlage A2 is te zien het verschil tussen wind- en golfrichting zoals Roskam dit gecorrigeerd heeft. Met het nieuwe golfklimaat wordt nu het langstransport bij Scheveningen bepaald. Dit is analoog gedaan aan paragraaf 2.2.

2.4.2 Definitie parameters en hoek van inval

Roskam presenteert zijn gegevens in 6 periode klassen. Dit zijn: $T_{m0} < 1s$, $1,0s < T_{m0} < 3,0s$, $3,0s < T_{m0} < 5,0s$, $5,0s < T_{m0} < 7,0s$, $7,0s < T_{m0} < 9,0s$, $T_{m0} > 9,0s$. Zie tabel 2.2 waarin een tabel is overgenomen van Roskam.

STATION : L.E. GOSPEE		3-UURLIJKE REEKSEN 1-1-1979 T/M 31-12-1986								
RELATIEVE VERDELING										
GOLFRICHTINGSSECTOR : 330 - 30		GOLFRICHTING : THETA-B								
HWD IN KLASSEN VAN 30 CM (VERT.) EN 1M21 IN KLASSEN VAN 2.0 SEC (HWD.)										
		<1.0	1.0-3.0	3.0-5.0	5.0-7.0	7.0-9.0	>9.0	ALLE	TGEM	CUM.
0 - 50	.000	.500	14.602	.442	.000	.000	.000	15.634	3.95	100.000
50 - 100	.000	.000	26.244	5.493	.074	.074	.074	33.451	4.41	84.366
100 - 150	.000	.000	18.383	7.743	.074	.000	.000	25.180	4.60	59.885
150 - 200	.000	.000	4.277	7.448	.074	.000	.000	11.799	5.29	24.705
200 - 250	.000	.000	.000	5.16	6.265	.000	.000	6.785	5.55	12.906
250 - 300	.000	.000	.000	2.802	.000	.000	.000	2.802	6.00	6.121
300 - 350	.000	.000	.000	1.244	.221	.000	.000	2.365	6.21	3.319
350 - 400	.000	.000	.000	.359	.295	.000	.000	.654	6.89	1.254
400 - 450	.000	.000	.000	.000	.221	.000	.000	.221	8.00	.590
450 - 500	.000	.000	.000	.000	.265	.000	.000	.265	8.00	.369
500 - 550	.000	.000	.000	.000	.074	.000	.000	.074	8.00	.074
550 - 600	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
600 - 650	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
650 - 700	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
700 - 750	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
>750	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.00	.000
ALLE	.000	.500	64.602	35.407	1.327	.074	100.000	4.71	100.000	
TGEM	.00	25.00	55.73	170.25	363.89	75.00	117.29			

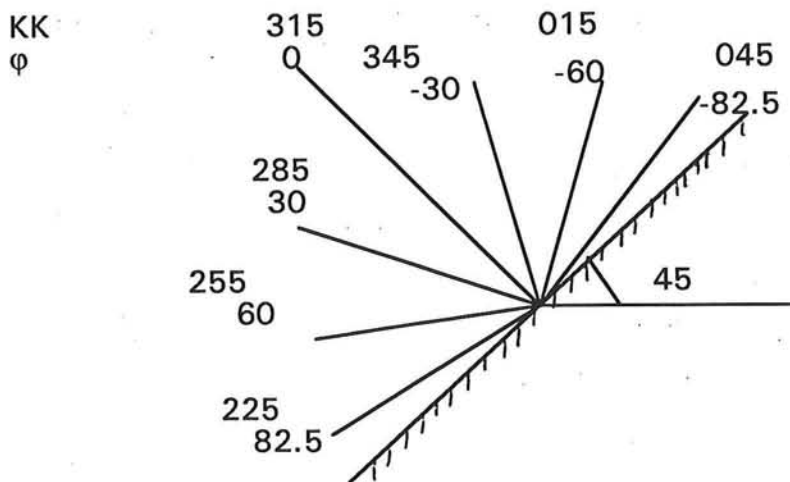
Tabel 2.2: Voorbeeld golfgegevens gepresenteerd door Roskam

Dit levert dan de volgende equivalente periode T_{eq} met bijbehorende B_T - waarde op (tabel 2.3).

periode klassen	T_{eq} (s), Roskam	B_T , Roskam
$T < 3,0s$	2,0	1,473
$3,0s < T < 5,0s$	4,0	1,944
$5,0s < T < 7,0s$	6,0	2,322
$T > 7,0$	8,0	2,720

Tabel 2.3: "nieuwe" B_T -waarden

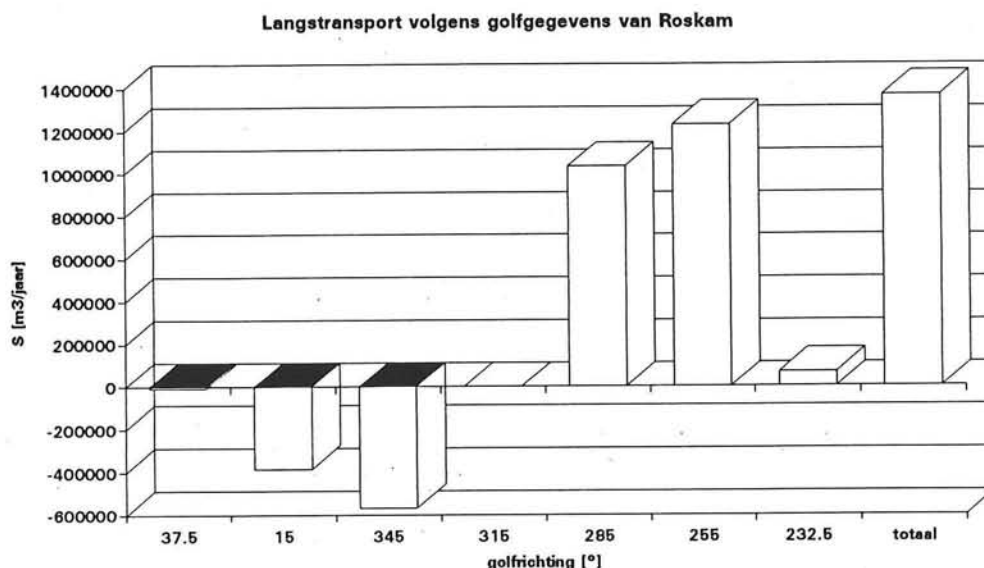
De waarden voor B_T zijn op dezelfde manier bepaald als in tabel 2.1, waarvoor de waterdiepte bij LEG 24 meter is genomen. De windrichtingssectoren, die Roskam gebruikt, verschillen met die van Dorrestein. Dit heeft tot gevolg, dat de definitie van de sectoren zich wijzigt. In plaats van golven uit de richting $KK = 360^\circ$ (Noord) definieert Roskam een sector $000^\circ-030^\circ$. De gemiddelde richting van de golven uit deze sector is dan 015° . Hierdoor verschuiven de hoeken van inval op de kust met 15° . In figuur 2.5 is de nieuwe definitie van hoek van inval te zien.



Figuur 2.5: Nieuwe definitie hoek van inval

2.4.3 Berekening langstransport

Analoog aan paragraaf 2.2.2 wordt nu weer het sedimenttransport berekend. Het resultaat is te zien in figuur 2.6.



Figuur 2.6: Berekening langstransport 2

De afzonderlijke waarden voor het langstransport per kolom staan vermeld in bijlage A1 tabel a4. In bijlage A6 zijn tabellen van deze berekening met “nieuwe” golfgegevens opgenomen. Hierin staan weer voor elke golfhoogteklasse en periode de waarde voor H_{sig} , D_{br} , P_l en de kans vermeld.

Het eerste wat opvalt als er naar het netto langstransport gekeken wordt is dat dit, met een waarde van $1,37 \cdot 10^6$ m³ per jaar, niet overeenkomt met de ijking die Bakker [2] en Dijkman [12, 13] verricht hebben. Wordt er naar de waarden van het sedimenttransport in de afzonderlijke richtingen gekeken, dan is de transportcomponent in Zuidelijke richting nog wel in dezelfde orde grootte als in figuur 2.3. Het transport in Noordelijke richting is daarentegen flink toegenomen. Het zijn vooral de golven met een periode van $T_{eq} = 6s$ die dit teweeg brengen. Een verklaring hiervoor is te vinden in de golfrozetten, met daarin de verschijningskansen van de golven. Zie bijlage A3. Het blijkt, dat het aantal golven uit Zuidwestelijke richting flink is toegenomen. Deze kansverdeling brengt grote gevolgen met zich mee voor het netto transport. In de praktijk lijkt dit

niet waarschijnlijk. Maar veranderingen in verschijningskansen kunnen niet alleen voor de grote toename zorgen. Redenen voor dit grote transport zijn meer te zoeken in de invoergegevens. In vergelijking 2.1 dient voor de golfhoogte in principe de hoogte van de golf op de brekerlijn te worden ingevoerd. Hiervoor ontbraken eenvoudigweg de golfgegevens, aangezien golven niet op de brekerlijn gemeten worden. Gegevens van Roskam en Dorrestein zijn gemeten bij LEG. Om toch in de buurt te komen van de waarde, die de golfhoogte bij de brekerlijn heeft, is de waarde, die gemeten is bij LEG ($h = 24\text{m}$) m.b.v. correlatiegrafieken uit [17], herleid naar een golfhoogte bij $h = 10\text{ m}$ diepte. Voor de golfhoogtes, die gebruikt zijn voor figuur 2.6 is echter de waarde ingevuld die rechtstreeks afkomstig is van LEG. Deze is niet gecorrigeerd naar een diepte van 10 meter. Dit brengt grotere golven en dus grotere brekerdieptes met zich mee. Vergelijking 2.17 toont het belang van de waarde van de brekerdiepte, aangezien die hierin tot de derde macht voorkomt.

Het is interessant om de uitkomst van figuur 2.6 te vergelijken met de uitkomst die Dijkman heeft gevonden. Deze heeft in zijn studie dezelfde golfgegevens gebruikt als die waarmee figuur 2.6 berekend is.

2.5 Vergelijken met Dijkman

2.5.1 Berekeningsmethode

Dijkman gaat uit van een iets andere berekeningswijze dan in dit rapport. Wordt er in de berekeningsmethode als in [2] uitgegaan van een kust met evenwijdige dieptelijnen, in [12, 13] werkt Dijkman volgens het tweelinmodel. In dit model wordt het kustprofiel opgedeeld in twee zones:

- de strandzone tussen de lokale duintop (variërend tussen NAP+10m en NAP+20m) en NAP-1m,
- de vooroeverzone gelegen tussen NAP-1m en NAP-5m

Het niveau NAP-1m is hierbij een benadering voor het LW-niveau. De keuzen voor deze niveaus houdt in dat alleen de kuststrook boven NAP-5m als actief bewegend wordt verondersteld. De keuze voor NAP-5m is louter op praktische ervaring gemaakt. Het tweelinmodel wordt opgebouwd uit een continuïteits- en een bewegingsvergelijking voor zowel de strand- en vooroeverzone. Verder wordt naast langs- ook dwarstransport beschouwd. Het langstransport op het strand en de vooroever op een willekeurige plaats x langs de kust wordt bepaald met:

$$S_1(x,t) = S_{\text{getij}1}(x) + S_{01}(x) - s_1(x) \frac{\partial y_1(x,t)}{\partial x} \quad (2.19)$$

$$S_2(x,t) = S_{\text{getij}2}(x) + S_{02}(x) - s_2(x) \frac{\partial y_2(x,t)}{\partial x} \quad (2.20)$$

Hierin geldt index 1 voor het strand en index 2 voor de vooroever:

$S_{1,2}(x,t)$	Totale langstransport op bepaalde locatie langs kust	$[\text{m}^3/\text{jr}]$
$S_{\text{getij}1,2}(x)$	Constante getijtransportterm op locatie langs kust	$[\text{m}^3/\text{jr}]$
$S_{01,02}(x)$	Het brandingsstroomtransport, als de kust evenwijdig aan de x-as is	$[\text{m}^3/\text{jr}]$
$s_{1,2}(x)$	Kustconstante	$[\text{m}^3/\text{jr/rad}]$
$y_{1,2}(x)$	Zeewaartse coördinaat van de strand- resp. vooroeverlijn	$[\text{m}]$
$\partial y_{1,2}/\partial x$	Oriëntatie van de kust als functie van tijd en plaats	

Voor een uitgebreide beschrijving van dit model wordt verwezen naar Bakker [3].

Naast het door golven gedreven transport heeft Dijkman ook het door getijstromen gedreven transport meegenomen. De getijstromen zelf zijn in beeld gebracht met het programma HOKU van het Waterloopkundig Laboratorium [18]. Als transportformule is de Bijker-formule gebruikt. Voor het door golven gedreven langtransport is methode Bakker [2] aangehouden. Dijkman gebruikt de gegevens van Roskam als golfgegevens.

Door het transport door getij en door golven op elkaar te superponeren wordt het totale langtransport gevonden. De overheersende factor in het langtransport is echter het door golven aangedreven transport.

Het resultaat van Dijkman's berekeningen is te zien in bijlage A4. De uitkomsten van het model van Dijkman benaderen de werkelijkheid met wisselend succes. Voor het totale langtransport bij Scheveningen wordt een waarde gevonden van $70 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ per jaar. Deze waarde is opgebouwd uit $45 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ per jaar transport noordwaarts op de strandzone plus $25 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ per jaar transport noordwaarts in de vooroeverzone. Uit de buurt van havendammen wordt voor met name de strandlijn een goede benadering gevonden. Dichterbij de havendammen wordt de trend van aanzanding en erosie wel waargenomen, de preciese ontwikkeling niet. Dit is bijvoorbeeld te zien in bijlage A4, waar het berekende aanzandings- en erosiegedrag van resp. Scheveningen en Hoek van Holland nogal aan de forse kant is in vergelijking met de werkelijkheid.

2.5.2 Aangebrachte veranderingen in de golfgegevens

Ook Dijkman heeft de golfgegevens van LEG aangepast. De periode wordt op eenzelfde manier behandeld als in [2]. En ook de golfhoogtes worden aangepast aan een diepte van $h = 10$ meter. Om de periode T_{m0} aan te passen gebruikt Dijkman vergelijking 2.18

Worden nu de veranderingen die Dijkman in de golven heeft aangebracht ook toegepast in de berekening zoals figuur 2.6 dan treedt het volgende op. Het invullen van T_{sig} , volgens Dijkman, levert echter een numeriek probleem op bij de berekening van $\cos \phi_{br}$ van de grotere golven. Het getal onder de wortel krijgt een negatieve waarde, zie hiervoor vergelijking 2.16. Dit is te wijten aan de gebruikte formule voor de groepssnelheid in de brekerzone. Tot nu toe is voor de bepaling hiervan met vergelijking 2.4 de solitary wave theory aangehouden. Bekijkt men de berekening van de energiestroom bij niet-lineaire golven nauwkeurig, dan vindt men, dat in ondiep water weliswaar de groepsnelheid van een individuele golf toeneemt, maar dat vgl. 2.2 een overschatting van de energiestroom geeft. Bakker concludeert dit ook al in [2]. Een golf zou bij het ingaan van de brekerzone plotseling i.p.v. een snelheid $\sqrt{gD}$, een snelheid van $\sqrt{1,4gD} (= \sqrt{g(D+H)})$

krijgen. Hierdoor wordt de brekerdiepte te onnauwkeurig bepaald. Om dit probleem te omzeilen is bij deze berekeningen voor de groepssnelheid van de golven in de brandingszone weer uitgegaan van de lineaire golftheorie.

Net zoals Bakker in [2] worden de golfhoogtes herleid van een waterdiepte bij LEG naar een waterdiepte van $h = 10$ meter. Bakker deed dit m.b.v. correlatiegrafieken van Harreveld. Dijkman heeft naast de golfhoogtes ook de golfrichtingen op $h = 10$ m berekend. Dijkman deed dit met het programma ENDEC. Voor de waterdiepte bij LEG neemt hij $h = 20$ meter, terwijl in [2] voor $h = 24$ meter genomen wordt. Het resultaat van de ENDEC-berekening voor Scheveningen en Hoek van Holland is te zien in tabel 2.4.

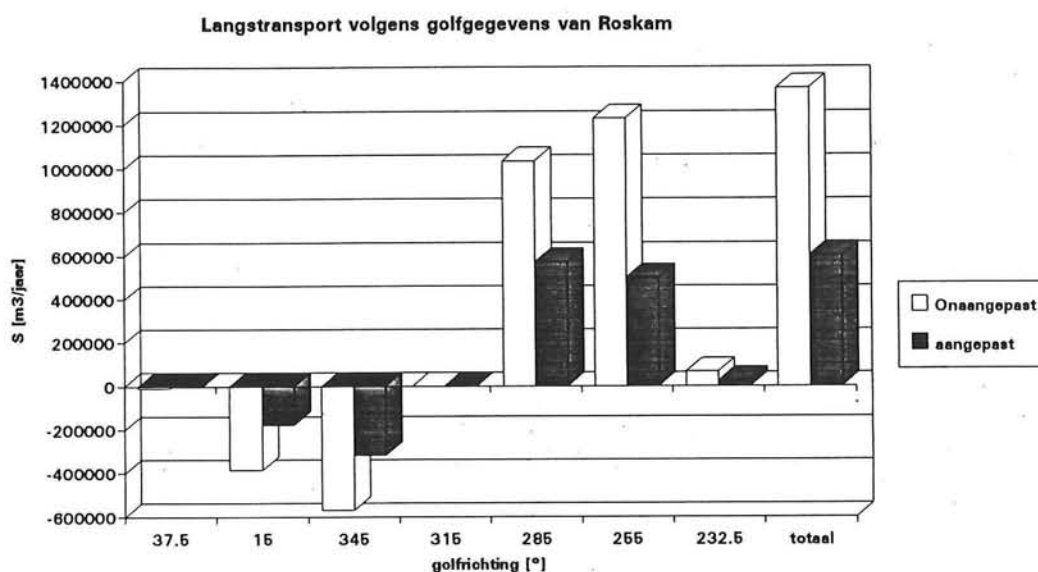
Plaats	ϕ op 20 m	ϕ op 10 m	$H_{sig, 10m}/H_{sig, 20m}$
Scheveningen	15	14	0,85
	30	27	0,825
Hoek v Holland	45	40	0,80
	60	55	0,75
	75	70	0,70
	82,5	76,5	0,70

Tabel 2.4 : Resultaat ENDEC-berekening

De vorm van de kust is bij deze berekeningen aangenomen als een kust met evenwijdige dieptelijnen.

2.5.3 Langtransport met aangepaste golfgegevens

Wanneer de aanpassingen van de golven volgens tabel 2.4 worden ingevoerd in het langtransportmodel dan verandert het transport flink. In figuur 2.7 is het langtransport, dat berekend is met de aangepaste golfgegevens, uitgezet samen met de eerder gemaakte berekening van figuur 2.6.



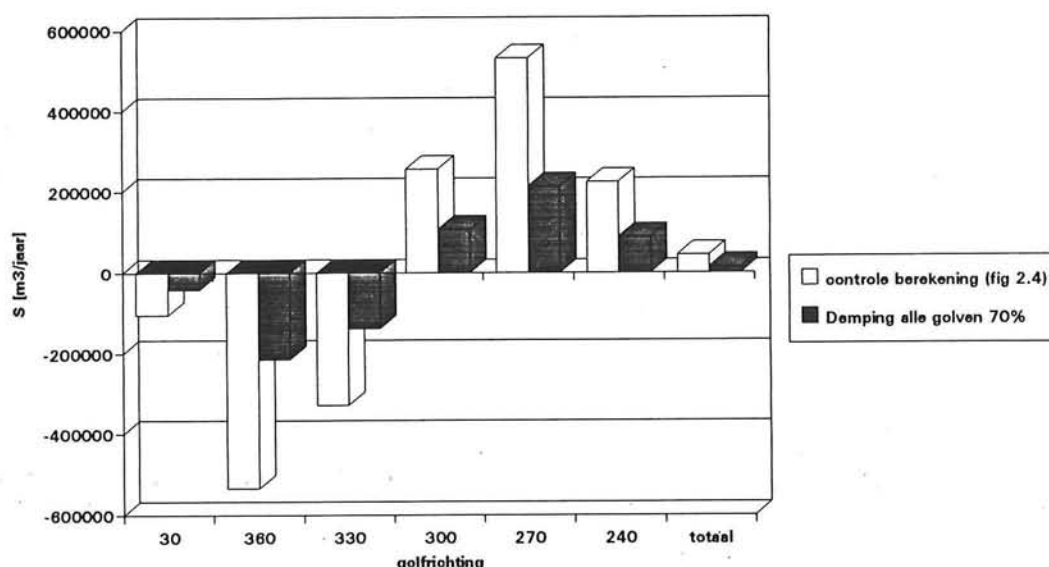
Figuur 2.7: Berekening langtransport met aangepaste gegevens van tabel 2.4

Het totale langtransport per jaar wordt weer uitgerekend door de waarde van P_l met de evenredigheidsconstante $K_3 = 2 \cdot 10^3$ te vermenigvuldigen. De constante K_3 wordt ook door Dijkman gebruikt om zijn langtransport te calibreren aan de werkelijkheid. In bijlage A4 heeft Dijkman dit gedaan en er is een waarde $K_3 = 0,5 \cdot 10^3$ gevonden. Dit scheelt een factor 4 in het netto langtransport. Wanneer de netto P_l - waarde die gebruikt is in figuur 2.7 met $K_3 = 0,5 \cdot 10^3$ i.p.v. $K_3 = 2 \cdot 10^3$ wordt vermenigvuldigd, dan wordt het netto sedimenttransport $150 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ per jaar. Dit komt al een stuk dichterbij de buurt van de ijking, die Bakker en Dijkman verricht hebben. Wordt er uitgegaan van een transport van orde grootte $70 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ per jaar, dan geldt voor de waarde $K_3 = 250$. Het gevonden langtransport van figuur 2.7 wordt dan $75 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ per jaar. Er wordt echter dan wel alleen gekeken naar het netto transport en niet naar de grootte van de

afzonderlijke transportcomponenten. Deze waarde van K_3 kan dus niet zonder meer worden gebruikt. Hier is meer onderzoek voor nodig, dat buiten het kader van het huidige rapport valt.

2.6 Het effect op het langtransport bij verlaging van de golfhoogte

Tot nu toe is alleen het model beschreven om het langtransport mee te berekenen. Uit de bovenstaande berekeningen van het langtransport kan geconcludeerd worden dat de controleberekening, die met het spreadsheetprogramma en de gegevens van Dorrestein gemaakt is (fig 2.4), redelijk overeen komt met de ijking die Bakker en Dijkman hebben gedaan. Om deze reden, wordt dit model gebruikt om de invloed van een zanddiode te zien. Zoals eerder vermeld is de golfhoogte de enige parameter van het langtransport, die beïnvloed kan worden. Wat gebeurt er nu als de golfhoogte consequent verlaagd wordt? Hiervoor zijn twee gedachte-experimenten doorgerekend. Als eerste is een rij golfbrekers voor de kust verondersteld die elke golf voor 70 % dempt. Het resultaat v.w.b. het langtransport staat in figuur 2.8. Als tweede gedachte-experiment is het zanddiode-principe toegepast door alleen golven uit de Westelijke richtingen ($KK = 240^\circ, 270^\circ, 300^\circ$) te dempen met 70 %. Dit zou een toename van het netto transport in Zuidelijke richting moeten bewerkstelligen. Zie figuur 2.9.

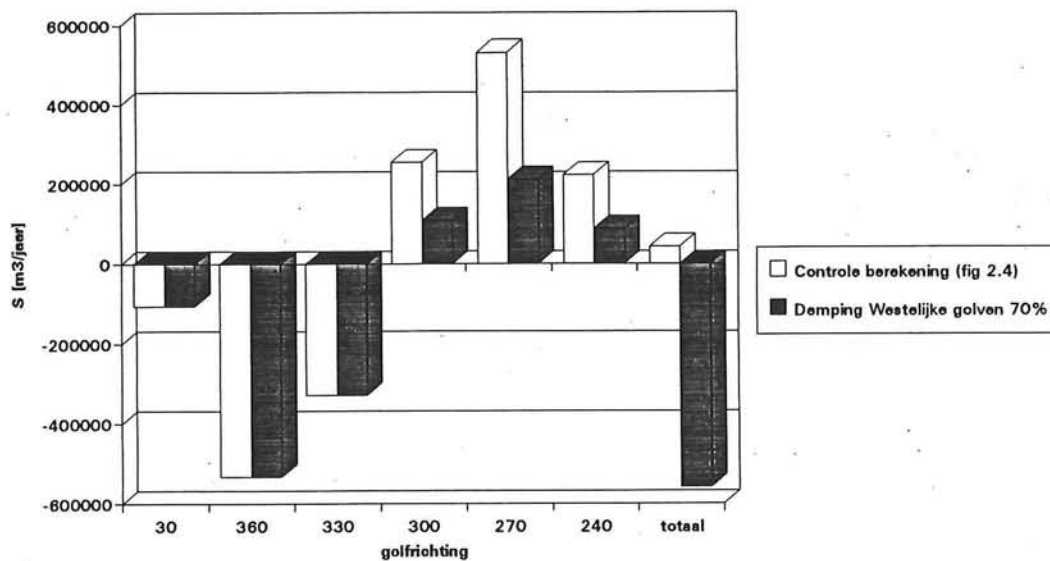


Figuur 2.8: Demping alle golven met 70%

In figuur 2.8 is te zien, dat door alle golven met 70 % te dempen, er een afname is in langtransport. Zowel de Noordelijke als Zuidelijke gerichte component van het langtransport vermindert sterk, maar ook het jaarlijks netto transport neemt af. Het jaarlijks netto transport bedraagt nu nog maar $13,8 \cdot 10^3$ m³/jaar tegen $43 \cdot 10^3$ m³/jaar in de oorspronkelijke situatie, in Noordelijke richting. Dit zou betekenen dat het erosieprobleem bij Scheveningen nog niet verholpen is, maar wel dat er minder frequent zand gesuppleerd hoeft te worden.

Volgens het zanddiode-principe wordt er echter ingegrepen in de wisselstroom van zand langs de kust. Dit betekent dat er overwegend transport in Noordelijke of Zuidelijke richting plaatsvindt. Om de erosie in Scheveningen te bestrijden zou het netto langtransport dus Zuidelijk gericht moeten zijn. Om dit te bereiken is er een golfbreker verondersteld, die alleen golven uit de Noordelijke richtingen ($KK = 330^\circ, 360^\circ, 030^\circ$) ongestoord doorlaat. De golven uit de Westelijke

richtingen worden nu voor 70 % gedempt. Dit zou het netto langstransport naar het Zuiden doen gaan.



Figuur 2.9: Damping Westelijke golven met 70 %

In figuur 2.9 is duidelijk het zanddiode-principe te zien. Alle golven die een Noordelijke gerichte component van het langstransport veroorzaken worden gedempt. Het volume dat dan aan zand in Noordelijke richting vertrekt neemt dus af. Op deze manier wordt het netto langstransport in Zuidelijke richting gestimuleerd. Het netto langstransport is niet alleen van richting omgedraaid, maar ook met een factor 10 toegenomen. De grootte van het netto langstransport bedraagt $5,6 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{jaar}$.

Op zich is het een leuke gedachte dat het zandtransport langs de kust op deze manier beïnvloed kan worden en met een factor 10 per jaar vergroot kan worden. Bedacht moet echter worden, dat dit zand ook ergens vandaan moet komen. Dit zal ten koste gaan van een deel van de kust elders, in dit geval in het Noordelijk gedeelte van de Hollandse kust. Daarmee wordt het probleem alleen maar verschoven, want zo ontstaat er elders langs de kust een erosieprobleem.

2.7 Conclusie

Het blijkt dat een goede voorspelling van het door golven gedreven langstransport van vele moeilijk te meten factoren afhankelijk is. Allereerst bevatten de dataseries, die er beschikbaar zijn de nodige onduidelijkheden. De dataset van Dorrestein bevat "oude" waarnemingen. Bovendien kleven aan deze waarnemingen allerlei meeton nauwkeurigheden. De waarnemingen zijn op het oog geschat door mensen op de lichtschepen. Bij de recente metingen is gebruik gemaakt van waverider-boeien e.d. Hiermee kan de golfhoopte nauwkeuriger gemeten worden. De wave-rider boei heeft echter het nadeel dat de golfrichting niet wordt meegenomen. Dit blijkt uit recentere golfgegevens van Roskam. In eerste instantie wordt het golfklimaat uitgerekend onder aanname dat de golfrichting gelijk is aan de windrichting. Dit is natuurlijk niet altijd waar. Golven worden naast de windrichting erg beïnvloed door bodemtopografie, stromingen en nog aanwezige oudere golven. Om dit te corrigeren heeft Roskam gegevens gebruikt van een serie Wavec-boeien. Deze meten ook golfrichtingen. Aangezien deze Wavec-boeien er pas sinds 1985 liggen is dit nog te kort om een inzicht te krijgen in golfrichtingklimaat. Daarbij komt dat de registratiedichtheid nog ver onder de 100% ligt. De Wavec-boeien vielen nogal eens uit. Alhoewel de gegevens van

Dorrestein dus niet meer zo recent zijn geven deze toch een beter beeld weer van het golfklimaat dan die van Roskam. Van belang voor een dergelijke beschrijving van een golfklimaat is, dat de golfrichting in de metingen wordt meegenomen. Dit kan door i.p.v. wave-rider-boeien de wavec-boeien te gebruiken. Of de metingen van de wave-rider-boei, wat richting betreft, bijvoorbeeld te vergelijken met gelijktijdige visuele waarnemingen op schepen.

Uit Dijkman's en eigen berekeningen blijkt dat voorspellingen van langstransporten erg afhangen van significante golfhoogte. Dit houdt in dat de golfhoogte op "diep" water gecorrigeerd moet worden naar een golfhoogte op "ondiep" water. Bakker heeft dit gedaan in [2] met behulp van correlatiegrafieken van Harreveld afkomstig van het booreiland Triton. Dijkman deed dit door de golfhoogte op $h = 10$ m te berekenen met het computerprogramma ENDEC. Uit figuur 2.7 blijkt dat berekeningen erg gevoelig zijn voor de waarde die voor H_{sig} wordt gebruikt.

De hoofdzaak is kennelijk de goede H_{sig} te voorspellen. Dit houdt in, dat de waarde voor H_{sig} zo dicht mogelijk bij de brekerlijn moet liggen, zodat de waarde voor H_{sig} de waarde voor H_{br} nadert. Zie vergelijking 2.1.

Uiteindelijk dient de berekening geijkt te worden met de werkelijkheid. Dit kan gedaan worden door het opstellen van een zandbalans over het beschouwde kustvak. Door op een aantal plaatsen in dit kustvak het zandtransport te berekenen en dit te vergelijken met het aanzandings- en erosiepatroon van de kust, kan de grootte van de evenredigheidsfactor K_3 bepaald worden.

Gezien het aanzandings- en erosiepatroon bij Scheveningen blijkt dat de waarde van het resulterend langstransport bij Scheveningen niet erg aan veranderingen onderhevig is. Mede daardoor zijn de berekeningen met de oudere gegevens nog steeds bruikbaar. Zeker gezien het feit het golfklimaat hier beter in wordt weergegeven. Voor de rest van deze studie naar drijvende golfbrekers langs de kust wordt gerekend met het model waarmee de oude berekening gecontroleerd is. De golfgegevens zijn afkomstig van Dorrestein. Een extra reden hiervoor is dat de oude gegevens zich in een werkelijkheid-getrouwer model hebben laten vangen dan de nieuwere gegevens. (Vreemd eigenlijk)

Het zanddiode-principe werkt in ieder geval voor het langstransport. Het netto langstransport is in theorie in grootte en richting te beïnvloeden. Wel moet hierbij goed in de gaten worden gehouden, dat door het erosieprobleem op de ene plaats op te lossen er een ander erosieprobleem elders kan ontstaan.

3. Verandering van het Evenwichtsprofiel

3.1 Inleiding

Golven brengen naast langstransport ook andere effecten op de kust te weeg. Golven verplaatsen zand in het profiel omhoog of naar beneden. Zo wordt tijdens een storm zand verplaatst van het bovenste gedeelte van het profiel naar het onderste gedeelte. Deze duinafslag herstelt zich min of meer in de rustige periode na de storm. Gesteld kan worden dat het profiel streeft naar een evenwicht onder een bepaalde golfslag. In dit evenwichtsprofiel zal per definitie geen transport meer naar boven of naar beneden optreden. Dit proces gaat als volgt te werk. Golven rollen naar de kust. Door hun asymmetrische vorm in de brekerzone brengen zij sediment, dat zich in suspensie bevindt, naar boven in het profiel. Tevens treedt er transport op door de bodemhelling van het profiel. Zandkorrels rollen naar beneden t.g.v. de zwaartekracht. Wanneer de golven breken wordt er een retourstroom langs de zeebodem opgewekt die de zandkorrels weer terugvoert naar de zee. Deze 3 aspecten samen leiden tot een evenwichtshelling $\tan\beta_e$. Wanneer deze evenwichtshelling geïntegreerd wordt over de hoogte van het profiel dan volgt een evenwichtsprofiel

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe het dwarsprofiel van de kust verandert doordat de golfhoogte verlaagd wordt. Om dit uit te kunnen rekenen wordt een mathematisch model gebruikt, dat v.d. Kerk [6, 19] heeft opgesteld. Het model bestaat uit drie bouwstenen. Een sedimenttransportformule, een golfvoortplantings- en dissipatiemodel en een model voor de retourstroom. Het model berekent een dimensieloos evenwichtsprofiel voor golven met een bepaalde hoogte en periode, die op de kust afkomen. Dit evenwichtsprofiel is afhankelijk van de volgende variabelen:

- $k_0 h$: Dit is de dimensieloze diepte, waarin de diepte h dimensieloos gemaakt is door hem te vermenigvuldigen met het golfgetal op diep water k_0 .
- s_0 : Dit is de golfsteilheid, die van zichzelf al dimensieloos is.
- H/wT : Dit is de dimensieloze valsnelheid van het sediment. Hierin is de valsnelheid w dimensieloos gemaakt met de golfhoogte H en de periode T .

Het nadeel is dat met dit model het evenwichtsprofiel berekend wordt voor slechts een monochromatische golf. Het is dus niet mogelijk om met dit model het kustprofiel uit te rekenen voor een golfklimaat.

V.d. Kerk gaat in zijn model uit van golven die loodrecht op de kust afkomen. Het langstransport treedt in dat geval theoretisch niet op. Deze aanname heeft v.d. Kerk ter wille van de eenvoud gedaan; hij maakt gebruik van een specifiek geval van de transportformule van Bailard [1]. Een andere concessie die v.d. Kerk heeft moeten doen is, dat zijn model alleen bruikbaar is tot aan de eerste brandingsrug, die golven tegenkomen vanuit zee. Dit is het gevolg van het golfvoortplantings- en dissipatiemodel dat gebruikt wordt. Hierin wordt een vaste verhouding tussen de waterdiepte en brekende golven gesteld. Dit heeft als nadeel dat golven achter de brandingsrug bij een gelijke diepte als ervoor dezelfde hoogte krijgen, d.w.z. de golfhoogte zou na brandingsrug weer aangroeien tot zijn oude waarde. Dit is niet in overeenstemming met de praktijk. M.a.w. landwaarts van de eerste brandingsrug zijn de gebruikte aannames en dus het model niet toepasbaar.

Toch is het model van v.d. Kerk bruikbaar voor dit onderzoek, aangezien het snel een inzicht kan verschaffen in de verandering van de kust wanneer de golfhoogte consequent verlaagd wordt. In appendix I is een samenvatting van dit model opgenomen. Voor een precieze afleiding hiervan, wordt naar [6, 19] verwezen. In paragraaf 3.2 worden vervolgens evenwichtsprofielen berekend,

die gelden voor de Delflandse kust. Deze profielen worden in paragraaf 3.3 vergeleken met de werkelijkheid.

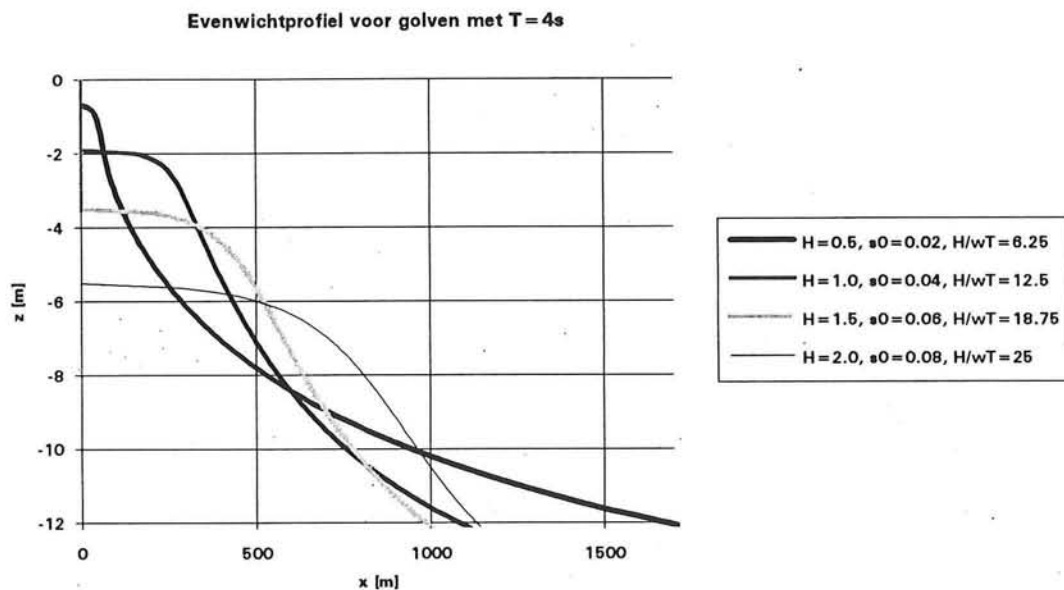
3.2 Uitwerkingen van evenwichtshellingen

3.2.1 Evenwichtsprofielen voor verschillende perioden

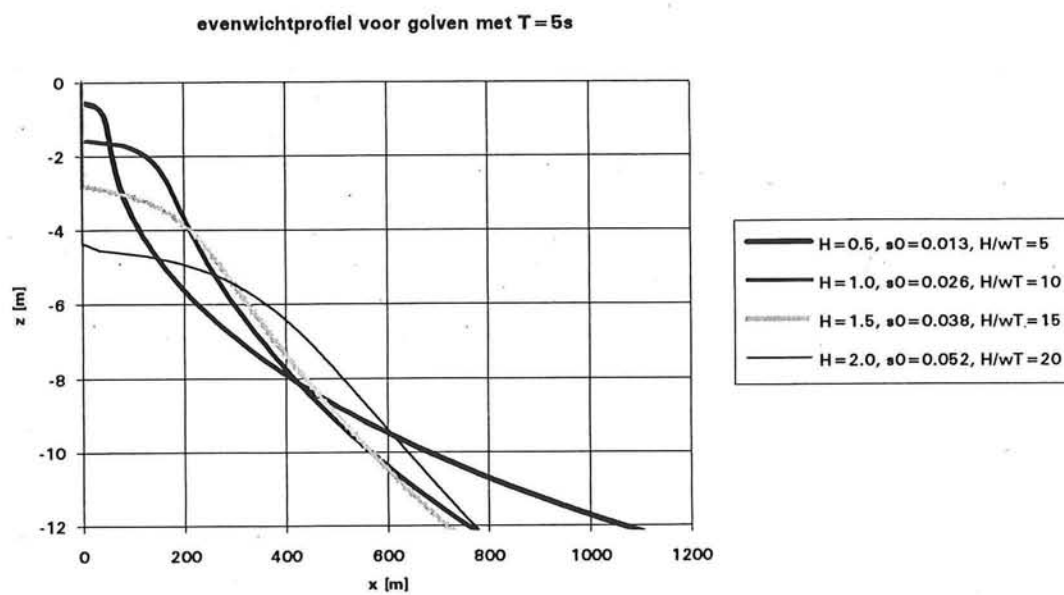
Het model van v.d. Kerk berekent een evenwichtsprofiel van een kust voor golven met een bepaalde golfhoogte en -periode. Van belang in dit verslag is hoe dit profiel verandert wanneer de golfhoogte wordt verlaagd. Om dit te onderzoeken is het volgende gedaan. Voor een golf met een gegeven hoogte en periode kan de evenwichtshelling bepaald worden. Dit is voor de 4 perioden uit hoofdstuk 2, die ook van belang zijn voor het langstransport, $T = 4, 5, 6$ en 8 s gedaan.

Per periode zijn voor 4 verschillende golfhoogtes evenwichtsprofielen berekend. Per periode zijn deze profielen in een figuur geplot. Zie de figuren 3.1 t/m 3.4. Het profiel is doorgerekend naar een diepte van $z = -12$ m. Dit is gedaan, omdat de vorm van de Delflandse kust voor de diepere gedeeltes waarschijnlijk door geologische omstandigheden bepaald wordt en niet door de golven.

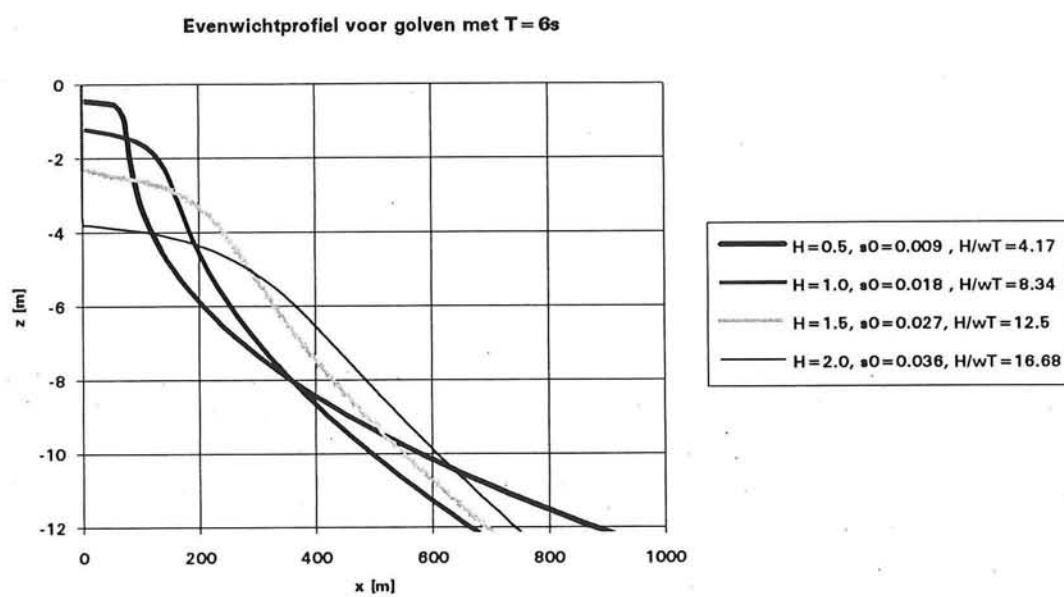
Het profiel dat door het programma wordt uitgerekend is dimensieloos. In het programma wordt de dimensieloze diepte $k_0 z$ als functie van de dimensieloze afstand $k_0 x$ uit de kust berekend. Door deze dimensieloze afstanden te delen door k_0 , het golfgetal op diep water, worden de reële afstanden gevonden. Uitgangspunt bij het in elkaar plotten van de profielen is, dat de hoeveelheid sediment in het profiel hetzelfde blijft.



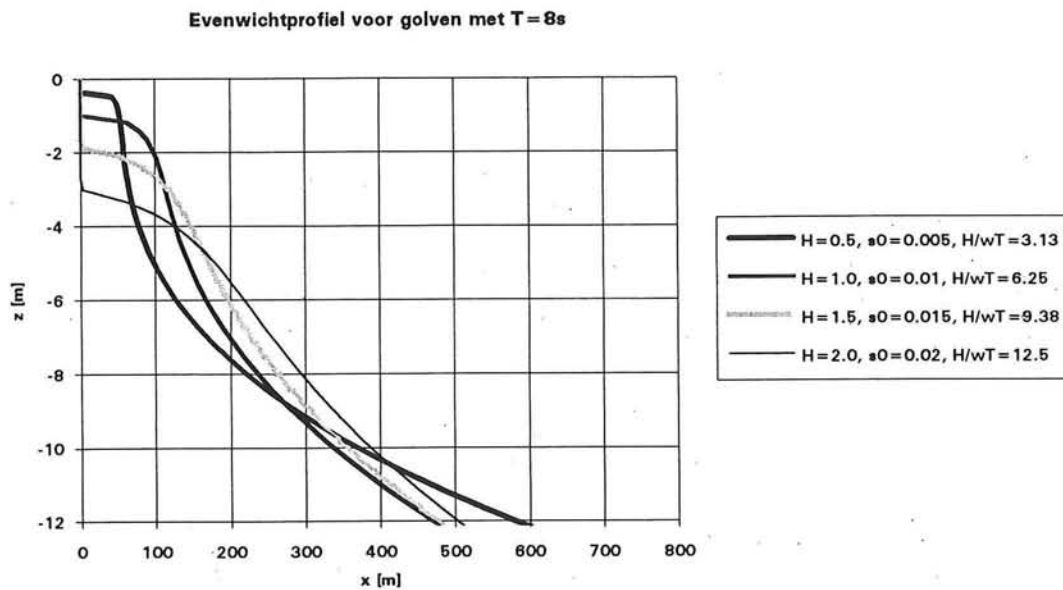
Figuur 3.1: evenwichtprofiel voor golven met $T = 4$ s



Figuur 3.2: Evenwichtprofiel voor golven met $T = 5s$



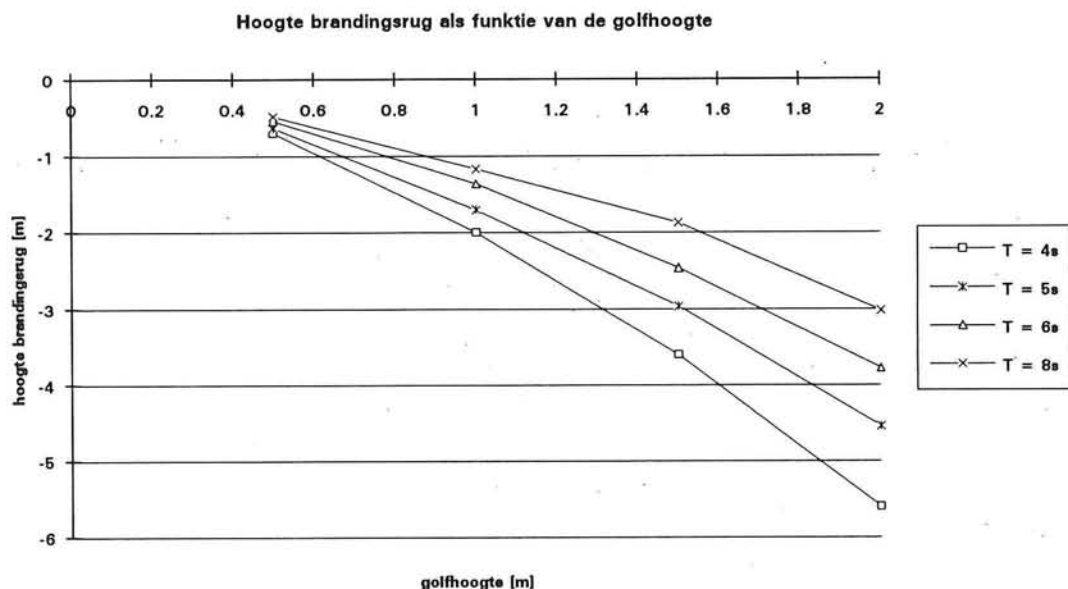
Figuur 3.3: Evenwichtprofiel voor golven met $T = 6s$



Figuur 3.4: Evenwichtprofiel voor golven met $T = 8s$

Een aantal aspecten valt op wanneer de evenwichtprofielen beschouwd worden.

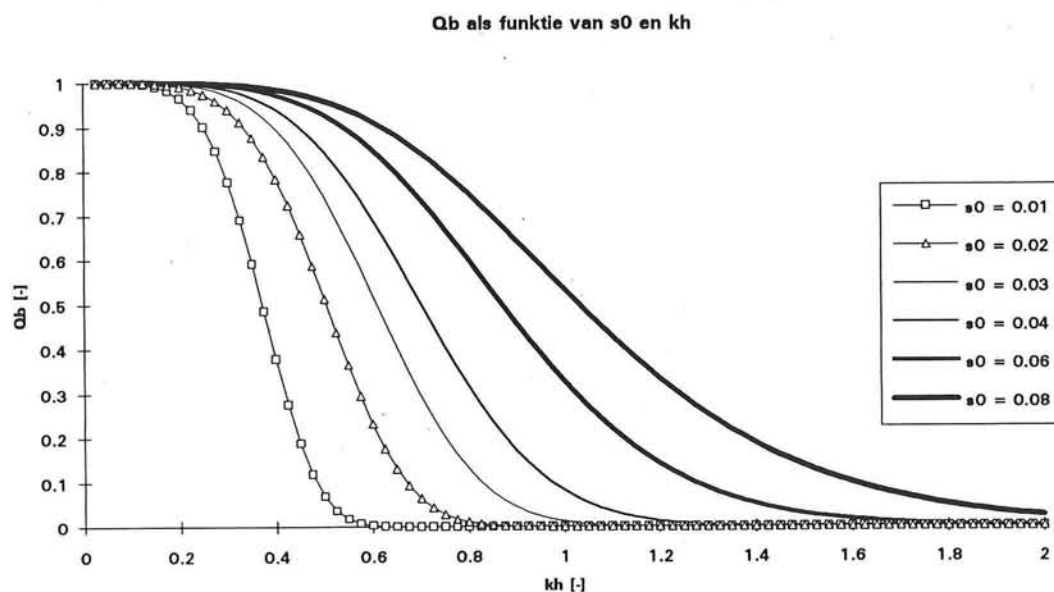
1. Een langere golf zorgt bij gelijk blijvende golfhoogte voor een steiler profiel.
2. Bij gelijk blijvende golflengte en verlaging van de golfhoogte kruipt de brandingsrug omhoog. Om dit te illustreren is in figuur 3.5 voor elke periode de hoogte van de brandingsrug uitgezet tegen de golfhoogte.



Figuur 3.5: Invloed golfperiode en -hoogte op de hoogte van de brandingsrug

3. De hoogte van de brandingsrug wordt voornamelijk bepaald door de golfsteilheid s_0 . Echter bij golven met een lagere periode, ofwel een kleinere lengte, is de brandingsrug beduidend lager

dan bij de langere golven. De verklaring voor dit feit is terug te vinden in figuur 3.6. Hier staat de fractie van brekende golven Q_b uitgezet tegen de dimensieloze diepte kh . Al bij grotere dieptes breken er meer golven met een kleine lengte, dan met een grote lengte. Een kleine lengte betekent een grotere steilheid bij gelijk blijvende golfhoogte. Golven met een grotere steilheid breken eerder dan golven met een kleinere steilheid. Alleen brekende golven geven een sterke retourstroom. Wanneer deze het zand even snel zeewaarts afvoert, als de golven het opkruien, dan kan ook een horizontaal profiel (aan de bovenkant van een brandingsrug) in evenwicht zijn.



Figuur 3.6: Q_b als functie van kh en s_0

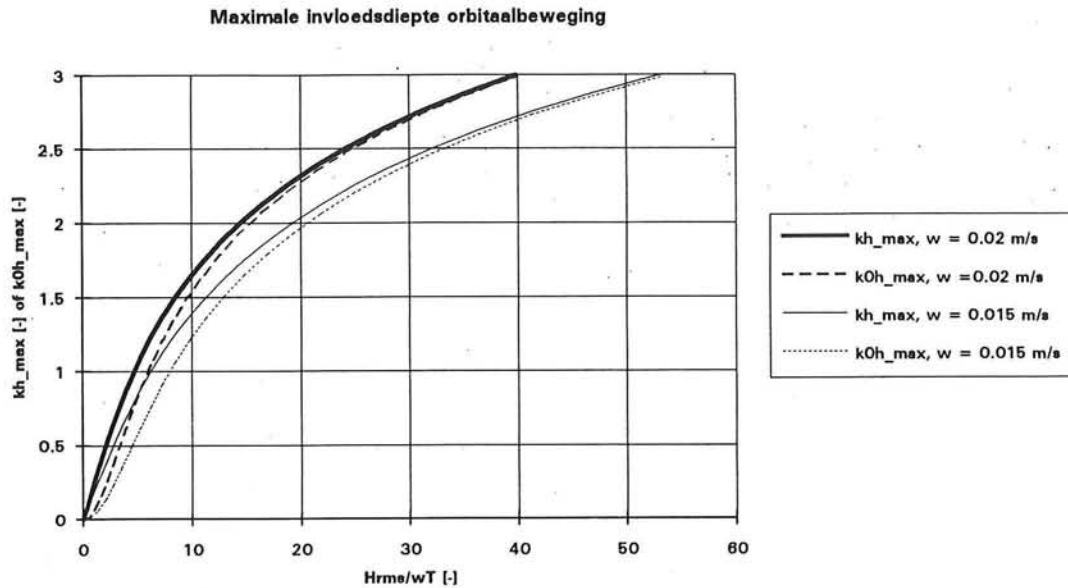
4. De hoeveelheid zand, die in het profiel gewonnen kan worden, kan bepaald worden uit de groei van de brandingsrug. Door het gewonnen oppervlak te vermenigvuldigen met de lengte van het kustvak kan hieruit de hoeveelheid zand bepaald worden die afgevoerd kan worden bij verschillende transmissiecoëfficiënten.

3.2.2 Geldige diepte evenwichtsprofielen

In de figuren 3.1 t/m 3.4 zijn alle evenwichtsprofielen afgekapt bij de diepte van $z = -12$ m. De evenwichtsprofielen worden echter wel tot grotere dieptes doorgerekend. Dit is op zich irrelevant, misschien zelfs onjuist, omdat golven zich op diep water bevinden wanneer de diepte h groter is dan de helft van de golflengte L . Op diep water oefenen de golven en de bodem geen invloed meer op elkaar uit. Bij golven met een periode van $T_{eq} = 4$ s ($L_0 = 25$ m) is dit al het geval bij een waterdiepte van $h = 12,5$ m. Een verklaring hiervoor is de bijdrage van u_{rms} , dit is de variantie van de gaussische verdeling voor de veranderlijke snelheidscomponent (orbitaalbeweging), aan het begin van beweging van het sediment, dat opgewekt wordt door de niet-brekende golven (vgl. I-14). Deze blijft bij v.d. Kerk een waarde behouden die groter is dan nul. Om dit te voorkomen wordt als criterium voor een ondergrens gesteld, dat wanneer de waarde van $u_{rms} \leq 0,25$ m/s is, er geen invloed op de bodem meer wordt uitgeoefend. Door vergelijking I-4 te herschrijven als vergelijking 3.1, is met $u_{rms} = 0,25$ m/s en een gegeven waarde voor w , een relatie te vinden tussen de dimensieloze diepte kh en de bijbehorende H_{rms}/wT , waarvoor het evenwichtsprofiel geldig is.

$$\sinh kh = \frac{w \pi H_{rms}}{u_{rms} wT} \quad (3.1)$$

In figuur 3.7 zijn de dimensieloze dieptes kh en k_0h uitgezet tegen de verhouding H_{rms}/wT , met waarden voor de valsnelheid van $w = 0,02$ m/s ($D_{50} = 200$ μ m) en $w = 0,015$ m/s ($D_{50} = 150$ μ m), waarvoor het evenwichtsprofiel maximaal geldig is.



Figuur 3.7: Maximale invloedsdiepte orbitaalbeweging

Bij een diepte groter dan $kh \geq 3$ geldt het model niet meer, aangezien dan de waterdiepte groter wordt dan de helft van de golflengte $h > \frac{1}{2} L$. Op dat moment bevindt de golf zich op diep water.

Voor bekende w kan, wanneer H/wT bekend is, met figuur 3.7 de maximale geldige waarde voor kh of k_0h bepaald worden. Uit de lineaire golftheorie kan dan vergelijking 3.2 afgeleid worden, die de maximale waterdiepte h_{max} geeft waarvoor de retourstroom geldt:

$$h_{max} = \frac{gT^2}{4\pi^2} kh_{max} \tanh kh_{max} = \frac{gT^2}{4\pi^2} k_0h_{max} \quad (3.2)$$

In de volgende paragraaf worden de gevonden theoretische evenwichtsprofielen vergeleken met de werkelijkheid.

3.3 Vergelijken met de werkelijkheid

3.3.1 Inleiding

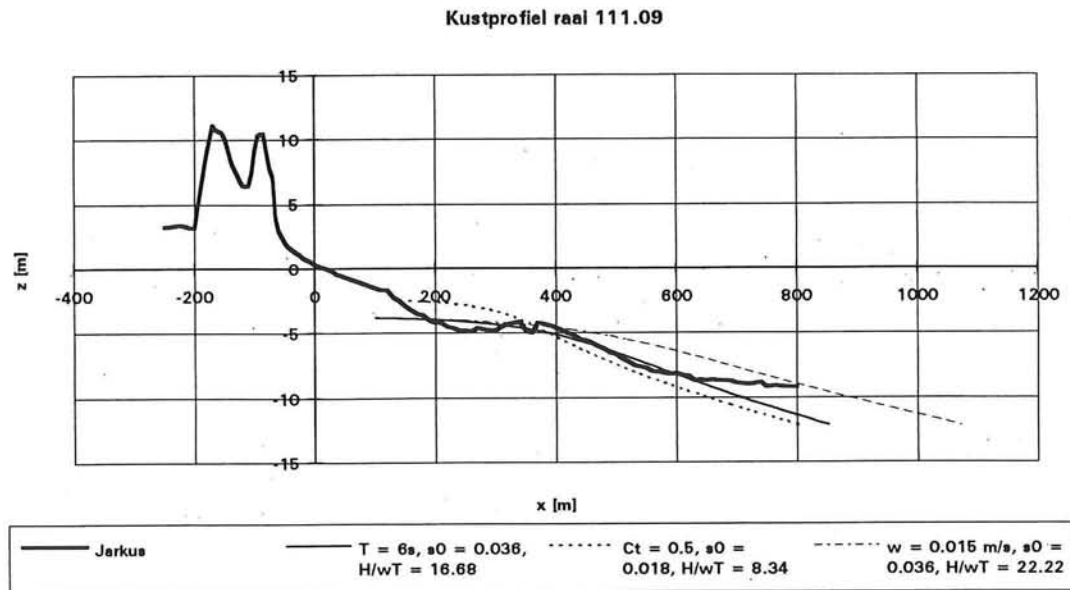
In de vorige paragraaf zijn voor een aantal golven, met een bepaalde hoogte en periode, evenwichtsprofielen voor een willekeurige kust uitgerekend. In deze paragraaf zullen deze profielen getoetst worden met de werkelijkheid. Dit is gedaan aan de hand van bestaande kustprofielen, afkomstig uit het Jarkus-bestand. Het Jarkusbestand is afkomstig van Rijkswaterstaat. Dit bestand ziet er als volgt uit. Langs de Nederlandse kust is een raaienstelsel aangelegd, het Rijks-Strand-Palen (RSP) -stelsel. Scheveningen ligt bijvoorbeeld bij raai 102 en Hoek van Holland bij raai 118. Ieder jaar wordt op een bepaalde dag het kustprofiel van zo'n raai gemeten. Dit kustprofiel wordt weergegeven in getallenparen, met een horizontale x-coördinaat en een verticale y-coördinaat. Deze jaarlijkse metingen gaan echter maar tot een afstand van circa 800 meter uit de kust. Om het verloop van het kustprofiel van een raai op grotere afstand uit de kust te bepalen wordt om de vijf jaar een zgn. doorloding uitgevoerd. Bij deze doorloding wordt het kustprofiel van een raai tot een afstand van circa 2500 m uit de kust gemeten.

In de figuren 3.1 t/m 3.4 is duidelijk te zien, dat het evenwichtsprofiel volgens v.d. Kerk doorloopt tot een zekere hoogte. Dit is de hoogte van de eerste brandingsrug die de golven vanuit zee naar de kust toe tegenkomen. Het model voor het evenwichtsprofiel, dat v.d. Kerk heeft opgesteld, rekent dus de hoogte en helling van de eerste brandingsrug uit die golven tegenkomen. Om de evenwichtsprofielen te toetsen met de werkelijkheid is dus een raai nodig met brandingsruggen. In bijlage B1 is een 3D-profiel van de Zuid-Hollandse kust te zien, dat ontleend is aan Bakker en de Vroeg [5]. In het gedeelte van de kust ten Noorden van Scheveningen, de Rijnlandse kust, zijn duidelijk brandingsruggen te zien. Voor deze kust liggen gemiddeld 3 brandingsruggen. Voor de kust ten Zuiden van Scheveningen, de Delflandse kust, ligt daarentegen slechts een enkele en in het algemeen helemaal geen brandingsrug. De verklaring hiervoor is onbekend, m.a.w. de theorie van v.d. Kerk is in dit opzicht gebrekkig. In eerste instantie is een profiel met een enkele brandingsrug gekozen om de evenwichtsprofielen te vergelijken met de werkelijkheid. Dit is gedaan om een inzicht te verkrijgen in de mate waarin de evenwichtsprofielen een brandingsrug benaderen. Het betreft hier het kustprofiel van raai 111.09. In paragraaf 3.3.2 wordt uitgewerkt welk van de evenwichtsprofielen aan de brandingsrug voldoet.

Wanneer de golfhoogte van de golven verlaagd wordt, krijgt de term H/wT een kleinere waarde. Dit betekent dat de kust een steilere helling krijgt. Zand wordt van de onderste zones van het kustprofiel naar het bovenste gedeelte getransporteerd. Een schatting van dit volume zand wordt gemaakt in 3.4. Hierbij wordt verondersteld, dat de Delflandse kust overal hetzelfde dwarsprofiel heeft. Gekozen wordt voor een raai zonder brandingsruggen (raai 113.01), omdat uit bijlage B1 blijkt, dat er voor het merendeel van de Delflandse kust geen brandingsruggen voorkomen.

3.3.2 Evenwichtsprofiel vs. Jarkus

In deze paragraaf wordt gekeken naar de mate waarin een kustprofiel met een brandingsrug benaderd kan worden door een evenwichtsprofiel. In figuur 3.8 is het kustprofiel te zien van raai 111.09. Het kustprofiel is een "normaal" Jarkusprofiel en is gemeten tot een afstand van circa 800 meter uit de kust. Op een afstand van circa 350 m uit de kust ligt hier een brandingsrug. De brandingsrug is benaderd door het evenwichtsprofiel van $H_{rms} = 2,0$ m en $T = 6$ s, dit is de getrokken lijn in figuur 3.8.



Figuur 3.8: Vergelijking evenwichtsprofielen en Jarkus (1)

De gestippelde lijn stelt het evenwichtsprofiel voor wanneer de golfhoogte voor de helft gedempt wordt. Duidelijk is te zien, dat de brandingsrug volgens de theorie omhoog komt en het profiel steiler wegloopt. Beneden een diepte van $z = -8 \text{ m}$ kan het evenwichtsprofiel het Jarkusprofiel niet meer volgen. Het evenwichtsprofiel schiet onder het Jarkusprofiel. Vanaf dat moment loopt het evenwichtsprofiel te steil weg. Een mogelijke oorzaak voor dit te steile weglopen is de grootte van de korreldiameter. Tot nu toe is aangenomen dat het zand in het kustprofiel een korreldiameter heeft van $D_{50} = 200 \mu\text{m}$, de valsnelheid is dan gelijk aan $w = 0,02 \text{ m/s}$. Recent onderzoek bij Terschelling heeft aangetoond, dat het zand dat dieper in het profiel ligt een kleinere korreldiameter heeft. De waarde hiervoor is circa $D_{50} = 150 \mu\text{m}$, dit heeft een valsnelheid van $w = 0,015 \text{ m/s}$. Dit brengt een hogere waarde voor H/wT met zich mee. Een hogere waarde voor H/wT brengt weer een flauwer profiel met zich mee. Het profiel zal dus in de diepere gedeeltes flauwer weglopen. Om dit te onderzoeken is nog een derde evenwichtsprofiel in figuur 3.8 geplot (de streep-punt lijn). Dit derde evenwichtsprofiel is berekend voor dezelfde golf ($H_{rms} = 2,0 \text{ m}$ en $T = 6 \text{ s}$) als het eerste evenwichtsprofiel. Alleen is dit berekend voor zand met een valsnelheid van $w = 0,015 \text{ m/s}$ tegen $w = 0,02 \text{ m/s}$ voor het eerste evenwichtsprofiel. Dit derde evenwichtsprofiel toont aan, dat bij een fijnere zandsort ($D_{50} = 150 \mu\text{m}$) de helling weliswaar flauwer wordt, maar zoals te zien is in figuur 3.8, wordt de helling van de brandingsrug minder goed benaderd.

De vraag die deze profielen oproepen is tot welke diepte zij nu geldig zijn. Met behulp van figuur 3.7 en vergelijking 3.2 kan de waarde bepaald worden voor $h_{\max}$ tot waar de evenwichtsprofielen geldig zijn. Het resultaat staat in tabel 3.1.

$T [s]$	$H_{rms} [m]$	$w [m/s]$	$H/wT [-]$	$kh [-]$	$h_{\max} [m]$
6	2,0	0,02	16,7	2,2	19,1
6	1,0	0,02	8,3	1,5	12,1
6	2,0	0,015	22,2	2,2	18,7

Tabel 3.1: waarden voor $h_{\max}$ voor golven met $T = 6 \text{ s}$

Uit figuur 3.8 en tabel 3.1 kan geconcludeerd worden, dat de hoogte van de brandingsrug en de helling redelijk benaderd kunnen worden door een evenwichtsprofiel. Echter nadat een diepte van $z = -8$ m bereikt is loopt het evenwichtsprofiel te steil weg. Toch moet bedacht worden, dat een evenwichtsprofiel veroorzaakt wordt door een enkele golf, met een karakteristieke hoogte en periode. In de natuur komen golven met allerlei hoogtes en perioden voor. Deze bepalen samen de vorm van het kustprofiel. Waarschijnlijk wordt het verschil tussen het evenwichtsprofiel en het Jarkusprofiel in het diepe gedeelte gecompenseerd door evenwichtsprofielen afkomstig van andere golven.

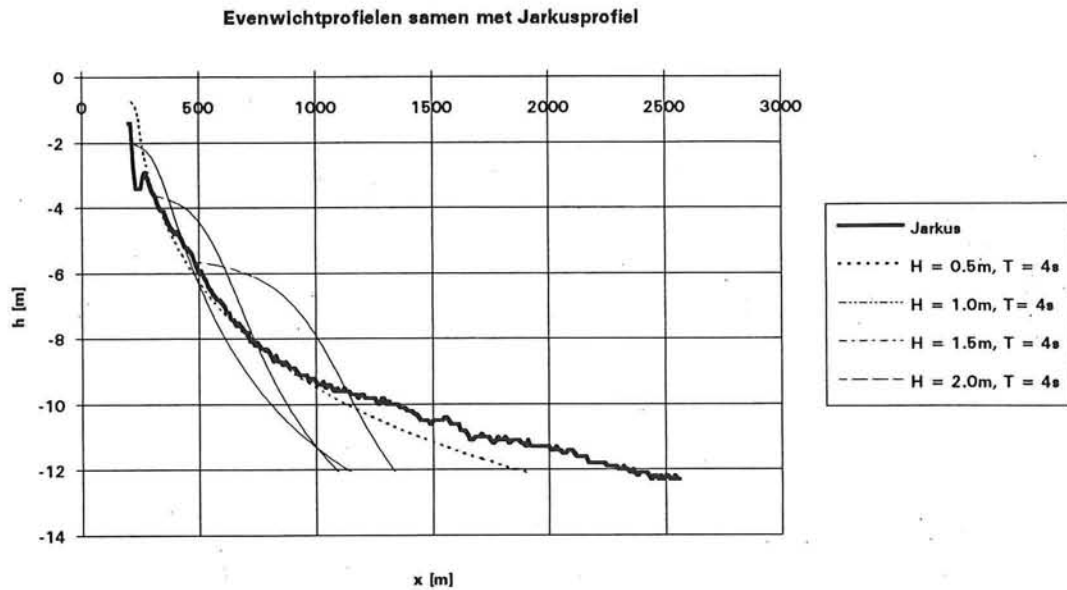
3.4 De aanwinst van zand bij verlaging van de golfhoogte

Het idee is om zand dat door de golfhoogteverlaging in het bovenste deel van het kustprofiel gewonnen wordt met het langtransport naar het zuiden af te voeren. Deze te winnen hoeveelheid zand is afkomstig uit het onderste gedeelte van het profiel. Zand wordt als het ware eerst van het onderste gedeelte naar het bovenste gedeelte van het kustprofiel getransporteerd. Bij dit dwarstransport wordt verondersteld, dat er geen langtransport optreedt. Daarna kan deze gewonnen hoeveelheid bijvoorbeeld naar het Zuiden worden afgevoerd. In de praktijk zullen deze twee vormen van transport gelijktijdig optreden. Van achteruitgang van de kust is ogenschijnlijk geen sprake, aangezien het zand dat in langsrichting wordt afgevoerd in dwarsrichting wordt aangevoerd. Dit afvoeren van zand wordt bewerkstelligd door de golfbrekers in een bepaalde hoek met de kust te leggen. Nadat de gewenste situatie bereikt is, zal m.b.v. de golfbrekers het langtransport op een waarde van netto nul m^3 /jaar moeten worden vastgezet.

Wanneer de golfbrekers weggehaald zouden worden, dan moet in de gaten gehouden worden, dat het kustprofiel zijn oude flauwere profiel weer wil aannemen. Zand wordt dus weer van het bovenste gedeelte van de kust naar beneden afgevoerd. Dit gaat dan gepaard met een achteruitgang van de kust, omdat het eerder gewonnen volume aan zand is afgevoerd.

De vraag blijft: "Hoe groot is het volume aan zand, dat in het bovenste gedeelte van het profiel gewonnen kan worden?" Om hierop een eenduidig antwoord te geven is nagenoeg onmogelijk. De kust is in zijn dwarsprofiel altijd in beweging. Na een storm wordt bijvoorbeeld zand van de duinen afgeslagen en naar de vooroever getransporteerd. Dit voltrekt zich tijdens de duur van zo'n storm, die circa zes uur bedraagt. M.a.w. in nog geen zes uur tijd kan het kustprofiel zich sterk veranderen. Wel is er een gebied vast te leggen waarbinnen het kustprofiel zich beweegt.

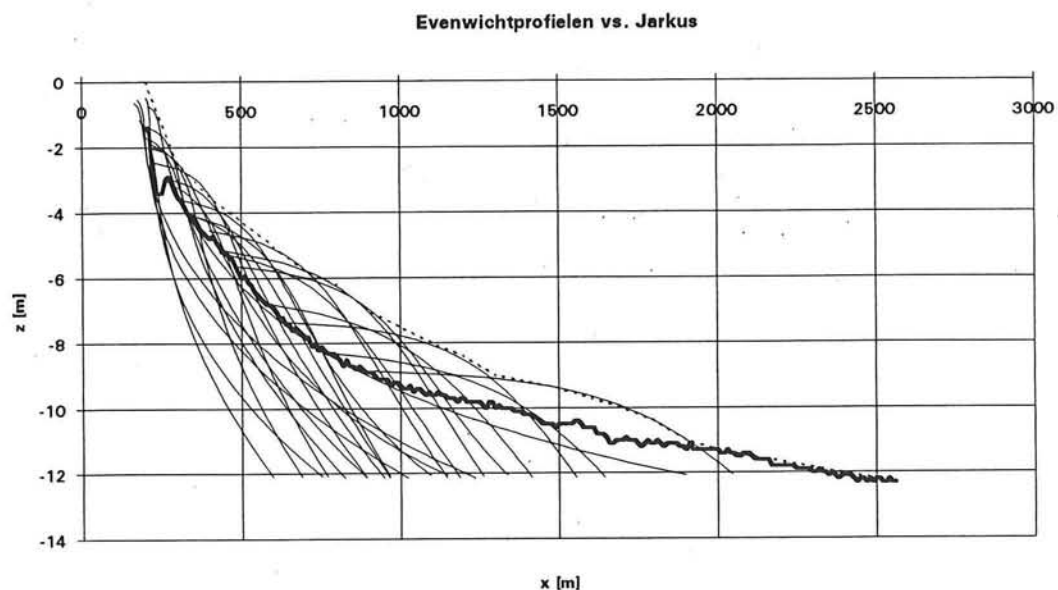
In figuur 3.9 is het profiel te zien van raai 113.01. Gekozen hier is voor het doorlodingsprofiel, om de invloed van de evenwichtsprofielen op grotere afstand uit de kust te kunnen zien. Hierin zijn de flauwste evenwichtsprofielen geplot, die in paragraaf 3.2 berekend zijn. Dit zijn de profielen voor golven met een periode van $T = 4$ s.



Figuur 3.9: Vergelijking evenwichtsprofielen en Jarkus (2)

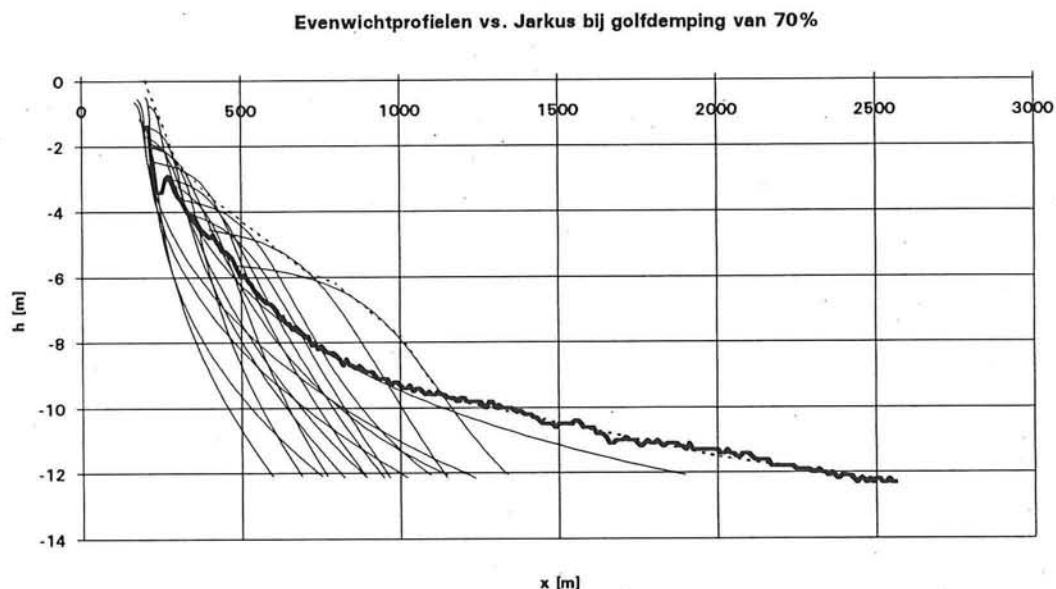
Wanneer figuur 3.9 beschouwd wordt, kan een aantal zaken worden opgemerkt. Het Jarkus-profiel wordt tot een diepte van $z = -9$ m redelijk benaderd door het evenwichtsprofiel veroorzaakt door golven met een hoogte van $H = 0,5$ m en een periode van $T = 4$ s. Bij een grotere diepte wordt het profiel te steil. Op zich is het vreemd, dat een enkel evenwichtsprofiel de werkelijkheid zo dicht benadert. Immers, alle evenwichtsprofielen samen zullen een omhullende om het werkelijke profiel moeten vormen. Dit gebeurt in zekere mate wanneer de andere profielen ook in de beschouwing worden meegenomen. De evenwichtsprofielen, die door de hogere golven veroorzaakt worden, vormen zich rondom het Jarkusprofiel. Wanneer deze profielen lager dan het Jarkusprofiel komen te liggen lopen zij eigenlijk, zoals vermeld is in de vorige paragraaf te steil weg.

Door alle evenwichtsprofielen in elkaar te plotten kan er een bovengrens bepaald worden. Onder deze bovengrens zal het kustprofiel zich bevinden. In figuur 3.10 zijn alle evenwichtsprofielen geplot. Naast de profielen die berekend zijn in paragraaf 2.3 zijn er nog extra profielen aan toegevoegd voor golven met een hoogte van $H_{rms} = 2,5$ m en $H_{rms} = 3$ m en periodes van $T = 4, 5, 6$ en 8 s.



Figuur 3.10: Benadering bovengrens Jarkusprofiel

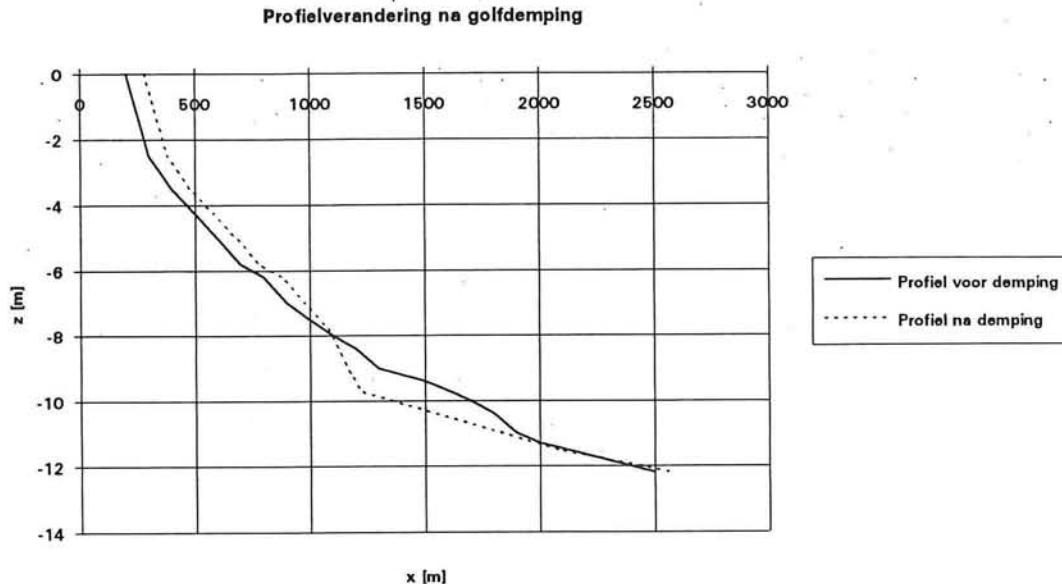
De dikke zwarte lijn is van het Jarkusprofiel, de gestippelde lijn is de bovengrensbenadering. De rest van de lijnen zijn de evenwichtprofielen. Wanneer de golven voor 70 % gedempt zouden worden, dan zou dit betekenen dat de evenwichtprofielen, die veroorzaakt worden door golven met een hoogte van $H \geq 0,7 \cdot 3 \approx 2$ meter uit figuur 3.10 zouden verdwijnen. Dit is te zien in figuur 3.11



Figuur 3.11: Benadering Jarkusprofiel bij golfdemping van 70%

Ook in figuur 3.11 is de bovengrens benaderd. Dit is weer de gestippelde lijn in de figuur.

Om te bepalen wat nu de winst aan zand in de bovenkant van het profiel is zijn deze twee bovengrensbepalingen in figuur 3.12 tegen elkaar uitgezet. Hierbij is rekening gehouden met het feit, dat de totale hoeveelheid zand in het profiel hetzelfde blijft. Duidelijk is te zien, dat zand van onderuit het profiel naar boven getransporteerd is. Voor diepte beneden $z = -12$ meter verandert er niets meer aan het profiel.



Figuur 3.12: Verandering in bovengrensbepaling

Uit figuur 3.12 kan de hoeveelheid zand afgeleid worden, die afgevoerd kan worden door langstransport. Hiervoor is het nodig om te weten op welke diepte het meeste langstransport plaatsvindt. In bijlage B2 is een figuur overgenomen uit [2]. Hierin is de jaarlijkse hoeveelheid langstransport in $[m^3/jaar]$ uitgezet tegen de diepte $[m]$. Het grootste deel van het langstransport vindt dan plaats tussen $-0,5 < z < -4$ meter diepte. Het gewonnen volume aan zand, waar het langstransport invloed op uit kan oefenen ligt tussen deze twee dieptes. Zandwinst voor grotere dieptes dan $z = -4$ m worden niet meegenomen.

Het gewonnen oppervlak aan zand in de bovenkant van het profiel bedraagt $280 m^2$. Gesteld is, dat dit profiel maatgevend is voor de Delflandse kust. De Delflandse kust heeft een lengte van circa 20 km. Zo komt de totale winst aan zand op een volume van maximaal $20 \cdot 10^3 * 280 = 5,6$ miljoen m^3 uit.

3.5 Conclusie

Uit de berekeningen voor het dwarsprofiel kan het volgende geconcludeerd worden. De evenwichtsprofielen, die berekend worden met het programma van v.d. Kerk zijn in het algemeen te steil. Een duidelijke grens die hiermee berekend kan worden is de bovengrens van het dwarsprofiel. Bij verlaging van de golfhoogte verandert ook de bovengrens van het kustprofiel. Door het verschil tussen die twee bovengrenzen te berekenen, kan een schatting gemaakt worden van het volume aan zand, dat naar boven getransporteerd wordt. De tijdstermijn waarin zich deze profielverandering voltrekt is echter nog een vraagteken. Dit is dan ook een aanbeveling voor verder onderzoek.

Na de grote zandsuppletie bij Hoek van Holland, die tot de vorming van de Van Dixhoorn-driehoek geleid hebben zijn er in de afgelopen 20 jaar nog vier zandsuppleties aan de Delflandse kust uitgevoerd. Dit zijn er drie bij Hoek van Holland en een bij Terheijde. De suppleties bij Scheveningen zijn niet meegeteld, aangezien deze ten Noorden van de havenpielen zijn uitgevoerd. Deze vier suppleties hadden een totaal volume van 5,57 miljoen m³ zand. Het totale volume, dat wordt gewonnen volgens het zanddiode-principe langs de Delflandse kust bedraagt maximaal 5,6 miljoen m³ zand, uitgaande van de bovengrensbepaling.

Conclusie: Op basis van het zanddiodeprincipe kan de erosie van de Delflandse kust worden tegengegaan zonder dat er grote zandsuppleties nodig zijn. Geconcludeerd wordt tevens dat er een aanzienlijke zandwinst boven in het profiel is.

Er moeten nog enige kanttekeningen geplaatst worden bij het gebruik van de bovengrensmethode om de winst aan zand in het bovenste gedeelte van het profiel uit te rekenen. Een bovengrens geeft in feite de flexibiliteit aan waaronder een kustprofiel zich kan bevinden. Doordat deze bovengrens verandert, hoeft het nog niet logisch te zijn dat het kustprofiel deze verandering ook inderdaad volgt. Het bestaande kustprofiel van raai 113.01 ligt immers ook onder de "nieuwe" bovengrens. Bekend is echter dat na stormen de kust een flauwer profiel aanneemt door zand van het bovenste gedeelte van het profiel naar beneden te verplaatsen (duinafslag). In de rustige periode na een storm herstelt de kust zich weer. De kleinere golven bouwen als het ware de kust weer op. Door het plaatsen van offshore golfbrekers neemt de hoogte van de golven, die het strand bereiken af. Door de toename van het aantal kleinere golven zal het opbouwproces na een stormperiode sneller optreden. Er treedt dus wel degelijk een kanteling van het gemiddeld kustprofiel op.

De bovengrensmethode om de zandwinst in het bovenste gedeelte van het profiel uit te rekenen moet gezien worden als schatting van wat er maximaal gewonnen kan worden. Voor een nauwkeuriger bepaling is een modelproef in een laboratorium aan te bevelen.

Het gevaar van deze manier van kunstmatig zandwinnen schuilt in de betrouwbaarheid van golfbrekers. Wanneer de golfbrekers bezwijken dan zal het kustprofiel weer zijn oude flauwere helling aannemen. Zand wordt nu van boven naar beneden verplaatst. In het Zuidelijk deel levert dit niet direkt gevaar op, aangezien hier extra zand is bijgekomen. In het Noordelijk gedeelte daarentegen is het zand, dat in een eerdere fase door de zee naar boven gebracht is, weggevoerd naar het Zuiden. Om een flauwer profiel te krijgen zal de zee het zand van de oorspronkelijke kust vandaan halen. Dit betekent, dat de kust ten Zuiden van Scheveningen aangevallen wordt en achteruit gaat. Zolang er geen andere structurele maatregelen genomen worden, zullen de golfbrekers eeuwig moeten blijven liggen.

4. Te stellen voorwaarden aan de golfbreker

4.1 Inleiding

In de vorige hoofdstukken is ingegaan op de beweging van sediment voor de Delflandse kust. Het langstransport bij Scheveningen is beschreven en er is aangegeven hoe het evenwichtsprofiel van de kust kan veranderen onder een verlaging van de golfhoogte. In dit hoofdstuk worden de voorwaarden omschreven, waaraan een golfbreker voor de Delflandse kust moet voldoen om de gewenste invloed op het sedimenttransport uit te oefenen. Uit het morfologisch gedrag van de kust kunnen verschillende voorwaarden afgeleid worden. Zo wordt in paragraaf 4.2 beschouwd welke golfhoogte en -periode het meeste transport veroorzaken. Er wordt ook gekeken naar de afstand uit de kust waar de golfbreker kan komen te liggen. Deze is zowel afhankelijk van de golfbreker zelf (m.b.t. de benodigde diepgang) als van de mogelijkheid van het weer aangroeien van de golven door de wind. Daarnaast gelden nog een aantal praktische beperkingen die in paragraaf 4.3 staan vermeld.

4.2 Morfologische voorwaarden

4.2.1 Maatgevende golflengte

Voor de berekening van het totale langstransport zijn de transporten per golfrichting bij elkaar opgeteld. In de berekeningen wordt voor elke golfrichting het transport per golfperiode en -hoogte berekend. De gebruikte perioden zijn $T_{eq} = 4, 5, 6$ of 8 seconden. Bij welke van deze perioden vindt nu het grootste deel van het totale langstransport plaats?

In figuur 4.1 wordt per golfperiode de waarde van het langstransport aangegeven. Een positieve waarde duidt op een Noordelijk gericht transport, een negatieve waarde op een Zuidelijk gericht transport.

Het langstransport wordt duidelijk gedomineerd door golven met een periode van $T_{eq} = 5$ en 6 seconden. Kennelijk is het vaak voorkomen van een golf meer van belang voor langstransport, dan de grootte van een golf. Een grotere golf zorgt voor een groter transport dan een kleinere golf. Maar doordat kleinere golven vaker voorkomen dan grotere golven zorgen zij, bij gelijkblijvende golfrichting, voor een groter aandeel in het resulterend transport.

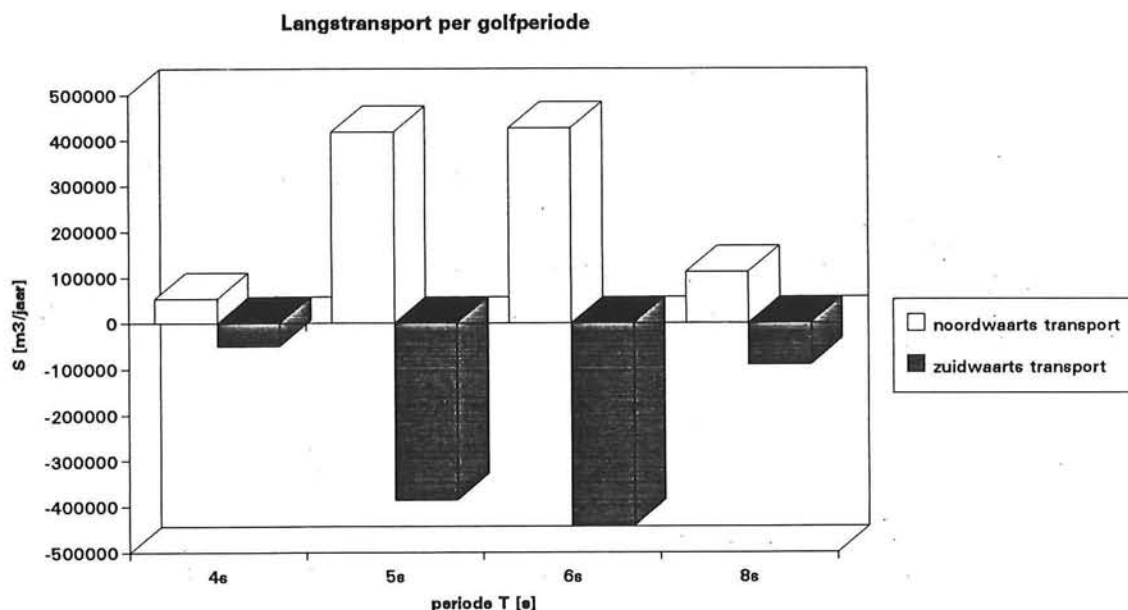
Wanneer de periode T bekend is kan de golflengte L , volgens de lineaire theorie, berekend worden met vergelijking 4.1 voor diep water en vergelijking 4.2 voor ondiep water.

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (4.1)$$

$$L = L_0 \tanh kh \quad (4.2)$$

Hierin is k het golfgetal $2\pi/L$ [m^{-1}] en staat h voor de diepte [m].

In tabel 4.1 is dit uitgewerkt voor beide perioden bij diep water en $h = 12$ m.



Figuur 4.1: Langtransport per periode

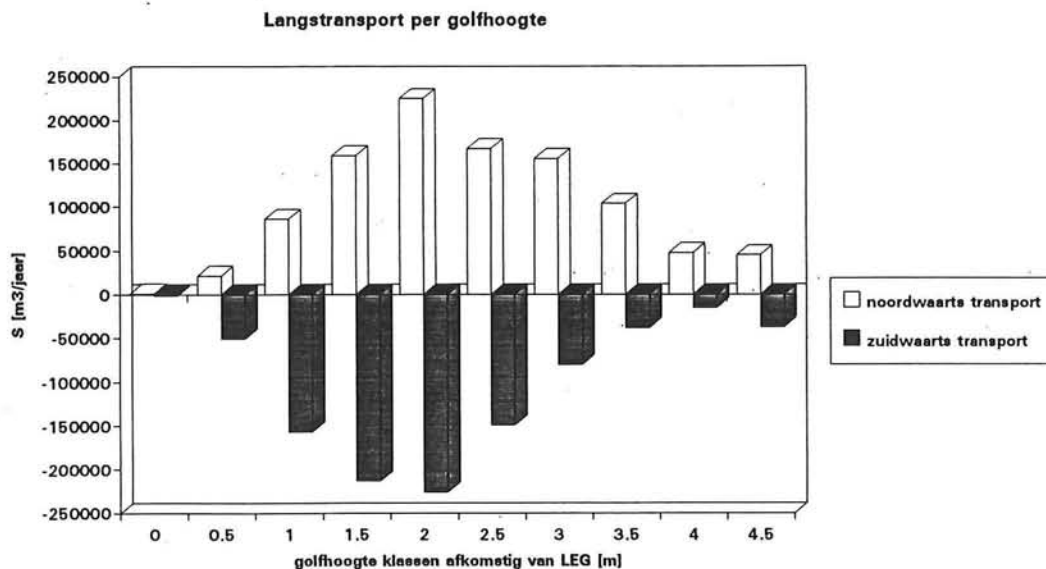
	$T = 5s$	$T = 6s$
L_{12} [m]	38,5	50,6
L_0 [m]	39	56

Tabel 4.1: Golf lengtes bij $h = 12m$ en diep water

Uit tabel 4.1 kan geconcludeerd worden dat voor de maatgevende golf lengte m.b.t. het langtransport geldt, dat deze omstreeks tussen $40 < L < 50$ meter in ligt.

4.2.2 Maatgevende golfhoogte

In de vorige paragraaf is gekeken wat de periode is van de golven die het meeste transport van zand veroorzaken. Een andere vraag is welke golfhoogtes dominerend zijn in het langtransport. Om dit te onderzoeken zijn de bijdragen van alle golfhoogteklassen aan het Noordelijk of Zuidelijk gericht transport bij elkaar opgeteld. Dorrestein geeft in totaal 10 golfhoogteklassen. Deze begint met een klasse met een golfhoogte van nul meter. De volgende klassen zijn steeds een halve meter hoger. De hoogste klasse heeft golven met een hoogte van 4,5 meter. In de berekening van het netto langtransport wordt voor elke golfrichting zijn bijdrage hieraan berekend. Per golfrichting wordt onderscheid gemaakt tussen de vier perioden. Voor elke periode wordt dan per golfhoogteklasse het langtransport berekend. Per golfrichting komt een golfhoogteklasse dus vier maal voor. Deze vier bij elkaar opgeteld vormen de totale bijdrage aan het langtransport van de golfhoogteklasse aan de golfrichting. Dit kan voor elke golfrichting gedaan worden. Tot slot worden de bijdragen per golfhoogteklasse van alle golfrichtingen aan het Zuidelijk of Noordelijk gerichte transport bij elkaar opgeteld. In figuur 4.2 is per golfhoogteklasse de bijdrage aan de langs het sedimenttransport weergegeven.



Figuur 4.2: Langtransport per golfhoogteklasse

Op de horizontale as staan de golfklassen vermeld, die Dorrestein in [14] gebruikt. Deze waarden zijn afkomstig van LEG en hebben dan betrekking op een waterdiepte van $h = 24$ meter. Uit figuur 4.2 blijkt dat golven met een hoogte tussen $1,5 \text{ m} < H_{sig} < 3 \text{ m}$ het grootste aandeel in het transport hebben. Worden deze waarden omgerekend naar een waterdiepte van $h = 10 \text{ m}$, volgens Harreveld, zie paragraaf 2.3.1, dan hebben de golven een hoogte tussen circa $1,2 \text{ m} < H_{sig} < 2,7 \text{ m}$. In theorie zou weer de grootste golf het meeste transport veroorzaken. Maar zoals eerder is opgemerkt, is het vaak voorkomen van een golf belangrijker voor het netto transport, dan de hoogte van een golf.

4.2.3 Maatgevende waterdiepte

Om een golfbreker zo effectief mogelijk te plaatsen is het nodig, dat hij zo dicht mogelijk bij de brekerlijn komt te liggen. In de brekerzone is om twee redenen geen alternatief. Ten eerste zijn er dan al golven gebroken voor zij de golfbreker bereiken. Deze golven zorgen dan al voor langtransport. Ten tweede zorgen de brekende golven in de brandingszone voor te grote krachten, die op de golfbreker werken.

In hoofdstuk 2 wordt voor de bepaling van het langtransport de brekerdiepte D_{br} berekend (zie paragraaf 2.2.2). Uit de uiteindelijke berekening komt naar voren dat de grootste brekerdiepte in theorie $D_{br} = 7,8 \text{ m}$ bedraagt. Deze brekerdiepte geldt voor golven uit de golfhoogteklasse van $H_{sig} > 4,5 \text{ m}$, met een periode van $T_{eq} = 8 \text{ s}$, uit de golfrichting $KK = 330^\circ$. Dit zou leiden tot de conclusie, dat de golfbreker op een plaats moet komen te liggen met een waterdiepte van $h = 8 \text{ m}$. Bedacht moet worden, dat H_{sig} gedefinieerd wordt als het gemiddelde van de hoogste éénderde golven uit een registratie. In de registratie komen dus hogere golven voor dan H_{sig} . Een hogere golf leidt weer tot een grotere brekerdiepte (vgl. 2.13). Het is verstandig om de golfbreker iets dieper te leggen, bijvoorbeeld op $h = 10 \text{ m}$.

Als voorwaarde voor de waterdiepte geldt nu, dat de minimale waterdiepte waar de golfbreker komt te liggen is $h = 10 \text{ m}$. Uit figuur 3.9 en [28] kan bepaald worden, dat de afstand uit de kust tussen circa $1,3 \text{ km} < x < 1,8 \text{ km}$ bedraagt.

4.2.4 Afstand uit de kust m.b.t. golfregeneratie

Wanneer een golf op enige afstand uit de kust wordt gedempt, dan zal deze door de wind weer aangroeien. Nu wordt de afstand uit de kust waar de golfbreker komt te liggen belangrijk. Ligt de golfbreker te ver uit de kust dan zal de wind de golf weer tot zijn oorspronkelijke hoogte, of daar in de buurt, doen aangroeien. Voor de minimum afstand uit de kust geldt dat de golfbreker buiten de brandingszone moet komen te liggen.

De grootte en lengte van golven wordt o.a. bepaald door de windsnelheid U_a [m/s], de duur van de wind t [s] en de strijklengte F [m] en de diepte h [m]. Wanneer een golf met een nog willekeurige hoogte bij de kust aankomt kan berekend worden hoe lang zijn strijklengte is. Om nu de aangroei van een golf naar de kust toe te berekenen is uitgegaan van een standaard windveld. In de Shore Protection Manual worden de formules van Sverdrup-Munk-Brettschneider gegeven voor de golfhoogtevoorspelling voor diep (4.3) en ondiep (4.4) water gegeven.

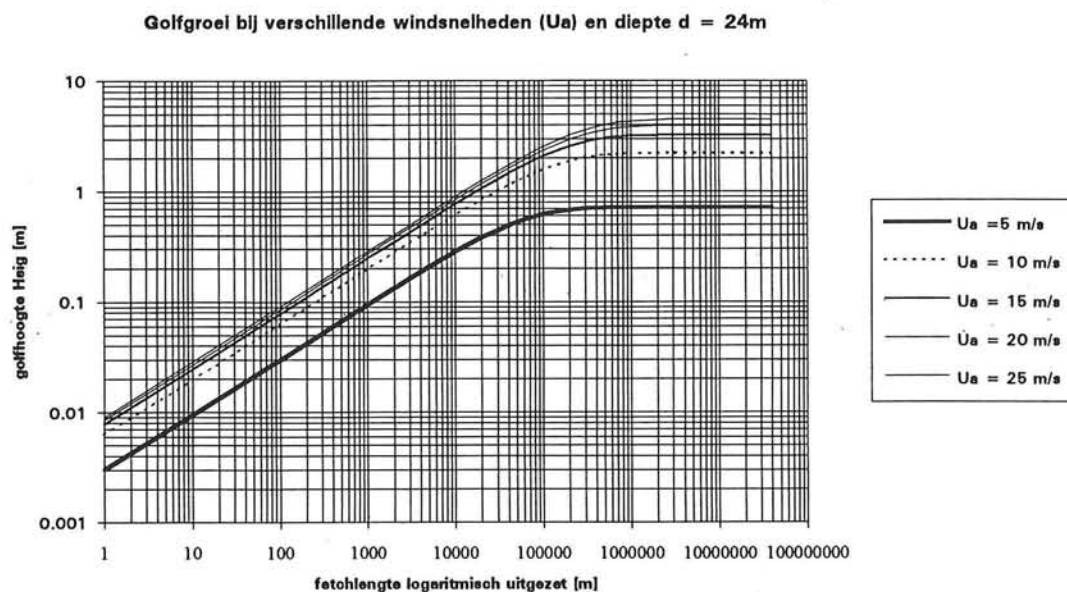
$$\begin{aligned}\frac{gH_{m0}}{U_a^2} &= 1,6 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{gF}{U_a^2}} \Leftrightarrow \\ H_{m0} &= 5,112 \cdot 10^{-4} U_a \sqrt{F}\end{aligned}\quad (4.3)$$

$$\frac{gH}{U_a^2} = 0,283 \tanh \left[0,530 \left(\frac{gh}{U_a^2} \right)^{3/4} \right] \tanh \left\{ \frac{0,00565 \sqrt{\frac{gF}{U_a^2}}}{\tanh \left[0,530 \left(\frac{gh}{U_a^2} \right)^{3/4} \right]} \right\} \quad (4.4)$$

Waarin:

- H, H_{m0} : significante golfhoogte [m]
- g : zwaartekrachtversnelling [m/s^2]
- U_a : windsnelheid gemeten op a meter hoogte [m/s]
- h : waterdiepte [m]
- F : strijklengte [m]

Theoretisch kunnen golven bij constante omstandigheden, bij $U_a = \text{constant}$, $h = \text{constant}$, $t = \infty$ s en $0 < F < \infty$, een evenwichtshoogte bereiken. Beschouw hiervoor figuur 4.3, deze is uitgewerkt voor $h = 24$ m en $U_a = 5, 10 \dots 30$ m/s.



Figuur 4.3: golfhoogtegroei bij $h = 24\text{ m}$

Duidelijk is te zien hoe golven naar een evenwichtshoogte toe lopen. Men spreekt dan over een volgroeide golf.

Om de golfgroei na een golfbreker op bepaalde afstand te bepalen is het nodig, dat de windsnelheid bekend is. Uit bijlage C1 blijkt dat er op de Noordzee een vrijwel rechtlijnig verband bestaat tussen windsnelheid en golfhoogte. Deze gegevens zijn eveneens afkomstig van Dorrestein. Uit de grafieken van bijlage C1 kan bij een gegeven golfhoogte de windsnelheid bepaald worden. Wanneer deze vaststaat kan de uiteindelijke berekening van de golfregeneratie uitgevoerd worden. Deze gaat dan als volgt.

Voor een bepaalde golfhoogte wordt m.b.v. bijlage C1 de bijbehorende windsnelheid U_a bepaald. Vervolgens kan, met vergelijking 4.3 of 4.4, de hypothetische strijklengte F berekend worden die nodig is om met een dergelijke windsnelheid deze golfhoogte te bereiken. Nu wordt de golfhoogte vermenigvuldigd met een transmissiecoëfficiënt. Ook voor de verlaagde golf kan een hypothetische strijklengte berekend worden die nodig zou zijn om die hoogte te bereiken. Deze strijklengte is uiteraard kleiner dan de eerste. De golfhoogte is immers kleiner. Bij de nieuw berekende strijklengte wordt de afstand tot de kust opgeteld. Met deze nieuwe waarde voor de strijklengte kan de golfhoogte bij de kust bepaald worden.

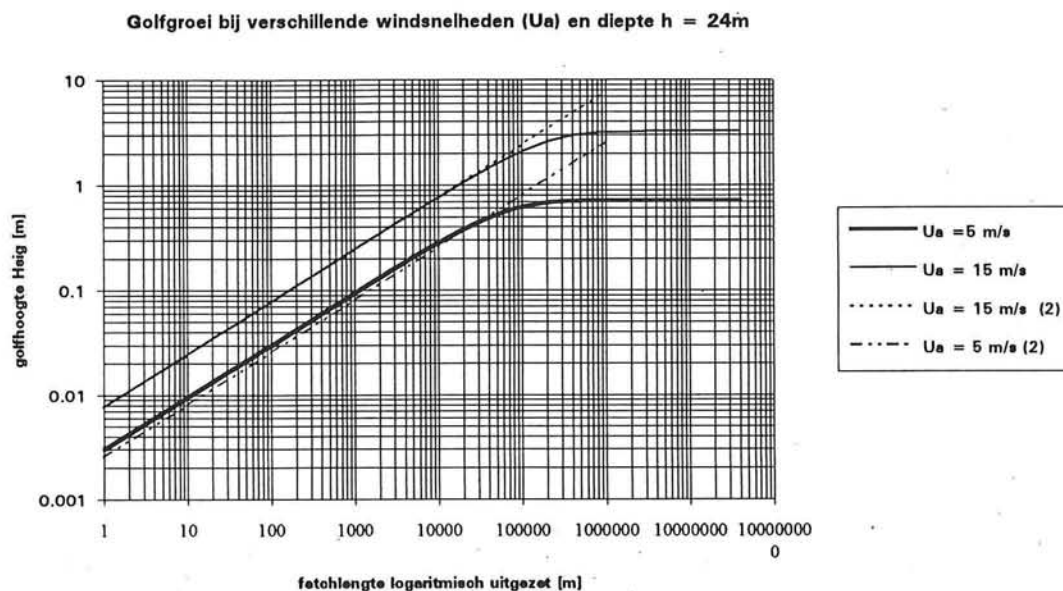
In bijlage C3 is per golfrichting uitgerekend hoe groot deze F is bij transmissiewaarden van $C_t = 33, 50, 70\%$. Deze waarden voor de transmissiecoëfficiënten zijn gekozen, omdat uit de meetserie van Burgers de grootte van de transmissiecoëfficiënt van het VA-ponton tussen $33\% < C_t < 70\%$ blijkt te liggen. Hier wordt in hoofdstuk 5 verder op ingegaan.

De hypothetische strijklengtes zijn in eerste instantie berekend met vergelijking 4.4, voor een waterdiepte bij Lichteiland Goeree, van $h = 24$ meter. Het bleek dat bij kleine golven en dus bij kleine windsnelheden $U_a \leq 7\text{ m/s}$, ook bij oneindige strijklengte, de golfhoogte theoretisch (vgl. 4.4) niet gehaald zou kunnen worden. De golf nadert dan snel naar zijn theoretisch volgroeide waarde. Deze waarde komt niet overeen met de invoer. Dit kan geïllustreerd worden met het volgende voorbeeld.

Voor een golf uit de West-Zuid-Westen ($KK = 240^\circ$) met een hoogte van $0,26\text{ m}$ wordt een bijbehorende windsnelheid van $0,9\text{ m/s}$ gevonden. Wanneer dit ingevuld wordt in vergelijking 4.4

dan kan een golf door deze windsnelheid theoretisch slechts aangroeien tot 0,03 m. Een verklaring hiervoor is, dat het lineaire verband tussen windsnelheid en golfhoogte voor de lagere windsnelheden niet op gaat. (N.B. Er blijkt een afwijking te zijn bij lage windsnelheden tussen de theoretische waarde voor de golfhoogte t.o.v. de windsnelheid en de metingen van Dorrestein. In bijlage C2 wordt verder ingegaan op het gemeten verband tussen windsnelheid en golfhoogte en het theoretisch verband. Het verschil is verder niet onderzocht, omdat dit niet van belang is voor de rest van dit onderzoek.)

Uit praktische overweging wordt toch het lineaire verband gebruikt om per golfrichting de windsnelheid voor een bepaalde golf te bepalen. Voor de strijklengteberekening wordt dan vergelijking 4.3 i.p.v. 4.4 gebruikt. Ondanks het feit dat vergelijking 4.3 eigenlijk voor diep water bedoeld is, mag hij gebruikt worden. Beschouw hiervoor figuur 4.4, hieruit kan geconcludeerd worden dat wanneer de golf zich in het aangroeiende stadium bevindt, het niet uit maakt welke van de twee vergelijkingen gebruikt wordt. In figuur 4.4 zijn naast elkaar uitgezet het strijklengte-golfhoogte-verloop bij windsnelheden van $U_a = 5$ m/s en $U_a = 15$ m/s. De lijnen met index 2 in de legenda zijn berekend met vergelijking 4.3.



Figuur 4.4: Vergelijken golfhoogtegroei

Daarnaast zijn de strijklengtes bij hogere windsnelheden ($U_a > 7$ m/s), die met vergelijking 4.3 berekend worden, kleiner dan de strijklengtes die berekend zijn met vergelijking 4.4. Dit betekent dat een golf na damping volgens vergelijking 4.3 sneller zal aangroeien dan volgens 4.4. Met vergelijking 4.3 wordt ook de maximale groei van de golfhoogte berekend, die hij kan bereiken.

In tabel c1 t/m c6 van bijlage C3 zijn nu voor de strijklengte achtereenvolgens die voor $h = 24$ meter waterdiepte F en die voor diep water F_0 naast elkaar gezet. Daarnaast staan de waarden voor $F_{0,33}$, $F_{0,5}$ en $F_{0,7}$, wat de strijklengtes zijn bij transmissiecoëfficiënten van resp. $C_t = 33$, 50 en 70%. Voor het bepalen van de strijklengte bij $h = 24$ m voor de lage windsnelheden $U_a \leq 7$ m/s is vergelijking 4.3 gebruikt. Voor de hogere windsnelheden is vergelijking 4.4 gebruikt. Wat de invloed van de wind is bij de regeneratie van golven na de golfbreker is geïllustreerd in het volgende voorbeeld.

Rekenvoorbeeld:

Gegeven is een golf uit de windrichting $KK = 330^\circ$, met een hoogte van 2,28 meter, die op 2 kilometer uit de kust gebroken wordt met als transmissiecoëfficiënt 33%, 50% en 70%. Gevraagd de golfhoogte bij het bereiken van de kust.

Van de golf blijft door het breken resp. $H = 0,73$, 1,14 en 1,6 meter over. Uit bijlage C1 kan afgelezen worden dat de windsnelheid $U_a = 11,5$ m/s is. De totale strijklengte van deze golf bedraagt volgens $F = 150$ kilometer volgens tabel c4. Om tot $H = 0,73$ meter hoogte te komen is er een strijklengte nodig van $F = 16,7$ km. Totale strijklengte tot de kust wordt nu $F = 16,7 + 2 = 18,7$ km. Met vergelijking 4.3 kan nu de golfhoogte berekend worden. Deze wordt $H_{\text{kust}} = 0,80$ meter. Voor de transmissiecoëfficiënt van $C_t = 50$ en 70 % volgen op dezelfde manier; $H_{\text{kust}} = 1,17$ m en $H_{\text{kust}} = 1,62$ m.

Uit het resultaat volgt, dat er geen rekening met golfregeneratie gehouden hoeft te worden, wanneer de golven op een afstand van circa 1 a 2 kilometer uit de kust liggen en de golfbrekers een transmissiecoëfficiënt hebben van $50 \% < C_t < 70 \%$.

Uit deze paragraaf valt af te leiden, dat de afstand, die de golfbreker uit de kust moet komen te liggen, niet afhankelijk is van golfregeneratie na de golfbreker.

Uiteraard wordt de afstand uit de kust ook bepaald door de locale diepte, die de golfbreker zelf nodig heeft.

4.3 Andere voorwaarden

Naast voorwaarden, die volgen uit de morfologie, zijn er nog andere voorwaarden waaraan voldaan moet worden. Hiermee worden voorwaarden bedoeld die zowel afkomstig zijn van de golfbreker zelf als van scheepvaart en recreatie.

4.3.1 Tussenafstand

Wanneer de golfbreker wordt aangelegd in segmenten, dan is de grootte van de tussenafstand van belang. Een grote tussenafstand zal gevolgen hebben voor de transmissiecoëfficiënt. Golven kunnen door deze opening immers ongestoord doorlopen. Toch zijn openingen wel degelijk van belang. Wanneer de openingen te smal zijn dan is het voor een schip onmogelijk om erdoor te varen. Denk hierbij aan onderhoudsvaartuigen e.d.

4.3.2 Lokale beperkingen

Met lokale beperkingen worden o.a. vaarwegen en andere nautische aspecten bedoeld. De golfbrekers mogen niet te dicht bij vaarwegen in de buurt liggen.

4.3.3 Levensduur

In hoofdstuk 3 wordt al opgemerkt, dat wanneer de golfbrekers verwijderd worden, de kust zijn oude profiel weer aan zal nemen. Dit betekent dat de kust op plaatsen waar het gewonnen volume aan zand is weg gevoerd achteruit zal gaan. Aangezien het gewonnen volume aan zand niet beschikbaar is zal dit van de originele kust worden afgehaald. Dit levert meteen problemen op bij Scheveningen. De golfbrekers dienen dus net zo lang in zee hun functie te vervullen totdat een structurele oplossing voltooid is, anders dienen de golfbrekers permanent aanwezig te blijven. In dit geval is het waarschijnlijk verstandig om een vaste constructie te bouwen als golfbreker. Gedacht wordt aan een zandrif of stortstenen golfbreker. Dit brengt als nadeel met zich mee dat het langtransport dan maar één keer veranderd kan worden.

Hieruit valt te concluderen, dat drijvende golfbrekers het best ingezet kunnen worden om een bepaald effect op de kust te bereiken. Hierna zal de bereikte situatie gefixeerd moeten worden. Het betreft dus meestal korte termijn projecten.

In principe kan ook een drijvende golfbreker-oplossing voor zeer lange tijd gebruikt worden. Vanuit technisch oogpunt gaat een dergelijke constructie ongeveer 30 jaar mee. Ook dit pleit voor het inzetten van drijvende golfbrekers voor tijdelijke oplossingen.

4.4 Conclusie

1. De golfhoogte waarvoor de golfbreker gevoelig moet zijn, moet liggen tussen $0,90 \text{ m} < H_{sig} < 2,7 \text{ meter}$.
2. De golflengte waarvoor de golfbreker gevoelig moet zijn moet liggen tussen $40 \text{ m} < L < 50 \text{ meter}$.
3. De afstand uit de kust wordt bepaald door de benodigde diepgang die een golfbreker nodig heeft. Wanneer de benodigde diepgang $h = 10 \text{ meter}$ is, dan komt de golfbreker 1 a 2 kilometer uit de kust te liggen. Golfgroei na de golfbreker door de wind speelt geen rol meer.
4. Bij het bepalen van de afstand tussen verschillende segmenten moet er rekening mee gehouden worden, dat er schepen op bepaalde plaatsen tussendoor kunnen varen. Bijvoorbeeld om de drie elementen een tussenafstand van 1,3 maal de breedte van het maatgevende schip.
5. In het geval van plaatsing van de golfbrekers bij de Delflandse kust moet rekening gehouden worden met de vaargeul bij Scheveningen en de aanloop naar de Nieuwe Waterweg. Waarschijnlijk ondervinden geen van beide vaargeulen hinder van de golfbrekers.
6. In geval gebruik gemaakt wordt van drijvende golfbrekers, moeten deze bij voorkeur op korte termijn projecten ingezet worden.

5. De Golfbreker

5.1 Inleiding "Het Vrijhof Ankers-ponton"

In de vorige hoofdstukken is wel gesproken over het dempen van de golven door golfbrekers, maar er is nog niet aangegeven, wat voor soort golfbrekers hiervoor gebruikt kunnen worden. Vrijhof Ankers heeft een drijvende golfbreker (het VA-ponton) ontwikkeld, speciaal bedoeld voor het beïnvloeden van het zandtransport.

Drijvende golfbrekers zijn altijd een ondergeschoven kindje geweest in de familie van golfbrekers. De mate van golftransmissie ligt te hoog om ze in de buurt van havens te gebruiken. Langere golven trekken zich van een drijvende golfbreker net zoveel aan als van een notedop. Een ander aspect, wat in vroegere dagen problemen opleverde, was de verankering. De verankering van een systeem bezweek nog al eens, zodat de golfbreker letterlijk bij zijn opdrachtgevers werd teruggebracht door aan te spoelen op het strand. Zoals hoofdstuk 2 heeft aangetoond wordt de hoofdaandrijving van het langstransport gevormd door de minder lange golven. Golven met een periode van 5 a 6 seconden hebben een lengte op diep water van resp. 39 of 56 meter. Golven met deze lengten zijn wel met succes te beïnvloeden door drijvende golfbrekers. De verankerings techniek is inmiddels, dankzij de offshore industrie, ook verder ontwikkeld. Dit is een reden om de drijvende golfbreker in ere te herstellen.

In dit hoofdstuk worden de eigenschappen van deze golfbreker besproken. Dit is gedaan door modeltests te vergelijken met het golfdiffractieprogramma Delfrac. In appendix II is een korte beschrijving van de werking van dit model opgenomen. Voor een uitgebreide beschrijving van Delfrac wordt verwezen naar Pinkster [21].

In paragraaf 5.2 worden de resultaten van de modeltests beschreven, die door Burgers [11] gedaan zijn. Vervolgens worden in 5.3 de resultaten van Delfrac besproken. Tot slot wordt gekeken in welke mate de golfbreker voldoet aan de gestelde voorwaarden van het vorige hoofdstuk.

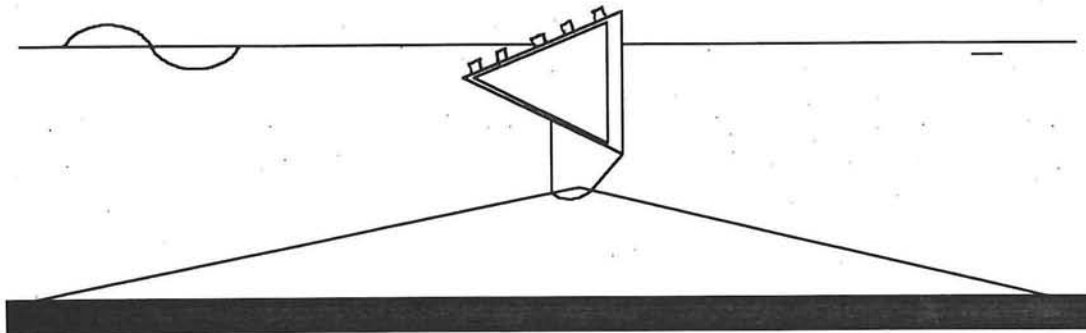
5.2 Modeltests

5.2.1 Inleiding

In 1993 heeft Burgers [11] in het kader van zijn afstudeerwerk onderzoek gedaan naar de eigenschappen van het VA-ponton m.b.t. golftransmissie en ankerkrachten. Het onderzoek bestond uit een proevenserie die uitgevoerd is in het Laboratorium van Vloeistofmechanica aan de T.U. Delft. Voor deze serie waren er drie schaalmodellen beschikbaar met een schaal van 1:40. Deze drie modellen lagen naast elkaar in het water. De tests zijn gedaan door golven in een hoek van $\gamma = 15^\circ$, 30° en 45° tegen de golfbreker aan te laten lopen. Ook de golfbreker zelf kan gedraaid worden. In de standaard situatie liggen de golfbrekers naast elkaar evenwijdig met de kust. In de oblique situatie liggen de golfbrekers eveneens naast elkaar, maar zijn zij in een hoek van $\psi = 30^\circ$ met de kust gedraaid. De golfval is nu loodrecht op de kust en dus in een hoek van $\gamma = 30^\circ$ met de normaal van de golfbreker.

5.2.2 Geometrie VA-ponton

Het VA-ponton heeft een driehoeksvormige doorsnede. Hij is op een zodanige manier geballast dat een hoek in de richting van de aankomende golf wijst, terwijl de achterkant loodrecht op het wateroppervlak staat. Zie figuur 5.1.



Figuur 5.1: Dwarsdoorsnede VA-ponton

Het voordeel van een achterkant die loodrecht in het water staat is, dat er bij verticale beweging van het ponton geen golven worden opgewekt die naar de kust toe gericht zijn. Bovenop het ponton zijn ribbels gemaakt. Deze ribbels zorgen ervoor dat de golven breken wanneer ze over de golfbreker heen lopen. Er is een test gedaan met gladde golfbrekers en deze bleken minder succesvol te werken.

Er is in eerste instantie uitgegaan van een lengte van het schaalmodel (1 : 40) van 2.7 meter. Dit komt overeen met een lengte van 108 meter in werkelijkheid. Er is ook een variant getest, die een lengte had van 3.15 meter, hetgeen overeen komt met 126 meter. De zijde van de driehoek zijn in werkelijkheid 6.5 meter lang. Uitgangspunt is dat de golfbreker voor 85 % onder water ligt. Dit betekent een diepgang van 5.5 meter. De waterdiepte waarvoor gekozen is bedraagt 12 meter.

De golfbreker wordt verankerd aan vier voorgespannen ankerlijnen van circa 200 meter. Het voordeel van voorspannen is dat het verankeringsstelsel hogere horizontale krachten kan opnemen. Daarnaast worden bewegingen zoals verzetten en gieren, bewegingen die nieuwe golven achter de golfbreker kunnen opwekken, belemmerd. Het opnemen van verticale krachten is aanzienlijk minder dan het opnemen van horizontale krachten. Dit heeft als voordeel, dat de golfbreker waterstandsverschillen, veroorzaakt door getij en windopzet, gemakkelijk kan volgen zonder dat dit leidt tot een sterke toename van de verankeringskrachten.

Als ankerlijn wordt ketting gebruikt. Over deze ketting kan het bevestigingspunt van de golfbreker aan de kabel verplaatst worden. Zo kan de golfbreker in iedere gewenste richting op de golven gelegd worden. Dit heeft als voordeel dat hierdoor de transmissiecoëfficiënt voor elke golf gevarieerd kan worden. Iets schever of minder scheef op de golven betekent een hogere of lagere transmissiecoëfficiënt.

Voor het anker zelf is gedacht aan het Stevmanta-anker. Dit anker is nog in ontwikkeling bij Vrijhof-Ankers. Proeven hebben inmiddels uitgewezen dat dit anker in staat is krachten van circa 150 maal zijn eigen gewicht te kunnen houden. Conventionele ankers kunnen tot nu toe slechts circa 16 maal hun eigen gewicht houden. Dit scheelt in de kosten aangezien een anker per kilo betaald wordt.

5.2.3 Modeltests en Resultaten

In het golfbasin zijn een aantal verschillende proeven uitgevoerd. Er is getest in verschillende situaties. In de standaardsituatie lagen de golfbrekers evenwijdig aan de "kust" en kwamen de golven onder een hoek van $\gamma = 30^\circ$ met de normaal van de golfbrekers in. Tijdens de meetserie

gevarieerd met de invalshoek γ van de golven, de waterdiepte, de lengte van de golfbreker, de voorspanning van de ankerlijnen en ten slotte zijn de golfbrekers in een hoek van 30° met de "kust" gedraaid. De zogenaamde oblique situatie.

Resultaten van de tests zijn te zien in bijlage D1. De figuren hierin zijn ontleend aan [11]. Helaas geven alleen de tests waarin de golven een hoek van $\gamma = 30^\circ$ met de golfbreker maken een representatieve waarde voor de transmissiecoëfficiënt. Bij een kleinere hoek van inval zoals $\gamma = 15^\circ$, bleek dat er niet een duidelijk trend in de meetpunten zat zoals bij $\gamma = 30^\circ$ het geval was. Hierdoor kunnen er geen krommen door de meetpunten getrokken worden. Bij een hoek van inval van $\gamma = 45^\circ$ lagen de meetpunten van de golfhoogte achter de golfbreker precies in het verlengde van het gat tussen de golfbrekers. Hierdoor konden de golven de meetpunten bijna ongestoord bereiken. Het gevolg is dat de waarden van de transmissiecoëfficiënten te hoog uitvallen. In de oblique situatie viel op ondanks het feit dat golven door reflectie tegen de achterkant van de naastgelegen golfbreker tussen de golfbrekers door kwamen, er toch een lage transmissiecoëfficiënt gehaald werd.

Een grotere lengte van de golfbreker leidt tot een lagere transmissiecoëfficiënt. Wanneer de golfbreker in dieper water gelegd wordt dan heeft dit slechts een minimale invloed op de transmissiecoëfficiënt. Voorspanning van de ankerlijnen heeft nagenoeg geen effect op de transmissiecoëfficiënt.

5.3 Delfrac

5.3.1 Inleiding

De enige tastbare gegevens die tot nu toe te verkrijgen zijn over het VA-ponton zijn die van de in 5.2.4 beschreven meetserie. Op de faculteit van Maritieme techniek is het golfdiffractie-programma Delfrac ontwikkeld. Dit programma is primair ontwikkeld voor het bepalen van golfkrachten op een drijvende constructies, zoals schepen en offshore-platforms. Naast deze gegevens is Delfrac ook in staat om de golfbeweging rondom zo'n constructie te beschrijven. Het is deze mogelijkheid van het programma, waar gebruik van gemaakt is. Burgers heeft tijdens zijn onderzoek geprobeerd het VA-ponton in te voeren in WAMIT, ook een golfdiffractieprogramma. Dit was niet erg succesvol vanwege het feit, dat het VA-ponton een niet-symmetrische doorsnede heeft, in tegenstelling tot schepen en offshore-platforms. Zie hiervoor figuur 5.1 en bijlage D2. In bijlage D2 is te zien hoe de constructie in Delfrac is ingevoerd. Het VA-ponton is opgebouwd uit panelen. Voor elk paneel kunnen de golfkrachten uitgerekend worden. In deze studie zal hiervan geen gebruik gemaakt worden. Het deel van de constructie dat boven water uitsteekt wordt niet in de berekening meegenomen. Delfrac maakt alleen gebruik van het onderwatergedeelte van de constructie. In deze paragraaf wordt beschreven wat nog meer van belang is bij de invoer van de karakteristieken van het VA-ponton in het programma. Daarnaast hoe de uitvoer van het programma eruit ziet en wat de prestaties van het VA-ponton volgens Delfrac zijn.

5.3.2 Invoer

mogelijke parameters

Hoewel de vorm van het VA-ponton min of meer vaststond, zijn er nog tal van variabelen over om afwisselend in te voeren. Gesteld wordt dat de transmissiecoëfficiënt (C_t) afhankelijk is van de volgende parameters:

$$C_t = f(s_0, h, L_0, L_{gb}, \Delta y, d_{gb}, \gamma, \psi) \quad (5.1)$$

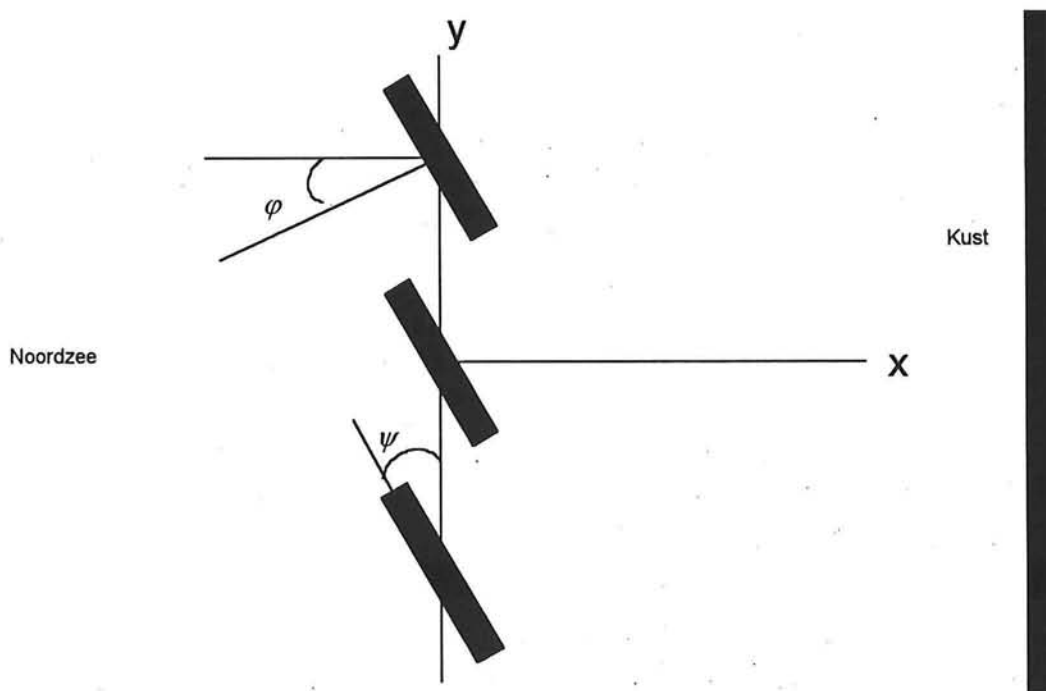
Hierin is:

s_0	:	De golfsteilheid op diep water [-]
h	:	De waterdiepte [m]
L_0	:	De golflengte op diep water [m]
L_{gb}	:	De lengte van het VA-ponton [m]
Δy	:	De afstand tussen twee pontons, wanneer deze in elkaars verlengde liggen [m]
d_{gb}	:	diepgang van het VA-ponton [m]
γ	:	hoek van inval van de golven met de normaal van de golfbreker [°]
ψ	:	hoekverdraaiing golfbrekers t.o.v. elkaar [°]

Gezien de beschikbare tijd was het niet mogelijk om al deze parameters uit te werken voor het VA-ponton. Daarom is er een keuze gemaakt om een aantal situaties door te rekenen om zodoende een inzicht te krijgen in de werking van het VA-ponton. De situaties zijn gekozen naar omstandigheden waarmee het VA-ponton te maken zal krijgen.

Uitgangspunten bij de invoergegevens

De golfsteilheid speelt geen rol, aangezien Delfrac met de lineaire golftheorie werkt. Wel is van belang welke golfperiodes worden ingevoerd. Er is gekozen voor de perioden, die ook in de langtransportberekeningen zijn gebruikt, te weten $T = 4, 5, 6$ en 8 s. In hoekfrequentie is dit resp. $\omega = 1,57, 1,26, 1,05$ en $0,79$ rad/s. Voor de waterdiepte wordt gekozen $h = 12$ meter. Deze keus komt voort uit de eis, dat de diepgang voor het VA-ponton $h = 10$ meter moet zijn bij LLWS (LaagLaagWaterSpring). Het verschil tussen LLWS en HHWS bedraagt 3 meter. Dit is afgeleid uit [28]. De meest voorkomende waterdiepte zal dan circa 12 meter bedragen. Voor de afmetingen van het VA-ponton zijn zoveel mogelijk de afmetingen van de in het laboratorium geteste exemplaren genomen. Dit houdt in $L_{gb} = 120$ m, $d_{gb} = 5.5$ m, $\Delta y = 10$ m. Wat overblijft om mee te experimenteren zijn de golflengte L , de hoek van inval φ en de hoekverdraaiing ψ . Zie figuur 5.2:



Figuur 5.2: ligging van de golfbrekers t.o.v. de kust

Let op het verschil tussen de hoek γ en de hoeken φ en ψ . De hoek γ is de hoek die een golf maakt met de normaal van de golfbreker. Deze is gedefinieerd in een lokaal assenstelsel, waarvan de oorsprong in het midden van de golfbreker ligt. De Y-as ligt in het verlengde van de golfbreker met de X-as hier loodrecht op. De hoeken φ en ψ zijn gedefinieerd in een plaatsvast assenstelsel waarbij de Y-as evenwijdig met de kust ligt en de X-as loodrecht op de kust staat. De relatie tussen γ , φ en ψ in een linksdraaiend assenstelsel wordt gegeven in vergelijking 5.2

$$\gamma = \varphi + \psi \quad (5.2)$$

Beperkingen

Een beperking van Delfrac is, dat het gebruik van ankerkabels niet kan worden meegenomen in de berekening. Een constructie moet of los drijvend, maar wel plaatsvast, of vastgelast aan de bodem worden ingevoerd. Uit een eerdere berekening bleek dat een vastgelaste constructie te veel als een staande muur werkt. Alle golven werden gereflecteerd. Dit is te zien in bijlage D3 (blz D-X). Hierin is het verschil in golftransmissie te zien tussen een vaste golfbreker en een losdrijvende golfbreker, wanneer de golven met een hoekfrequentie van $\omega = 1,25 \text{ rad/s}$ ($T \approx 5 \text{ s}$) loodrecht op de constructie inkomen. Duidelijk is te zien, dat een losdrijvende constructie loodrecht inkomende golven bijna ongestoord doorlaat, terwijl een vaste constructie de golven goed dempt.

Gekozen is voor een invoer in Delfrac van losdrijvende golfbrekers. Deze vorm van invoer zal de werkelijkheid het meest benaderen.

Een andere beperking is, dat de ribbels op het ponton niet in het programma kunnen worden geïmplementeerd. Deze ribbels, die er bij de laboratoriumproeven voor zorgden dat de golven over de constructie heen braken hebben in Delfrac geen zin, aangezien er met lineaire golftheorie gerekend wordt, niet-lineaire aspecten zoals breken treden niet op. Er wordt gerekend met transmissie en reflectie.

puntenrooster

Naast de invloed van de golven op de golfbreker kan met Delfrac ook het golfpatroon rondom de golfbreker berekend worden. Ten einde dit te doen moet een puntenveld gedefinieerd worden. Voor elk punt wordt nu de golftransmissie berekend (H_i / H_i), waarin H_i de hoogte van de inkomende golf aan de voorkant van de constructie is en H_i de hoogte van de doorgelaten golf.

Dit puntenrooster is gedefinieerd volgens het plaatsvaste assenstelsel uit figuur 5.2. Gekozen is om alleen het veld achter de golfbreker te definiëren. Golven die weer richting zee gereflecteerd worden zijn voor de morfologie immers niet van belang. Het veld begint met 16 verticale rijen van 51 punten, met een tussenafstand van 10 meter, evenwijdig aan de golfbreker. De eerste rij ligt op 50 meter afstand van de golfbreker. De 16^e rij ligt dan op 200 meter. Op 450 meter achter de golfbreker is nog een extra rij neergelegd. Dit is gedaan om het effect van golfdiffractie op grote afstand te kunnen zien. De mate van golfdemping wordt grafisch weergegeven door middel van de dikte van een roosterpunt. Hoe dikker het roosterpunt, hoe groter de transmissiecoëfficiënt en hoe slechter de golfdemping. De numerieke waarde van de gedempte golf in een punt is in uitvoerfiles van Delfrac te lezen. In bijlage D3 is het grafische resultaat te zien van de berekeningen. De transmissiewaarde die per situatie wordt vermeld is gevonden door alle golfdempingen in het "rustige" gebied te middelen. In de volgende paragraaf wordt dit behandeld.

Ideale hoek van inval

Uit de tests in het laboratorium blijkt dat de ideale hoek van inval op de golfbreker afhankelijk is van de golflengte. Bij deze ideale invalshoek is het optimaal als de golfbreker met zijn uiteinden precies op twee of drie golftoppen ligt. Dit geldt alleen als de golflengte kleiner is dan de lengte van de golfbreker. In theorie kan voor elke periode (golflengte) een ideale hoek van inval γ

bepaald worden. Nu kunnen er twee tabellen worden opgesteld. In tabel 5.1 zijn de hoeken van inval bepaald voor golven op diep water. Aangezien het VA-ponton niet op diep water wordt geplaatst, maar op een diepte van $h = 12$ m, moeten de golflengten aan deze diepte worden aangepast. Dit heeft uiteraard gevolgen voor de ideale hoek van inval.

Voor diep water geldt:

	$T = 4s$	$T = 5s$	$T = 6s$	$T = 8s$
golflengte, L_0 [m]	25	39	56	100
γ , op 2 golftoppen	12°	19°	30°	56°
γ , op 3 golftoppen	25°	40°		

Tabel 5.1: ideale hoek van inval diep water

Voor water met een diepte $h = 12$ m geldt:

	$T = 4s$	$T = 5s$	$T = 6s$	$T = 8s$
golflengte, L_{12} [m]	25	38.5	50.6	76
γ , op 2 golftoppen	12°	19°	25°	40°
γ , op 3 golftoppen	25°	40°	57°	

Tabel 5.2: ideale hoek van inval bij $h = 12m$

De hoek γ is, zoals gezegd, de hoek van inval met de normaal van de golfbreker. Deze hoek is onafhankelijk van de hoek, die de golfbrekers met de kust maken. Door de golfbrekers nu in het plaatsvast assenstelsel X-Y, zie figuur 5.2, te plaatsen kan de hoek γ op twee manieren ingesteld worden. Er kan nu gekozen worden om de golfbrekers te draaien t.o.v. de kust $\psi \neq 0^\circ$ en de golven recht op de kust $\varphi = 0^\circ$ (van links naar rechts) in te laten komen. De hoek ψ wordt dan gelijk aan γ . Reden voor deze keuze is de mogelijkheid die de golfbreker ons biedt om hem in elke gewenste richting op de golven te kunnen draaien. In tabel 5.3 wordt aangegeven welke situaties doorgerekend zijn in Delfrac. Ook kunnen de golfbrekers evenwijdig aan de kust blijven liggen ($\psi = 0^\circ$). Door de hoek die de golven met de kust maken φ gelijk te maken aan γ kan hier ook de ideale situatie bepaald worden. In tabel 5.4 staan de situaties die doorgerekend zijn voor $\psi = 0^\circ$.

T, ψ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
4 s			X	X					
5 s			X	X	X				
6 s			X	X	X				
8 s				X	X				

Tabel 5.3: keuze berekeningen met $\varphi = 0^\circ$

Met voor:

T golfperiode [s]

ψ hoekverdraaiing met de kust [°]

T, φ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
4 s			X		X		X		
5 s			X		X		X		
6 s			X		X		X		
8 s			X		X		X		

Tabel 5.4: Keuze berekeningen met $\psi = 0^\circ$

Met voor:

T golfperiode [s]

φ hoek van inval op de golfbreker [$^{\circ}$]

In de volgende paragraaf worden de resultaten besproken.

5.3.3 Uitvoer en resultaten

Voor de berekeningen van de transmissiewaarden bij $\psi = 0^{\circ}$, zijn alleen die roosterpunten meegenomen die duidelijk door de golfbrekers beïnvloed worden. Roosterpunten waar de golven ongestoord kunnen komen zijn buiten beschouwing gelaten. Dit is te zien op blz. D VIII van bijlage D3. Hier wordt het gebied aangegeven waarover de transmissiewaarde bepaald wordt. De transmissiewaarde voor een situatie wordt berekend uit het gemiddelde van de waarden uit het beschouwde gebied.

In tabel 5.5 worden de C_t - waarden (%) gegeven die komen uit de runs met evenwijdige ($\psi = 0^{\circ}$) golfbrekers.

T, φ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
4 s			43		30		48		
5 s			43		33		44		
6 s			78		62		77		
8 s			91		91		85		

Tabel 5.5: Numerieke waarden (%) voor de transmissiecoëfficiënt 1

In één oogopslag valt te zien dat de VA - pontons voor de golven met een kleine lengte redelijk tot goed werken.

In de figuren uit bijlage D3 waarbij de golfbrekers gedraaid liggen t.o.v de kust ($\psi \neq 0^{\circ}$) valt het op dat deze verdraaiing ψ niet in alle gevallen gunstig werkt. Golven worden gereflecteerd terug naar zee, maar komen in die beweging de achterkant van de naastgelegen golfbreker tegen. Deze reflecteert de golf weer naar de kust toe. Dit is door Burgers tijdens de laboratoriumproeven ook al opgemerkt. Bij het bepalen van de numerieke waarde van de transmissiecoëfficiënten is er dan ook anders te werk gegaan dan bij de situatie van tabel 5.5. Het gebied achter de golfbrekers is verdeeld in zeven verschillende gebieden. Per gebied is de gemiddelde transmissiewaarde berekend. Zo kan er gekeken worden naar zowel de golfdemping in de "rustige" gebieden als in de gebieden, die beïnvloed worden door de reflectie door de gaten. De gebieden zijn als volgt gedefinieerd als een aantal rijen. Rij 1 bevindt zich onderaan, rij 51 bovenaan. Tabel 5.6 geeft weer om welke rijen het per gebied gaat, op blz.D IV van bijlage D3 worden deze gebieden weergegeven.

gebied	I	II	III	IV	V	VI	VII
rijen	1-7	8-22	23-28	29-35	36-42	43-46	47-51

Tabel 5.6: Definitie van deelgebieden

Tabel 5.7 geeft per gebied de waarde van de transmissiecoëfficiënt. In de onderste rij van tabel 5.7 worden de transmissiewaarden gegeven die gelden voor het gewogen gemiddelde van de gebieden II t/m VI. De gebieden I en VII zijn buiten beschouwing gelaten. Deze gebieden liggen resp. onder en boven het gebied achter de golfbrekers. Aangezien de voortplantingsrichting van de golven van links naar rechts is, komen zij ongehinderd in deze gebieden terecht.

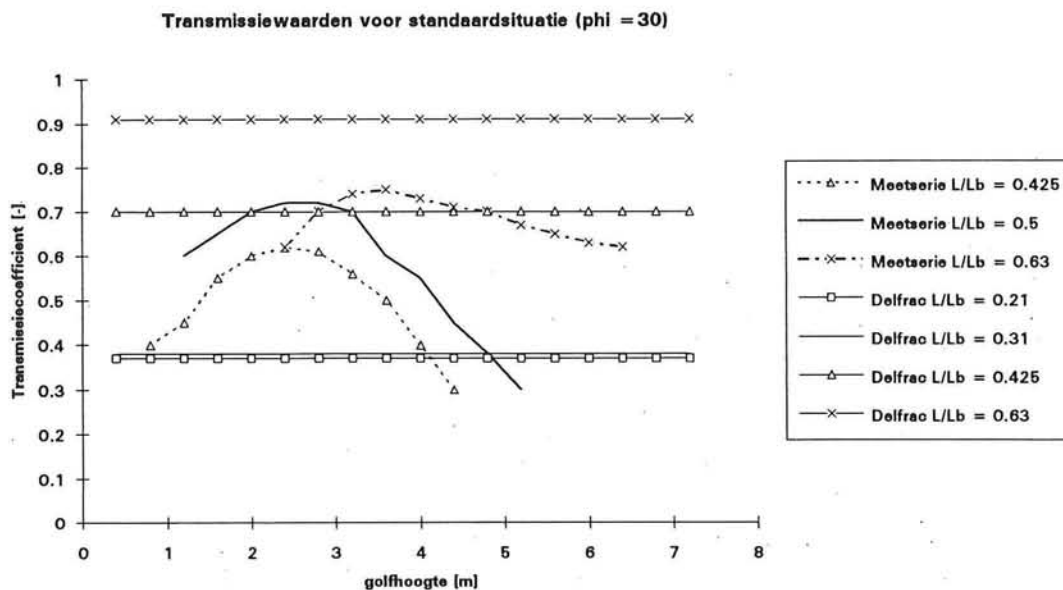
T_{eq}, ψ	4s, 20°	5s, 20°	6s, 20°	4s, 30°	5s, 30°	6s, 30°	8s, 30°	5s, 40°	6s, 40°	8s, 40°
I	95	92	101	96	96	91	105	98	92	95
II	42	51	83	56	55	73	99	49	82	96
III	45	80	90	65	47	96	97	113	115	100
IV	56	53	70	65	55	58	96	59	59	91
V	54	67	91	61	52	94	99	118	114	103
VI	70	57	67	78	57	69	92	55	67	95
VII	110	102	101	104	97	94	95	113	95	96
II - VI	50	59	81	62	53	77	97	74	87	97

Tabel 5.7: Numerieke waarden (%) voor Transmissiecoëfficiënten 2

Twee feiten vallen op wanneer er naar tabel 5.7 gekeken wordt. Ten eerste is de golfhoogte vergroting door diffractie tussen de gaten door, aanzienlijk kleiner dan de golfhoogte verlaging achter de golfbreker. Ten tweede valt weer op dat de golven met een kleinere lengte beter gedempt worden dan golven met een grotere lengte.

5.4 Vergelijken Coëfficiënten

In welke mate komen de gegevens van Delfrac overeen met de meetserie van Burgers? Er zijn twee proeven uit de meetserie goed te vergelijken met de tests met Delfrac. Dit zijn de proeven waarin de golfbrekers in de zgn. standaard situatie liggen. In figuur 5.2 komt dit overeen met $\psi = 0^\circ$ en $\varphi = 30^\circ$. Ook de zgn. oblique situatie ($\psi = 30^\circ$ en $\varphi = 0^\circ$) laat zich vergelijken met de tests uit Delfrac. Figuur 5.3 laat de verschillen zien tussen de meetserie en Delfrac voor de standaard situatie. Uitgezet zijn voor verschillende golflengte - golfbrekerlengte-verhoudingen (L/L_b) de golfhoogte tegen de transmissiewaarde. De kromme lijnen zijn afkomstig van de meetserie. Deze zijn aan bijlage C1 ontleend door voor een bepaalde waarde van L/L_b de transmissiecoëfficiënt per golfhoogte vast te stellen. De horizontale lijnen zijn afkomstig van de gevonden waarden met Delfrac. Aangezien er in Delfrac gerekend wordt met lineaire golftheorie speelt de invloed van de golfhoogte geen rol. De transmissiecoëfficiënt is dus voor elke golfhoogte hetzelfde.



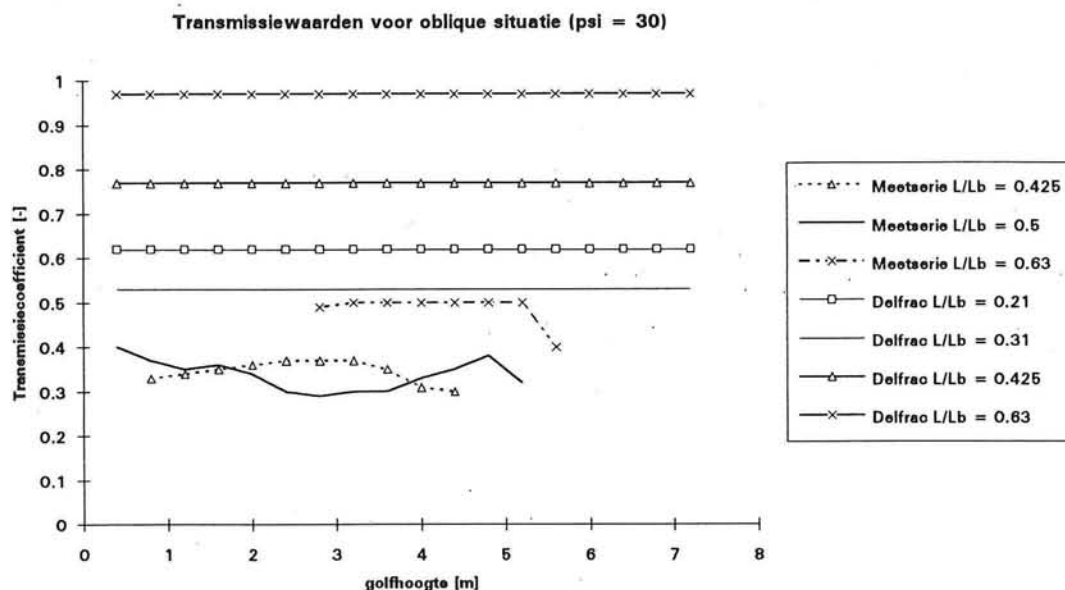
Figuur 5.3: Vergelijking transmissiewaarden standaard situatie

Wanneer de transmissiewaarden vergeleken worden, dan valt op dat de meetserie een lagere transmissiecoëfficiënt voor langere golven geeft dan Delfrac. Vergelijk bijvoorbeeld de waarden van Delfrac en de meetserie voor $L/L_b = 0,425$ en $L/L_b = 0,63$ met elkaar. De verklaring hiervoor is te vinden in twee oorzaken. Ten eerste is de golfbreker tijdens de meetserie verankerd geweest en bij Delfrac los drijvend. Dit brengt met zich mee, dat bij een verankerd systeem de golfbreker zich een klein beetje als een staande muur gedraagt. Bij losdrijvend is dit totaal niet het geval. Ten tweede ontbreken bij Delfrac de ribbels op de voorkant van de golfbreker. Deze bewezen in de meetserie hun nut doordat golven hierdoor braken wanneer ze over de constructie heen rolden. Een proef met gladde golfbrekers was minder succesvol.

In Delfrac wordt gerekend met lineaire golftheorie, hetgeen inhoudt dat een golf niet breekt. Alle golfenergie blijft behouden. Golven worden of doorgelaten of gereflecteerd. Een trend die ook goed in de proeven te zien is dat een grote golflengte-golfbrekerlengte-verhouding tot hogere transmissiewaarden leidt.

Wanneer de waarden voor transmissiecoëfficiënten voor de oblique situatie met elkaar vergeleken worden dan is het verschil tussen meetserie en Delfrac groter. De waarden gevonden met Delfrac zijn zonder uitzondering hoger dan die gevonden zijn met de meetserie. Zie hiervoor figuur 5.4. Ook hier kunnen de twee verklaringen die bij figuur 5.3 horen gegeven worden. Wat echter ook meespeelt is de mate van reflectie tegen de achterkant van naastgelegen golfbreker. In Delfrac is dit de totale golfenergie die niet is doorgelaten (gereflecteerd). In de meetserie is een deel van de golfenergie gedissipeerd aangezien de golf over de constructie heen is gebroken. Er wordt dus minder golfenergie gereflecteerd.

Daarnaast stonden tijdens de proeven de meetpunten vlak achter de golfbrekers opgesteld. Tijdens de proeven waren er drie meetpunten precies achter het hart van een golfbreker opgesteld. Deze waren geplaatst op afstanden van 0,75, 1,25 en 1,5 meter gerekend vanaf de golfbreker. Dit komt neer op 30, 50 en 60 meter in werkelijkheid. De waarden verkregen met Delfrac zijn afkomstig van een breder gebied, meer punten evenwijdig aan de golfbreker i.p.v. één, en van een gebied dat verder achter de golfbreker ligt, vanaf 50 meter tot 200 meter achter de golfbreker.



Figuur 5.4: Vergelijking transmissiewaarden oblique situatie

5.5 Kostprijsberekening

Na de eigenschappen m.b.t. golftransmissie besproken te hebben, komt de vraag aan de orde wat zo'n VA-ponton kost. Hiervoor is overleg gepleegd met de ontwerper van het VA-ponton.

Volgens de ontwerper weegt een stalen VA-ponton, met een lengte van 126 m, 340 ton en heeft een ballast van 1550 ton. In het totale gewicht van het VA-ponton zijn ook de gewichten van de ketting en staaldraad opgenomen, waarmee het ponton verankerd is. Volgens opgave van de ontwerper weegt alleen het ponton 270 ton. Voor de prijs van alleen het ponton wordt uitgegaan van een staalprijs van f 4,00 per kilo. Dit betekent, dat alleen het ponton f 1,08 miljoen kost.

Om de verankeringskabels aan het ponton vast te maken is een kettingratel nodig. Over deze ratel kan het ponton ook over de ketting heen en weer lopen. Zo wordt het modelijk om het VA-ponton in de gewenste hoek met de golven te draaien. Deze kettingratel kost volgens de ontwerper f 49.000. De ketting en staalkabel van het verankeringsysteem wegen samen 62,4 ton. De kosten hiervan samen worden door de ontwerper op een bedrag van f 360.000 geschat. Voor de ankers wordt gekozen voor een tientons Stevmanta-anker. De prijs voor een Stevmanta-anker bedraagt circa f 8,00 per kilo. Dit betekent dat de prijs voor 4 ankers op f 320.000 neerkomt.

De globale kosten voor één VA-ponton inclusief verankering komen neer op:

Ponton	f 1.080.000
Kettingratel	f 49.000
Staalkabel en ketting	f 360.000
Ankers	f 320.000
Totaal kosten	f 1,8 miljoen

5.6 Conclusie

Uit de figuren 5.3 en 5.4 blijkt dat de waarden die voor de transmissiecoëfficiënt die m.b.v. Delfrac gevonden zijn als een bovengrens kunnen worden beschouwd. In geval van de oblique situatie kunnen de waarden, die in de meetserie van Burgers gevonden zijn als een ondergrens beschouwd worden. In de standaard situatie valt niet echt een ondergrens te onderkennen.

Worden de uitkomsten voor de golftransmissie vergeleken met de geformuleerde voorwaarden uit hoofdstuk 4 dan kan het volgende gesteld worden.

1. Wat de golflengte betreft, lijkt het VA-ponton aan de gestelde eisen te voldoen. Voor golven met een golflengte-golfbrekerlengte-verhouding van tussen de 0,425 en 0,5 voldoet het VA-ponton, volgens de proevenserie van Burgers, redelijk tot goed. Volgens Delfrac gebeurt dit in het geval van $\psi = 0^\circ$ ook redelijk. In het geval van gedraaide golfbrekers worden golven met een periode van $T = 6$ s matig ($C_t = 0,77$) gebroken. De proeven van Burgers wijzen echter op een lagere coëfficiënt. Hier dient dan ook nader onderzoek in het laboratorium naar gedaan te worden.
2. Uit het programma van eisen komt naar voren, dat de golfbrekers gevoelig moeten zijn voor golven met een hoogte tussen circa $1\text{ m} < H < 3$ meter. Wordt figuur 5.3 beschouwd, dan blijkt juist, dat de golven hier hun hoogste transmissiewaarde bereiken. Waarschijnlijk speelt hier de steilheid van de golf een rol. Met gelijkblijvende golflengte wordt de golf steiler naarmate de golfhogte toeneemt. Hierdoor neemt de kans op breken toe. Een transmissie waarde van tussen $0,6 < C_t < 0,7$ voldoet echter goed met het oog op beïnvloeding van het langstransport.
3. Voor het VA - ponton is minimale diepgang van 10 meter vereist. Dit betekent een afstand van 1 a 2 kilometer uit de kust. Bij deze afstand speelt golfregeneratie door de wind geen rol van betekenis. Nader onderzocht moet worden of een ponton van dergelijke afmetingen voldoende heeft aan een diepte van $h = 10$ m bij grote golven.
4. Het VA-ponton heeft duidelijk een transmissiecoëfficiënt die afhankelijk is van golven en richting.

De kosten voor één enkel VA-ponton inclusief verankering bedragen f 1,8 miljoen.

6. Het effect van het VA-ponton

6.1 Inleiding

In hoofdstuk 2 en 3 zijn modellen beschreven voor het langs- en dwarstransport bij de Delflandse kust. Uit deze modellen is in hoofdstuk 4 een aantal voorwaarden afgeleid, waaraan een offshore golfbreker moet voldoen, wil hij met succes deze transporten beïnvloeden. In hoofdstuk 5 is de offshore golfbreker vorm gegeven en zijn zijn eigenschappen m.b.t. golftransmissie geanalyseerd. Nu komt de vraag aan bod: "Hoe groot is de invloed van deze golfbreker dan wel?" In dit hoofdstuk zijn een aantal berekeningen m.b.t. het langstransport uitgevoerd, om een inzicht te verschaffen in de effecten die het VA-ponton teweeg kan brengen. Uitgangspunt is een rij van drijvende golfbrekers langs de totale Delflandse kust, op een afstand van circa 2 kilometer. Op deze afstand uit de kust speelt de golfgeneratie na het breken geen rol meer.

In het oorspronkelijk ontwerp van het VA-ponton is het uitgangspunt, dat hij te allen tijde in een ideale hoek met een golf uit een willekeurige richting kan worden ingesteld. Om dit te doen is een mechanisme ontwikkeld, waarmee dit vanaf de wal gedaan kan worden. In de cases in de onderstaande paragrafen liggen de golfbrekers in een vaste hoek met de kust. Eventueel kan de hoek van de golfbrekers met de kust na een paar jaar anders ingesteld worden. De reden voor de keuze, om de golfbrekers een vaste hoek met de kust te laten maken, is, dat een mechanisme om de golfbrekers te draaien nog niet zijn betrouwbaarheid bewezen heeft.

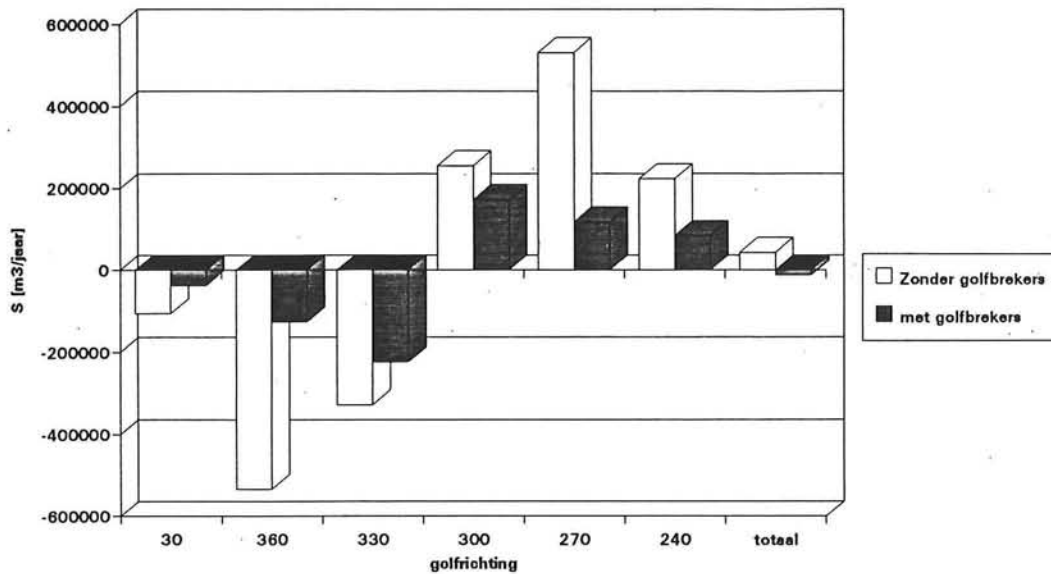
In de eerste case is het langstransport uitgerekend wanneer de golfbrekers evenwijdig met de kust liggen, analoog aan paragraaf 2.6. De tweede case laat zien hoe de golfbrekers moeten liggen om zoveel mogelijk zand Zuidwaarts te sturen.

6.2 Doorgerekende cases

6.2.1 Golfbrekers evenwijdig met de kust

Een eerste experiment is om de golfbrekers evenwijdig met de kust te leggen. De verwachting hierbij is, dat (zie ook figuur 2.8) de grootte van het netto langstransport enigszins vermindert. Ook wordt verwacht, dat de volumes van de Noord- en Zuidgaande componenten van het langstransport afnemen. Gekozen is om de waarden van de transmissiecoëfficiënten af te leiden uit tabel 5.5, die berekend is met het programma Delfrac. Dit is gedaan omdat deze waarden een bovengrens vormen van de transmissiewaarden (zie figuur 5.3). In het geval, dat de transmissiecoëfficiënten niet berekend zijn met Delfrac is er tussen de waarden geïnterpoleerd. Hierbij is gesteld, dat de transmissiecoëfficiënten van de hoeken van inval $\gamma = 0^\circ$ en $\gamma = 90^\circ$ gelijk zijn aan 1 (= 100%). In tabel e1 van bijlage E worden de gebruikte transmissiecoëfficiënten weergegeven.

In figuur 6.1 is te zien, wat het verschil is tussen het langstransport met en zonder golfbrekers. Uitgezet is de waarde van het sedimenttransport in $m^3/jaar$ tegen de golfrichting. Een positieve waarde duidt op een noordelijk gericht transport. Een negatieve waarde duidt op een Zuidelijk gericht transport.



Figuur 6.1: Verschil in langstransport ($\psi = 0^\circ$) met en zonder golfbrekers

Duidelijk is te zien, dat het transport per golfrichting aanzienlijk afneemt. Dit betekent, dat het volume aan zand, dat jaarlijks door de golven heen en weer gestuurd wordt, aanzienlijk kleiner is dan normaal. Het netto transport bedraagt echter $12 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ Zuidwaarts t.o.v. $43 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ Noordwaarts, hetgeen het volume van het transport is zonder golfbrekers. Figuur 2.8 toont een afname van het netto transport per jaar van $43 \cdot 10^3$ naar $13,8 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$, maar nog steeds in Noordelijke richting. Een verklaring hiervoor is het verschil in transmissiecoëfficiënten per periode per golfrichting i.p.v. een algemene transmissiecoëfficiënt van $C_t = 0,7$ in figuur 2.8.

Met dit kleine transport is overigens wel meteen het erosie probleem opgelost langs de Delflandse kust. Nader uitgezocht zal moeten worden of er in het Noorden niet een nieuw erosieprobleem op zal treden.

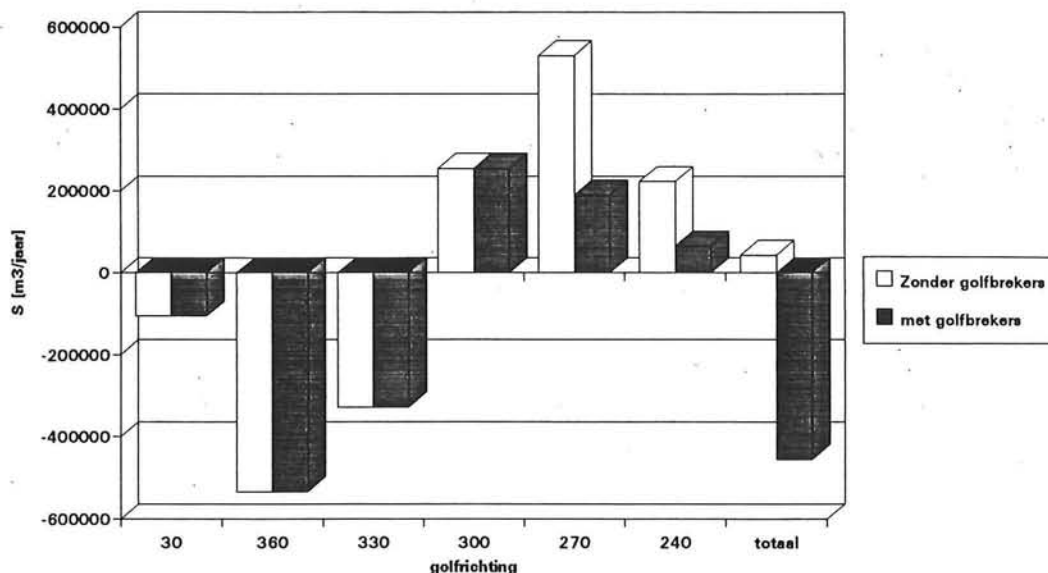
6.2.2 Maximaal transport richting het Zuiden

Om het langstransport naar het Zuiden zoveel mogelijk te stimuleren is het nodig om alle golven, die uit het Noorden komen zoveel mogelijk ongedempt te laten passeren. Daarnaast moeten dan alle golven, die voor een Noordelijk gerichte transportstroom zorgen, zoveel mogelijk gedempt worden.

De grootte van de transmissiecoëfficiënten zijn verkregen door interpolatie uit de tabellen 5.5 en 5.7. Wanneer bijvoorbeeld de golfbrekers in een hoek van $\psi = -20^\circ$ met de kust liggen en golven ($T = 5\text{s}$) komen onder een hoek van $\varphi = 45^\circ$ met de kust inkomen, dan is de hoek van inval op de normaal van de golfbreker $\gamma = 45^\circ - 20^\circ = 25^\circ$. Voor de waarde van de transmissiecoëfficiënt wordt nu geïnterpoleerd tussen de waarde volgens tabel 5.7 ($C_t = 0,59$) en de geïnterpoleerde waarde volgens tabel 5.5 ($C_t = 0,41$). Voor de waarde uit tabel 6.5 moet eveneens geïnterpoleerd worden. De uiteindelijke transmissiecoëfficiënt wordt dan $C_t = (0,59 + 0,41)/2 = 0,5$. In geval dat de golf onder een hoek van $\varphi = 135^\circ$ met de kust inkomt dan is de hoek met de normaal van de golfbreker $\gamma = 135 + 20 = 155^\circ$. De transmissiecoëfficiënt bij deze hoek van inval wordt gelijk aan 1 gesteld. Alleen golven uit de kompasrichtingen 270° en 240° met een periode van $T = 4, 5$, of 6s hebben een transmissiewaarde van $C_t < 1$. Voor golven met een periode van $T = 8\text{s}$ blijkt de golfbreker volgens hoofdstuk 5 niet te reageren. Golven, die uit de richting 300° komen maken na draaien van de golfbreker een hoek van inval met de golfbreker van $\gamma > 90^\circ$. Ook voor deze

golven is de transmissiecoëfficiënt gelijk aan 1 gesteld. De gebruikte transmissiecoëfficiënten staan in tabel e2 t/m e4 van bijlage E vermeld.

In figuur 6.2 is de verandering in langstransport te zien bij het draaien van de golfbrekers t.o.v. de kust met een hoek van $\psi = -20^\circ$.



Figuur 6.2: Verschil in Langstransport bij gedraaide golfbrekers ($\psi = -20^\circ$)

Doordat de golven uit de richtingen 240° en 270° gedempt worden neemt het transport naar het noorden af. Dit veroorzaakt een grote toename in transport in de zuidelijke richting. Het totale netto transport bedraagt $S_{\psi = -20^\circ} = 4,6 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Ook voor de situaties waarbij de golfbrekers met een hoek van $\psi = -30^\circ$ en $\psi = -40^\circ$ met de kust gedraaid zijn is op dezelfde manier het netto langstransport berekend. Het volume van het netto getransporteerd zand per jaar bedraagt dan resp. $S_{\psi = -30^\circ} = 4,4 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{jaar}$ en $S_{\psi = -40^\circ} = 2,8 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{jaar}$.

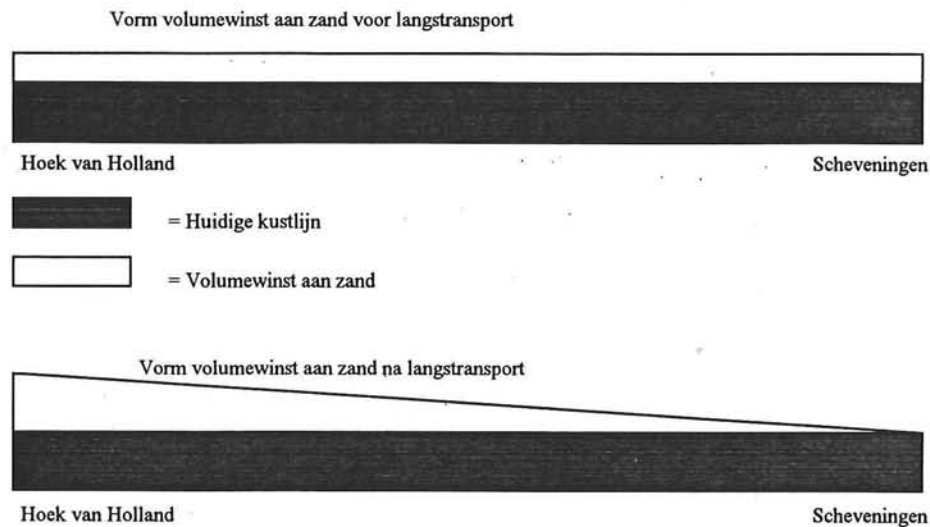
Bij een hoekverdraaiing van $\psi = -20^\circ$ of $\psi = -30^\circ$ zijn de netto langstransporten bijna even groot. Het verschil, dat deze twee hebben met het netto langstransport bij een hoekverdraaiing van $\psi = -40^\circ$, wordt veroorzaakt door de golven uit de kompasrichting 270° . Wanneer de golfbrekers in deze hoek met de kust gedraaid zijn, dan maken de golven slechts een hoek van $\gamma = 5^\circ$ met de normaal van de golfbreker. De golfbrekers voldoen op dat moment niet zo goed. Ze hebben dan een transmissiecoëfficiënt van circa $C_t > 85 \%$. Dit in tegenstelling tot de kleinere hoekverdraaiingen, waar de mate van transmissie slechts circa 50% is.

6.3 Conclusie

Geconcludeerd kan worden dat het VA-ponton een effectief middel is om de grootte en richting van het netto langstransport te beïnvloeden.

Wanneer de VA-pontons evenwijdig met de kust gelegd worden, dan neemt de grootte van het netto langstransport af en verandert zelfs van richting. Het erosieprobleem voor de Delflandse kust is dan min of meer opgelost. De gedachte is dat het zand, dat door het langstransport naar het Zuiden wordt afgevoerd, via het dwarstransport gewonnen wordt in de bovenkant van het profiel (zie hoofdstuk 3). Hierbij kan maximaal $5,6 \text{ miljoen m}^3$ zand gewonnen worden. Dit zand wordt in eerste instantie verondersteld, evenwijdig met de kust te liggen. Het langstransport zal

deze vorm veranderen in een driehoek, waarvan de punt bij Scheveningen komt te liggen en de basis bij Hoek van Holland. (Zie figuur 6.3)



Figuur 6.3: Vorm van volumewinst aan zand

Op het moment dat deze driehoek ontstaat, wordt de originele kust direct ten zuiden van Scheveningen aangevallen. Om deze situatie te bereiken heeft het nieuwe netto langtransport van $12 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$, er minstens $\frac{1}{4} \cdot 5,6 \cdot 10^6 / 12 \cdot 10^3 \approx 117$ jaar voor nodig om deze aanwas te transporteren. Dit vormt kennelijk geen problemen.

Anders wordt de situatie wanneer er geprobeerd wordt de grootte van het netto langtransport per jaar naar het Zuiden te doen toenemen, door de golfbrekers t.o.v. de kust te verdraaien. De grootte van het netto langtransport kan met een factor 10 toenemen. De gedachte, dat ook nu het zand, dat nodig is voor het langtransport door het dwarstransport wordt aangevoerd, gaat nu niet op. In deze situatie worden golven uit 4 kompasrichtingen ongestoord doorgelaten. Het is onwaarschijnlijk dat de kust ook nu een grote profielkanteling ondergaat. Dus het zand, dat nodig is voor dit grote langtransport kan niet aangevoerd worden door het dwarstransport. Dit zand zal dan ergens anders vandaan moeten komen. Dit zal dan direct ten koste gaan van de kust. M.a.w. een zanddiode oplossing voor de Delflandse kust met gedraaide drijvende golfbrekers is met het oog op het ontstaan van nieuwe erosieproblemen geen alternatief.

7. Plan Waterman

7.1 Inleiding

Als subdoel is geformuleerd of het zanddiode-concept ook gebruikt kan worden voor de aanwinst voor grote stukken land. Eén van de bestaande plannen voor het uitbreiden van de Delflandse kust is het plan Waterman [27]. Beredeneerd wordt of dit plan mede gerealiseerd kan worden door gerichte sturing van het zandtransport.

7.2 Het probleem Zuid-Holland

De provincie Zuid-Holland neemt binnen de twaalf provincies, die Nederland rijk is, een bijzondere positie in. In deze regio bevindt zich 's werelds grootste zeehaven (Rotterdam) als ook 's werelds grootste aaneengesloten kassengebied (het Westland). Van alle provincies heeft Zuid-Holland dan ook de grootste industriële en agrarische produktie en export. Ook is het de belangrijkste dienstverlenende provincie. Zuid-Holland wordt dan ook wel beschouwd als de motor van de Nederlandse economie.

Echter het is ook de provincie met de hoogste bevolkingsdichtheid, de hoogste autodichtheid, het hoogste energieverbruik en de hoogste afvalproduktie per persoon en in totaal. Tevens is het de provincie met de hoogste werkeloosheid. Hoewel Zuid-Holland in vele opzichten als de motor van Nederland kan worden beschouwd, kan er nog veel aan die motor verbeterd worden.

In de provincie Zuid-Holland is ruimte om te wonen, werken, te recreëren en zich te verplaatsen schaars. Er is nadrukkelijk behoefte aan verantwoorde stedelijke uitbreiding, dit tezamen met een verbetering van de infrastructuur en het bevorderen van de economie. Naast deze behoefte is er ook de wens om de bestaande natuur-, milieu- en landschapswaarden zoveel mogelijk te behouden. Deze twee wensen naast elkaar hebben er toe geleid, dat als oplossing naar voren werd gebracht, Zuid-Holland naar zee toe uit te breiden.

Voor deze uitbreiding heeft Waterman [27] vijf deelplannen ontwikkeld voor de Hollandse kust. Daarvan richten de deelplannen 1 en 2 zich op Zuid-Holland, te weten landaanwinst bij de Delflandse kust en de Maasvlakte.

In dit verslag wordt o.a. aangegeven of het mogelijk is een gedeelte van deelplan 1 op basis van het zanddiode-concept te realiseren. Hier wordt gedacht aan kleine ingrepen in het sedimenttransport voor de kust, zodat het sediment naar locaties gestuurd wordt waar dit gewenst is.

7.3 Deelplan 1: De Delflandse kust

7.3.1 Huidige kustlijn

Ten zuiden van Scheveningen, langs de Delflandse kust bevindt zich een smalle duinenrij met een steile onderzeese vooroever. Het aantal brandingsruggen voor deze kust (een of nul), is aanzienlijk minder dan noordelijker langs de Hollandse kust (drie of meer). Een verklaring hiervoor is nog onbekend.

De Delflandse kust loopt al sinds eeuwen achteruit. Dit wordt met figuur 1.1, naar Edelman [15], geïllustreerd. Hierin is de erosie en aanwas van de duinvoet langs de gehele Hollandse kust weergegeven tussen 1860 en 1960.

Waterman wijt deze achteruitgang aan de vorm van de kustboog. Vanaf IJmuiden tot aan Scheveningen-Noord is deze boog hol van vorm. De kust heeft zich hier in de afgelopen 100 jaar

redelijk stabiel gedragen. Er is zelfs nog sprake van enige aanwas. Ter plaatse van Scheveningen-Noord is er een omslagpunt. De kustboog tot aan 's Gravenzande (en voor 1971 tot en met Hoek van Holland) krijgt een bolle vorm. Dit stuk kust is een aangevallen stuk kust. In de 18^e en 19^e eeuw heeft men hier dan ook besloten tot het aanleggen van de Delflandse hoofden. Dit zou als een rem op het langstransport moeten werken. De werking van deze hoofden is beperkt, omdat naast de gunstige werking op het langstransport, er muistromen gecreëerd worden. Deze muistromen zorgen voor een ongunstig sedimenttransport van de kust af gericht. Te overwegen is om de holle kustboog door te trekken naar Hoek van Holland om zodoende ook hier een stabiele evenwichtskust te realiseren, uiteraard zonder de hoofden.

Een holle kustboog alleen is een onvoldoende voorwaarde voor een stabiele kust. Er dient ook nog voldaan te zijn aan andere voorwaarden, zoals bijv. aansluiting van het zandtransport aan de randen van het kustvak.

7.3.2 Beschrijving Deelplan 1

Deelplan 1 is een wigvormige landaanwinst tussen Scheveningen-Noord en Hoek van Holland. Als afmetingen gelden een lengte van 20 km, een breedte variërend van enkele honderden meters bij Scheveningen-Noord tot ruim 3,5 km bij Hoek van Holland en een totaal oppervlak van circa 3000 hectare. Tussen Scheveningen -Noord en het verlengde noorderhavenhoofd wordt een korte holle kustboog aangelegd. Tussen het verlengde zuiderhavenhoofd en Hoek van Holland gaat het om een lange holle kustboog. In dit verslag wordt alleen dit laatste gedeelte beschouwd.

Als verdediging naar zee wordt een primaire duinenrij met een strand hiervoor aangelegd. Hierachter komen secundaire duinenrijen, die in een hoek met de kust lopen. Zij liggen als het ware in het verlengde van historische strandwallen, die nog steeds in de infrastructuur van Scheveningen en Den Haag zijn terug te vinden. De secundaire duinenrijen bieden de mogelijkheid om het plan gefaseerd uit te voeren. In eerste instantie wordt dan het buitenduin met het strand ervoor aangelegd. Hierna wordt waar gewenst, de nieuwe kust met de oude verbonden. Zo kan het nieuwe duingebied van binnen naar buiten of andersom worden aangelegd.

Dit stuk nieuw te vormen kust benadert de historische kustlijn van omstreeks 1600. Dit is mogelijk doordat er aan de zuidzijde dankbaar gebruik wordt gemaakt van het lange noorderhavenhoofd (4,7 km) bij Hoek van Holland. Dit "bolwerk" zorgt ervoor dat hier de kust als het ware vastgelegd wordt.

Deelplan 1 zorgt voor een verbetering van de bescherming van de Delflandse kust. De hoogte van de nieuwe zeewering zal circa 10 meter bedragen en voldoet hiermee aan de Deltanormen.

7.4 Uitvoering van deelplan 1

7.4.1 Inleiding

Een kustuitbreiding wordt niet in een paar dagen uitgevoerd. Meestal duurt een project van dergelijke omvang een aantal jaren. Aanbouw van nieuw land is dan ook een kwestie van inspielen op de behoefte in de toekomst. "Wanneer is er hoeveel extra land nodig?" is de vraag die men zich moet stellen. Uit economisch oogpunt is van belang wanneer het nieuw verworven land zich kan terug betalen. Stel dat het totale deelplan 1 in een keer wordt gerealiseerd. Dit zou volgens de laatste tijdramingen ongeveer 6 jaar duren. Al die tijd ligt het nieuwe land braak en pas na die tijd zou geïnvesteerd kapitaal kunnen worden terugverdiend.

Dit pleit voor een gefaseerde aanpak, waarin gekeken wordt naar de behoefte aan land in de tijd. Op korte termijn is er behoefte aan een vierde haven in Scheveningen en aan voorzieningen voor strandrecreatie bij Hoek van Holland. Beide projecten zouden zich snel kunnen terugverdienen. Een uitbreiding van bouwlocaties voor Scheveningen en Den Haag is op dit moment nog niet echt

nodig. Er zouden problemen kunnen komen met het snel bebouwen van nieuw land. De vertraging die dit met zich meebrengt, zorgt voor grote renteverliezen. In de volgende paragraaf wordt uitgelegd hoe een fasering van de kustuitbreiding er uit kan zien en of dit middels "bouwen met de natuur" zou kunnen worden gerealiseerd.

7.4.2 Fasering van kustuitbreiding

Uit economisch oogpunt is het gewenst om het hele project in fasen uit te voeren. Telkens kan een afgeronde fase dan worden beschouwd als een eindpunt. Van hier uit kan er gekeken worden of er voldaan is aan alle behoeften en of het gebied snel rendabel wordt.



Figuur 7.1: Faseren in drie stappen

Dit heeft er toe geleid om deelplan 1 in 3 stappen uit te voeren. Zie figuur 7.1. Als eerste stap wordt er ingespeeld op de behoefte aan een vierde zeehaven bij Scheveningen en aan uitbreiding van strandrecreatie bij Hoek van Holland. Aan het zuidelijke havenhoofd wordt een kleine landaanwinst gecreëerd, terwijl bij Hoek van Holland alvast een begin gemaakt wordt aan het grote werk. Stap 2, de grote noordlob, wordt aangelegd wanneer er vraag is naar woningruimte vanuit Den Haag. Als derde en afsluitende stap volgt dan het sluiten van de nieuwe kustlijn. Hier wordt ingesprongen op de behoefte naar meer plaats voor kassenbouw van het Westland en naar meer ruimte voor natuurgebied.

7.4.3 Bouwen door de natuur

Tot nu toe is aangenomen dat de drie fasen uitgevoerd worden door grootschalige baggerwerkzaamheden. Het probleem dat zich hiermee voordoet, is dat er toch gedurende lange tijd geen gebruik van het strand gemaakt kan worden. Kan de natuur een deel van deze landaanwinst niet zelf, of met een klein beetje hulp van buitenaf, creëren? Dat dit mogelijk is heeft de natuur ons al laten zien bij IJmuiden. Sinds de aanleg van de havenhoofden in 1870 heeft er zich aan de Noordzijde zand opgehoopt. Na de verlenging van de havenhoofden in 1970 vindt er ook een aanzienlijke aanzanding plaats aan de zuidzijde. Dit laatste fenomeen is het gevolg van een knik in zuidelijke richting van het havenhoofd. Zand dat door een zuidwesterstorm tegen het havenhoofd is aangelegd kan hier door een noordwester niet meer weggevoerd worden, omdat de golven er eenvoudigweg niet kunnen komen.

Ook voor verwezenlijken van fase 1 van deelplan 1 wordt een dergelijke manier van realisatie overwogen. Volgens het zanddiode-principe kan er zand dat via het dwarstransport naar boven gehaald is, met het langstransport naar het Zuiden worden afgevoerd (zie Bakker [4]). Een realisatie van deelplan 1 door de natuur zelf zal meer tijd vergen dan d.m.v.

baggerwerkzaamheden. Voordeel is dat het strand voor recreatieve doeleinden beschikbaar blijft en de badgasten het strand met eigen ogen kunnen zien groeien.

7.5 Zanddiode en plan Waterman ?

Waterman berekent in [27], dat deelplan 1 (De wigvormige landaanwinst tussen Hoek van Holland en Scheveningen) een oppervlakte-toename van circa $3 \cdot 10^3$ ha. Dit komt overeen met een totaal volume aan zand van circa 340 miljoen m^3 . Voor het uitvoeren van fase 1 van deelplan 1 is ongeveer een derde van dit volume aan zand nodig. Dit is 113 miljoen m^3 zand.

Kan er m.b.v. het zanddiode-concept een bijdrage geleverd worden aan het leveren van de benodigde hoeveelheid zand?

In de situatie, dat de golfbrekers evenwijdig aan de kust geplaatst worden, komt als gevolg van het dwarstransport maximaal 5,6 miljoen m^3 zand voor kustaanwinning beschikbaar. Dit wordt dan slechts zeer langzaam naar het Zuiden verplaatst door het langstransport. Het duurt ruim 100 jaar voor het volle effect bereikt wordt en dan nog heeft dit slechts een bijdrage geleverd van slechts 4,2 miljoen m^3 zand in de Zuidelijke helft van de Delflandse kust.

In de situatie, dat de drijvende golfbrekers, in een hoek met de kust gedraaid worden, neemt weliswaar de grootte van het netto zandtransport toe met een factor 10 in de gewenste richting. Echter, zoals aangegeven in paragraaf 6.5, zal in die situatie de profielkanteling minder groot zijn, waardoor er minder zand beschikbaar komt. De bijdrage aan het plan Waterman zal dan nog geringer zijn. Daarbij veroorzaakt dit zandtransport ongewenste erosie aan het Noorden van de Delflandse kust.

Stel dat er langs de kust een hoeveelheid zand beschikbaar is met het volume van 113 miljoen m^3 . Volgens het zanddiode-principe zou het langstransport een waarde aan kunnen nemen van circa $4,5 \cdot 10^5 m^3/jaar$. In dat geval zou de natuur er $113 \cdot 10^6 / 4,5 \cdot 10^5 \approx 250$ jaar over doen om alleen al fase 1 te creëren. De realisatie van een dergelijk plan op deze termijn wordt dan wel een erg langdurig project.

Voor het realiseren van grootschalige landaanwinningsprojecten is het zanddiode-principe blijkbaar minder geschikt. Afgezien van de vraag waar al het zand vandaan moet komen, duurt het erg lang voor al het zand op zijn bestemming is aangekomen.

8. Algemene conclusies en aanbevelingen

8.1 Kostprijsvergelijking

Voor het oplossen van het erosieprobleem langs de Delflandse kust lijkt het aanbrengen van een rij VA-pontons evenwijdig aan de kust een redelijk alternatief. In het dwarsprofiel van de kust wordt door het dwarstransport 5,6 miljoen m³ zand gewonnen. Het langstransport neemt af in grootte en verandert van richting.

Is het ook economisch haalbaar om deze zandaanwinst te realiseren met een rij van VA-pontons voor de kust?

De baggermaatschappijen kunnen een hoeveelheid zand van 5,6 miljoen m³ aanbrengen voor een prijs van omstreeks f 7,50 per m³. Dit betekent, dat het aanbrengen van 5,6 miljoen m³ zand f 42 miljoen kost. De oplossing met de VA-pontons moet dus minder kosten. Eén VA-ponton kost circa f 1,8 miljoen. Wanneer er voor de totale Delflandse kust VA-pontons worden neergelegd, dan betekent dit dat er $20000/(120+10) \approx 154$ komen te liggen. De investering in 154 VA-pontons bedraagt dus circa f 277 miljoen. Dit bedrag staat in niet verhouding tot het eerder genoemde bedrag van f 42 miljoen.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat het gebruik van de VA-pontons voor het bestrijden van erosie van de Delflandse kust uit economisch oogpunt niet haalbaar is.

8.2 Het zanddiode-principe

8.2.1 Het langstransport

Met betrekking tot het langstransport kan geconcludeerd worden dat het zanddiode-principe werkt. Het is mogelijk om het langstransport niet alleen van richting te veranderen maar ook van grootte.

Ingrijpen in het langstransport kan echter ook tot gevolg hebben, dat er ergens anders weer een nieuw erosieprobleem gecreëerd wordt. In dat geval wordt een bestaand erosieprobleem alleen maar verschoven. Wanneer dit erosieprobleem wordt verschoven naar een deel van de kust waar het geen kwaad kan dan is een oplossing volgens het zanddiode-principe een goede oplossing. Denk hierbij aan een door erosie bedreigde stad aan de kust in een ontwikkelingsland. Wanneer er op enkele kilometers afstand van deze stad een woestijn ligt, dan kan er volgens het zanddiode-principe een netto langstransport per jaar van de woestijn naar de stad gerealiseerd worden. Het feit, dat de woestijn achteruit gaat vindt men in het algemeen niet zo'n probleem. Bovendien wordt de stad gered.

8.2.2 Het dwarstransport

In theorie werkt het zanddiode-principe ook voor het dwarstransport. Door m.b.v. golfbrekers de golfhoogte consequent te verlagen treedt er een kanteling van het kustprofiel op, waarbij zand van de onderkant van het profiel naar de bovenkant getransporteerd wordt. Dit betekent, dat de kust vooruit komt.

Een paar kanttekeningen moeten hierbij gemaakt worden.

1. Wil de kustaanwinst, die m.b.v. de profielkanteling gewonnen is, behouden blijven, dan moeten de golfbrekers voor altijd blijven liggen. Wanneer de golfbrekers na verloop van tijd weer verwijderd zouden worden, dan zal het kust profiel zijn oude flauwe helling weer aannemen en de kust gaat dan achteruit.

2. De bovengrens-methode voor het bepalen van de maximale hoeveelheid zand, die in de bovenkant van het profiel gewonnen kan worden, is nog een vrij grove methode. Er zal meer onderzoek gedaan moeten worden naar het instellen van het gemiddeld kustprofiel aan de hand van de evenwichtsprofielen. Dit zou gedaan kunnen worden aan de hand van uitbreiding van de theoretische modellen en het vergelijken van deze modellen met proeven in een laboratorium.

8.2.3 Het VA-ponton als zanddiode

Het VA-ponton kan gebruikt worden als een zanddiode. Hij voldoet aan de uit de morfologie naar voren komende voorwaarden. Met het VA-ponton kan met succes worden ingegrepen in het langstransport en bij evenwijdige ligging aan de kust wordt ook de profielkanteling veroorzaakt.

Op dit moment is het VA-ponton als zanddiode uit economisch oogpunt echter niet haalbaar.

8.2.4 Conclusie

Het zanddiode-principe lijkt een goed middel om erosie en aanwasproblemen langs de kust te bestrijden. Met behulp van het zanddiode-principe is men in staat om zandtransporten te sturen en te beheersen.

Bij het toepassen van het zanddiode-principe moet echter steeds bedacht worden, waar het eventuele nodige zand vandaan moet komen. Als dit van een plaats is waar dit geen kwaad kan, dan is dat niet erg. Het is echter ook goed mogelijk dat er elders weer een ander erosieprobleem zal optreden. In dat geval is het probleem alleen maar verschoven.

8.3 Plan Waterman

8.3.1 Zanddiodes en grootschalige projecten

In hoofdstuk 7 is geconcludeerd dat de bijdrage aan het plan Waterman, die met het gebruik van VA-pontons bereikt wordt, uiterst gering is. Dit is het gevolg van het feit dat het dwarstransport te weinig zand (5,6 miljoen m³) naar het bovenste gedeelte van het kustprofiel transporteert om hiermee een substantiele bijdrage aan fase 1 van Deelplan 1 (113 miljoen m³) te leveren.

Stel dat deze hoeveelheid zand (113 miljoen m³) wel voorradig is. Het maximale netto transport dat met de VA-pontons te bereiken is, bedraagt circa $4,5 \cdot 10^5$ m³/jaar. In dat geval zouden de VA-pontons er 250 jaar over doen om deze hoeveelheid aan te brengen in Hoek van Holland.

8.3.2 Conclusie

Grootschalige landaanwinningsprojecten zijn in eerste instantie niet haalbaar. Pas wanneer men erg veel tijd beschikbaar heeft en weet waar het zand vandaan gehaald kan worden zonder nieuwe erosieproblemen te creëren, dan pas zou landaanwinning op grote schaal m.b.v. het zanddiode-principe een kans van slagen hebben. De vraag moet dan wel gesteld worden, of een golfbreker die voor een periode van enkele eeuwen moet blijven liggen niet als een vaste constructie (bijv. een zandrif of een golfbreker van stortsteen) gebouwd moet worden.

8.4 Aanbevelingen

1. Als alternatief voor een offshore golfbreker bij de Delflandse kust is in dit rapport het VA-ponton voorgesteld. Natuurlijk zijn er vele andere vormen van offshore golfbrekers, zoals bijvoorbeeld een onderwaterrif op 1 a 2 kilometer uit de kust. Naar deze andere vormen van offshore golfbrekers volgens het diodeprincipe is nader onderzoek aan te bevelen

2. Nader onderzoek dient er te worden verricht naar het gemiddelde dwarsprofiel van de kust. Het programma van v.d. Kerk berekent een evenwichtprofiel voor een enkele golf. Hoe ziet zo'n profiel eruit in een scala van golven, zoals die op de Noordzee voorkomen?
3. De theorie van v.d. Kerk is nog niet diepgaand aan gegevens uit experimenten en de natuur getoetst. Morfologische toetsen aan de hand van laboratoriumexperimenten en literatuuronderzoek zijn sterk aan te bevelen.
4. Een volgende studie zou zich moeten richten op de voorbereiding van een proef op prototype schaal naar de werking in de praktijk van een zanddiode.

Referentielijst

1. Bailard J.A., "An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, no C11, pp 10938-10954, (1981)
2. Bakker W.T., "Berekening van het langstransport door golven met de methode van evenwijdige dieptelijnen", Rijkswaterstaat, Dir. Waterhuishoudingen Waterbeweging. Studierapport W.W.K. 69-7, (1969)
3. Bakker W.T., "One aspect of dynamics of a coast, partly protected by a row of groynes", R.W.S. Dir. Waterhuishoudingen en Waterbeweging, Studierapport W.W.K. 67-5, (1967)
4. Bakker W.T., Brief aan Waterman R.E., Stive M.J.F. en Mulder J.P.M., d.d. 2 maart 1994
5. Bakker W.T. en de Vroeg J.H., "Is de kust veilig?", Nota 88.017 Rijkswaterstaat Dienst getijde wateren (1988)
6. Bakker W.T., v.d. Kerk C.P.T., de Vroeg J.H., "Determination of coastal constants in mathematical line models", Second European Workshop on Coastal Zones, Loutraki, (1988)
7. Battjes J.A., Brief nr. 366/B/IV aan Ir. J.N. Svašek (Rijkswaterstaat, Deltadienst), Technische Hogeschool, (1968)
8. Battjes J.A., "Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves", Doct. thesis, Delft Univ. of Tech. (1974)
9. Battjes J.A. en Janssen M.P.F.M., "Energy loss and set-up due to breaking of random waves", *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng.*, pp 569-587, 1978
10. Bowen A.J., "Simple models of nearshore sedimentation. Beach profiles and longshore bars", In: *Coastline of Canada*, edited bij S.D. McCann, pp 1-11, Geological Survey of Canada, Halifax (1981)
11. Burgers R.J.W., "A preliminary study of wave attenuation and mooring forces", afstudeerverslag T.U. Delft, fac. Civiele Techniek, sec. Offshore (1993)
12. Dijkman M.J., Bakker W.T. en de Vroeg J.H., "Twee-lijn model van de Hollandse kust", T.U. Delft, fac. Civiele Techniek, sec. Kustwaterbouw (1989)
13. Dijkman M.J., Bakker W.T. en de Vroeg J.H., "Prediction of coastline evolution for specific parts of the Holland coast", *Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng.*, Delft (1990)
14. Dorrestein R., "Wind and wave data of Netherlands lightvessels since 1949", K.N.M.I., Med. en Verhand. no. 90, (1957)
15. Edelman T., "Erosie en aanwas van het kustvak Den Helder - Hoek van Holland", Rijkswaterstaat afd. Kustonderzoek, studierapport W.W.K. 61 - 1 (1961)
16. Guza R.T. and Thornton E.B., "Velocity moments in nearshore region", *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering* (1985)
17. van Harreveld K., "Korrelatie van golfgegevens Triton - 1964/65 met overeenkomende gegevens van Licht eiland Goeree", Rijkswaterstaat, Deltadienst, Waterloopkundige afd. Nota K 288
18. Hartsuiker G., "Hollands Kustmodel (HOKU), (concept)", Bouw en voorlopige afregeling numeriek stromingsmodel van de Hollandse kust. Waterloopkundig laboratorium, H825, (1988)

19. van de Kerk, C.P.T. "De theoretische onderbouwing van de kustconstante s_y met behulp van de Crostran conceptie" afstudeerverslag T.U. Delft, fac. Civiele techniek, sec. Kustwaterbouw (1988)
20. Longuet-Higgins, "Mass transport in waterwaves", Proc. Roy. Soc., Vol.245 A903 (1953)
21. Pinkster J.A., "Hydronamic interactions effects in waves", Report No. 1025-P, ISOPE-1995, Offshore and Polar Eng. Conf., Den Haag (1995)
22. Roskam A.P., "Golfklimaten langs de Nederlandse kust", Rijkswaterstaat Dienst getijde wateren (RIKZ) Nota GWA0 88-046 (1988)
23. Stive M.J.F., "A model for cross-shore sediment transport", Paper presented at 20th Int. Conf. Coastal Eng., Taipei (1986)
24. Stive M.J.F. and De Vriend, H.J., "Quasi-3D modelling of nearshore currents", Manuscript submitted for publication in Special Issue of Coastal engineering covering JONSMOD '86, corrected March 1987.
25. Svašek J.N., "Invloed van brekende golven op de stabiliteit van zandige kusten", Rijkswaterstaat, Deltadienst, Waterloopkundige afdeling, Nota W 68.083, (1968)
26. Swart D.H., "Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles", Publication no. 131 Delft Hydraulics Laboratory (1974)
27. Waterman R.E., "Naar een integraal kustbeleid via Bouwen met de Natuur", ISBN 90-212-9511-3 (1991)
28. Zeekaart 1801.5 van "Hydrografische kaart voor kust- en binnenwateren , Noordzeekust, Hoek van Holland tot aan Noordwijk" (1993)

Bijlage A

A1: Tabellen bij het bepalen van het langstransport

KK	$S[m^3/jaar]$
30	$-1,05 \cdot 10^5$
360	$-5,34 \cdot 10^5$
330	$-3,28 \cdot 10^5$
sub	$-9,67 \cdot 10^5$
300	$2,55 \cdot 10^5$
270	$5,31 \cdot 10^5$
240	$2,24 \cdot 10^5$
sub	$10,1 \cdot 10^5$
totaal	$43 \cdot 10^3$

Tabel a1: Berekening figuur 2.3 (controle)

KK	$S[m^3/jaar]$
30	$-1,06 \cdot 10^5$
360	$-5,30 \cdot 10^5$
330	$-3,23 \cdot 10^5$
sub	$-9,58 \cdot 10^5$
300	$2,37 \cdot 10^5$
270	$5,33 \cdot 10^5$
240	$2,19 \cdot 10^5$
sub	$9,89 \cdot 10^5$
totaal	$30,6 \cdot 10^3$

Tabel a2: Berekening figuur 2.3 (1969)

KK	$S[m^3/jaar]$
30	$-1,05 \cdot 10^5$
360	$-5,32 \cdot 10^5$
330	$-3,27 \cdot 10^5$
sub	$-9,64 \cdot 10^5$
300	$2,41 \cdot 10^5$
270	$5,37 \cdot 10^5$
240	$2,23 \cdot 10^5$
sub	$10,01 \cdot 10^5$
totaal	$37 \cdot 10^3$

Tabel a3: Berekening figuur 2.4

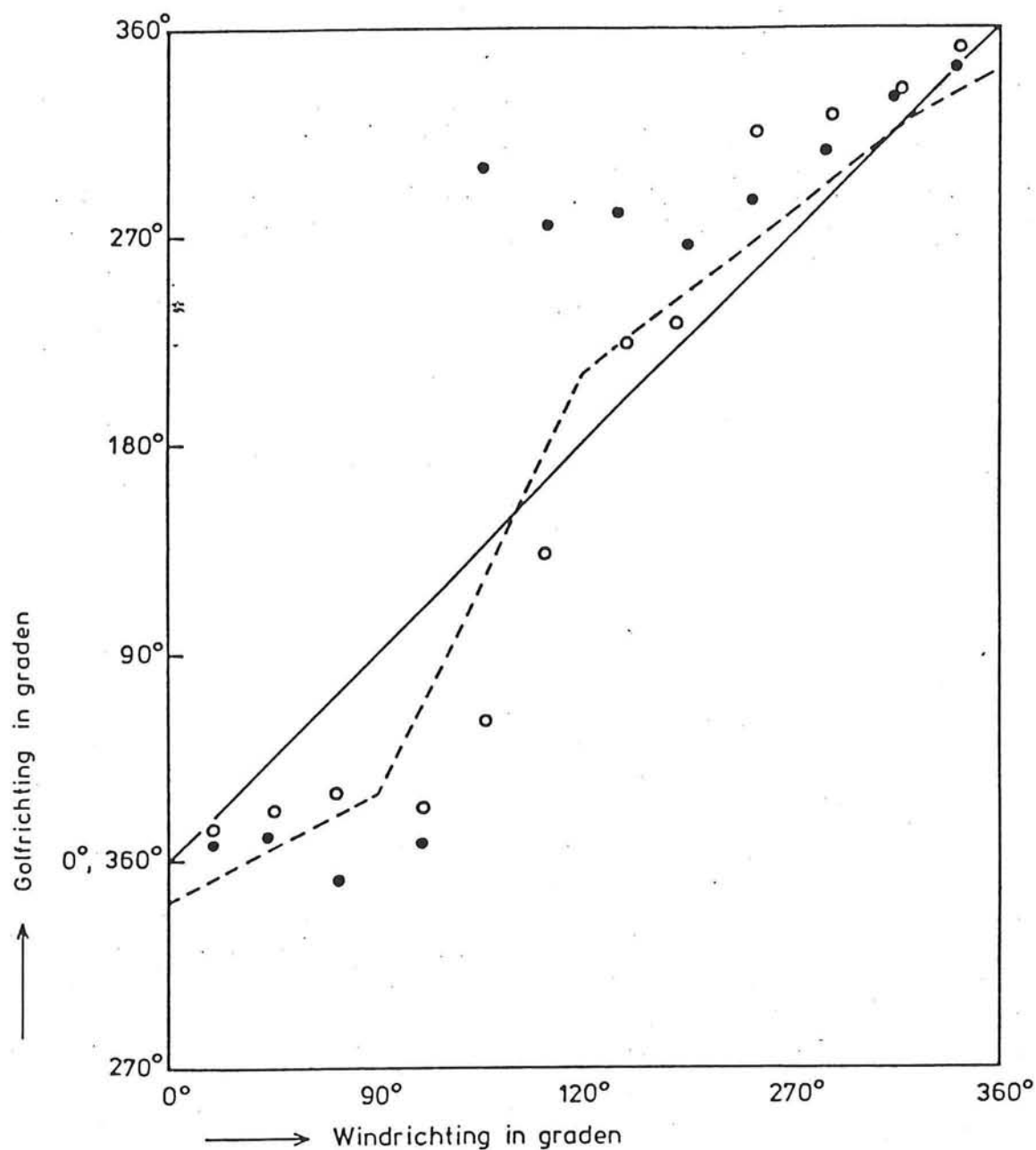
<i>KK</i>	$S[m^3/jaar]$
45	$-0,91 \cdot 10^4$
15	$-3,84 \cdot 10^5$
345	$-5,68 \cdot 10^5$
sub	$-9,61 \cdot 10^5$
285	$10,3 \cdot 10^5$
255	$12,3 \cdot 10^5$
225	$0,66 \cdot 10^5$
sub	$23,3 \cdot 10^5$
totaal	$13,7 \cdot 10^5$

Tabel a4: Berekening figuur 2.6

<i>KK</i>	$S[m^3/jaar]$
30	$-0,34 \cdot 10^4$
360	$-1,75 \cdot 10^5$
330	$-3,16 \cdot 10^5$
sub	$-4,94 \cdot 10^5$
300	$5,72 \cdot 10^5$
270	$5,00 \cdot 10^5$
240	$0,24 \cdot 10^5$
sub	$10,96 \cdot 10^5$
totaal	$6,00 \cdot 10^5$

Tabel a5: Berekening figuur 2.7

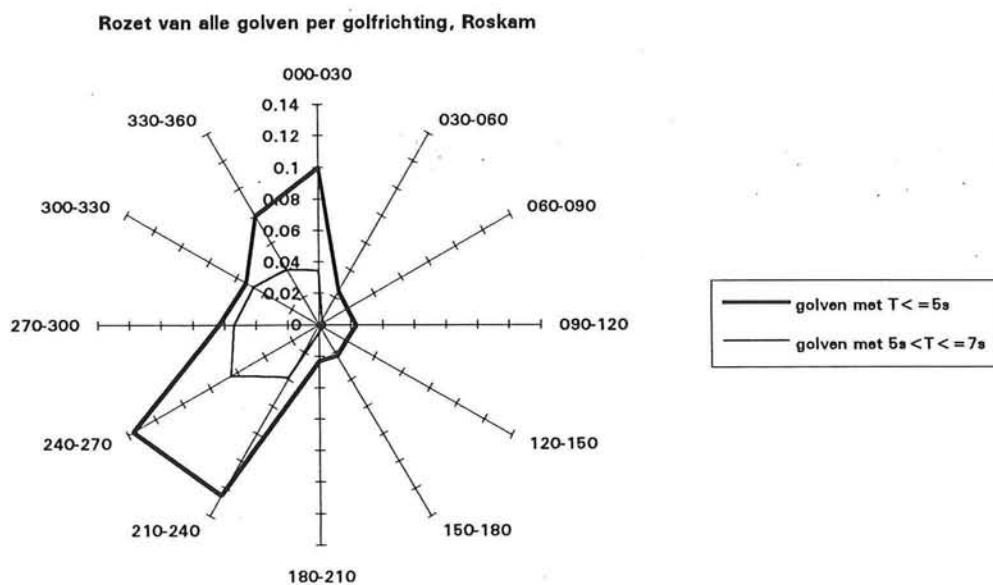
A2: Verschil tussen Golf-en Windrichting volgens Roskam



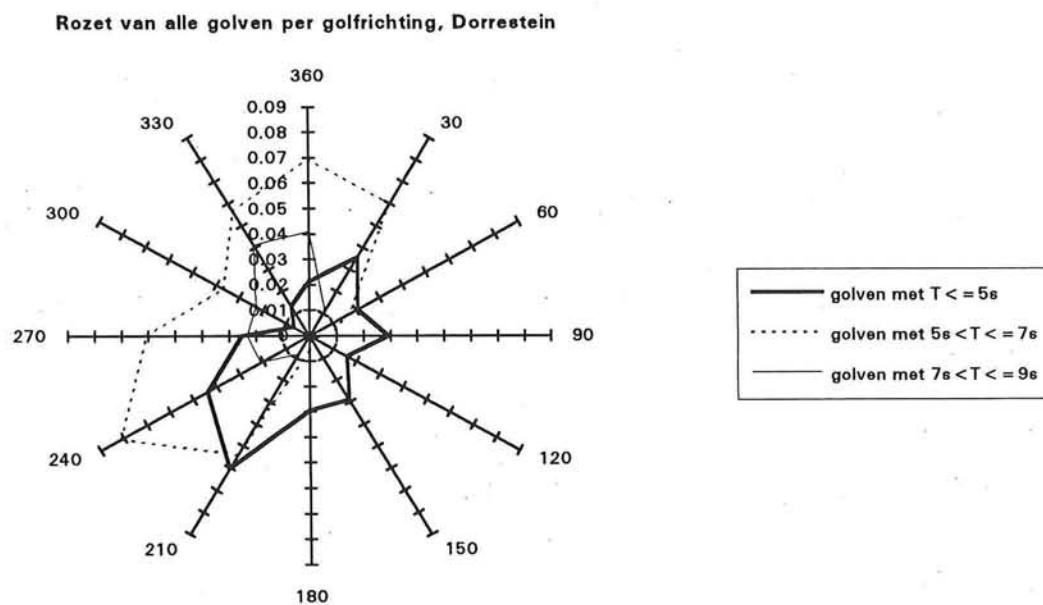
Relatie gemiddelde windrichting – gemiddelde golfrichting

Bijlage A3: Golfrozetten

Golfrozet Roskam

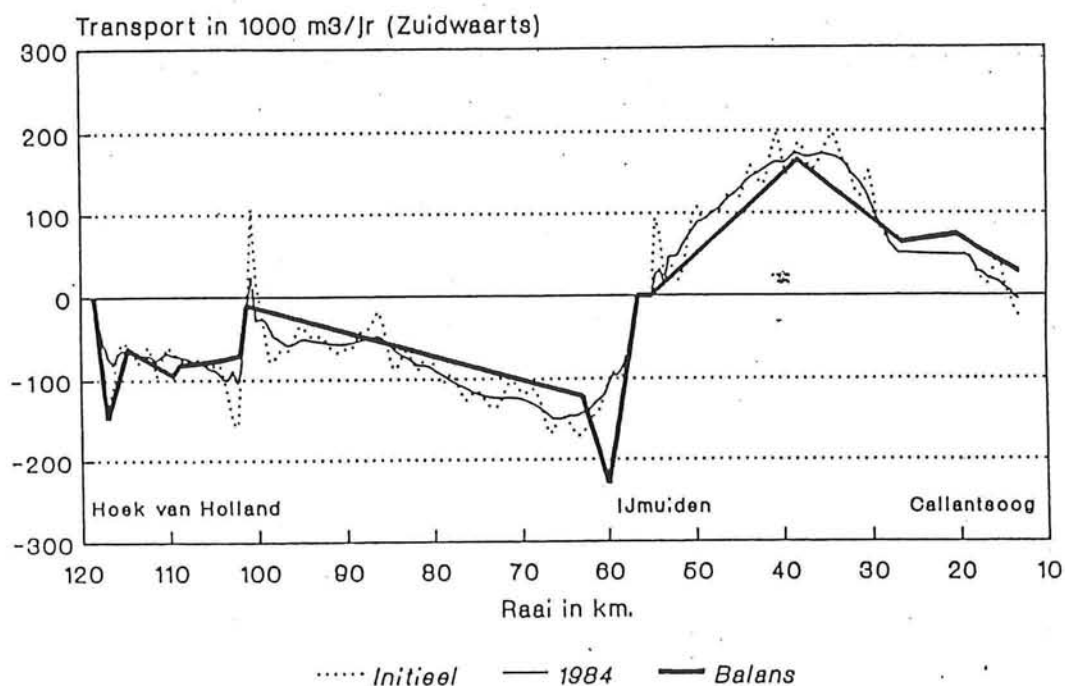


Golfrozet Dorrestein

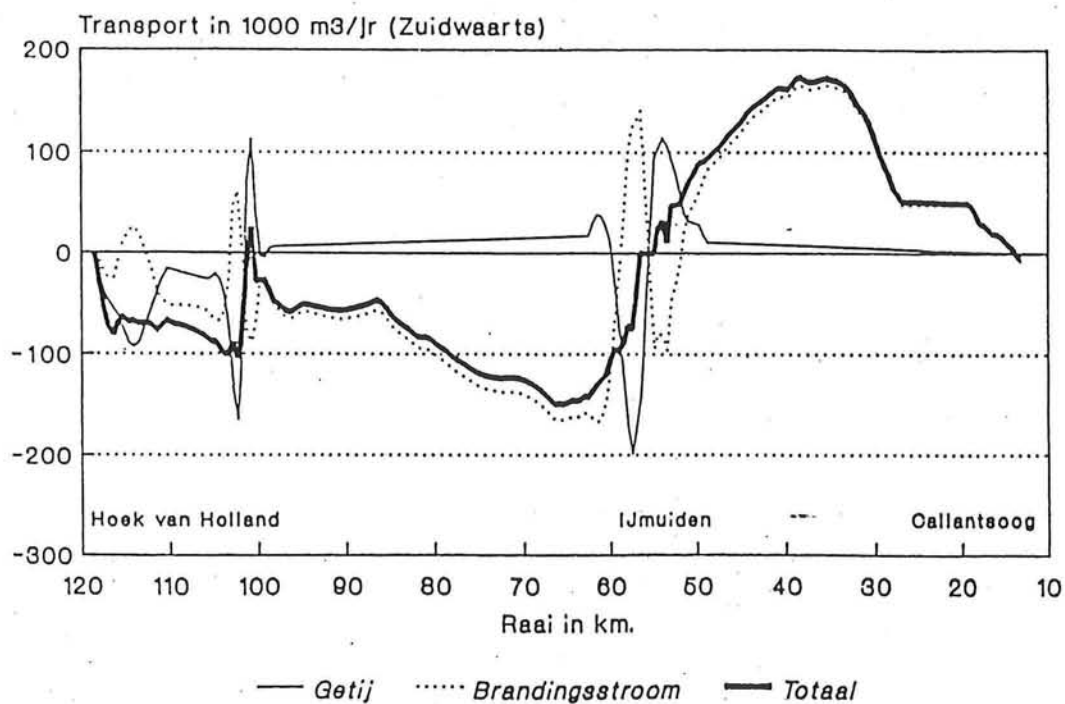


Bijlage A4: Calibratie en berekening Langtransport Dijkman

Resultierend langtransport Model vs Balans



Resultierend langtransport Getij en brandingsstroom afzonderlijk



Bijlage A5: Tabellen met uitkomsten van de controleberekening

H_{sig} , kans, D_{br} , en P_i als functie van H , T_{eq} , φ gemeten op LEG, geldend voor Delfland

Kompasloers 240, hoek van inval 75

H	H _{sig}	T=4s			T=5s			T=6s			T=8s		
		D _{br}	P _i	verdeling	D _{br}	P _i	verdeling	D _{br}	P _i	verdeling	D _{br}	P _i	verdeling
0	0.26	0.40	13.24	0.003675	0.43	13.49	0.00369	0.47	14.59	0	0.54	18.65	0
0.5	0.58	0.77	98.76	0.01779	0.83	97.79	0.00588	0.90	104.29	0	1.05	131.87	0
1	0.88	1.11	291.08	0.01749	1.18	279.63	0.02132	1.27	294.20	0.00074	1.47	368.25	0
1.5	1.2	1.47	671.89	0.004851	1.54	621.48	0.02925	1.65	643.73	0.00338	1.90	796.77	0
2	1.52	1.83	1312.98	0.00147	1.89	1159.58	0.01646	2.02	1180.45	0.00676	2.32	1443.91	0.00015
2.5	1.82	2.20	2258.76	0	2.23	1888.98	0.00588	2.36	1888.20	0.00588	2.71	2282.43	0.00015
3	2.12	2.59	3710.63	0	2.57	2890.71	0.00162	2.70	2830.34	0.00323	3.08	3377.92	0.00044
3.5	2.45	3.09	6294.48	0	2.95	4399.53	0.00029	3.08	4185.98	0.00088	3.49	4920.16	0.00015
4	2.76	3.67	10637.47	0	3.33	6283.05	0	3.44	5818.96	0.00029	3.88	6732.67	0
4.5	3.05	4.45	18757.64	0	3.69	8609.80	0	3.77	7718.55	0	4.24	8787.00	0

Kompasloers 270, hoek van inval 45

H	H _{sig}	T=4s			T=5s			t=6s			T=8s		
		D _{br}	P _i	verdeling	D _{br}	P _i	verdeling	D _{br}	P _i	verdeling	D _{br}	P _i	verdeling
0	0.31	0.68	49.05	0.003441	0.74	50.10	0.00067	0.80	54.24	0	0.94	68.39	0
0.5	0.64	1.24	298.36	0.01332	1.34	298.05	0.00821	1.45	319.19	0.00033	1.69	404.86	0
1	0.97	1.77	864.49	0.007215	1.89	843.14	0.01943	2.04	893.00	0.001	2.37	1123.24	0
1.5	1.32	2.32	1948.01	0.001332	2.45	1846.38	0.01654	2.64	1931.53	0.00377	3.06	2407.63	0
2	1.67	2.87	3705.28	0	3.01	3397.61	0.00977	3.22	3507.25	0.00777	3.72	4330.83	0
2.5	1.99	3.39	6104.57	0	3.51	5401.62	0.00255	3.74	5502.52	0.00511	4.31	6733.68	0.00011
3	2.32	3.95	9654.87	0	4.03	8174.53	0.00133	4.27	8203.38	0.00322	4.90	9941.00	0.00044
3.5	2.67	4.59	15094.95	0	4.59	12058.07	0.00011	4.84	11888.69	0.00144	5.53	14248.62	0.00056
4	2.99	5.23	22291.70	0	5.11	16632.32	0	5.35	16104.43	0.00056	6.09	19094.08	0.00022
4.5	3.32	5.97	33258.48	0	5.65	22592.27	0	5.89	21419.27	0.00011	6.68	25094.64	0.00033

Kompasloers 300, hoek van inval 15

H	H _{sig}	T=4s			T=5s			t=6s			T=8s		
		D _{br}	P _i	verdeling	D _{br}	P _i	verdeling	D _{br}	P _i	verdeling	D _{br}	P _i	verdeling
0	0.35	0.83	32.81	0.0014	0.91	34.18	0.0007	0.99	37.38	0	1.16	48.22	0
0.5	0.7	1.45	174.71	0.00413	1.58	181.53	0.00595	1.73	198.26	0.00035	2.02	255.41	0
1	1.05	2.01	486.08	0.00112	2.19	483.07	0.01323	2.39	526.89	0.00245	2.80	678.07	0.00007
1.5	1.43	2.58	986.38	0.00007	2.81	1019.67	0.0098	3.07	1110.66	0.00476	3.59	1427.77	0
2	1.81	3.13	1750.45	0	3.40	1804.97	0.00546	3.71	1963.48	0.00623	4.34	2521.42	0.00021
2.5	2.17	3.63	2725.42	0	3.94	2803.73	0.00133	4.29	3046.27	0.00392	5.02	3908.11	0.0007
3	2.53	4.11	3967.91	0	4.46	4072.46	0.00021	4.86	4419.54	0.00357	5.68	5664.53	0.0007
3.5	2.88	4.57	5452.80	0	4.96	5583.99	0.0014	5.40	6053.03	0.00128	6.31	7751.17	0.00056
4	3.22	5.01	7174.87	0	5.43	7331.64	0	5.91	7938.85	0.00049	6.90	10157.23	0.00049
4.5	3.59	5.47	9381.89	0	5.93	9564.44	0	6.46	10344.43	0.00007	7.54	13222.69	0.00084

Kompekoers 330, hoek van inval 15

H	H _g	T=4s			T=5s			t=6s			T=8s		
		Dbr	R	verdeling	Dbr	R	verdeling	Dbr	R	verdeling	Dbr	R	verdeling
0	0.36	0.85	-35.11	0.002185	0.93	-36.58	0.00207	1.01	-40.01	0.00012	1.19	-51.60	0
0.5	0.72	1.48	-187.02	0.00736	1.62	-194.29	0.01438	1.77	-212.18	0.00334	2.07	-273.33	0
1	1.11	2.10	-533.29	0.00368	2.29	-552.50	0.02001	2.50	-602.49	0.00748	2.93	-775.22	0.00012
1.5	1.5	2.69	-1107.91	0.000345	2.92	-1144.78	0.01346	3.19	-1246.62	0.00771	3.73	-1602.23	0.00012
2	1.89	3.24	-1945.13	0	3.53	-2004.67	0.00541	3.84	-2180.12	0.01083	4.49	-2799.01	0.00046
2.5	2.28	3.77	-3075.68	0	4.10	-3161.79	0.00082	4.47	-3434.06	0.00679	5.22	-4404.34	0.00069
3	2.55	4.14	-4045.22	0	4.49	-4151.28	0.00012	4.89	-4604.78	0.00322	5.72	-5773.48	0.00058
3.5	3	4.72	-6028.23	0	5.13	-6168.55	0	5.58	-6694.13	0.00115	6.52	-8556.68	0.00046
4	3.39	5.22	-8144.59	0	5.66	-8313.58	0	6.16	-8997.25	0.00035	7.20	-11506.45	0.00035
4.5	3.76	5.69	-10517.95	0	6.16	-10711.08	0	6.70	-11578.36	0	7.82	-14793.66	0.00082

Kompekoers 360, hoek van inval 45

H	H _g	T=4s			T=5s			t=6s			T=8s		
		Dbr	R	verdeling	Dbr	R	verdeling	Dbr	R	verdeling	Dbr	R	verdeling
0	0.35	0.75	-66.17	0.002948	0.81	-67.41	0.00402	0.89	-72.88	0.00054	1.03	-93.14	0
0.5	0.73	1.39	-416.50	0.012864	1.49	-413.45	0.01956	1.61	-441.46	0.0071	1.88	-558.67	0.00027
1	1.11	1.99	-1229.53	0.005226	2.12	-1186.08	0.02251	2.28	-1250.14	0.0126	2.65	-1566.82	0.0004
1.5	1.5	2.60	-2754.27	0.000536	2.74	-2568.20	0.01487	2.94	-2668.66	0.00838	3.40	-3310.57	0.00054
2	1.9	3.25	-5339.33	0	3.37	-4775.05	0.0063	3.60	-4882.98	0.00697	4.14	-5990.95	0.00027
2.5	2.29	3.90	-9277.22	0	3.98	-7889.29	0.00188	4.23	-7928.42	0.00281	4.85	-9616.58	0.00013
3	2.68	4.61	-15282.86	0	4.60	-12185.21	0	4.85	-12007.60	0.00147	5.55	-14386.44	0.00013
3.5	3.07	5.40	-24549.51	0	5.24	-17951.97	0	5.48	-17297.85	0.00013	6.23	-20451.46	0.00013
4	3.46	6.30	-38094.18	0	5.87	-25345.21	0	6.10	-23812.02	0	6.90	-27760.41	0
4.5	3.83	7.48	-65279.46	0	6.54	-34965.44	0	6.72	-31891.42	0	7.57	-36613.23	0.00013

Kompekoers 030, hoek van inval 75

H	H _g	T=4s			T=5s			t=6s			T=8s		
		Dbr	R	verdeling	Dbr	R	verdeling	Dbr	R	verdeling	Dbr	R	verdeling
0	0.38	0.54	-33.98	0.00321	0.59	-34.26	0.00161	0.64	-36.86	0	0.74	-46.92	0
0.5	0.64	0.84	-127.07	0.019367	0.90	-125.10	0.00867	0.98	-133.06	0.00054	1.13	-167.91	0
1	0.92	1.15	-327.46	0.010583	1.22	-313.21	0.02215	1.32	-328.91	0.00182	1.53	-411.12	0
1.5	1.19	1.45	-656.55	0.002247	1.53	-608.08	0.0183	1.64	-630.16	0.003	1.89	-780.26	5.4E-05
2	1.49	1.80	-1238.96	0.000214	1.86	-1099.46	0.00686	1.98	-1121.15	0.0031	2.28	-1372.95	0
2.5	1.81	2.18	-2220.29	0	2.22	-1860.61	0.00171	2.35	-1861.05	0.00193	2.69	-2250.52	0.00011
3	2.09	2.55	-3535.38	0	2.53	-2776.47	0.00032	2.67	-2724.47	0.00054	3.05	-3255.86	0
3.5	2.32	2.88	-5106.68	0	2.80	-3742.84	0	2.93	-3608.41	0.00054	3.33	-4267.60	5.4E-05
4	2.56	3.28	-7510.24	0	3.08	-5000.92	0	3.20	-4722.42	0.00011	3.63	-5520.68	0
4.5	2.85	3.87	-12408.34	0	3.44	-6940.60	0	3.54	-6367.20	0	3.99	-7331.24	0

Bijlage A6: Tabellen met uitkomsten van de berekening met de golfgegevens van Roskam

H_{sig} , kans, D_{br} , en P_I als functie van H , T_{eq} , ϕ , gemeten op LEG, geldend voor Delfland.

KK = 210-225, hoek van inval 82.5

H	H _{sig}	T=2s			T=4s			T=6s			T=8s		
		D _{br}	P _I	kans	D _{br}	P _I	kans	D _{br}	P _I	kans	D _{br}	P _I	kans
0.05	0.25	0.23	5.40	0.00036	0.29	5.34	0.010396	0.34	5.94	0.00018	0.40	7.61	0
0.5-1	0.75	0.67	130.18	0.000135	0.72	82.37	0.025473	0.84	87.12	0.003646	0.98	110.20	4.51E-05
1-1.5	1.25				1.12	310.86	0.018317	1.28	310.87	0.004726	1.48	388.21	0
1.5-2	1.75				1.53	780.00	0.006391	1.70	729.78	0.004366	1.97	899.15	4.51E-05
2-2.5	2.25				1.95	1623.26	0.001305	2.12	1397.75	0.003691	2.43	1697.40	0
2.5-3	2.75				2.41	3075.62	0.000135	2.53	2374.57	0.002205	2.88	2838.41	0
3-3.5	3.25							2.94	3729.83	0.00045	3.33	4381.14	0
3.5-4	3.75							3.35	5547.38	0.000136	3.78	6389.93	0
4-4.5	4.25							3.78	7931.63	0	4.23	8936.56	0
4.5-5	4.75							4.21	11016.67	0	4.68	12102.42	0
5-5.5	5.25							4.67	14980.67	0	5.13	15981.41	0

KK = 240-270, hoek van inval 60

H	H _{sig}	T=2s			T=4s			T=6s			T=8s		
		D _{br}	P _I	kans	D _{br}	P _I	kans	D _{br}	P _I	kans	D _{br}	P _I	kans
0.05	0.25	0.41	25.68	0.000362	0.50	23.84	0.018484	0.59	26.26	0.000893	0.69	33.56	0
0.5-1	0.75	1.54	1399.32	0.000362	1.26	382.73	0.052145	1.45	391.96	0.007387	1.68	492.05	0
1-1.5	1.25				2.00	1520.58	0.042853	2.23	1423.82	0.011276	2.57	1754.53	0
1.5-2	1.75				2.78	4113.28	0.018134	2.98	3409.17	0.017051	3.41	4115.64	0
2-2.5	2.25				3.70	9703.55	0.003339	3.73	6678.37	0.013262	4.24	7875.98	0
2.5-3	2.75				5.01	23998.14	0.000541	4.49	11647.90	0.010014	5.06	13367.52	0
3-3.5	3.25							5.27	18878.76	0.002886	5.88	20974.33	0
3.5-4	3.75							6.10	29175.80	0.000893	6.71	31156.63	0.000271
4-4.5	4.25							6.98	43777.10	0.000362	7.55	44483.35	9.05E-05
4.5-5	4.75							7.95	64757.78	0	8.42	61679.51	9.05E-05
5-5.5	5.25							9.07	96019.82	9.05E-05	9.32	83699.15	0

KK = 270-300, hoek van inval 30

H	H _{sig}	T=2s			T=4s			T=6s			T=8s		
		D _{br}	P _I	kans	D _{br}	P _I	kans	D _{br}	P _I	kans	D _{br}	P _I	kans
0.05	0.25	0.48	23.71	0.00018	0.61	25.32	0.012152	0.73	28.57	0.00054	0.85	36.75	0
0.5-1	0.75	1.22	400.36	0	1.50	371.60	0.023044	1.77	408.36	0.003331	2.06	523.13	0
1-1.5	1.25				2.29	1326.26	0.018723	2.68	1427.31	0.007021	3.12	1813.10	0
1.5-2	1.75				3.04	3114.20	0.007561	3.53	3271.65	0.014483	4.11	4131.49	0
2-2.5	2.25				3.78	5966.21	0.00171	4.35	6110.10	0.011882	5.05	7670.34	0
2.5-3	2.75				4.51	10138.81	9.04E-05	5.14	10103.20	0.008281	5.96	12806.87	0
3-3.5	3.25							5.92	15410.61	0.005311	6.84	19111.16	9.04E-05
3.5-4	3.75							6.69	22195.11	0.0018	7.71	27350.31	0.00027
4-4.5	4.25							7.44	30625.44	0.0008	8.57	37491.19	0.00072
4.5-5	4.75							8.19	40878.87	9.04E-05	9.41	48702.51	0.00054
5-5.5	5.25							8.94	53143.58	0	10.24	64156.36	0.00027

KK = 330.360, hoek van inval -30

H	H _{ig}	T=2s			T=4s			T=6s			T=8s		
		D _{br}	R	kans	D _{br}	R	kans	D _{br}	R	kans	D _{br}	R	kans
0.05	0.25	0.48	-23.71	0.00072	0.61	-25.32	0.017814	0.73	-28.57	0.000539	0.85	-36.75	0
0.5-1	0.75	1.22	-400.36	0	1.50	-371.60	0.03275	1.77	-409.36	0.007918	2.06	-523.13	0.000181
1-1.5	1.25				2.29	-1326.26	0.022403	2.68	-1427.31	0.009446	3.12	-1813.10	9.00E-05
1.5-2	1.75				3.04	-3114.20	0.005218	3.53	-3271.65	0.008087	4.11	-4131.49	9.00E-05
2-2.5	2.25				3.78	-5866.21	0.00063	4.35	-6110.10	0.007647	5.05	-7670.34	0
2.5-3	2.75				4.51	-10138.81	0	5.14	-10103.20	0.003418	5.96	-12606.87	0
3-3.5	3.25							5.92	-15410.61	0.00225	6.94	-19111.16	0.00027
3.5-4	3.75							6.69	-22195.11	0.00045	7.71	-27350.31	0.00036
4-4.5	4.25							7.44	-30625.44	0	8.57	-37491.19	0.00027
4.5-5	4.75							8.19	-40878.87	0	9.41	-49702.51	0.00036
5-5.5	5.25							8.94	-53143.58	0	10.24	-64156.36	9.00E-05

KK = 360.030, hoek van inval -60

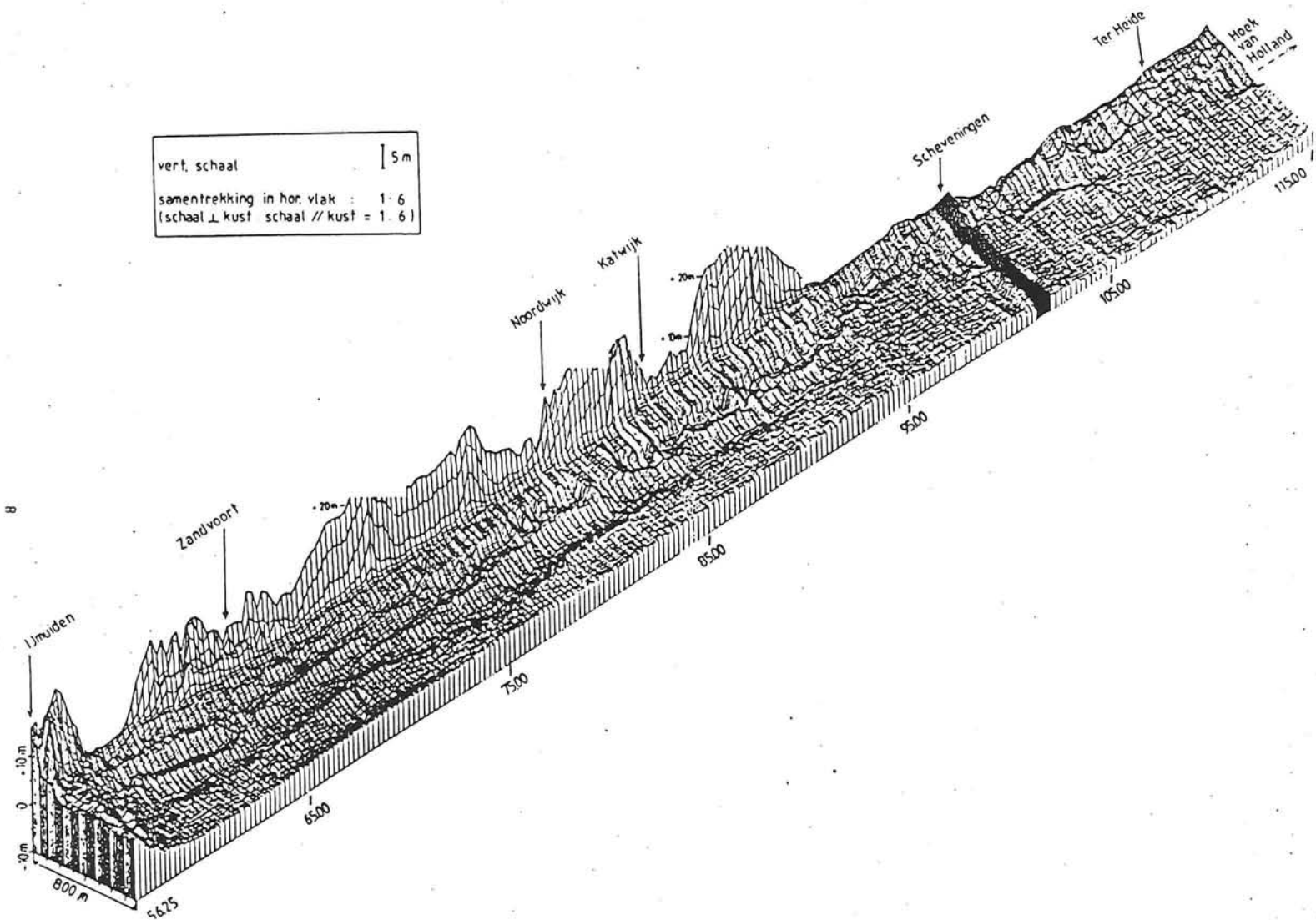
H	H _{ig}	T=2s			T=4s			T=6s			T=8s		
		D _{br}	R	kans	D _{br}	R	kans	D _{br}	R	kans	D _{br}	R	kans
0.05	0.25	0.41	-25.68	0.000541	0.50	-23.84	0.030831	0.59	-26.26	0.001534	0.69	-33.56	0
0.5-1	0.75	1.54	-1399.32	0	1.26	-382.73	0.0395	1.45	-391.96	0.01001	1.68	-482.05	9.00E-05
1-1.5	1.25				2.00	-1520.58	0.023177	2.23	-1423.82	0.010822	2.57	-1754.53	9.00E-05
1.5-2	1.75				2.78	-4113.28	0.00505	2.98	-3409.17	0.006403	3.41	-4115.64	0
2-2.5	2.25				3.70	-9703.95	0.00027	3.73	-6578.37	0.003066	4.24	-7875.98	9.00E-05
2.5-3	2.75				5.01	-23999.14	0.000181	4.49	-11647.90	0.002255	5.06	-13367.52	0.000181
3-3.5	3.25							5.27	-18878.76	9.00E-05	5.88	-20974.33	0.000181
3.5-4	3.75							6.10	-29175.80	0.000377	6.71	-31156.63	0.000181
4-4.5	4.25							6.98	-43777.10	0	7.55	-44483.35	0
4.5-5	4.75							7.95	-64757.78	0	8.42	-61679.51	0
5-5.5	5.25							9.07	-96019.82	0	9.32	-83699.15	0

KK = 030.045, hoek van inval -82.5

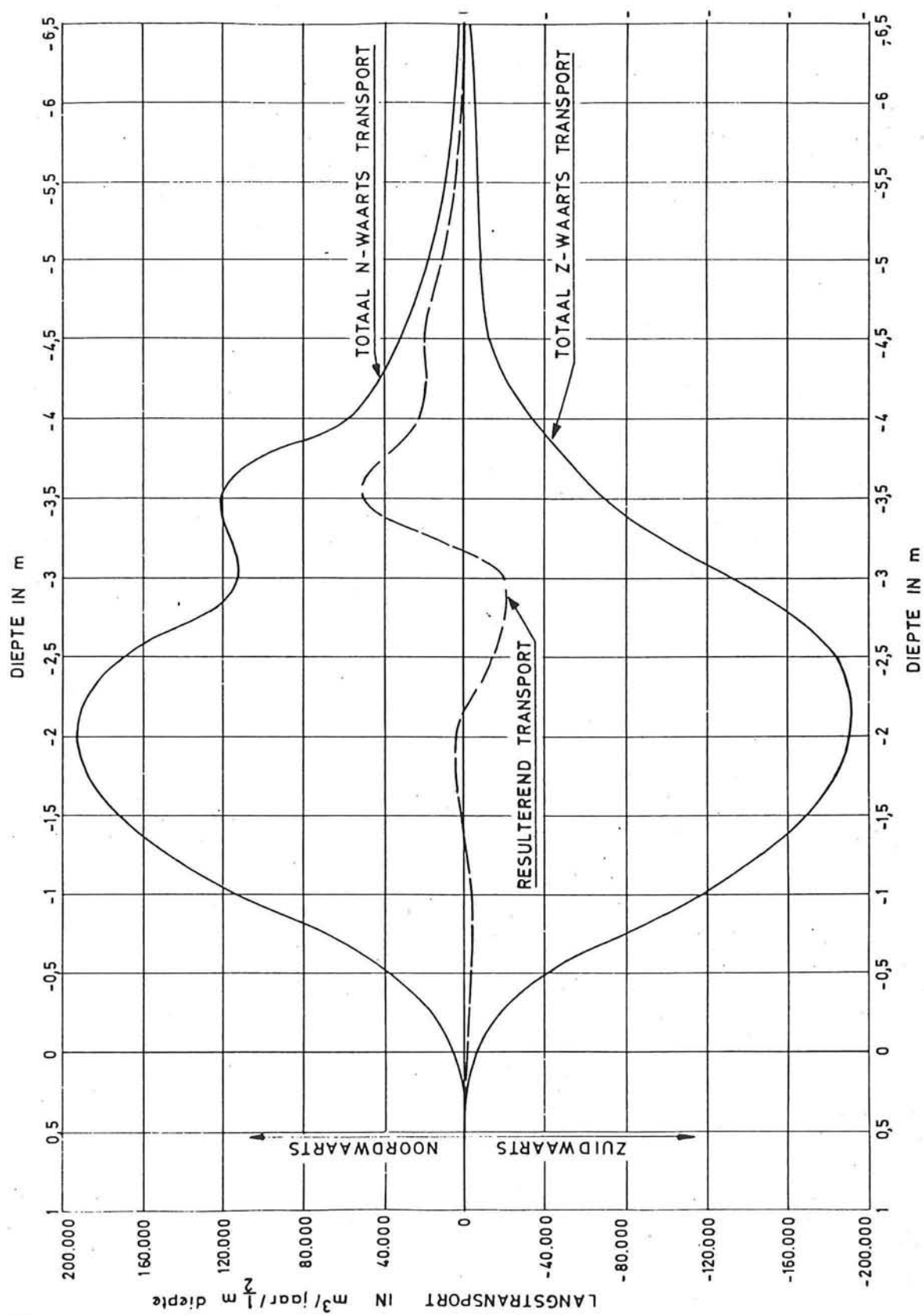
H	H _{ig}	T=2s			T=4s			T=6s			T=8s		
		D _{br}	R	kans	D _{br}	R	kans	D _{br}	R	kans	D _{br}	R	kans
0.05	0.25	0.23	-5.40	0.000324	0.29	-5.34	0.010566	0.34	-5.94	0.000539	0.40	-7.61	0
0.5-1	0.75	0.67	-130.18	0	0.72	-82.37	0.013808	0.84	-87.12	0.00248	0.98	-110.20	0
1-1.5	1.25				1.12	-310.86	0.003666	1.28	-310.87	0.001402	1.49	-388.21	0
1.5-2	1.75				1.53	-780.00	0.001186	1.70	-729.78	0.000324	1.97	-899.15	0
2-2.5	2.25				1.95	-1623.26	0	2.12	-1397.75	0	2.43	-1697.40	0
2.5-3	2.75				2.41	-3075.62	0	2.53	-2374.57	0	2.88	-2838.41	0
3-3.5	3.25							2.94	-3729.83	0.000108	3.33	-4381.14	0
3.5-4	3.75							3.35	-5547.38	0	3.78	-6389.93	0
4-4.5	4.25							3.78	-7931.63	0	4.23	-8936.56	0
4.5-5	4.75							4.21	-11016.67	0	4.68	-12102.42	0
5-5.5	5.25							4.67	-14960.67	0	5.13	-15981.41	0

Bijlage B

Bijlage B1: 3D-profiel van de Zuid-Hollandse kust

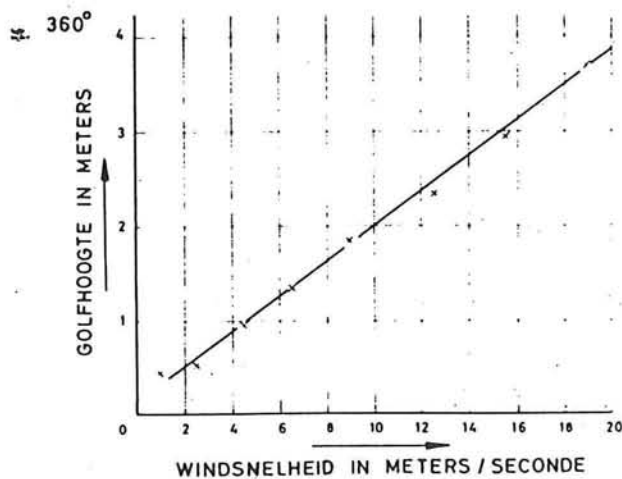
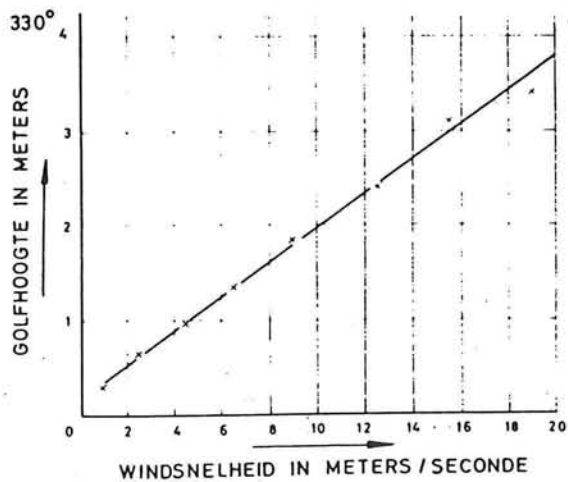
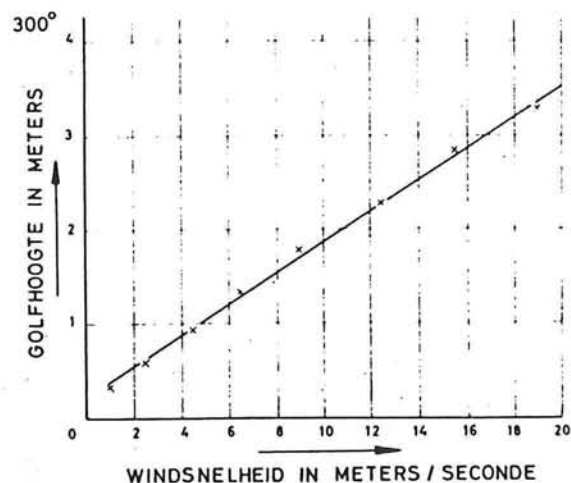
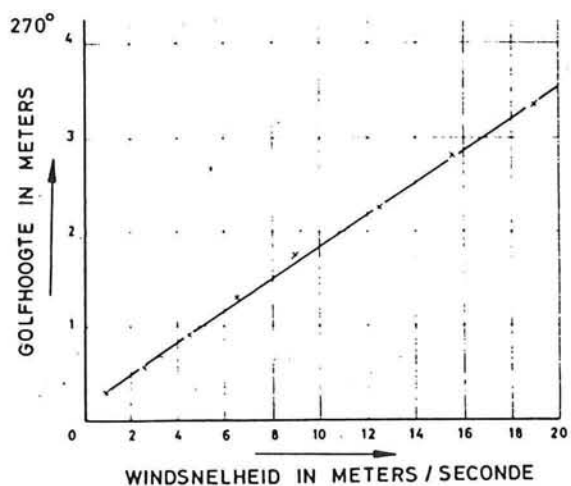
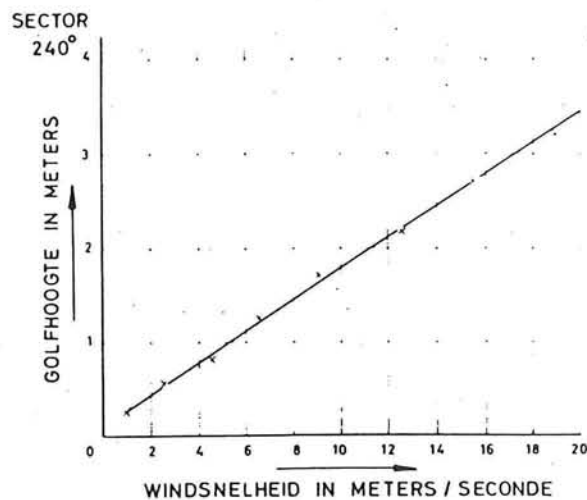
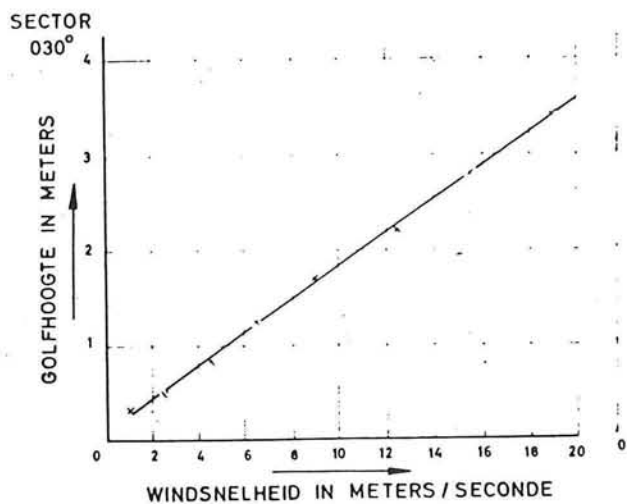


B2: Langtransport bij Scheveningen als functie van de diepte



Bijlage C

Bijlage C1: Golfhoogte als functie van Windsnelheid, gemeten bij L.E. Goeree



Bijlage C2: Beschouwing Lineaire verband U_a en H

Tijdens berekeningen in paragraaf 5.2.3 van de strijklengtes kwam tot uiting dat de golfhoogte bij de lagere windsnelheden enigszins overschat zijn. Dit bleek met name wanneer vergelijking 5.4 gebruikt werd. Voor het gemak worden nu vergelijking 5.3 en 5.4 weergegeven:

$$\frac{gH_{m0}}{U_a^2} = 1.6 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{gF}{U_a^2}} \Leftrightarrow H_{m0} = 5.112 \cdot 10^{-4} U_a \sqrt{F} \quad \text{herhaling (5.3)}$$

$$\frac{gH}{U_a^2} = 0.283 \tanh \left[0.530 \left(\frac{gh}{U_a^2} \right)^{3/4} \right] \tanh \left\{ \frac{0.00565 \sqrt{\frac{gF}{U_a^2}}}{\tanh \left[0.530 \left(\frac{gh}{U_a^2} \right)^{3/4} \right]} \right\} \quad \text{herhaling (5.4)}$$

Waarin:

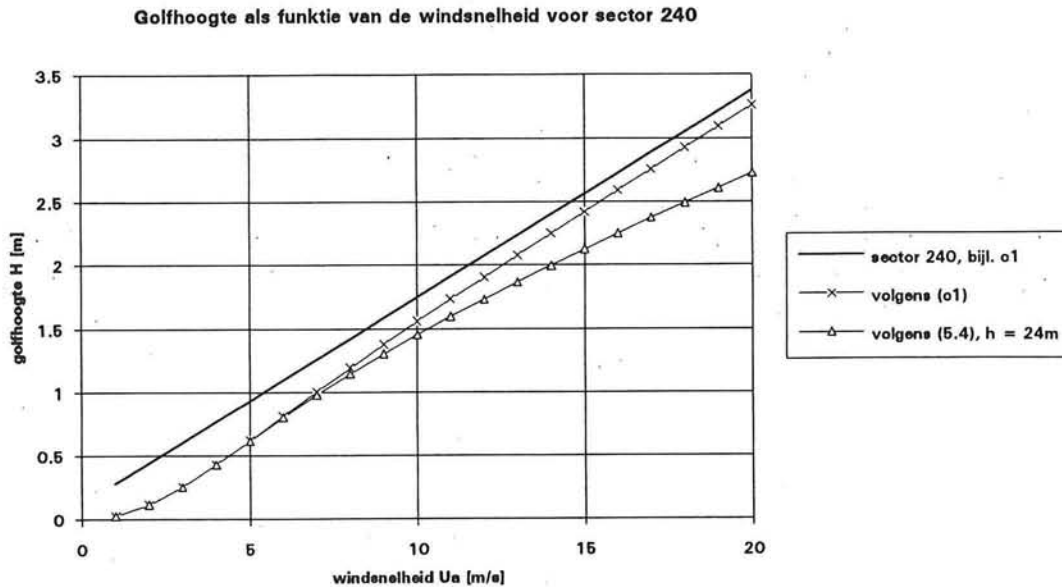
- H, H_{m0} : significante golfhoogte [m]
- g : zwaartekrachtversnelling [m/s^2]
- U_a : windsnelheid gemeten op a meter hoogte [m/s]
- h : waterdiepte [m]
- F : strijklengte [m]

Om het verschil tussen beide vergelijkingen na te gaan is de grafiek uit bijlage C1 voor sector 240° nagerekend. Uit de grafiek is een aantal waarden van H/U_a afgelezen. Met vergelijking 5.3 is de daarbij behorende strijklengte F berekend. Vervolgens is met deze strijklengte en de windsnelheid de golfhoogte weer berekend. Dit is dan echter gedaan met vergelijking 5.4. Hierbij is de invloed van de diepte verwaarloosd. Door voor de diepte $h = \infty$ in te voeren, versimpelt vergelijking 5.4 naar vergelijking c1:

$$\frac{gH}{U_a^2} = 0.283 \tanh \left\{ 0.00565 \sqrt{\frac{gF}{U_a^2}} \right\} \quad (c1)$$

Daarna is dezelfde berekening weer uitgevoerd met vergelijking 5.4, voor de waterdiepte is $h = 24$ meter gekozen.

Wanneer figuur c1 beschouwd wordt valt op, dat bij gelijkblijvende windsnelheid en strijklengte de golfhoogte afneemt bij gebruik van vergelijking c1. De verklaring hiervoor is simpel. Wanneer aangenomen wordt dat de waarde voor $0.00565 \sqrt{gF/U_a^2}$ klein is, dan is dit gelijk aan de tanh hiervan. Met andere woorden vergelijking c1 versimpelt tot vergelijking 5.3. Bij lagere windsnelheden $U_a \leq 7$ m/s wordt de term onder de tanh niet klein genoeg. Dit betekent dat de term gH/U_a^2 te snel naar zijn evenwichtswaarde van 0.283 nadert. Dus de aanname gaat niet op voor deze windsnelheden. In figuur c1 is te zien, dat pas bij windsnelheden groter dan $U_a = 7$ m/s de twee lijnen gaan convergeren. Kennelijk mogen de vergelijking 5.4 en c1, in dit geval, pas gebruikt worden voor windsnelheden boven $U_a = 7$ m/s.



Figuur c1: Golfhoogte als functie van de wind

In figuur c1 is tevens naar de invloed van de waterdiepte gekeken. Bij windsnelheden boven de $U_a = 7$ m/s gaat deze een rol spelen. Dit is logisch, omdat golven bij deze grotere windsnelheden hoger en langer worden. Dit effect zit opgesloten in de tanh in de term voor de diepte in vergelijking 5.4. Bij lage windsnelheden is de factor U_a^2 klein en nadert de tanh naar 1. Wanneer de windsnelheid toeneemt wordt de totale term onder de tanh kleiner en krijgt deze een waarde < 1 .

Voor het bepalen van de strijklengtes in bijlage C3 is uitgegaan van vergelijking 5.3 en de verhouding H/U_a zoals die gegeven is in bijlage C1. Dit is gedaan om twee redenen. Ten eerste is een aanpassing van bijlage C1 voor alle windrichtingen te bewerkelijk. Ten tweede wordt met vergelijking 5.3 de kleinst mogelijke strijklengte berekend. Met andere woorden de golf groeit het snelst. Wanneer uit de berekening met deze vergelijking en gegevens blijkt, dat de golfgroei na de golfbrekers richting kust te verwaarlozen is, dan is dit zeker het geval voor berekeningen met vergelijkingen c1 en 5.4.

Bijlage C3: strijklengte berekeningen per golfrichting

Berekend is de benodigde strijklengte die een golf nodig heeft om zijn hoogte te bereiken met een gegeven windsnelheid. Deze windsnelheid is bepaald aan de hand van bijlage C1

Tabel c1: Strijklengteberekening voor $KK = 240^\circ$

H_{sig} [m]	U_a [m/s]	F [km]	F_0 [km]	$F_{0.33}$ [km]	$F_{0.5}$ [km]	$F_{0.7}$ [km]
0.26	0.9	324	324	36	80.9	158.6
0.58	2.8	158	158	17.6	39.4	77.5
0.88	4.7	134	134	15	33.6	65.9
1.20	6.7	124	124	13.8	31.1	60.9
1.52	8.6	157	119	13.2	29.8	58.3
1.82	10.4	147	116	12.9	29	56.8
2.12	12.3	157	114	12.6	28.4	55.7
2.45	14.3	188	112	12.4	28	54.9
2.76	16.2	228	111	12.3	27.7	54.3
3.05	18	280	110	12.2	27.4	53.8

Tabel c2: Strijklengte berekening voor $KK = 270^\circ$

H_{sig} [m]	U_a [m/s]	F [km]	F_0 [km]	$F_{0.33}$ [km]	$F_{0.5}$ [km]	$F_{0.7}$ [km]
0.31	1	366	366	40.6	86.6	180
0.64	3	174	174	19.3	43.5	85.3
0.97	5	144	144	16	36	70.6
1.32	7	136	136	15.1	34	66.7
1.67	9	190	132	14.7	32.9	64.5
1.99	11	174	125	13.9	31.6	61.3
2.32	13	193	122	13.5	30.5	59.7
2.67	15	238	121	13.5	30.3	59.4
2.99	17	290	118	13.2	29.8	58
3.32	19	365	117	13	29.2	57.2

Tabel c3 : Strijklengte berekening voor $KK = 300^\circ$

H_{sig} [m]	U_a [m/s]	F [km]	F_0 [km]	$F_{0.33}$ [km]	$F_{0.5}$ [km]	$F_{0.7}$ [km]
0.35	1	468	468	52.2	117	230
0.70	3	208	208	23.1	52	102
1.05	5	169	169	18.8	42.1	82.7
1.43	7.5	139	139	15.5	34.8	68.2
1.81	10	167	125	13.9	31.3	61.4
2.17	12	186	125	13.9	31.3	61.3
2.53	14	226	125	13.9	31.2	61.2
2.88	16	284	124	13.8	31	60.7
3.22	18	360	122	13.6	30.6	60
3.59	20	500	123	13.7	30.8	60.4

Tabel c4: Strijklengte berekening voor $KK = 330^\circ$

H_{sig} [m]	U_a [m/s]	F [km]	F_0 [km]	$F_{0.33}$ [km]	$F_{0.5}$ [km]	$F_{0.7}$ [km]
0.36	1	496	496	55.3	124	243
0.72	3	220	220	24.6	55	108
1.11	5	189	189	21	46.3	92.4
1.50	7	176	176	19.6	43.8	86.1
1.89	9.5	280	151	16.8	37.8	74.2
2.28	11.5	279	150	16.7	37.6	73.7
2.55	13	304	147	16.4	36.8	72.1
3.00	15.5	396	143	15.9	35.8	70.2
3.39	18	498	135.7	15.1	33.9	66.5
3.76	20	744	135	15	33.8	66.2

Tabel c5: Strijklengte berekening voor $KK = 360^\circ$

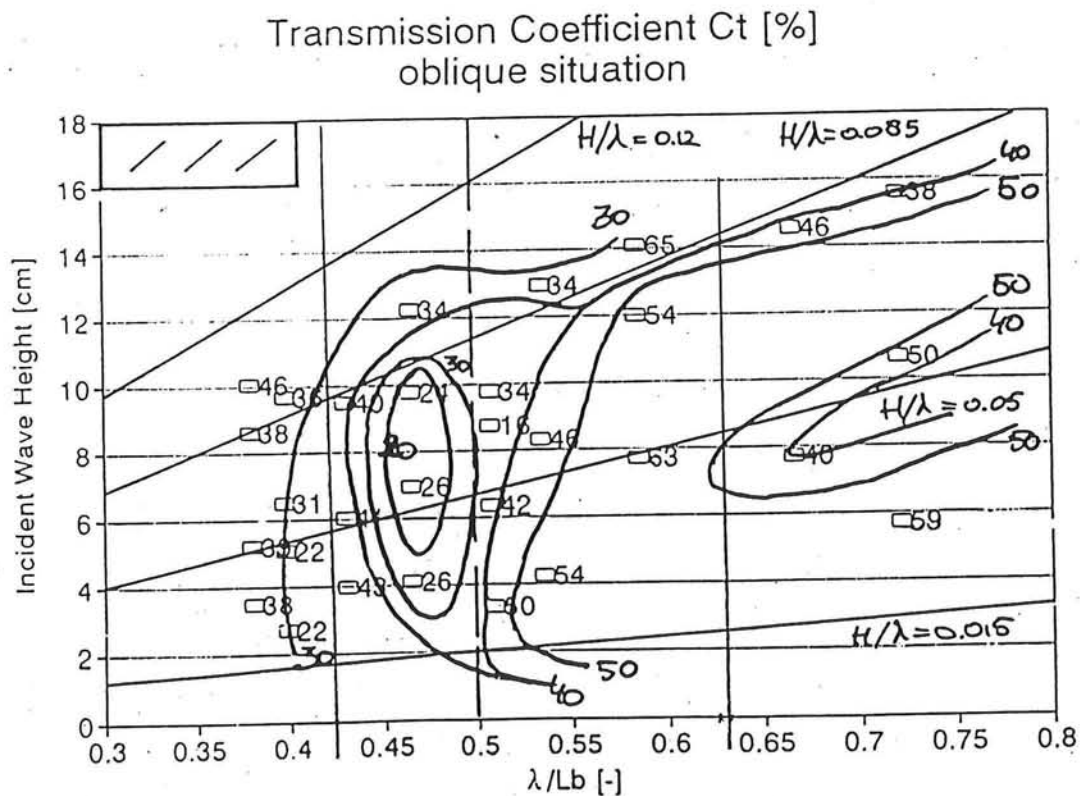
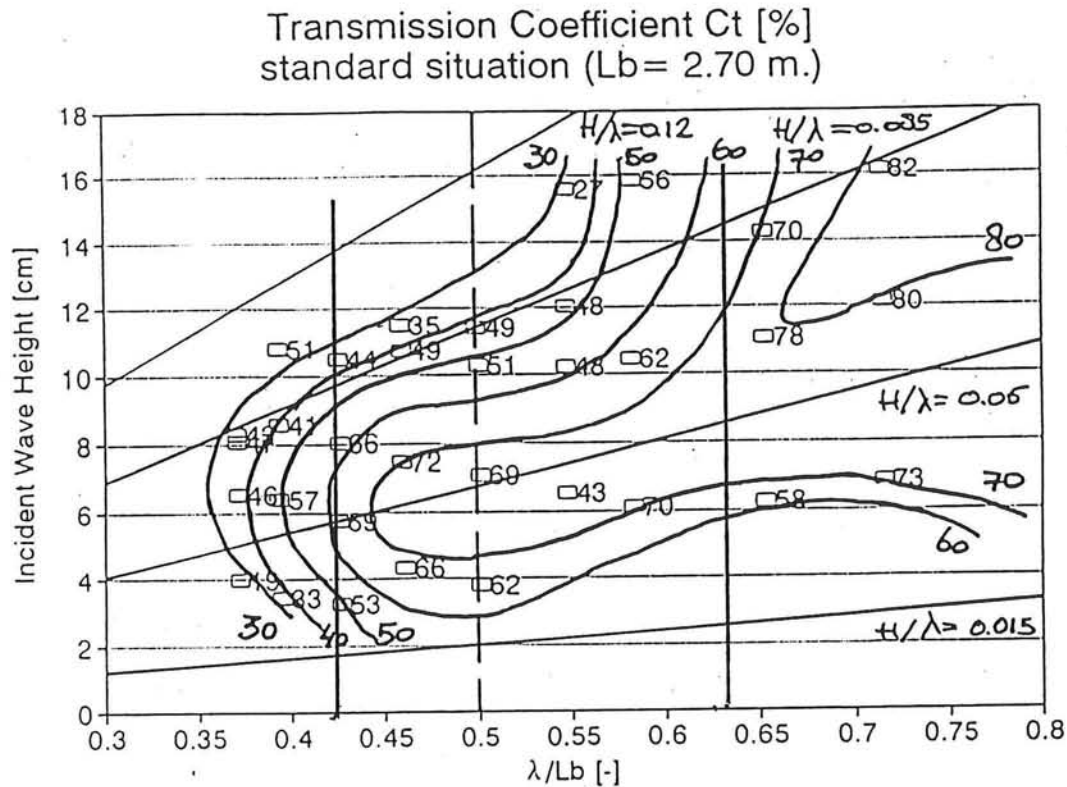
H_{sig} [m]	U_a [m/s]	F [km]	F_0 [km]	$F_{0.33}$ [km]	$F_{0.5}$ [km]	$F_{0.7}$ [km]
0.35	1	469	469	52.9	117	230
0.73	3	267	267	25.2	56.6	111
1.11	5	188	188	21	46.3	92.4
1.50	7	176	176	19.5	43.8	86.1
1.90	9.5	291	153	16.8	38.3	75
2.28	12	232	138	15.3	34.5	67.7
2.68	14	299	140	15.6	35.1	68.7
3.07	16	405	141	15.6	35.2	69
3.45	18	576	141	15.6	35.1	68.9
3.83	20	950	140	15.6	35.1	68.7

Tabel c6: Strijklengte berekening voor $KK = 030^\circ$

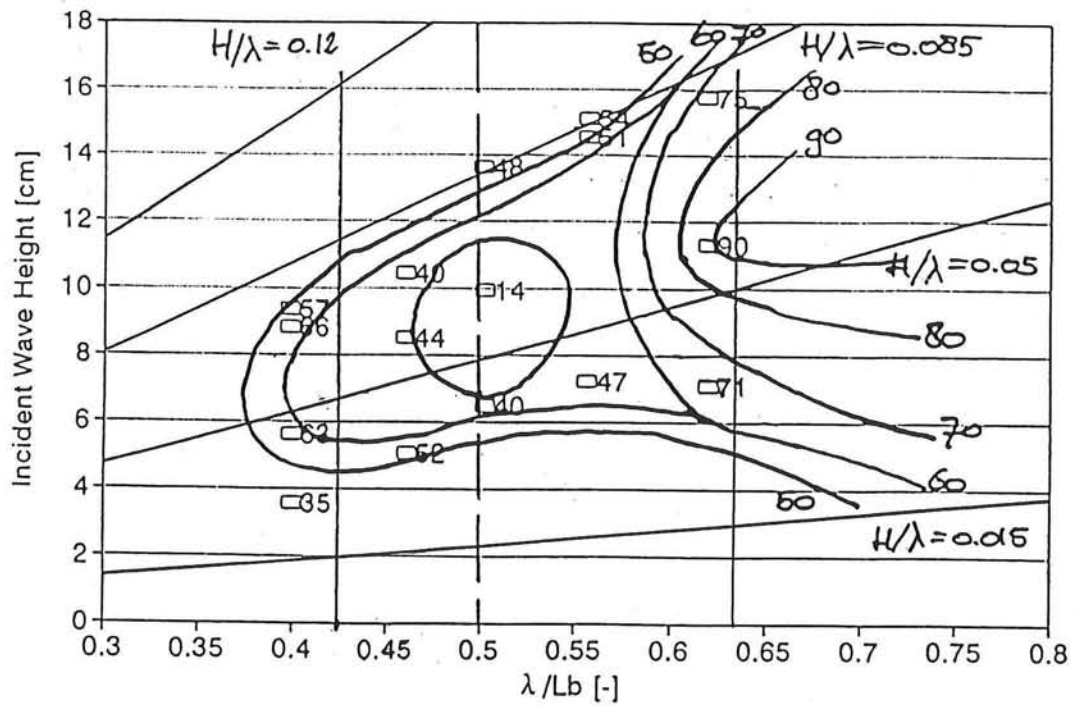
H_{sig} [m]	U_a [m/s]	F [km]	F_0 [km]	$F_{0.33}$ [km]	$F_{0.5}$ [km]	$F_{0.7}$ [km]
0.38	1	551	551	61.7	138	271
0.64	2.7	215	215	23.9	53.8	105
0.92	4.5	160	160	17.8	39.9	78.3
1.19	6	151	150	16.8	37.6	73.7
1.49	8	232	133	14.8	33.1	65
1.81	10	167	125	13.9	31.3	61.4
2.09	11.6	177	124	13.8	31	60.9
2.32	13	193	121.8	13.5	30.5	59.7
2.56	14.5	216	119	13.3	29.8	58.4
2.85	16	270	121	13.5	30.4	59.5

Bijlage D

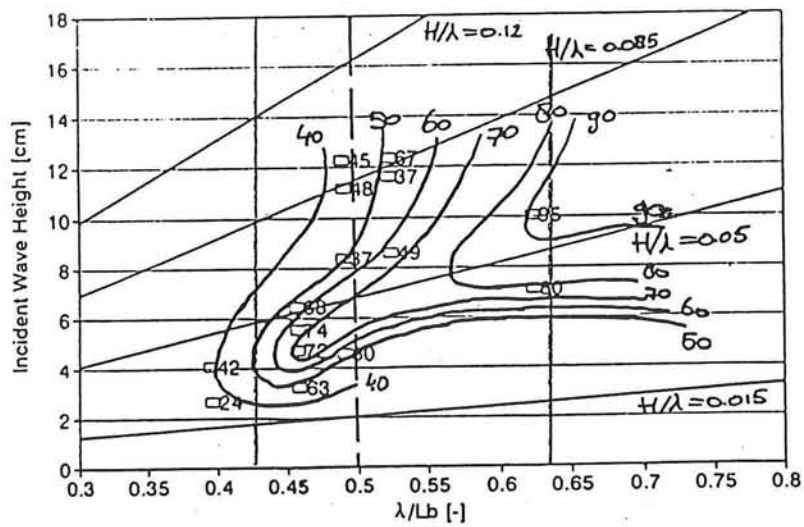
Bijlage D1: Resultaten uit de meetserie van Burgers



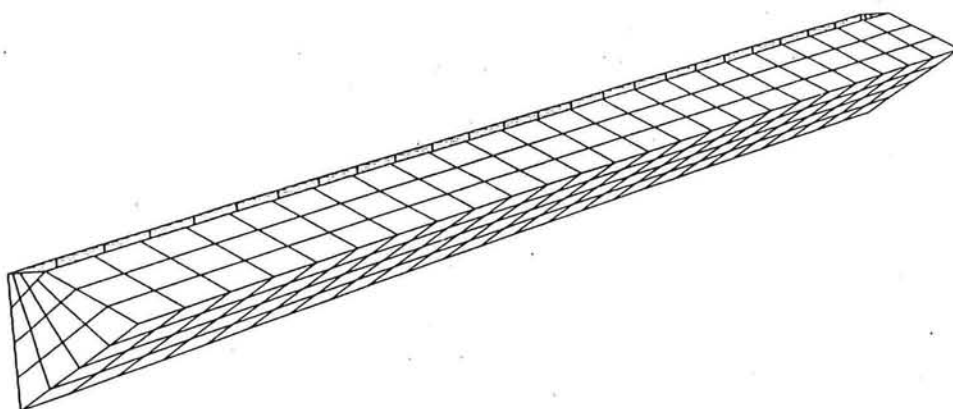
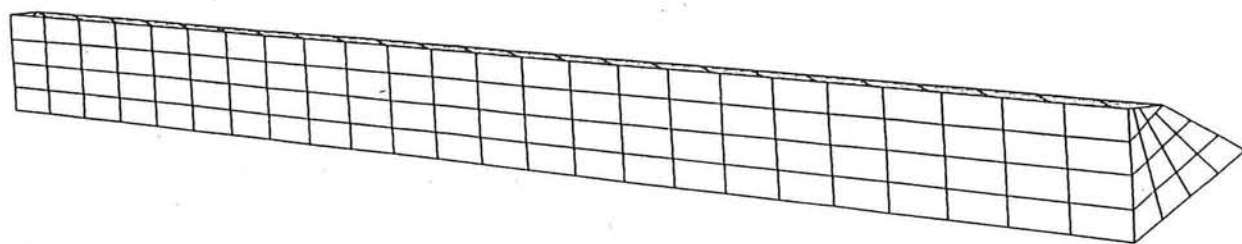
Transmission Coefficient C_t [%]
 $L_b = 3.15$ m.



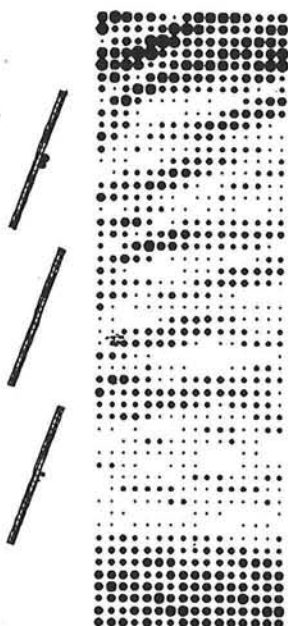
Transmission Coefficient C_t [%]
 depth = 0.47 m.



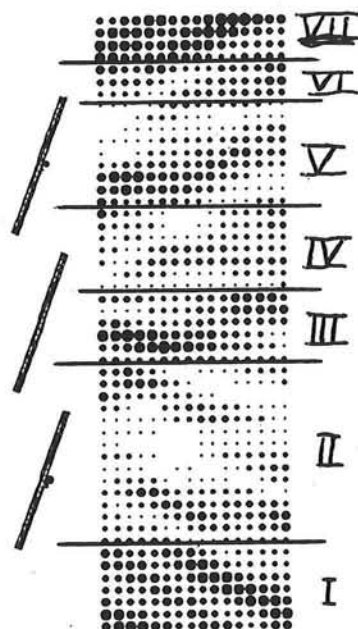
Bijlage D2: Invoer panelenmodel VA-ponton



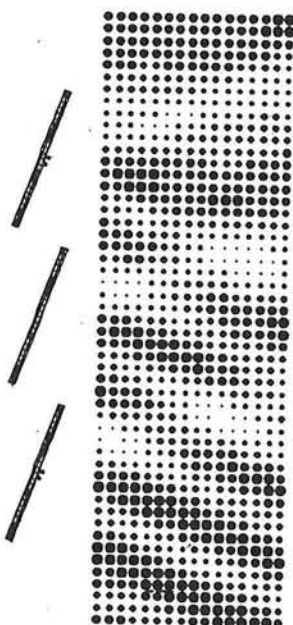
Bijlage D3: Uitkomsten Delfrac visueel



20gr 4sec

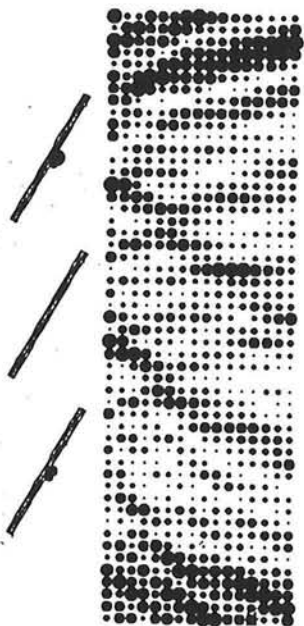


20gr 5sec



20gr 6sec

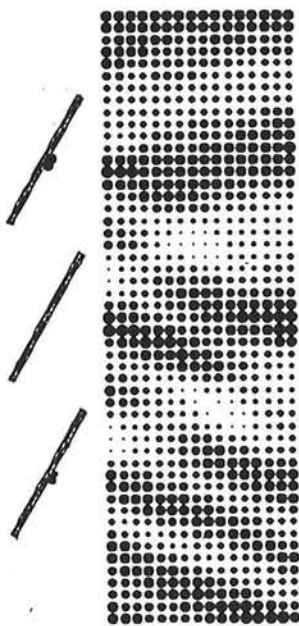




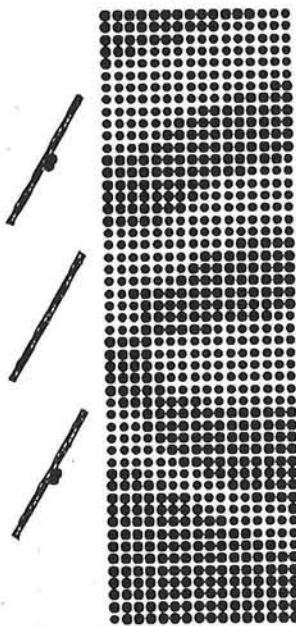
30gr 4sec



30gr 5sec

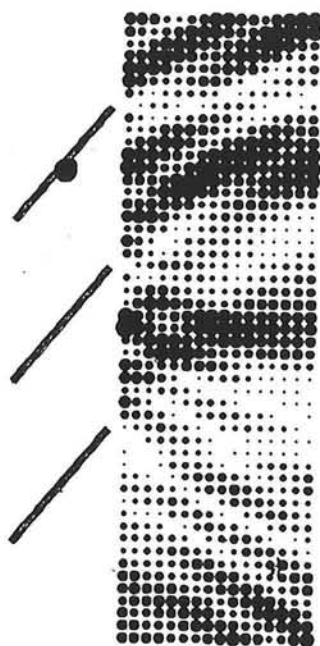


30gr 6sec

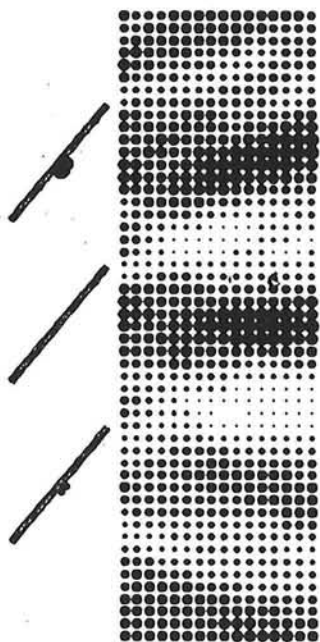


30gr 8sec

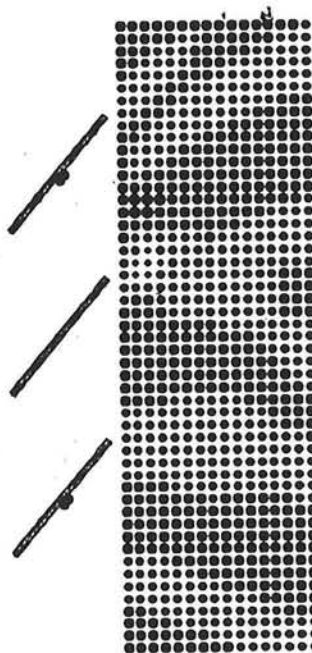




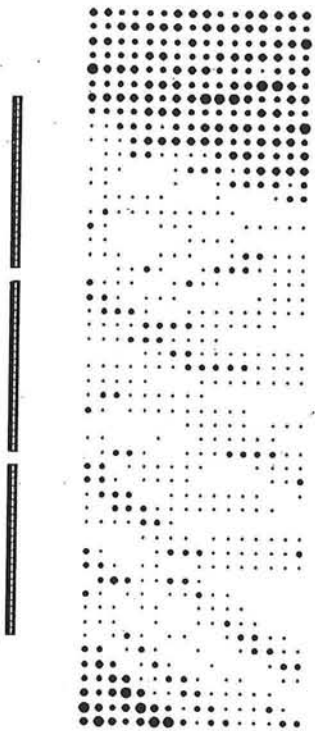
40gr 5sec



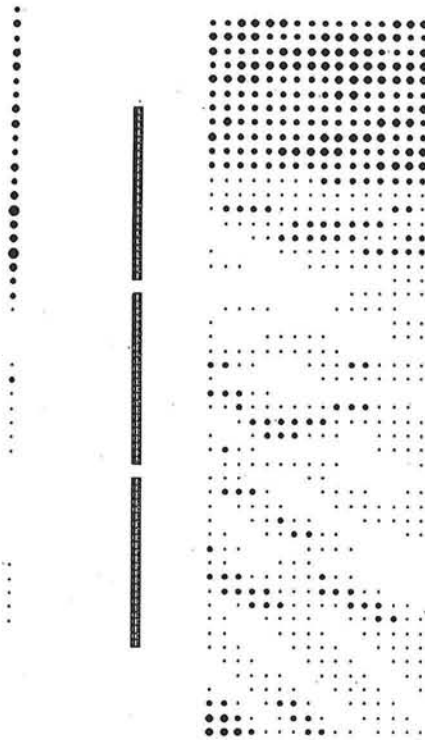
40gr 6sec



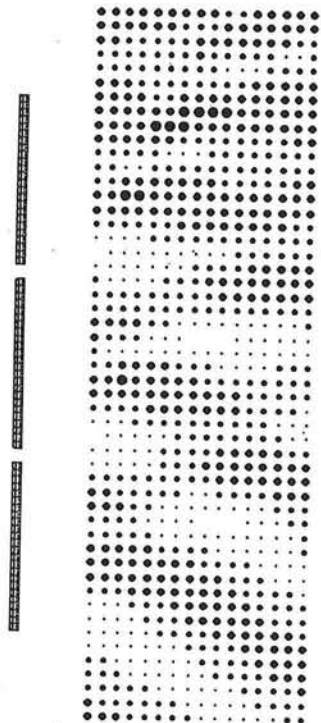
40gr 8sec



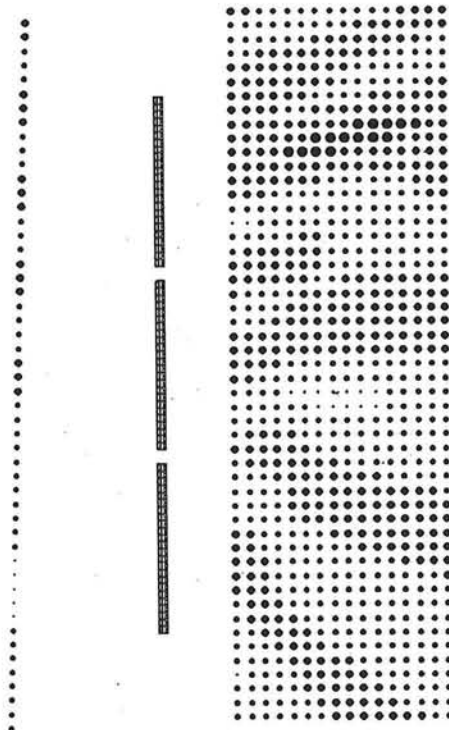
20gr 4sec



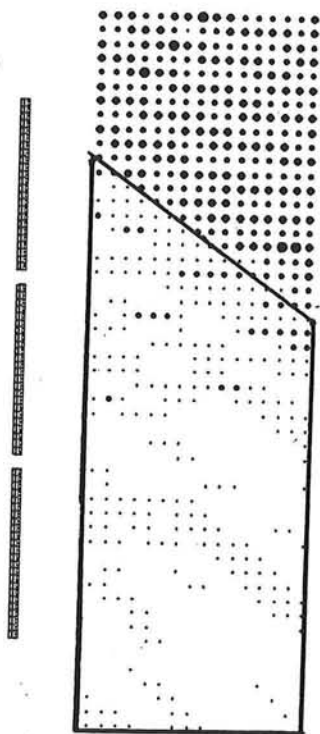
20gr 5sec



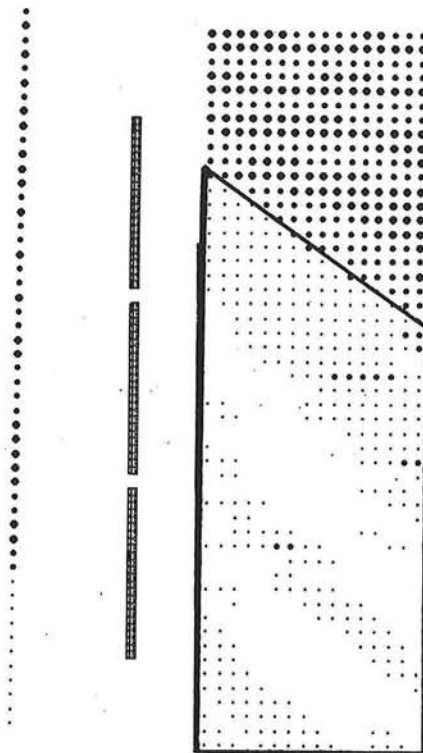
20gr 6sec



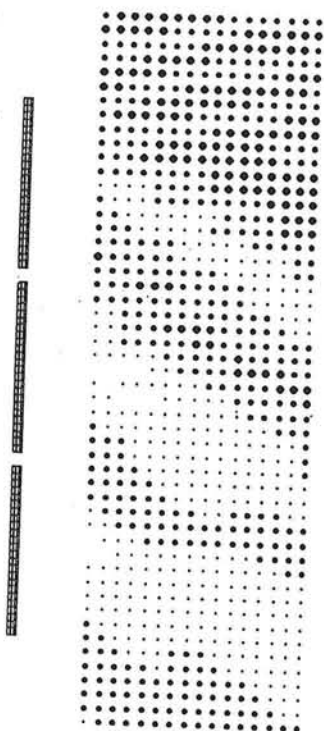
20gr 8sec



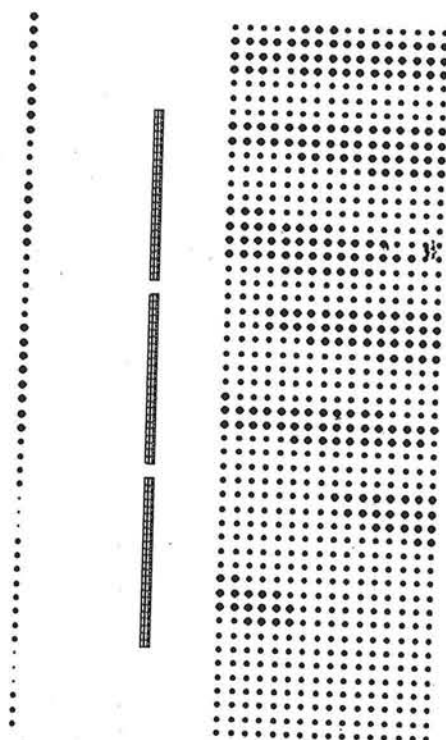
40gr 4sec



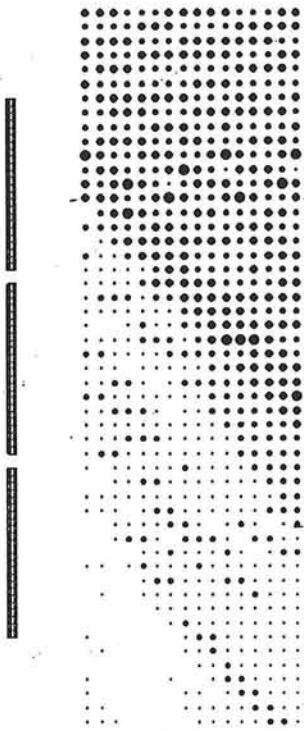
40gr 5sec



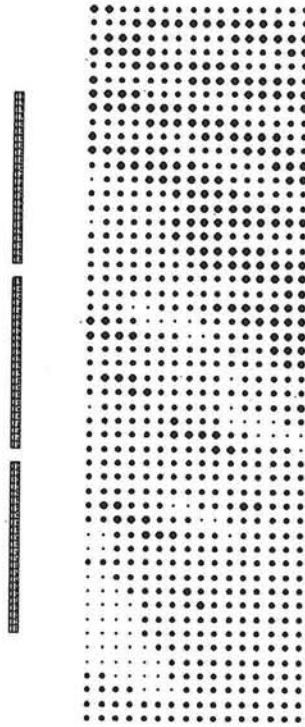
40gr 6sec



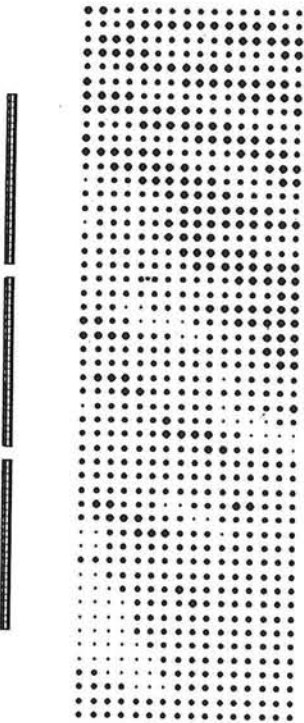
40gr 8sec



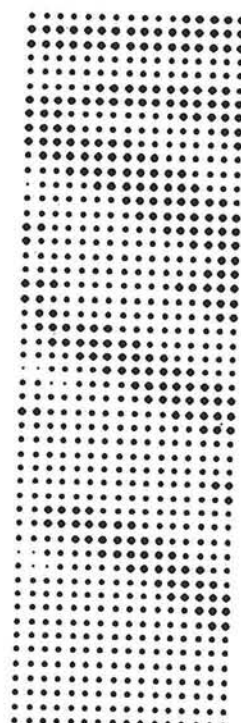
60gr 4sec



60gr 5sec



60gr 6sec

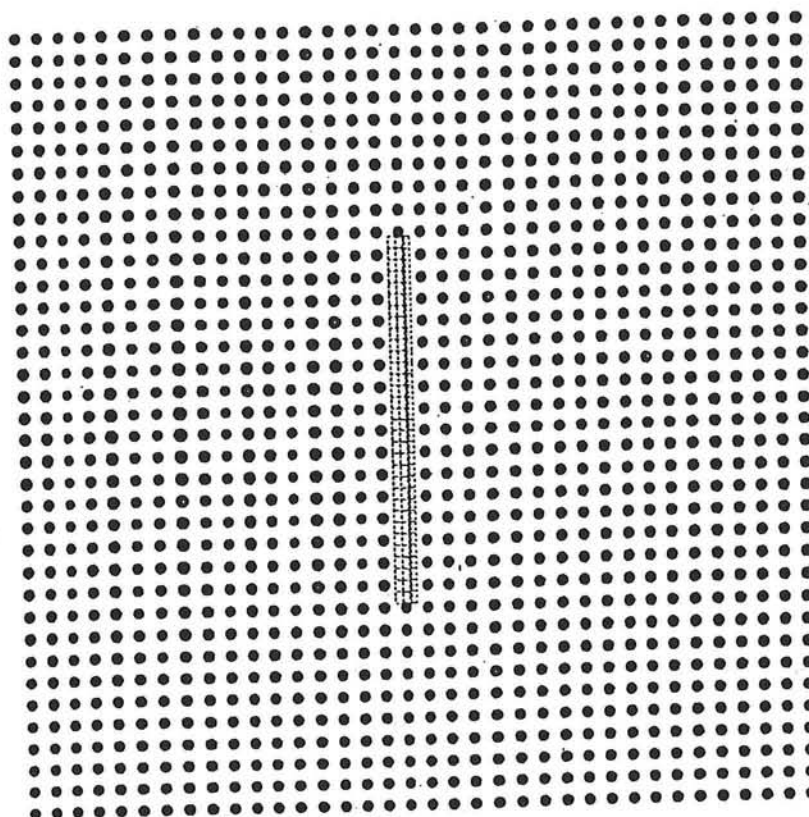


60gr 8sec

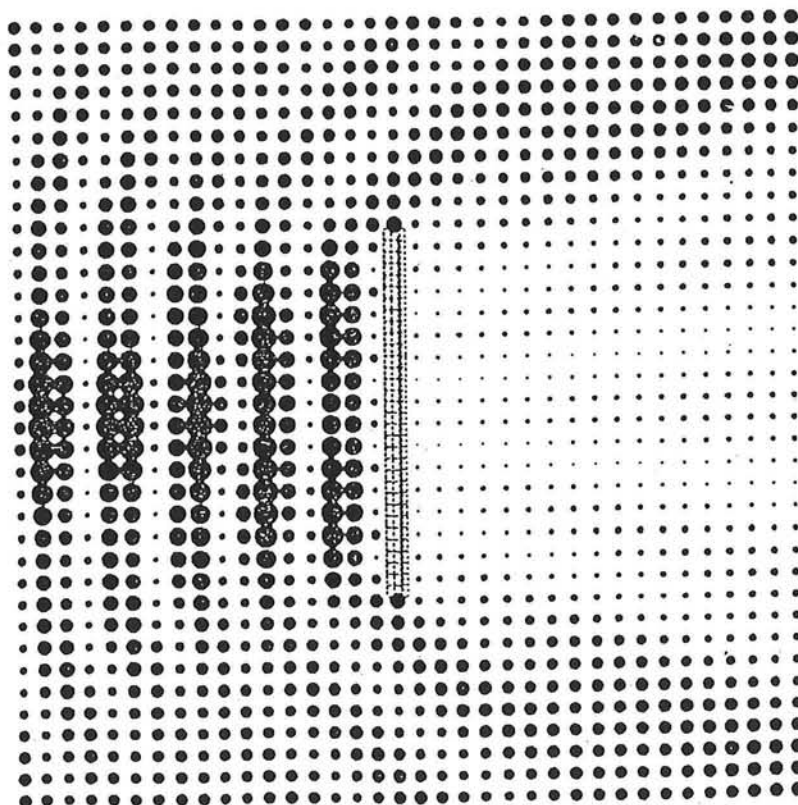


Vershil tussen vaste constructie en losdrijvend

$\omega = 1.25$
 Free Floating



$\omega = 1.25 \text{ r/s}$
Fixed



Bijlage E

Bijlage E1: Tabellen met gebruikte transmissiecoëfficiënten

φ [°], T [s]	$T = 4s$	$T = 5s$	$T = 6s$	$T = 8s$
240°	0.74	0.72	0.86	0.93
270°	0.35	0.36	0.66	0.90
300°	0.58	0.58	0.84	0.93
330°	0.58	0.58	0.84	0.93
360°	0.35	0.36	0.66	0.90
030°	0.74	0.72	0.86	0.93

Tabel e1: transmissiewaarden bij $\psi = 0^\circ$

φ [°], T [s]	$T = 4s$	$T = 5s$	$T = 6s$	$T = 8s$
240°	0.47	0.50	0.77	1
270°	0.45	0.50	0.78	1
300°	1	1	1	1
330°	1	1	1	1
360°	1	1	1	1
030°	1	1	1	1

Tabel e2: transmissiewaarden bij $\psi = 20^\circ$

φ [°], T [s]	$T = 4s$	$T = 5s$	$T = 6s$	$T = 8s$
240°	0.48	0.44	0.71	1
270°	0.60	0.55	0.80	1
300°	1	1	1	1
330°	1	1	1	1
360°	1	1	1	1
030°	1	1	1	1

Tabel e3: transmissiewaarden bij $\psi = 30^\circ$

$\varphi [^\circ], T [s]$	$T = 4s$	$T = 5s$	$T = 6s$	$T = 8s$
240°	0.54	0.54	0.76	1
270°	0.80	0.80	0.91	1
300°	1	1	1	1
330°	1	1	1	1
360°	1	1	1	1
030°	1	1	1	1

Tabel e4: transmissiewaarden bij $\psi = 40^\circ$

Appendix I: Samenvatting model dwarstransport van v.d. Kerk

Inleiding

In deze appendix wordt een samenvatting gegeven van het mathematisch model, dat v.d. Kerk [6, 19] heeft ontwikkeld om het evenwichtsprofiel van een kust te beschrijven. Het model is opgebouwd uit drie bouwstenen. Als eerste een sedimenttransportformule. Wanneer er geen transport van sediment meer optreedt in het profiel wordt aangenomen, dat het profiel zijn evenwichtshelling bereikt heeft. Voor het goed modelleren van de evenwichtshelling is een golfvoortplantings- en dissipatiemodel nodig. Golven brengen namelijk door hun asymmetrische vorm sediment naar boven in het profiel. Doordat de golven breken wekken zij een retourstroom op langs de bodem. Deze retourstroom transporteert het sediment weer terug naar zee. In de evenwichtshelling zijn beide vormen van transport met elkaar in evenwicht.

Allereerst wordt de evenwichtshelling behandeld. Daarna volgt een beschrijving van het model voor de retourstroom en het golfvoortplantings- en dissipatiemodel.

De evenwichtshelling

Het evenwichtsprofiel van v.d. Kerk betreft een dimensieloos evenwichtsprofiel. Dit heeft als voordeel, dat het model voor meerdere kusten en situaties bruikbaar is. Wanneer het dimensieloze profiel eenmaal bekend is voor een gegeven golf (met hoogte en periode) dan kan hieruit het kustprofiel berekend worden.

V.d. Kerk leidt de volgende uitdrukking af voor de evenwichtshelling $\tan\beta_e$. Deze afleiding is afkomstig van een specifiek geval van de Bailard-formule [1]. Golven vallen in dit geval loodrecht op de kust in en langtransport treedt theoretisch niet op.

$$\tan\beta_e = \frac{\langle q_{as} \rangle_{\dim} + \langle q_{un} \rangle_{\dim}}{\langle q_{sl} \rangle_{\dim} / \tan\beta_e} \quad (I-1)$$

In vergelijking B1 komen de drie vormen van transport duidelijk naar voren. Het transport t.g.v. asymmetrie van golven is q_{as} , het transport t.g.v. de retourstroom (undertow) q_{un} en het transport t.g.v. van de bodemhelling (slope) q_{sl} . De driehoekige haken $\langle \rangle$ geven aan, dat deze factoren zijn gemiddeld over de tijd, de index $\dim$ betekent dat de termen dimensieloos zijn gemaakt. De drie termen worden als volgt beschreven:

$$\begin{aligned} \langle q_{as} \rangle_{\dim} &= Fb_{\dim} \Psi_1 + Fs_{\dim} \Psi_2 \\ \langle q_{un} \rangle_{\dim} &= Fb_{\dim} \frac{3}{2} \delta_u + Fs_{\dim} \delta_u (u3^*) \\ \langle q_{sl} \rangle_{\dim} &= Fb_{\dim} (\tan\beta_e / \tan\phi) (u3^*) + Fs_{\dim} (H_{rms}/wT)(h/H_{rms}) \frac{(2\pi)^2}{k_0 h} \left(\frac{u_{rms}}{gT} \right) \varepsilon_s \tan\beta_e (u5^*) \end{aligned} \quad (I-2)$$

Hierin zijn:

- β_e : Hoek van de evenwichtshelling [°]
- ϕ : Interne wrijvingshoek van het sediment [°]
- H_{rms} : Locale root-mean-square golfhoogte [m]
- w : Valsnelheid van het sediment [m/s]
- T : Golfperiode [s]

- h : diepte [m]
 k_0 : golfgetal op diep water [m^{-1}]
 g : Zwaartekrachtversnelling [m/s^2]
 ε_s : efficiëntiefactor suspensietransport [-]

De termen Fb_{dim} en Fs_{dim} zijn als volgt bepaald:

$$\begin{aligned}
 Fb_{dim} &= \frac{c_f \varepsilon_b}{\tan(\phi) \Delta g (1-n)} \left(\frac{u_{rms}}{gT} \right)^3 \\
 Fs_{dim} &= \frac{c_f \varepsilon_s}{\Delta (1-n)} \left(\frac{H_{rms}}{wT} \right) \left(\frac{h}{H_{rms}} \right) \frac{(2\pi)^2}{k_0 h} \left(\frac{u_{rms}}{gT} \right)^4
 \end{aligned} \tag{I-3}$$

Hierin zijn:

- ε_b : efficiëntiefactor bodemtransport
 c_f : wrijvingscoëfficiënt, gelijk aan $0,5 f_w$
 f_w : wrijvingsparameter volgens Swart [26]
 Δ : $= (\rho_s - \rho)/\rho$, waarin ρ_s de dichtheid van het sediment is en ρ van water.

De overige termen die in vergelijking I-2 voorkomen zijn periode gemiddelde hogere orde termen van de snelheid u , die is opgebouwd uit $u = \underline{u} + \tilde{u}$, waarmee $\underline{u}$ de gemiddelde retourstroom bij de bodem is, en $\tilde{u}$ de veranderlijke component van de snelheid (orbitaalsnelheid). Die termen worden als volgt gedefinieerd:

$$\begin{aligned}
 \tilde{u} &= u_m \cos \omega t + u_{2m} \cos(2\omega t + \phi), \text{ met } u_m > u_{2m} \\
 \delta_u &= \underline{u} / \tilde{u}_m \\
 \psi_1 &= \langle \tilde{u}^3 \rangle / u_m^3 \\
 \psi_2 &= \langle |u|^3 \tilde{u} \rangle / u_m^4 \Rightarrow u_m^4 \psi_2 = \langle |\tilde{u}|^3 \tilde{u} \rangle + 3\underline{u} \langle |\tilde{u}|^3 \rangle \\
 (u3^*) &= \langle |u|^3 \rangle / u_m^3 \Rightarrow u_m^3 (u3^*) = \langle |\tilde{u}|^3 \rangle + 3\underline{u} \langle |\tilde{u}|^3 \rangle \\
 (u5^*) &= \langle |u|^5 \rangle / u_m^5 \Rightarrow u_m^5 (u5^*) = \langle |\tilde{u}|^5 \rangle + 5\underline{u} \langle |\tilde{u}|^3 \tilde{u} \rangle
 \end{aligned}$$

de termen ψ_2 , $(u3^*)$, $(u5^*)$ zijn door Stive [23] (zie ook Bowen [10]) herschreven, om ze gemakkelijker te benaderen. Hierbij zijn de hogere orde termen van $\underline{u}$ verwaarloosd t.o.v die van $\tilde{u}$. V.d. Kerk leidt dan voor deze termen het volgende af.

$$\begin{aligned}
 \psi_1 &= \frac{3u_{2m}}{4u_m} \cos \phi \\
 \psi_2 &= \frac{16u_{2m}}{5u_m} \cos \phi + \frac{4,8\underline{u}}{u_m^4} \langle \tilde{u}^2 \rangle^{3/2} \\
 (u3^*) &= \frac{1}{u_m^3} \left\{ 1,60 \langle \tilde{u}^2 \rangle^{3/2} + 3\underline{u} \langle |\tilde{u}| \tilde{u} \rangle \right\} \\
 (u5^*) &= \frac{1}{u_m^5} \left\{ 6,38 \langle \tilde{u}^2 \rangle^{5/2} + 16\underline{u} u_m^3 u_{2m} \cos \phi \right\}
 \end{aligned}$$

Om m.b.v van vergelijking I-2 de evenwichtshelling $\tan \beta_e$ te kunnen bepalen resten er nog 3 onbekenden. Dit zijn u_m , u_{rms} , en $\underline{u}$. Op $\underline{u}$, de retourstroom, wordt in de volgende paragraaf ingegaan. Voor u_m wordt de waarde van u_{rms} genomen en deze zijn derhalve identiek. De term u_{rms} , wordt als volgt gedefinieerd: u_{rms} is gelijk aan de variantie s_u van de Gaussische verdeling

voor de snelheden van $\tilde{u}$. Deze variantie kan bepaald worden met de lineaire theorie. Zie vergelijking I-4.

$$s_u = u_{rms} = \pi H_{rms} / (T \sinh kh) \quad (I-4)$$

Door Guza en Thornton [16] wordt de term $\langle \tilde{u}^2 \rangle$ als volgt berekend

$$\langle \tilde{u}^2 \rangle = s_u^2 \quad (I-5)$$

Dit kan dan weer herleidt worden tot een term van u_{rms} .

Het hierboven beschreven model van de evenwichtshelling kan met vergelijking I-6 worden samengevat.

$$\tan \beta_e = f(kh, s_0, H_{rms} / wT) \quad (I-6)$$

Hierin is:

- k : golfgetal [-]
 s_0 : golfsteilheid op diep water [-]

Wanneer s_0 en T bekend zijn dan kan de evenwichtshelling $\tan \beta_e$ als functie van $k_0 h$ berekend worden. Zie vergelijking I-7 waarin $k_0 x_e$ de dimensieloze x-coördinaat is.

$$\tan \beta_e = \frac{\partial k_0 h}{\partial k_0 x_e} \quad (I-7)$$

Door integratie van de reciproke waarde van $\tan \beta_e$ over de dimensieloze hoogte $k_0 z$ wordt het evenwichtsprofiel berekend.

$$k_0 x_e = \int_0^{k_0 h} \frac{1}{\tan \beta_e} d(k_0 z) \quad (I-8)$$

Tot nu toe is alleen beschreven hoe m.b.v. de sedimenttransportformule van Bailard het evenwichtsprofiel kan worden bepaald. Voordat vergelijking I-6 met succes kan worden gebruikt is het nodig om de retourstroom te kennen, die van belang is voor de evenwichtshelling $\tan \beta_e$. In de volgende paragraaf wordt beschreven hoe door v.d. Kerk de retourstroom en het hierbij behorende golfvoortplantings- en -dissipatiemodel in zijn model verwerkt.

De gemiddelde retourstroom of 'undertow'

Een van de onbekenden, die nodig is om de evenwichtshelling te kunnen bepalen is de retourstroom. De retourstroom vertegenwoordigt een evenwicht tussen drie krachten. Deze krachten worden weergegeven in een horizontale impulsbalans. Zie vergelijking I-9.

$$\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \rho g (h_0 + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \tau_b = 0 \quad (I-9)$$

Hier is S_{xx} de radiationstress, deze is als volgt gedefinieerd, S_{xx} is een periode-gemiddelde waarde:

$$S_{xx} = \int_{-h}^{\eta+\zeta} (\rho u^2 + p_D) dz - \frac{1}{2} \rho g \eta^2 \quad (I-10)$$

Hierin staat p_D voor de dynamische druk $p_D = \rho g(z - \zeta) + p$, met:

- p : hydrostatische druk [kg/m³]
- ρ : soortelijke massa van zeewater [kg/m³]
- g : zwaartekracht versnelling [m/s²]
- ζ : set-up [m]
- τ_b : de gemiddelde bodemschuifspanning [Nm⁻²]
- h : plaatselijke diepte [m]
- h_0 : diepte bij ongestoorde waterdiepte [m]
- z : verticale coördinaat (positief omhoog gerekend) [m]
- η : uitwijking van het wateroppervlak door de golfbeweging [m]

Om tot de uiteindelijke berekening van de retourstroom te komen wordt de beschouwde diepte opgedeeld in drie lagen (Stive en de Vriend [24]). De bovenste laag bevindt zich tussen de golftoppen en -dalen. Daarna komt een middenlaag en tot slot een bodemgrenslaag. Door op het niveau van de golfdalen η_{tr} een schuifspanning $\tau(\eta_{tr})$ aan te nemen wordt de invloed van de bovenste laag in rekening gebracht. Om de randen van de midden- en onderlaag op elkaar aan te laten sluiten wordt voor deze overgang gesteld, dat de snelheden even groot zijn: $u_{\text{bodem}} = u_{\text{midden}}$. Nu rest er nog een onderrandvoorwaarde voor de onderste laag. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen brekende en niet-brekende golven. Voor brekende golven wordt als randvoorwaarde aangenomen, dat de periode-gemiddelde schuifspanning aan de bodem τ_b nul is. Voor niet-brekende golven wordt als randvoorwaarde genomen de snelheid over de bodem volgens de 'conduction solution' van Longuet-Higgins [20]. Voor de uiteindelijke retourstroom $\underline{u}$ wordt een combinatie van beide gebruikt. Wanneer Q_b de fractie van brekende golven is wordt gesteld:

$$\underline{u} = Q_b u_e + (1 - Q_b) u_s \quad (I-11)$$

In vergelijking I-11 is u_e de retourstroom, die opgewekt wordt door brekende golven en u_s de retourstroom, die wordt opgewekt door niet-brekende golven.

Zonder op de afleiding in te gaan worden nu de vergelijking in dimensieloze vorm gegeven voor u_e en u_s .

$$\begin{aligned} \frac{u_e}{gT} = & A \left(kh \frac{\partial(R/\rho gh)}{\partial kh} D + (R/\rho gh) \right) \frac{1}{(1 + 0,375 \gamma^2)} \tan \beta_e + \\ & B \left(kh \frac{\partial(H_{rms}/h)}{\partial kh} D + (H_{rms}/h) \right) \frac{1}{(1 + 0,375 \gamma^2)} \tan \beta_e + C \end{aligned} \quad (I-12)$$

Met

$$A = \frac{1}{6\pi} (d_t/h)^2 \frac{kh}{10^{-2}}$$

$$B = \frac{1}{2\pi} (d_t/h) \frac{kh}{10^{-2}} \left(\frac{1}{16} + \frac{0,9}{2\pi^* kh} \right) \left(\frac{H_{rms}}{h} \right)$$

$$C = \frac{-1}{(20\pi)} (kh \tanh kh)^{1/2} \left(\frac{H_{rms}}{h} \right)$$

$$D = 1 - \frac{\partial \ln(\tanh kh)}{\partial \ln(kh \tanh kh)}$$

Waarin d_t de afstand tussen de bodemgrenslaag en de golfdalen is en γ de gemiddelde verhouding tussen H_{rms} en h is. (γ heeft een waarde van circa 0,39)

Wanneer vergelijking I-12 nader beschouwd wordt zijn twee termen nog niet besproken. Dit zijn de dimensieloze krachtterm $R/\rho gh$ en de dimensieloze golfhoogte H_{rms}/h . De dimensieloze golfhoogte wordt in de volgende paragraaf behandeld. De krachtterm R wordt veroorzaakt door het drukverschil t.g.v. de radiationstress en de set-up. Dit is de resulterende kracht, die gemiddeld over een verticale kolom vloeistof werkt. Voor de dimensieloze krachtterm kan geschreven worden:

$$\frac{R}{\rho gh} = \left(\frac{H_{rms}}{h} \right)^2 \frac{kh}{4 \sinh(2kh)} + \frac{\zeta}{h} \quad (I-13)$$

De bijdrage van de dimensieloze set-up ζ/h aan de dimensieloze krachtterm wordt berekend m.b.v. vergelijking I-9, waarbij de bodemschuifspanning τ_b verwaarloosd wordt.

Voor de retourstroom voor niet-brekende golven u_s , wordt vergelijking I-14, die afgeleid is door Stive en de Vriend [24], gebruikt.

$$\frac{u_s}{gT} = 2\pi \left(\frac{u_{rms}}{gT} \right)^2 \frac{\tanh kh}{4} \left[3 + e^{-2} - 2e^{-1} (3 \cos(Z_b)) \right] \quad (I-14)$$

Hierin is Z_b de dimensieloze verticale coördinaat van de bodemgrenslaag. Z_b is dimensieloos gemaakt door hem te delen door de dikte van de grenslaag. De waarde voor u_s wordt berekend voor $Z_b = 1$, dit is de bovenkant van de grenslaag.

Om de evenwichtshelling te kunnen berekenen ontbreekt nog een model dat de verhouding H_{rms}/h beschrijft. Hier wordt in de volgende paragraaf op ingegaan.

Golfvoortplantings- en dissipatiemodel

In deze paragraaf wordt een mathematisch model beschreven dat de golfhoogte als functie van de diepte en golfsteilheid uitrekent.

$$\frac{H_{rms}}{h} = f(kh, s_0) \quad (I-15)$$

Hierin is voor de golfhoogte H_{rms} gekozen, daar het onregelmatige golven betreft. De golfhoogte is dimensieloos gemaakt door hem te delen door de diepte h . De diepte zelf is dimensieloos gemaakt door deze te vermenigvuldigen met het golfgetal k . Verder is de golf nog afhankelijk van de golfsteilheid op diep water s_0 , die van zich zelf al dimensieloos is. De term kh is tot $k_0 h$ te herleiden volgens vergelijking I-16

$$\frac{k_0 h}{kh} = \frac{2\pi h/L_0}{2\pi h/L} = \frac{2\pi h/L_0}{2\pi h/L_0 \tanh kh} \Rightarrow k_0 h = kh \tanh kh \quad (I-16)$$

Het model is gebaseerd op het Battjes-Janssen model [9]. In deze paragraaf worden de belangrijkste vergelijkingen gegeven en wordt aangestipt waar het gebruikte model afwijkt van het BJ-model. Voor de afleiding wordt verwezen naar [9] en van de Kerk [6, 19].

In het BJ-model wordt de golfhoogte H_{rms} berekend als functie van, de golfhoogte op diep water H_0 , de golfperiode T , de lokale waterdiepte h en de horizontale afstand x . Om de golfhoogte H_{rms} op een bepaalde plaats te weten, wordt bij bekende bodemligging een integratie over x uitgevoerd. Bij het uitrekenen van een evenwichtsprofiel is de bodemligging h als functie van x juist onbekend. Het blijkt, dat het niet mogelijk is om voor x een expliciete relatie te vinden, zodat deze uit het BJ-model geëlimineerd kan worden. Daarom gebruikt v.d. Kerk het model, dat Battjes in zijn proefschrift [8] beschrijft.

Voor vergelijking I-15 wordt gevonden:

$$\left(\frac{H_{rms}}{h}\right)^2 = (1 - Q_b) \frac{s_0^2 (2\pi)^2}{(kh \tanh(kh))^2 2n \tanh(kh)} \quad (I-17)$$

Hierin is Q_b de fractie van de golven die breken. Dit wordt weergegeven in vergelijking I-18:

$$Q_b = \exp\left(-\frac{(H_m/h)^2 (kh \tanh(kh))^2 2n \tanh(kh)}{s_0^2 (2\pi)^2}\right) \quad (I-18)$$

De factor n wordt gedefinieerd als:

$$n = \left(0,5 + \frac{kh}{\sinh(2kh)}\right) \quad (I-19)$$

Op het moment, dat golven de brekerhoogte H_{br} bereiken wordt de kansverdeling voor brekende golven afgekapt.

Het verschil met [8] zit in het brekingscriterium voor brekende golven (H_m / h) in vergelijking 4.18. In [8] wordt de hoogte van de brekende golf bepaald met vergelijking I-20:

$$H_m = \frac{0,88}{k_p \tanh(\gamma k_p h / 0,88)} \quad (I-20)$$

waarin γ gelijk is aan:

$$\gamma = 0,5 + 0,4 \tanh(33s_0) \quad (I-21)$$

Als aanpassing op [8] wordt nu het brekingscriterium anders gekozen, namelijk dat geldt:

$$H_b/h = 0,48 \quad (I-22)$$

Deze aanpassing is nodig, omdat het golfvoortplantings- en dissipatie model van Battjes [8] de dissipatie van golfenergie systematisch onderschat. Met het brekingscriterium uit vergelijking I-22 komt er meer dissipatie in het model voor. Een nadeel wat dit aangepast BJ-model met zich meeneemt, is dat golven voor en achter een brandingsrug bij dezelfde waterdiepte, dezelfde

golfhoogte hebben. Dit is in strijd met de fysica. Daarom geldt het hierboven beschreven model voor het evenwichtsprofiel slechts tot aan de eerste brandingsrug.

Appendix II: Berekeningsmethode Delfrac

Inleiding

In deze bijlage wordt een samenvatting gegeven van de berekeningswijze van het golfdiffractiemodel Delfrac. Dit model is ontwikkeld aan de faculteit der Maritieme Techniek van de T.U. Delft. Het model is bedoeld om de krachten van golven op een drijvend lichaam, bijv. een schip, uit te rekenen. Het programma is echter ook in staat om de golfbeweging rondom zo'n constructie te beschrijven. Door deze eigenschap is het ook geschikt om de mate van golftransmissie van een golfbreker te bepalen. Voor een uitgebreide beschrijving van de berekeningswijze van Delfrac wordt verwezen naar Pinkster [21].

In eerste instantie is Delfrac geschreven voor een enkel schip. Later is de toepassing uitgebreid, zodat i.p.v. één schip er meerdere ingevoerd kunnen worden. Dit is de multi body-toepassing. Nu kan de invloed van naastgelegen schepen op de golfbeweging meegenomen worden in de berekening. Dit is in dit afstudeeronderwerp van belang, aangezien er meerdere VA-pontons naast elkaar komen te liggen. Ook in de offshore kan dit van belang zijn, omdat hier regelmatig acties tussen schepen plaatsvinden in omstandigheden met golven. Als voorbeeld kan hierbij gedacht worden aan het overslaan van lading tussen twee schepen op open zee.

Beschrijving van de theorie

Aannames:

- Het schip wordt verondersteld als een star lichaam, dat sinusvormig oscillerend beweegt om zijn evenwichtsstand. Deze evenwichtsstand treedt op als het schip in rust is.
- Zowel de amplitudes van de scheepsbewegingen als van de golven worden verondersteld klein te zijn.
- Het water wordt verondersteld zich als een ideale vloeistof te gedragen en vrij van rotatie te zijn.
- Een rechtsdraaiend plaatsvast assenstelsel $O-X_1-X_2-X_3$ is gedefinieerd, waarbij de oorsprong zich in het massacentrum van het schip bevindt. De as $O-X_1$ staat in de lengte richting van het schip. De as $O-X_3$ staat verticaal.

Een schip kan zich bewegen in zes vrijheidsgraden bewegen. Dit zijn de translaties in de richting van de assen x_1 , x_2 en x_3 (surge, sway en heave) en rotatie om deze drie assen x_4 , x_5 en x_6 (roll, pitch en yaw). Wanneer er dus M schepen worden ingevoerd dan geldt voor de bewegingsvergelijking van het m -schip in een j -de vrijheidsgraad:

$$x_{mj}(t) = \bar{x}_{mj} \exp(-i\omega t) \quad (II-1)$$

Hierin is $\bar{x}_{mj}$, met overstreping, de complexe amplitude van de beweging is en ω de hoekfrequentie van een golf.

Het vrije oppervlak op grote afstand van het schip wordt gedefinieerd volgens vergelijking d2:

$$\zeta(x_1, x_2, t) = \zeta_a \exp(ik(x_1 \cos \alpha + x_2 \sin \alpha) - i\omega t) \quad (II-2)$$

Hierin is:

ζ_a : De amplitude van de golf

k : het golfgetal
 α : de hoek van inval van de golf op het schip

De waterbewegingen worden beschreven met de potentiaal Φ :

$$\Phi(x_1, x_2, x_3, t) = \phi(x_1, x_2, x_3) \exp(-i\omega t) \quad (II-3)$$

De complexe potentiaal ϕ kan bepaald worden uit de bijdragen van de scheepsbewegingen in alle vrijheidsgraden ($\phi_1, \dots, \phi_6$) en de bijdragen van de ongestoorde golven ϕ_0 en de golven door diffractie ϕ_d .

$$\phi = -i\omega \zeta_a (\phi_0 + \phi_d) - i\omega \sum_{j=1}^6 \phi_j x_j \quad (II-3)$$

Voor de potentiaal, die veroorzaakt wordt door meerdere (M) schepen verandert vgl. II-3 in:

$$\phi = -i\omega \left\{ (\phi_0 + \phi_d) \zeta_a + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^6 \phi_{mj} \zeta_{mj} \right\} \quad (II-4)$$

De snelheidspotentiaal van de ongestoorde golf wordt beschreven met:

$$\phi_0 = \frac{g}{\omega^2} \frac{\cosh k(x_3 + h)}{\cosh kh} \exp(ik(x_1 \cos \alpha + x_2 \sin \alpha)) \quad (II-5)$$

Hierin is:

h : waterdiepte
 α : hoek van inval van de golven

De andere potentialen zijn oplossingen van de Laplacevergelijking, die voldoen aan de voorwaarde, die gesteld is aan het vrije wateroppervlak en de randvoorwaarden voor de bodem en het scheepsoppervlak.

De vloeistofdruk kan beschreven worden met de wet van Bernoulli:

$$p(x_1, x_2, x_3, t) = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = p(x_1, x_2, x_3) \exp(-i\omega t)$$

Waarin:

(II-6 en II-7)

$$p(x_1, x_2, x_3) = -\rho \omega^2 \left\{ (\phi_0 + \phi_d) \zeta_a + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^6 \phi_{mj} \zeta_{mj} \right\}$$

De bewegingsvergelijkingen van het schip n in de k -de vrijheidsgraad, inclusief de effecten van de hydrodynamische interacties met schip m in de j -de vrijheidsgraad, worden in vergelijking II-8:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^6 \left\{ -\omega^2 (M_{nkmj} + a_{nkmj}) - i\omega b_{nkmj} + c_{nkmj} \right\} x_{mj} = X_{nk} \quad (II-8)$$

Hierin is:

X_{nk} : Golfkracht op het n -schip in de k -vrijheidsgraad
 M_{nkmj} : Inertiamatrix van het n -schip voor koppeling van de inertia bij acceleratie in de j -de vrijheidsgraad.
 $M_{nkmj} : = 0$ wanneer $n \neq m$

- b_{nkmj} : dempingsmatrix van de kracht op n -schip in de k -de vrijheidsgraad, die veroorzaakt wordt door de snelheid van het m -schip in de j -de vrijheidsgraad.
- c_{nkmj} : veerconstante matrix van de kracht op n -schip in de k -de vrijheidsgraad, die veroorzaakt wordt door de snelheid van het m -schip in de j -de vrijheidsgraad.

De golfkracht X_{nk} wordt bepaald met vergelijking II-9:

$$X_{nk} = - \iint_{S_n} p n_{nk} dS_n = - \rho \omega^2 \iint_{S_n} (\phi_0 + \phi_7) n_{nk} dS_n \quad (II-9)$$

Hierin is S_n het gemiddelde natte oppervlak van het n -schip. De term n_{nk} is de cosinus van de richting van een oppervlakte-elementje dS_n in de k -de vrijheidsgraad.

De toegevoegde massa en demping coëfficiënten zijn als volgt gedefinieerd:

$$\begin{aligned} a_{nkmj} &= -\Re \left[\rho \iint_{S_n} \phi_{mj} n_{nk} dS_n \right] \\ b_{nkmj} &= -\Im \left[\rho \omega \iint_{S_n} \phi_{mj} n_{nk} dS_n \right] \end{aligned} \quad (II-10)$$

De bijdragen van de schepen op de snelheidspotentiaal zijn afkomstig van een serie puntbronnen die continu verspreid is over het scheepsoppervlak. De snelheidspotentiaal op een punt (x_1, x_2, x_3) , die veroorzaakt wordt door een lichaam n van de j -de vrijheidsgraad wordt gegeven door:

$$\phi_{nj}(x_1, x_2, x_3) = \sum_{m=1}^M \frac{1}{4\pi} \iint_{S_m} \sigma_{nj}(A_1, A_2, A_3) G(x_1, x_2, x_3, A_1, A_2, A_3) dS_m \quad (II-11)$$

Hierin is $\sigma_{nj}(A_1, A_2, A_3)$ de bronsterkte op het punt (A_1, A_2, A_3) van het schip m door de beweging in j -de vrijheidsgraad van het n -de schip. $G(\dots)$ is de zgn. Greenfunctie, de invloedsfunctie van een bron, die voldoet aan de continuïteitsvergelijking en de voorwaarden, die gesteld zijn door het golfveld, de zeebodem.

De onbekende bronsterkte σ_{nj} wordt bepaald aan de hand van de normale snelheids randvoorwaarde voor elk van de M -lichamen.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_{nj}}{\partial n} &= -\frac{1}{2} \sigma_{nj}(x_1, x_2, x_3) + \\ &\sum_{m=1}^M \frac{1}{4\pi} \iint_{S_m} \sigma_{mj}(A_1, A_2, A_3) G(x_1, x_2, x_3, A_1, A_2, A_3) dS_m \end{aligned} \quad (II-12)$$

Voor het oplossen van de diffractie potentiaal geldt:

$$\frac{\partial \phi_d}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} \quad (II-13)$$

Met het oplossen van de integraalvergelijking II-12 zijn de onbekende bronsterktes bekend. Hiermee met vergelijking II-10 en II-9 de toegevoegde massa en dempingscoëfficiënten bepaald worden. Tot slot kunnen dan de bewegingen bepaald worden met vergelijking II-8.