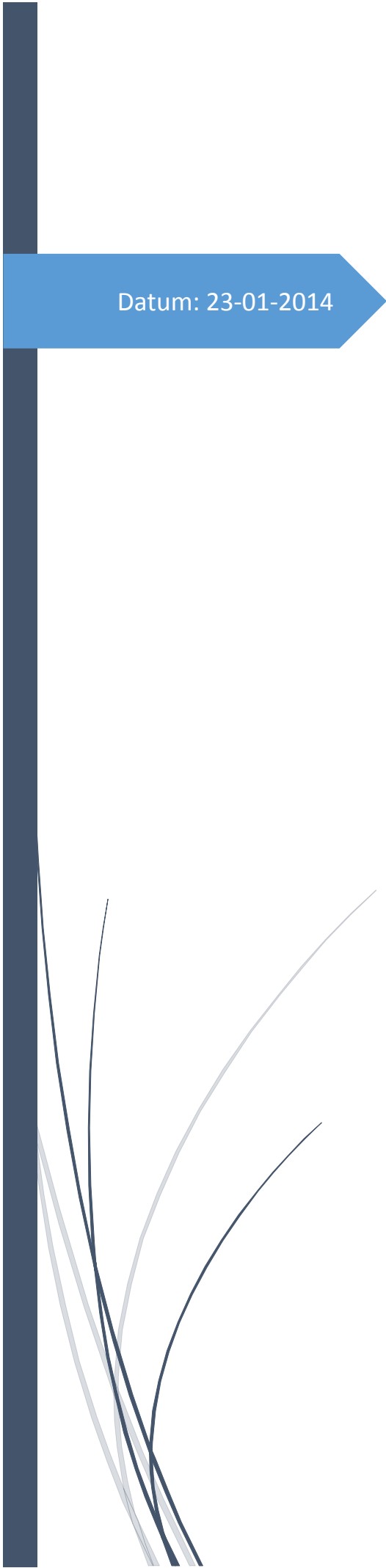


A dark blue vertical bar runs along the left edge of the page. A blue arrow-shaped banner points to the right from this bar, containing the date. At the bottom left, several thin, curved lines in dark blue and light grey sweep upwards and to the right.

Datum: 23-01-2014

Bachelor Eindopdracht Eindversie

Onderzoek naar het modelleren van
gebonden lange golven in SWASH

Menno Steensma
Universiteit Twente
Studentnummer: s0202770

Samenvatting

Dit onderzoek is gedaan voor de Bachelor Eindopdracht van Menno Steensma, student Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. De opdracht is uitgevoerd bij het bedrijf Arcadis op de locatie Zwolle binnen de marktgroep Havens en Mariene Infrastructuur. In dit rapport worden de mogelijkheden van het modelleerprogramma SWASH geanalyseerd met betrekking tot het modelleren van gebonden lange golven.

Het hoofddoel van het onderzoek is om met behulp van modelexperimenten te kijken in hoeverre het model SWASH geschikt is voor het modelleren van gebonden lange golven. Hierbij zal in worden gegaan op de onderstaande onderzoeksvragen:

1. Op welke manier kan de gebonden lange golf worden gemodelleerd in SWASH?
2. Hoe kan de gemodelleerde gebonden lange golf in het model SWASH worden vergeleken met de beschikbare theoretische kennis?
3. Wat is de invloed van de waterdiepte op het modelleren van gebonden lange golven in SWASH?
4. In hoeverre komt de gemodelleerde (gebonden) lange golf in SWASH overeen met de theoretische gebonden lange golf?
5. Welke beperkingen heeft SWASH bij het modelleren van gebonden lange golven?

Gebonden lange golven ontstaan door de interactie tussen korte golven. Wanneer twee korte golven met een verschillende periode bij elkaar komen is er sprake van een bi-chromatische golf. Onder bepaalde omstandigheden kan energie worden overgedragen van deze bi-chromatische golf naar een ontstane lange golf. Deze lange golf heeft een frequentie die gelijk is aan de verschilfrequentie van de twee korte golven. Indien deze ontstane lange golf dezelfde golflengte en snelheid heeft als de golfgroep dan is er sprake van een gebonden lange golf.

Het programma SWASH (Simulating Waves till Shore) is ontwikkeld in 2011 door de Technische Universiteit Delft. Het programma is gemaakt om de transformaties te bepalen van golven bij snel variërende condities tot aan de kust. De niet-lineaire vergelijkingen in ondiep water vormen een basis om complexe veranderingen in snel variërende condities te voorspellen. SWASH wordt nog niet veel in de praktijk gebruikt en is nog volop in ontwikkeling.

Allereerst is gewerkt aan het opzetten van een goede schematisatie, zoals het bepalen van een juiste gridresolutie, modeluitvoer en opstarttijd. Vervolgens is in dit onderzoek een bi-chromatische golf opgelegd in SWASH door twee monochromatische golven aan de inkomende rand van het domein op te leggen met $f_1 = 0.1$ Hz ($T_1 = 10$ sec) en $f_2 = 0.091$ Hz ($T_2 = 11$ sec). De analyse is uitgevoerd op een één dimensionale, vlakke, wrijvingsloze bodem van 10.000m lang. Aan de hand van een analyse van het spectrum dat hoort bij het door SWASH gegenereerde tijdsignaal is vastgesteld dat er een lange golf in SWASH ontstaat uit de twee opgelegde monochromatische golven. De lange golf heeft hierbij dezelfde frequentie als de verschilfrequentie tussen de twee opgelegde monochromatische golven namelijk $f_3 = 0.100 - 0.09 = 0.009$ Hz.

Hierna is de analyse met nagenoeg dezelfde randvoorwaarden uitgevoerd met twee monochromatische golven van $f_1 = 0.1172$ Hz ($T_1 = 10.2$ sec) en $f_2 = 0.09766$ Hz ($T_2 = 8.53$ sec). De amplitude van de onstane lange golf wordt weergegeven om de 100 m op verschillende afstanden in het domein. Hieruit blijkt dat er naast een (gebonden) lange golf een vrije stoorgolf ontstaat. Om ervoor te zorgen dat deze stoorgolf niet ontstaat op de inkomende rand zijn vervolgens simulaties uitgevoerd waarbij deze lange golf aan de inkomende rand van het domein handmatig wordt toegevoegd. Door dit te doen kan de amplitude van de ontstane lange golf worden geschat zonder de invloed van de stoorgolf.

Nadat de resultaten van SWASH in kaart zijn gebracht is er een theoretische vergelijking gemaakt. Hierbij zijn de resultaten van SWASH vergeleken met de overdrachtsfunctie van Sand (1981). Sand heeft een dimensie loze overdrachtsfunctie $G_{n,m}$ gepubliceerd waarmee de relatie gelegd kan worden tussen de twee opgelegde amplitudes van de monochromatische golven en de amplitude van de gebonden lange golf.

Wanneer deze vergelijking wordt gemaakt valt het op dat SWASH voor ondiep water dezelfde trend vertoont als de overdrachtsfunctie van Sand. Daarnaast komt ook de waarde van de overdrachtsfunctie $G_{n,m}$ voor ondiep water goed overeen met de theoretische waarde. Voor tussenliggend en diep water is dit niet het geval, hier wijkt de waarde van $G_{n,m}$ voor SWASH af van de theoretische waarde van $G_{n,m}$.

Als de amplitudes en frequenties van de twee opgelegde monochromatische golven voor ondiep water worden gevarieerd valt weer dezelfde trend te ontdekken als bij de overdrachtsfunctie van Sand. Daarnaast komt de grootte van de waarde van de overdrachtsfunctie $G_{n,m}$ goed overeen bij ondiep water. Bij tussenliggend en diep water valt het weer op dat de waarde van $G_{n,m}$ voor SWASH niet overeenkomt met de theoretische waarde van $G_{n,m}$.

Vervolgens wordt aan de inkomende rand van het domein een spectrum opgelegd. Bij opleggen van het spectrum zal gebruik gemaakt worden van een tweede orde correctie waarbij gebonden lange golven aan de inkomende rand van het domein worden toegevoegd. Het tijdsignaal wat geproduceerd is door SWASH wordt eerst omgezet naar een energiespectrum. Aan de hand van het energieniveau van de gebonden lange golf wordt de significante golfhoogte berekend. Hierna kan deze significante golfhoogte van SWASH worden vergeleken met een theoretische waarde voor de significante golfhoogte die gegeven is in Vis(1986). Bij deze vergelijking valt op dat de significante golfhoogte van de theoretische waarde voor gebonden lange golf in Vis(1986) goed overeenkomt met de significante golfhoogte van de gebonden lange golf van SWASH.

Kortom, er is met behulp van dit onderzoek een goede eerste stap gezet voor het modelleren van gebonden lange golven in SWASH. SWASH is in staat om de lange golf te modelleren en speelt in op de generatie van de super harmonische componenten. Daarnaast komt de overdrachtsfunctie van de gemodelleerde lange golf voor ondiep water goed overeen met de theoretische waarde voor de gebonden lange golf. Tevens valt uit een eerste analyse van de tweede orde correctie functie op dat deze goede resultaten vertoont. Uiteindelijk zal er wel meer onderzoek moeten worden gedaan naar de ontstane lange golf om te kijken of SWASH daadwerkelijk geschikt is voor het modelleren van gebonden lange golven.

Voorwoord

Voor u ligt de Bachelor Eindopdracht die ik heb gedaan voor mijn studie Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. Het onderwerp waar onderzoek naar is gedaan is 'het modelleren van gebonden lange golven in SWASH'.

De opdracht is uitgevoerd bij het bedrijf Arcadis waar ik 12 weken lang aan deze opdracht heb gewerkt. Ik heb de opdracht als zeer prettig ervaren en ben goed opgenomen binnen het bedrijf. Daarnaast was de opdracht zeer leerzaam en was het zeer uitdagend om met de nieuwste ontwikkelingen van de golfmodellering bezig te zijn.

Voor deze mooie ervaring wil ik graag nog een aantal mensen bedanken. Ten eerste wil ik graag Arcadis in het algemeen bedanken voor de mogelijkheid die ik heb gekregen om bij dit bedrijf stage te lopen. Daarnaast wil ik graag mijn dagelijks begeleider Matthijs Benit bedanken voor de goede begeleiding en samenwerking tijdens de opdracht. Tevens wil ik Martin van der Wel bedanken voor de deskundige hulp en gezelligheid tijdens het uitvoeren van mijn Bachelor Eindopdracht. Tot slot wil ik graag mijn begeleider vanuit de Universiteit Twente, Wouter Kranenburg bedanken voor de goede begeleiding en de snelle en nuttige input tijdens de opdracht.

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
Voorwoord	3
1. Inleiding	6
1.1. Bedrijfsinformatie	6
1.2. Probleemomschrijving	6
1.3. Hoofddoel	7
1.4. Onderzoeksvragen	7
1.5. Onderzoeksmethode	7
2. Gebonden lange golven	9
3. SWASH	11
3.1. Basisvergelijkingen	11
3.2. Invoer SWASH	12
3.2.1. Fysisch invoer	12
3.2.2. Numeriek invoer	12
3.2.3. Output	12
4. Principe tests	13
4.1. Situatieschets en randvoorwaarden	13
4.2. Twee monochromatische golven	14
4.3. Spectrumanalyse	15
4.3.1. Nyquistfrequentie:	15
4.3.2. Frequentieresolutie	15
4.3.3. Spectrumanalyse	16
4.4. Conclusie principe tests	16
5. Bi-chromatische randvoorwaarde	17
5.1. Afbakening/randvoorwaarden:	17
5.2. Spectrumanalyse:	18
5.2.1. Variatie diepte	18
5.3. Amplitude om de 100m uitvoer	19
5.4. De oplegging van een lange golf aan de rand	19
5.5. Conclusie van de analyse over een één dimensionale bodem	20
6. Theoretische vergelijking	21
6.1. Overdrachtsfunctie Sand	21
6.2. Vergelijking resultaten bij verschillende waterdieptes	23
6.3. Invloed Amplitude	24
6.4. Invloed Frequentie	25
6.5. Conclusie vergelijking met Sand:	26
7. Golfspectrum randvoorwaarde	27

7.1.	Tweede orde correctie:	27
7.2.	Situatieschets en randvoorwaarden:.....	27
7.3.	Variantie dichtheidsspectrum	28
7.4.	Theoretische vergelijking.....	30
7.5.	Conclusie opleggen spectrum.....	30
8.	Conclusie	31
9.	Aanbevelingen.....	32
10.	Referenties:.....	33
11.	Lijst van symbolen.....	34
11.1.	Algemeen	34
11.2.	Basisvergelijkingen SWASH	34
11.3.	Overdrachtsfunctie SAND.....	35
12.	Bijlagen.....	36
Bijlage A1	Variatie amplitude en periode	36
Bijlage A2	Sponslaag en Radiation	37
Bijlage A3	Keuze van het aantal verticale lagen.....	39
Bijlage B1	Frequentiekeuze voor de spectrumanalyse	40

1. Inleiding.

1.1. Bedrijfsinformatie

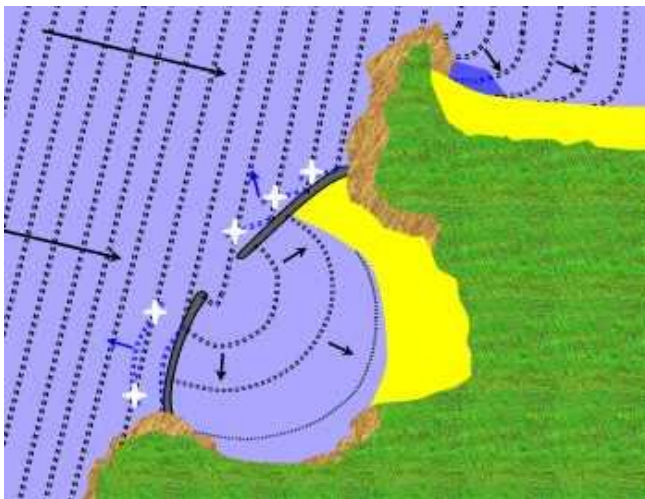
Arcadis is een advies-, ontwerp-, projectmanagement en ingenieursorganisatie die oplossingen levert op het gebied van infrastructuur, water, milieu en gebouwen. Arcadis verbetert mobiliteit, duurzaamheid en de kwaliteit van leven door balans aan te brengen in de gebouwde en natuurlijke leefomgeving. Arcadis ontwikkelt, ontwerpt, implementeert, onderhoudt en exploiteert projecten voor bedrijven en overheden.

Arcadis heeft in Nederland 2.300 medewerkers waarbij de kantoren over het gehele land zijn verspreid. Arcadis bedient in eerste instantie de Nederlandse markt maar heeft ook veel projecten in het buitenland lopen.

De stageplek bevindt zich in Zwolle. Op deze locatie zijn 2 adviesgroepen werkzaam, namelijk: Kust en Mariene systemen en Havens en Mariene Infrastructuur. De stage vindt plaats binnen de groep Havens en Mariene Infrastructuur. Arcadis houdt zich op deze afdeling voornamelijk bezig met projecten die in het buitenland plaats vinden.

1.2. Probleemomschrijving

Bij het ontwerp van een haven is het belangrijk dat er een juiste inschatting kan worden gemaakt van het golfklimaat in de omgeving. Een groot probleem bij het ontwerp zijn de lange golven die de havens binnen kunnen komen (zie Figuur 1).



FIGUUR 1 HET VRIJ KOMEN VAN EEN LANGE GOLF BIJ EEN AANLEGPLAATS

Deze lange golven hebben een periode van ongeveer 30 seconden en kunnen zorgen voor problemen bij aanlegplaatsen voor schepen. Dit komt doordat de eigenfrequentie van een aangemeerd schip dicht bij de frequentie van de lange golven zit waardoor het schip in fase met de golf gaat bewegen (Vis, Mol, Marcos Rita, & Deelen, 1986). Hierdoor kan een lange golf met een kleine amplitude al voor problemen zorgen zoals het niet kunnen laden en lossen van een schip, het breken van de aanleglijnen of in het extreemste geval zelfs het losraken van het schip. Om deze problemen te voorkomen is het bij het ontwerpen van havens belangrijk om goed in te kunnen inschatting wat de invloed van deze lange golven is.

Bij het in kaart brengen van het golfklimaat zijn de amplitude en de kans van het voorkomen van gebonden lange golven vaak lastig na te bootsen. Een programma wat mogelijk kan worden gebruikt om gebonden lange golven modelleren dicht bij de kust is SWASH (Simulating Waves till Shore). Arcadis is geïnteresseerd in de mogelijkheden van dit model voor de generatie van gebonden lange golven in praktijksituaties om zo haar klanten van betere adviezen te voorzien.

1.3. Hoofddoel

Het hoofddoel van het onderzoek is om met behulp van modelexperimenten te kijken in hoeverre het model SWASH geschikt is voor het modelleren van gebonden lange golven.

1.4. Onderzoeksvragen

1. Op welke manier kan de gebonden lange golf worden gemodelleerd in SWASH?
2. Hoe kan de gemodelleerde gebonden lange golf in het model SWASH worden vergeleken met de beschikbare theoretische kennis?
3. Wat is de invloed van de waterdiepte op het modelleren van gebonden lange golven in SWASH?
4. In hoeverre komt de gemodelleerde (gebonden) lange golf in SWASH overeen met de theoretische gebonden lange golf?
5. Welke beperkingen heeft SWASH bij het modelleren van gebonden lange golven?

1.5. Onderzoeksmethode

1. Verdieping

Eerst wordt een studie gedaan naar het onderwerp, het voornaamste doel hiervan is om meer te weten te komen over gebonden lange golven en het programma SWASH. Aan de hand van de literatuur wordt uitgezocht wat gebonden lange golven zijn, hoe ze ontstaan en wat het belang is van het modelleren ervan. Daarnaast zal aan de hand van gepubliceerde artikelen worden uitgezocht wat er allemaal al is gedaan met SWASH voor het modelleren van gebonden lange golven.

2. Testcases

Nadat dit is vastgesteld wordt er met het programma SWASH geëxperimenteerd. De basis van het programma zal eerst bekend moeten zijn om voordat de experimenten kunnen worden uitgevoerd. Er zijn een aantal testcases beschikbaar welke gerund worden en waarbij de output geanalyseerd wordt. Daarnaast zal de beschikbare handleiding worden gebruikt als referentie voor de werking van het programma. Bij alle uitgevoerde experimenten zal het programma MATLAB worden gebruikt om de resultaten te visualiseren en te analyseren

3. Principe tests

Hierna zal worden begonnen met de eerste serie van experimenten. Er worden in SWASH twee monochromatische golven aan de inkomende rand opgelegd welke een domein doorlopen over een vlakke één dimensionale wrijvingsloze bodem. Er wordt gecontroleerd of de gemodelleerde bi-chromatische golf in het afstandssignaal en het tijdsignaal voldoet aan de theoretische verwachtingen. Daarnaast zullen de resultaten met behulp van een fast fourier transformatie worden omgezet naar een spectrum zodat de tijdsignalen spectraal geanalyseerd kunnen worden.

4. Bi-chromatische randvoorwaarde:

Tijdens de analyse met de bi-chromatische randvoorwaarde wordt de ontstane lange golf beter in kaart gebracht. Dit wordt gedaan door het gedrag ervan te analyseren op verschillende punten in het domein. Daarnaast wordt de invloed van waterdiepte geanalyseerd door deze te variëren zodat er een vergelijking kan worden gemaakt tussen ondiep, tussenliggend- en diep water. Tot slot zullen er verschillende amplitudes en de frequenties worden opgelegd voor de korte golven zodat de invloed hiervan vastgesteld kan worden.

5. Theoretische vergelijking

De resultaten van dit experiment zullen worden vergeleken met de overdrachtsfunctie voor korte golven naar gebonden lange golven welke is gepubliceerd in Sand (1981). Door middel van een spectrumanalyse zal uit de tijdsignalen de amplitude van de ontstane lange golf worden bepaald. Met behulp van de opgelegde amplitudes in SWASH en de ontstane amplitudes van de lange golf wordt een vergelijking worden gemaakt met de overdrachtsfunctie van Sand.

6. Golfspectrum randvoorwaarde

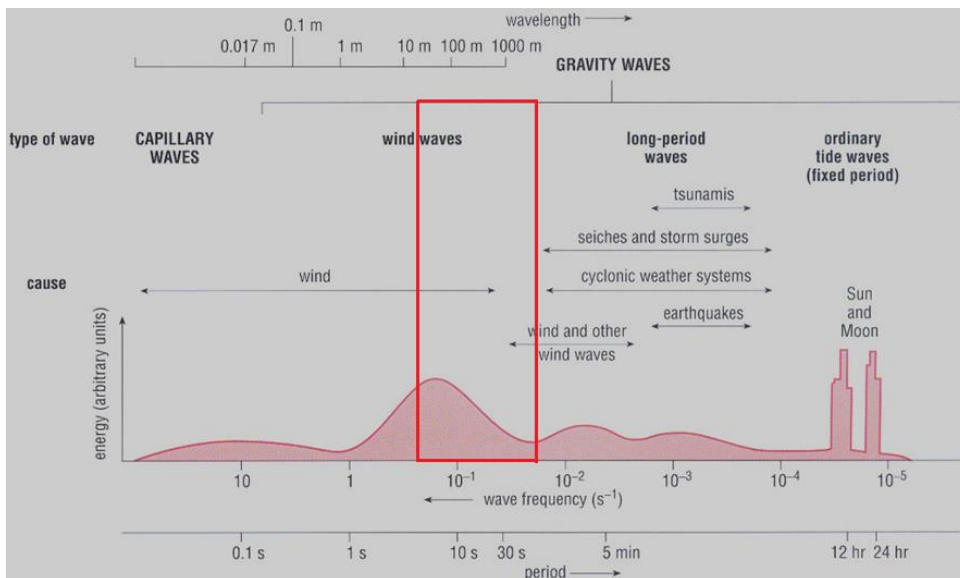
Er zal een golfspectrum worden opgelegd aan de inkomende rand in plaats van de twee monochromatische golven. Hierbij zal gebruik worden gemaakt van een tweede orde correctie voor gebonden lange golven welke gepubliceerd is door Rijnsdorp et al. (2012). Daarnaast zal een vergelijking worden gemaakt tussen de gebonden lange golf in SWASH en de theoretische gebonden lange golf. Dit wordt gedaan aan de hand van een theoretische schatting van de gebonden lange golf die gegeven in Vis (1986).

7. Conclusies

Tenslotte zal er met behulp van de uitgevoerde experimenten geanalyseerd worden of SWASH overeenkomt met de gegeven theorie en worden er conclusies getrokken over de mogelijkheden van SWASH voor het modelleren van gebonden golven. Daarnaast zal er worden bepaald in hoeverre SWASH bruikbaar is voor praktische toepassingen.

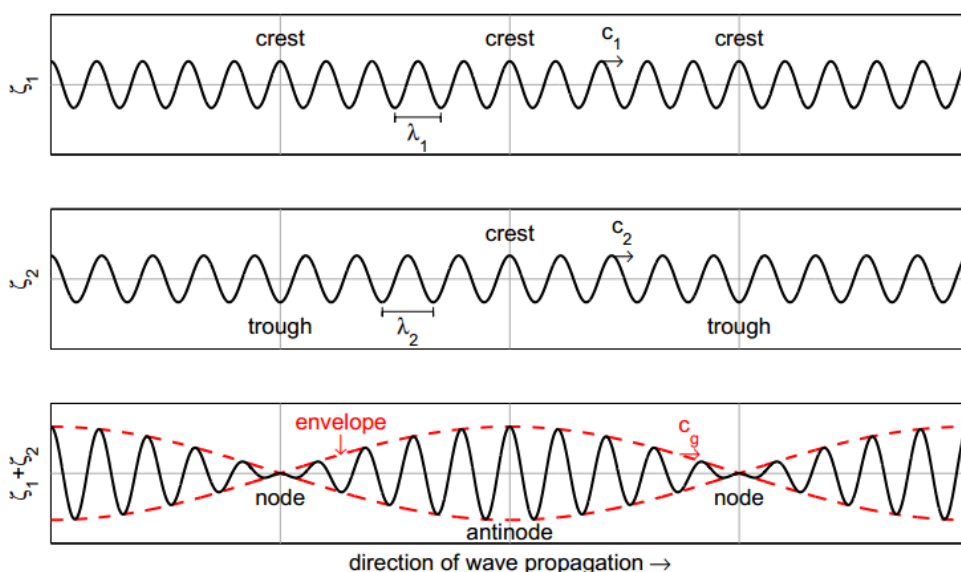
2. Gebonden lange golven

Om te begrijpen wat gebonden lange golven zijn en hoe ze ontstaan is het belangrijk om meer uit te leggen over de verschillende golven die er zijn. Golven kunnen worden ingedeeld in verschillende groepen op basis van hun frequentie en periode. Het voornaamste verschil dat wordt gemaakt is die tussen gravity waves en capillary waves. De soort golven waar dit onderzoek zich mee bezighoudt, is een deel van de wind waves waarvan het gebied wordt weergegeven met de rode omheining in Figuur 2.



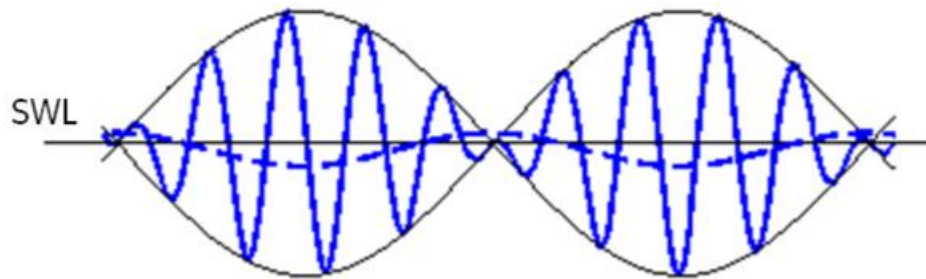
FIGUUR 2 INDELING VAN GOLVEN IN VERSCHILLENDE GROEPEN OP BASIS VAN HUN FREQUENTIE.

De korte golven van dit onderzoeksgebied planten zich vaak voort in groepen waarbij een serie golven dezelfde golflengte en amplitude heeft (Figuur 3A&B). Een gebonden lange golf kan ontstaan wanneer twee golven elkaar tegen komen met twee verschillende golflengtes (λ_1 en λ_2) en verschillende snelheden. De twee golven zullen op een tijdstip op verschillende locaties in fase en uit fase met elkaar lopen. Dit is een bi-chromatische golf met buiken en knopen, zoals wordt weergegeven in Figuur 3C (Brown, et al., 1999).



FIGUUR 3 A, B EN C. TWE E MONOCHROMATISCHE GOLVEN EN EEN BI-CHROMATISCHE GOLF.

Door de overdracht van energie tussen de verschillende golven kunnen er binnen golfgroepen gebonden lange golven ontstaan. Het kenmerk van gebonden lange golven is dat ze dezelfde golflengte en snelheid hebben als de golfgroep. Daarnaast is de amplitude van de gebonden lange golf kleiner dan die van de golfgroep en loopt de gebonden lange golf in en uit fase met de golfgroep (Figuur 4).



FIGUUR 4 BI-CHROMATISCH GOLF (BLAUWE LIJN) MET DE GEBONDEN LANGE GOLF (GESTIPPELDE BLAUWE LIJN) IN DE GOLFGROEP

3.SWASH

In dit hoofdstuk wordt een korte inleiding gegeven op het golfmodel SWASH waarbij eerst de basisvergelijkingen en de oplossingsmethode van SWASH wordt toegelicht. Als vervolg hierop zal er een korte introductie worden gegeven over de belangrijkste invoer die opgelegd kan worden in SWASH. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de fysische invoer en de numerieke invoer. De fysische invoer zal tijdens dit onderzoek worden veranderd terwijl de numerieke invoer nagenoeg constant blijft voor elk experiment

3.1. Basisvergelijkingen

SWASH (Simulating Waves till Shore) is een programma ontwikkeld in 2011 door de Technische Universiteit Delft. Het programma is gemaakt om de transformaties te bepalen van golven bij snel variërende condities tot aan de kust. De niet lineaire vergelijkingen in ondiep water vormen een basis om de complexe veranderingen in de snel variërend waterstromingen te voorspellen. De niet lineaire vergelijkingen zijn afgeleid van de Navier Stokes vergelijkingen welke gebaseerd zijn op het behoud van massa en moment en worden als volgt gegeven (Zijlema,2011).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right) \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad (1.3)$$

De vergelijkingen worden in SWASH tijdsafhankelijk opgelost in de horizontale richtingen x en y. Hierbij zijn u en v de dieptegemiddelde stroomsnelheden in de x en y richting. ζ is de oppervlakte uitwijking gemeten vanaf het initiële waterniveau. De niet hydrostatische druk wordt weergegeven door q , c_f is de wrijvingscoëfficiënt en τ_{ij} zijn de horizontale turbulente spanningen waarbij de richting wordt gegeven door i en j. Er zal bij dit onderzoek alleen worden geëxperimenteerd over een één dimensionale bodem waardoor de veranderingen in de y-richting niet van toepassing zijn. Daarnaast wordt de viscositeit en de bodemwrijving ook niet meegenomen in dit experiment. Hierdoor wordt de vergelijking in SWASH wordt voor de één dimensionale analyse vereenvoudigd tot de onderstaande vergelijkingen

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0 \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz = 0 \quad (1.5)$$

De gebonden lange golven komen voort uit niet-lineaire interacties tussen verschillende golfcomponenten op verschillende frequenties. Een lineair golfmodel is dus ongeschikt om gebonden lange golven te modelleren. SWASH berekent wel de niet-lineaire interacties tussen twee golven van verschillende frequenties. Hierdoor is het theoretisch gezien geschikt voor het modelleren van gebonden lange golven.

3.2. Invoer SWASH

3.2.1. Fysisch invoer

Opleggen van golven aan de rand

In SWASH worden de golfcondities aan het begin van het rekendomein opgelegd. Er kan gekozen worden om één of meer monochromatische op te leggen of er kan gekozen worden om een spectrum op te leggen. Bij het opleggen van de amplitude en de periode van een golf is belangrijk dat deze in de juiste orde grote worden opgelegd (zie bijlage A1). Tot slot is het in SWASH ook nog mogelijk om een golfdatabestand in te lezen.

Rekendomein en aantal grid cellen

Voordat een berekening wordt gestart is het belangrijk om de lengte van het rekendomein en het aantal grid cellen vast te stellen. Hoe meer grid cellen er worden gekozen des te nauwkeuriger de benadering van de golf zal zijn. Echter zal het opleggen van meer grid cellen wel ten kostte gaan van de tijdsduur van de berekening. Bij de berekeningen wordt als maat 50 grid cellen per golflengte genomen. Dit is nauwkeurig genoeg om een golf goed in kaart te brengen (SWASH handleiding). Naast de grootte van het rekendomein dient er een bodem te worden ingevoerd. Deze dient minstens even groot te zijn als het rekendomein en kan handmatig worden gedefinieerd of kan met behulp van data uit een omgeving worden ingelezen.

3.2.2. Numeriek invoer

Aantal verticale lagen

Voor de invoer in SWASH kan gekozen worden voor het aantal verticale lagen waarover de berekening moet worden uitgevoerd. Hoe meer lagen er aanwezig zijn, des te nauwkeuriger de benadering van de dispersierelatie zal zijn (zie bijlage A3). De dispersierelatie legt het verband tussen de golflengte en de periode. Volgens de lineaire golftheorie wordt deze relatie beschreven met de onderstaande formule.

$$\omega^2 = g * k * \tanh(k * h) \quad (3.1)$$

Reflectie

Indien er in SWASH geen beperkingen aan het einde van het rekendomein worden opgelegd dan gaat SWASH uit van volledig reflecterende wanden. Voor de analyse is deze reflectie ongewenst en om dit te minimaliseren kan gebruik gemaakt worden van een sponslaag aan het einde van het rekengebied. Een sponslaag zorgt ervoor dat de golf langzaam uit dempt (zie Bijlage A2). Deze uitdemping vindt plaats doordat in de sponslaag de viscositeit van het water langzaam toeneemt. De maat voor de lengte van de sponslaag die wordt aangehouden is ongeveer drie tot vijf keer de golflengte. Naast de sponslaag kan er gebruik gemaakt worden van de radiation randvoorwaarde welke in combinatie met de sponslaag voor een betere uitdemping van de golf zorgt (SWASH handleiding).

Doorlooptijd

In SWASH moet worden ingesteld hoe lang het model moet simuleren (doorlooptijd) en vanaf welk tijdstip er uitvoer geproduceerd dient te worden (opstarttijd). Deze doorlooptijd is dus niet gelijk aan de rekentijd van een simulatie van een experiment. Het is voor de analyse wenselijk om pas uitvoer te produceren nadat de golf het gehele domein is doorlopen.

3.2.3. Output

Tijdsignaal en afstandssignaal

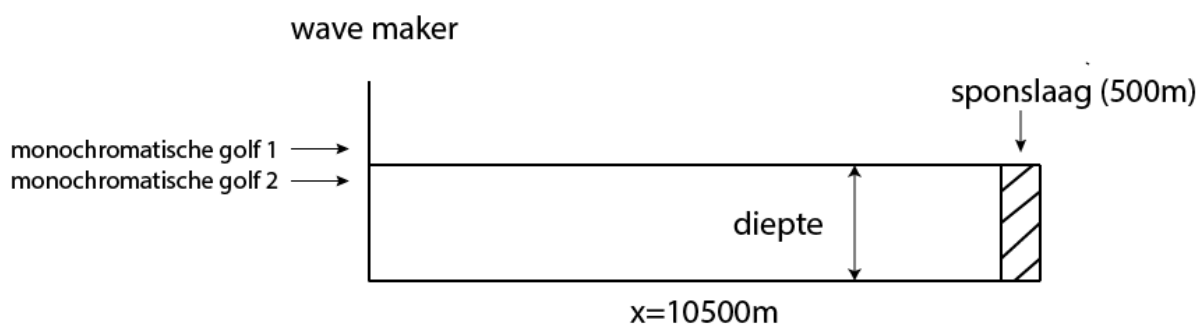
SWASH heeft verscheidene opties om output van een berekening weg te schrijven in een tabel. De basis output die tijdens dit onderzoek wordt geproduceerd door middel van SWASH is de oppervlakte uitwijking van het water (gemeten vanaf het initiële water niveau). Deze output wordt geproduceerd in de vorm van een tijdsignaal op verschillende posities in het domein en in de vorm van een afstandssignaal van het gehele domein.

4. Principe tests

Voordat er wordt begonnen met de experimenten wordt eerst het principe van het modelleren van de gebonden lange golf in SWASH nagebootst. Dit wordt gedaan door twee korte monochromatische golven met verschillende periodes aan de inkomende rand van het domein op te leggen. Voordat deze test wordt gedaan is eerst de situatie in kaart gebracht en zijn de randvoorwaarden vastgesteld. Aan de hand van deze randvoorwaarden ontstaat een bi-chromatische golf in het domein van SWASH. Van deze bi-chromatische golf wordt het tijdssignaal van de oppervlakte uitwijking omgezet naar een spectrum door middel van een fast fourier transformatie. Dit spectrum zal worden geanalyseerd en de verschillende pieken in het spectrum worden toegelicht. Tot slot zal nog worden ingegaan op de verschillende interacties tussen de frequenties.

4.1. Situatieschets en randvoorwaarden

Eerst is de situatieschets van de één dimensionale modelopzet weergegeven in Figuur 5. Hier zijn twee monochromatische met een periode van $T_1 = 10$ sec en $T_2 = 11$ sec aan de inkomende rand van het domein opgelegd. Het domein is 10.500 m lang en heeft een diepte van 10 meter. Daarnaast wordt de golfreflectie aan het einde van het domein gedempt met een sponslaag van 500 meter in combinatie met de radiation conditie. De overige fysische en numerieke randvoorwaarden zijn te vinden in Tabel 1 en Tabel 2. Voor het bepalen van de randvoorwaarden is de handleiding van SWASH gebruikt als leidraad.



FIGUUR 5 SITUATIESCHETS VAN DE PRINCIPE TESTS

Monochromatische golf 1	$f_1 = 0.100$ Hz ($T_1 = 10$ sec)
Monochromatische golf 2	$f_2 = 0.091$ Hz ($T_2 = 11$ sec)
Amplitude1&Amplitude2	0.04 m
Lengte van het domein	10500 m
Waterdiepte	10 m
Soort bodem	1D, wrijvingsloze, vlakke bodem
Viscositeit	Uit
Turbulentie	Uit

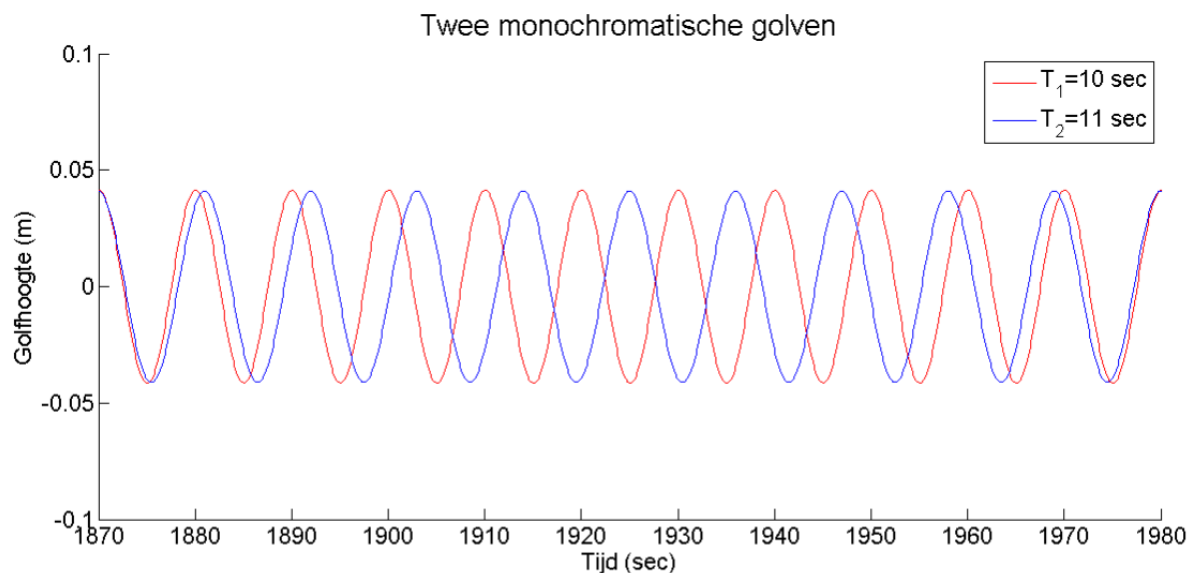
TABEL 1 FYSIEKE RANDVOORWAARDEN VOOR DE PRINCIPE TESTS

Aantal verticale lagen	3
Opstarttijd	1870 sec
Grid cellen	10500
Lengte tijdsignaal	1200 sec
Δt	1 sec
Reflectieconditie	Sponslaag (500 m) +Radiation

TABEL 2 NUMERIEKE RANDVOORWAARDEN VOOR DE PRINCIPE TESTS

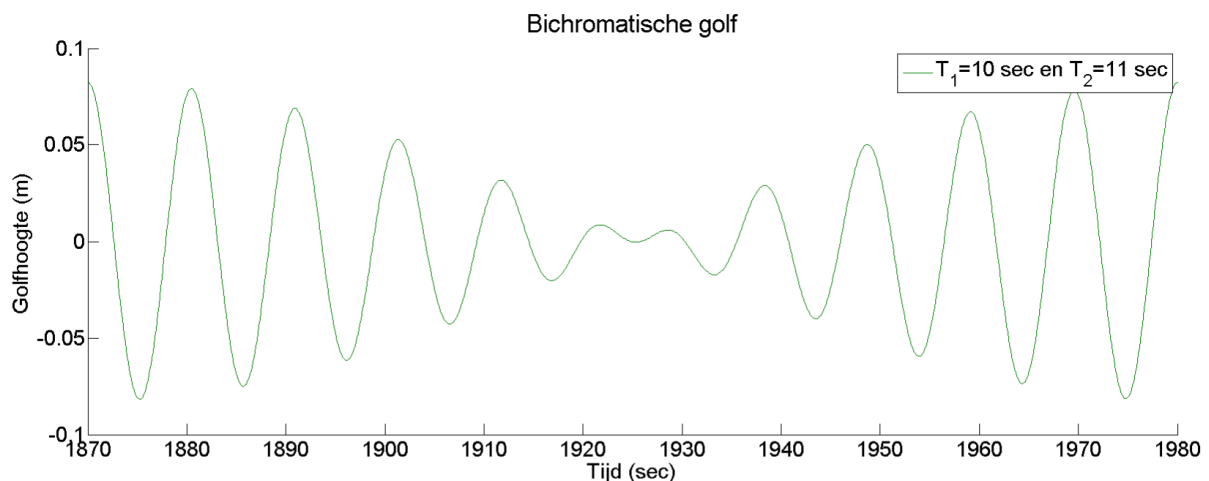
4.2. Twee monochromatische golven

Om weer te geven hoe de twee monochromatische golven met elkaar in fase en uit fase lopen zijn deze eerst apart van elkaar aan de inkomende rand van het domein in SWASH opgelegd. Van beide monochromatische golven is een tijdsignaal geproduceerd na de opstarttijd van 1870 seconden. De tijdsduur van signaal is 110 seconden en is gemeten in het domein op $x=0$. (zie Figuur 6).

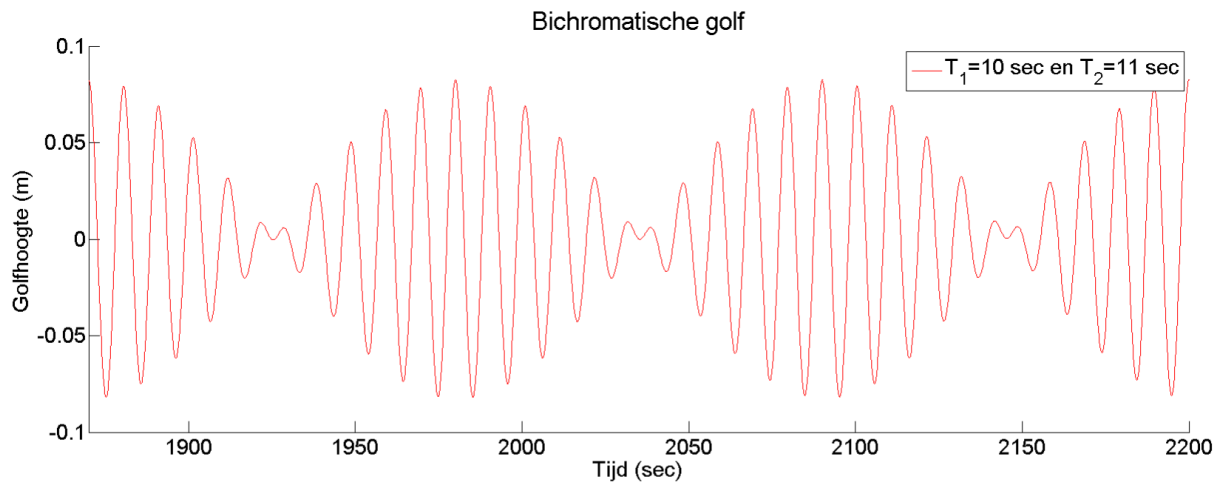


FIGUUR 6 TWEE MONOCHROMATISCHE GOLVEN MET $T_1=10$ SEC EN $T_2=11$ SEC

Hierna zijn de twee monochromatische golven tegelijk opgelegd in SWASH. Uit dit tijdsignaal is te zien dat dit een bi-chromatische golf is (Figuur 6 en Figuur 7).



FIGUUR 7 TIJDSIGNAAL VAN EEN BI-CHROMATISCHE GOLF OP $x=0$



FIGUUR 8 TIJDSSIGNAAL VAN EEN BI-CHROMATISCHE GOLF OP X=0 M

4.3. Spectrumanalyse

Uit het tijdsignaal van de oppervlakte uitwijking is niet direct af te leiden welke verschillende golfperiodes en amplitudes zich hierin bevinden. Om dit te visualiseren is met behulp van een fast fourier transformatie het tijdsignaal omgezet naar een spectrum. Voordat de fast fourier transformatie wordt gedaan zijn eerst de Nyquist frequentie en de frequentieresolutie vastgesteld.

4.3.1. Nyquistfrequentie:

De grootte van de tijdsintervallen waarop in SWASH om uitvoer wordt gevraagd zijn gekozen aan de hand van de Nyquist frequentie. De formule van de Nyquist frequentie wordt hieronder weergegeven.

$$f_N = \frac{1}{2 * \Delta t} \quad (4.1)$$

Bij een Δt van 1 sec is de Nyquist frequentie gelijk aan 0.5 Hz. Uit de spectrumanalyses blijkt dat er boven 0.5 Hz nauwelijks meer pieken waar te nemen zijn. Een Δt van 1 is dus nauwkeurig genoeg voor de analyse.

4.3.2. Frequentieresolutie

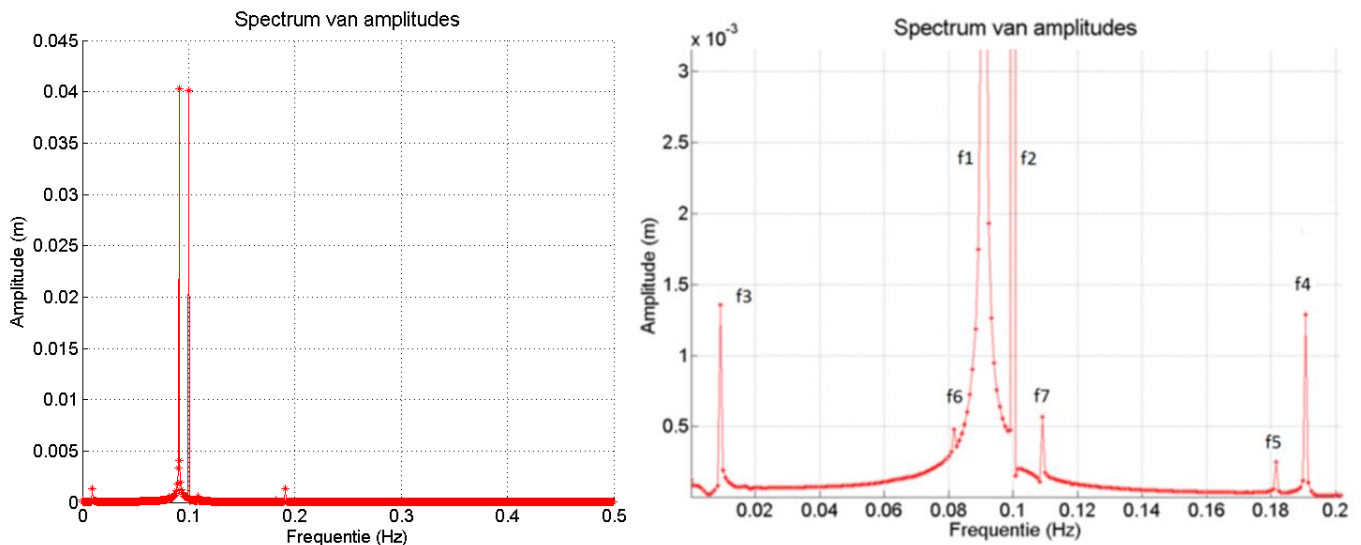
De frequentieresolutie (Δf) in het spectrum kan worden bepaald aan de hand van de lengte van het tijdsignaal en wordt bepaald met de onderstaande formule.

$$\Delta f = \frac{1}{D} \quad (4.2)$$

De lengte van het tijdsignaal (D) dient zo gekozen te worden dat de pieken in het spectrum goed in kaart worden gebracht. Voor de spectrumanalyse is een tijdsignaal van 1200 seconden van de oppervlakte uitwijking gemeten waardoor $\Delta f = \frac{1}{1200}$.

4.3.3. Spectrumanalyse

In het spectrum van Figuur 9a zijn voornamelijk de twee opgelegde amplitudes met de frequenties $f_1 = 0.1\text{Hz}$ en $f_2 = 0.091\text{Hz}$ dominant aanwezig. Wanneer het spectrum gedetailleerder wordt bekeken zijn er meerdere kleine piekjes waarneembaar.



FIGUUR 9 A EN B SPECTRUMANALYSE VAN EEN BI-CHROMATISCHE GOLF OP $X=4000$

Deze pieken ontstaan door de interacties tussen de twee opgelegde monochromatische golven. De frequentie van de lange golf f_3 is ontstaan door de interactie tussen f_1 en f_2 en is gelijk aan:

$$f_3 = |f_1 - f_2| \quad (4.3)$$

Naast de bovenstaande interactie zullen er ook andere interacties plaatsvinden tussen verschillende golven. De overige ontsane interacties welke te zien zijn in de spectrumanalyse zijn terug te vinden in Tabel 3.

Ontstane frequentie	Interactie	Ontstane frequentie(Hz)
f_3	$f_1 - f_2$	0.0091
f_4	$f_1 + f_2$	0.0019
f_5	$f_1 + f_1$	0.0018
f_6	$f_1 - f_3$	0.0819
f_7	$f_2 + f_3$	0.1091

TABEL 3 HET ONTSTAAN VAN VERSCHILLENDE GOLFFREQUENTIES.

4.4. Conclusie principe tests

Uit de resultaten van deze test kan geconcludeerd worden dat door het opleggen van twee monochromatische golven in SWASH een bi-chromatische golf signaal zichtbaar is. Daarnaast blijkt uit de spectrumanalyse dat de twee opgelegde korte monochromatische golven een lange golf produceren die gelijk is aan de verschilfrequentie van de twee opgelegde monochromatische golven. Tevens is bevestigd dat SWASH golfcomponenten genereert die voortkomen uit de interacties tussen verschillende golf frequenties.

5. Bi-chromatische randvoorwaarde

In dit hoofdstuk zal de lange golf die is ontstaan door de interactie tussen de twee korte monochromatische golven verder worden onderzocht. Om lange golf beter in kaart te brengen zijn een aantal randvoorwaarden veranderd, deze zullen eerst worden toegelicht. Hierna zal een spectrumanalyse voor de lange golf worden uitgevoerd voor verschillende waterdieptes. Vervolgens wordt de amplitude van de lange golf onderzocht op verschillende afstanden in het domein. Tot slot zal er een analyse worden uitgevoerd waarbij een lange golf aan de inkomende rand van het domein wordt toegevoegd.

5.1. Afbakening/randvoorwaarden:

In dit hoofdstuk zijn een aantal randvoorwaarden veranderd in vergelijking met hoofdstuk vier.

Bij deze analyse zijn namelijk de twee frequenties voor de korte monochromatische golven, de duur van het geproduceerde tijdsignaal en de opstarttijd verandert ten aanzien van de eerder beschreven waarden. De nieuwe frequenties van de korte monochromatische golven zijn nu gelijk aan $f_1 = 0.1172$ Hz ($T_1 = 10.2$ sec) en $f_2 = 0.0977$ Hz ($T_2 = 8.53$ sec), het geproduceerde tijdsignaal heeft nu een lengte van 1024 seconden en de opstarttijd is verlengd naar 3600 seconden. Deze veranderingen zijn gemaakt om zo een betere spectrumanalyse te verkrijgen (zie bijlage B1). De nieuwe fysische en numerieke randvoorwaarden zijn weergegeven in Tabel 4 en Tabel 5.

Monochromatische golf 1	$f_1 = 0.1172$ Hz ($T_1 = 10.2$ sec)
Monochromatische golf 2	$f_2 = 0.0977$ Hz ($T_2 = 8.53$ sec)
Amplitude1&Amplitude2	0.04 m
Lengte van het domein	10500 m
Waterdiepte	variabel
Soort bodem	1D, wrijvingsloze, vlakke bodem
Viscositeit	Uit
Turbulentie	Uit

TABEL 4 FYSISCHE RANDVOORWAARDEN BIJ DE BI-CHROMATISCHE TEST

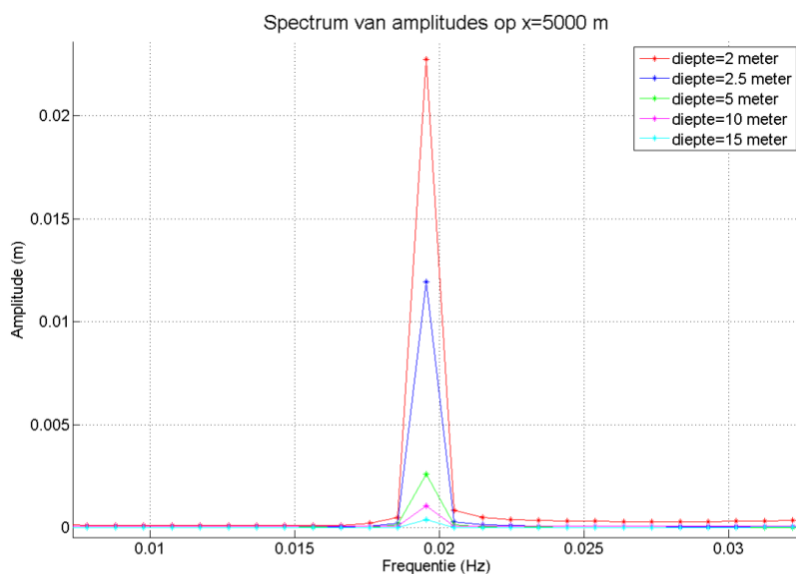
Aantal verticale lagen	3
Opstarttijd	3600 sec
Lengte tijdsignaal	1024 sec
Grid cellen	10500
Δt	1 sec
Reflectieconditie	Sponslaag (500 m) +Radiation

TABEL 5 NUMERIEKE RANDVOORWAARDEN BIJ DE BI-CHROMATISCHE TEST

5.2. Spectrumanalyse:

5.2.1. Variatie diepte

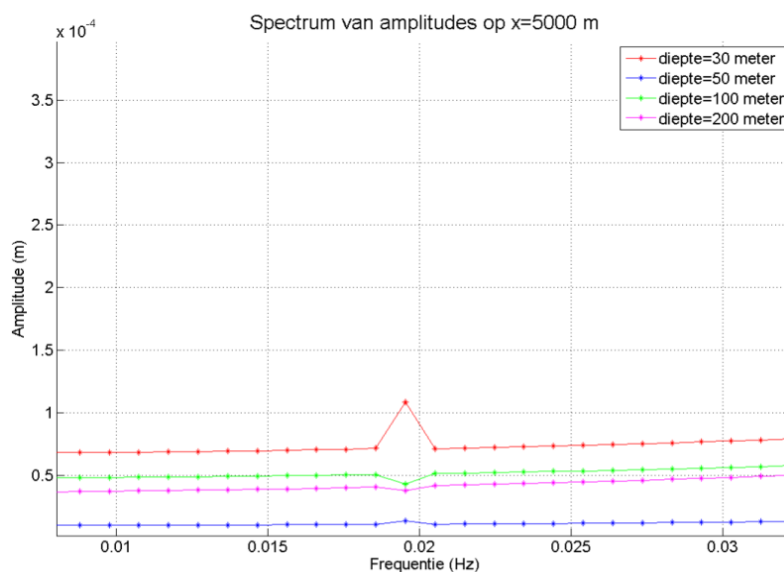
Voor de twee opgelegde frequenties van de monochromatische golven is eerst de diepte gevarieerd. De analyse is uitgevoerd voor de dieptes 2, 2.5, 5, 10, 15, 30, 50, 100 en 200 meter. Bij al deze verschillende dieptes is de golfhoogte van de lange golf vastgesteld op een afstand van 5000 meter. Deze lange golf heeft een frequentie van 0.0195 Hz welke terug is te vinden in de spectrumanalyse van Figuur 10 A en B. De spectrumanalyse van de lange golf is gedaan op een afstand van 5000 meter. De amplitude van de lange golf op dit punt is bepaald door de waarde van de piek van de lange golf uit het spectrum te halen. Duidelijk is te zien dat de ontstane amplitude van de lange golf toeneemt indien de diepte lager wordt. Ook valt op dat bij een diepte van meer dan 50 meter er geen lange golf meer ontstaat (Figuur 10B).



Diepte(m)	Amplitude (m)
2	0.023
2.5	0.0119
5	0.0026
10	0.00106
15	0.0004

**TABEL 6 AMPLITUDE VAN DE LANGE GOLF
BIJ VERSCHILLENDE WATERDIEPTES**

FIGUUR 10A AMPLITUDE VAN DE ONTSTANE LANGE GOLF BIJ VERSCHILLENDE WATERDIEPTES OP X=5000 M



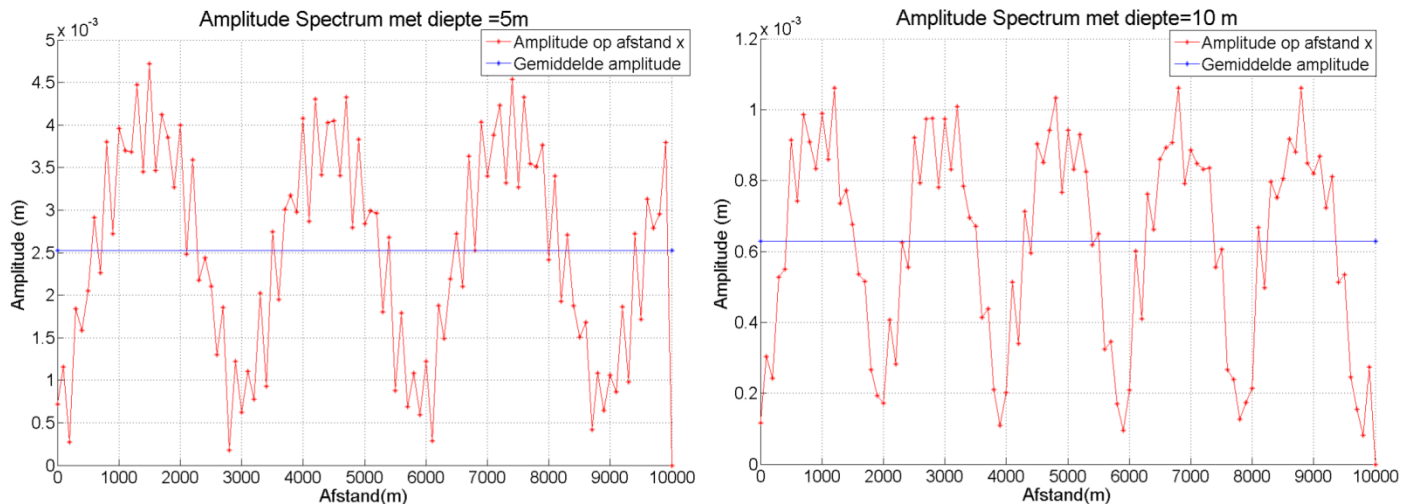
Diepte(m)	Amplitude (* 10 ⁻⁵ m)
30	11
50	1.3
100	3.8
200	4.3

**TABEL 7 AMPLITUDE VAN DE LANGE GOLF
BIJ VERSCHILLENDE WATERDIEPTES**

FIGUUR 10B AMPLITUDE VAN DE ONTSTANE LANGE GOLF BIJ VERSCHILLENDE WATERDIEPTES OP X=5000

5.3. Amplitude om de 100m uitvoer

Om het gedrag van de amplitude van de ontstane lange golf beter beeld te brengen is er om de 100 meter een tijdsignaal geproduceerd door SWASH. Uit deze tijdsignalen kan de amplitude van de lange golf om de 100 meter worden bepaald. Als deze waarden worden gevisualiseerd valt het op dat de amplitude van de ontstane lange golf een sinusvorm aanneemt (Figuur 11).

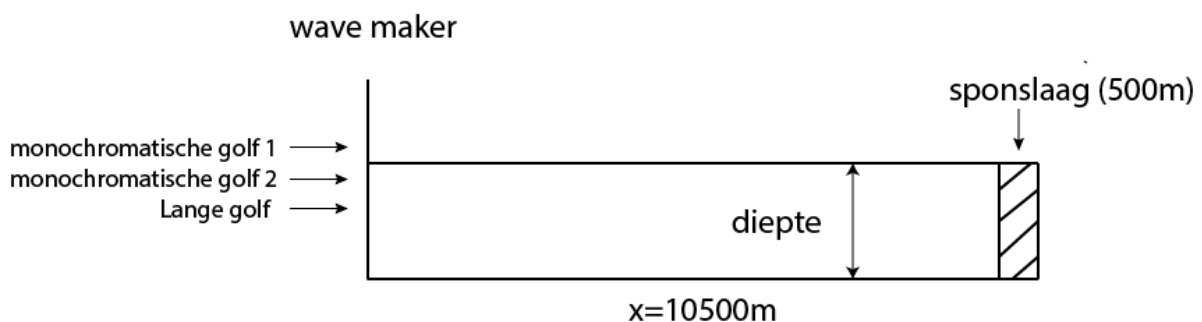


FIGUUR 11 A EN B AMPLITUDE VAN ONTSTANE DE LANGE GOLF WEERGEGEVEN OM DE 100 M BIJ DIEPTES 5 EN 10 METER

Deze zweving ontstaat doordat er in SWASH zijn twee lineaire golfcondities zijn opgelegd aan de inkomende rand van het domein, namelijk twee monochromatische golven. Van nature zou hier een niet-lineaire component in de vorm van een lange golf bij moeten zitten. Deze is echter niet aanwezig en waardoor SWASH automatisch een vrije lange golf aan de inkomende rand oplegt welke 180 graden uit fase is. Doordat SWASH deze stoorgolf oplegt zijn de randvoorwaarden van het model weer in evenwicht.

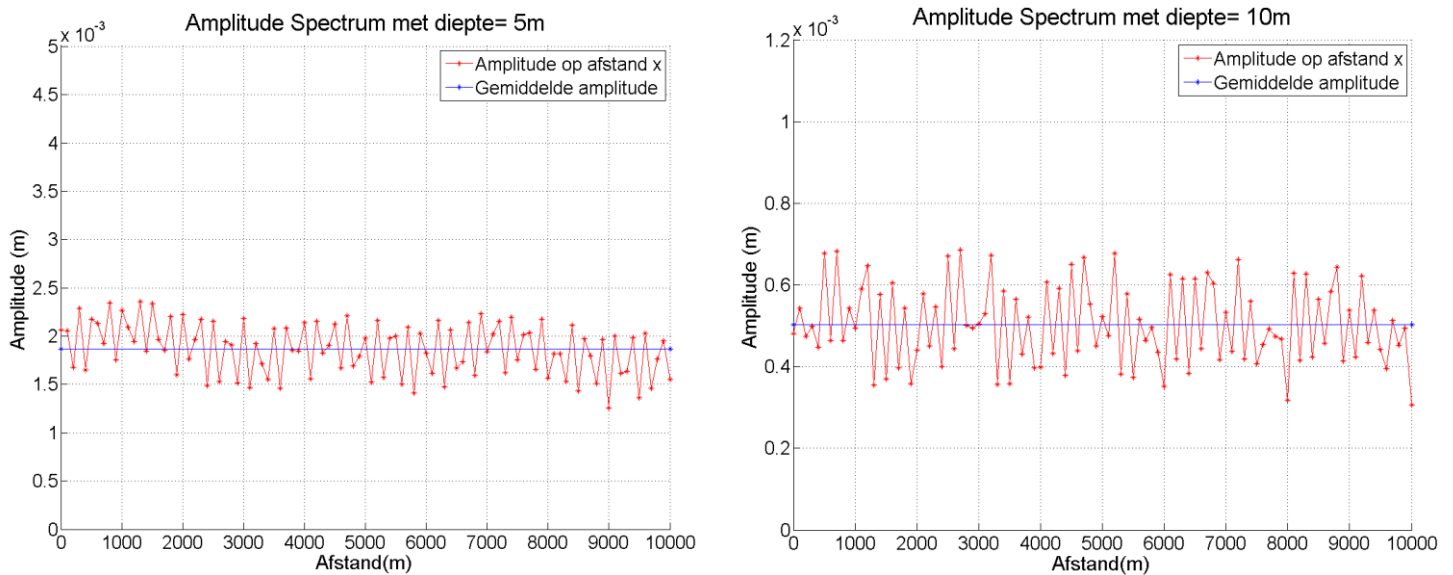
5.4. De oplegging van een lange golf aan de rand.

Om het ontstaan van de stoorgolf tegen te gaan zal er een energie in de vorm van een lange golf aan de rand van het domein worden toegevoegd. Met de toevoeging van de lange golf zullen de randvoorwaarden aan de inkomende rand van het domein weer in evenwicht zijn waardoor de stoorgolf vermindert. Deze lange golf wordt opgelegd met de verschilfrequentie die gelijk is aan $f_3 = 0.1172 - 0.0195 = 0.0195$ Hz. Daarnaast wordt de lange golf 180 graden uit fase opgelegd om zo aan de inkomende randvoorwaarden te voldoen. Naast het opleggen van de lange golf wordt er om praktische redenen gekozen voor een amplitude van 0.01 meter voor de twee monochromatische golven. De nieuwe situatieschets wordt nu weergegeven in Figuur 12



FIGUUR 12 SITUATIESCHETS VAN DE OPLEGGING VAN EEN LANGE GOLF AAN INKOMENDE DE RAND VAN HET DOMEIN

Na de oplegging van de lange golf aan de rand van het domein valt het op dat bij de dieptes van 5 en 10 meter de zweving van de door de lange golf nagenoeg verdwenen is (zie Figuur 13 A en B).



FIGUUR 13 A EN B AMPLITUDE VAN DE ONTSTANE LANGE GOLF GEMETEN OM DE HONDERD METER INCLUSIEF DE TOEVOEGING VAN EEN LANGE GOLF AAN DE RAND

Het is niet haalbaar om steeds handmatig de lange golf energie op te leggen om zo de zweving te minimaliseren bij elke analyse. Hierdoor is ervoor gekozen om bij de volgende analyses verder te gaan met de gemiddelde waarde van de amplitude van de lange golf zonder het opleggen van een lange golf aan de inkomende rand. De gemiddelde waarde wijkt namelijk niet erg af van de waarde van de amplitude met opgelegde lange golf. Hierdoor zal er met behulp van de gemiddelde waarde ook een goed beeld worden geschetst bij de verdere vergelijkingen.

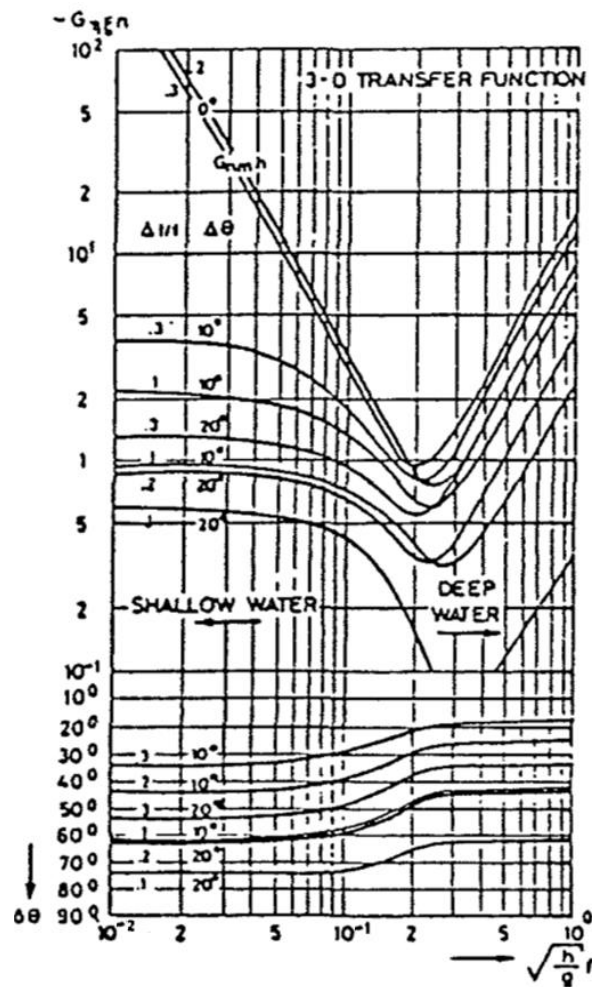
5.5. Conclusie van de analyse over een één dimensionale bodem

Uit de spectrumanalyse van de ontstane lange golf kan geconcludeerd worden dat er bij kleinere dieptes een lange golf ontstaat uit de twee opgelegde monochromatische golven. Daarnaast is in de analyse te zien dat er een zweving van de waarde van de amplitude is ontstaan in het domein bij het opleggen van twee monochromatische golven. Dit komt omdat er van nature een niet-lineaire component in de vorm van een lange golf bij zou moeten zitten. Deze is echter niet opgelegd waardoor SWASH een vrije lange golf aan de rand produceert welke 180 graden uit fase wordt opgelegd. De zweving wordt hierna verholpen door zelf energie in de vorm van een lange golf toe te voegen aan de inkomende rand van het domein. Uiteindelijk kan op deze manier de zweving geminimaliseerd worden zodat er een betere inschatting kan worden gemaakt van de amplitude van de ontstane lange golf.

6. Theoretische vergelijking

Nadat de resultaten van SWASH in hoofdstuk vijf in kaart zijn gebracht worden in dit hoofdstuk de resultaten van SWASH vergeleken met de overdrachtsfunctie van Sand. Deze theoretische vergelijking zal eerst worden toegelicht. Hierna zal de waarde van de overdrachtsfunctie van Sand worden vergeleken met die van SWASH voor verschillende waterdieptes. Tot slot wordt de invloed van de variatie van de amplitude en frequentie van de twee opgelegde korte golven geanalyseerd.

6.1. Overdrachtsfunctie Sand



FIGUUR 14 OVERDRACHTSFUNCTIE SAND

De theoretische relatie tussen twee korte golven en gebonden lange golven wordt weergegeven met een dimensie loze overdrachtsfunctie $G_{n,m}$ die gepubliceerd is in Sand (1981). Met behulp van deze overdrachtsfunctie welke weergegeven is in Figuur 14 wordt de relatie gelegd tussen de twee opgelegde amplitudes van de korte golven en de ontstane amplitude van de lange golf. Voordat de overdrachtsfunctie van Sand wordt gebruikt is er eerst onderscheid gemaakt tussen ondiep, tussenliggend en diep water:

- Ondiep water $\left(\sqrt{\frac{h}{g}} f_m < 0.05\right)$
- Diep water $\left(\sqrt{\frac{h}{g}} f_m > 0.25\right)$
- Tussenliggend water $\left(0.25 > \sqrt{\frac{h}{g}} f_m > 0.05\right)$

Voordat de relatie tussen de amplitude van twee korte golven en een gebonden lange golf wordt gegeven is eerst hieronder de theoretische relatie voor de golfhoogte van een bi-chromatische golf weergegeven:

$$\eta(x, t) = c_n \cos(\omega_n t - k_n x + \phi_n) + c_m \cos(\omega_m t - k_m x + \phi_m) \quad (6.1)$$

Deze relatie kan worden omgeschreven tot vergelijking (6.2) waarbij $a_n = c_n \cos(\phi_n)$, $b_n = -c_n \sin(\phi_n)$, $a_m = c_m \cos(\phi_m)$ en $b_m = -c_m \sin(\phi_m)$

$$\eta(x, t) = a_n \cos(\omega_n t - k_n x) + b_n \sin(\omega_n t - k_n x) + a_m \cos(\omega_m t - k_m x) + b_m \sin(\omega_m t - k_m x) \quad (6.2)$$

$$\eta(x, t) = (a_n a_m + b_n b_m) * \cos(\Delta\omega_{nm} t - \Delta k_{nm} x) + (a_m b_n - a_n b_m) * \sin(\Delta\omega_{nm} t - \Delta k_{nm} x) \quad (6.3)$$

In een artikel van Hansen (1978) wordt de overdrachtsfunctie $G_{n,m}$ geïntroduceerd. Hierin wordt de hoogte van de korte golven $\eta(x, t)$ omgeschreven naar de hoogte van de gebonden lange golf $\xi_{n,m}(x, t)$ als functie van de twee opgelegde korte golven. De uiteindelijke omgeschreven relatie wordt weergegeven in vergelijking 6.4.

$$\xi_{n,m}(x, t) = G_{n,m} \{ (a_n a_m + b_n b_m) * \cos(\Delta\omega_{nm} t - \Delta k_{nm} x) + (a_m b_n - a_n b_m) * \sin(\Delta\omega_{nm} t - \Delta k_{nm} x) \} \quad (6.4)$$

De bovenstaande formule kan vereenvoudigd worden aangezien de tweede term gelijk is aan nul omdat $b_n=0$ en $b_m=0$ doordat $\phi_n = 0$ en $\phi_m = 0$.

Daarnaast wordt de term $\cos(\Delta\omega_{nm} t - \Delta k_{nm} x) = 1$ omdat er tijdens de analyses een tijdsserie wordt gebruikt. Hierdoor wordt de term $(\Delta\omega_{nm} t - \Delta k_{nm} x) = 0$ en blijft de onderstaande vergelijking nog over:

$$\xi_{n,m} = G_{n,m} * (a_n a_m) \quad (6.5)$$

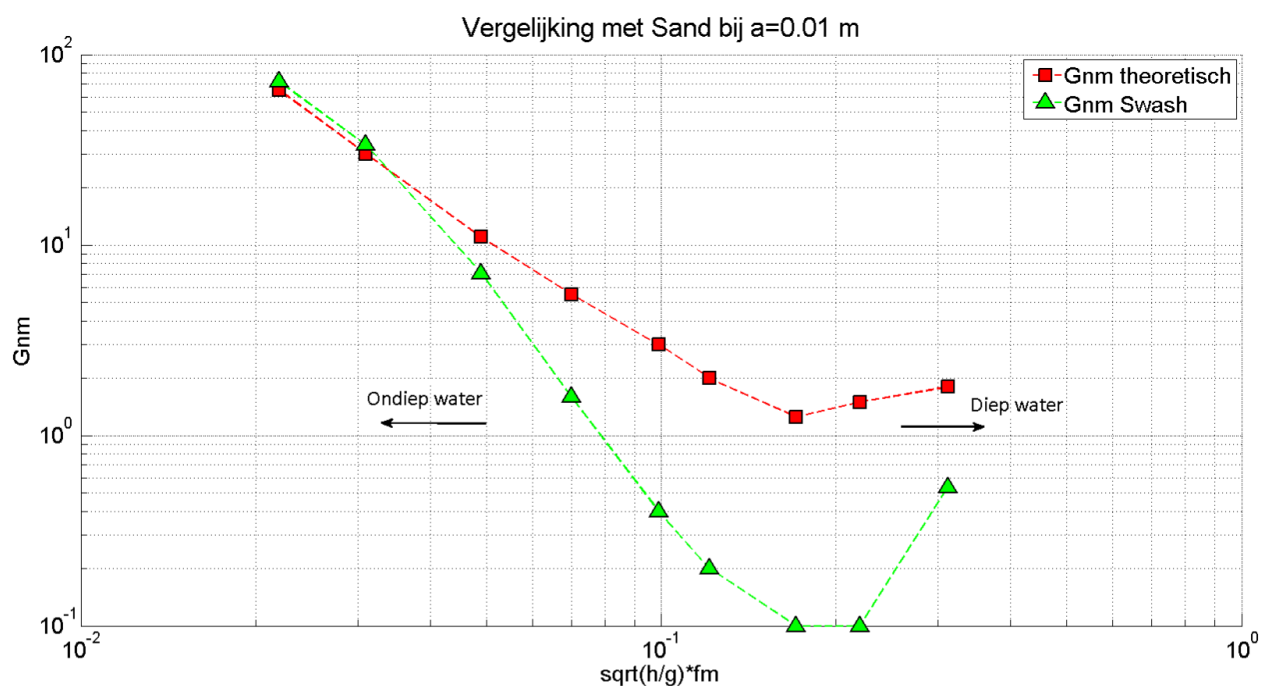
Met behulp van vergelijking 6.5 kan nu de $G_{n,m}$ waarde uit SWASH worden berekend. In vergelijking 6.5 zijn a_n en a_m opgelegde amplitudes van de twee monochromatische golven in SWASH en is $\xi_{n,m}$ de amplitude van de ontstane lange golf die uit spectrumanalyse van hoofdstuk 5 gehaald wordt. Met behulp van deze drie amplitudes kan de $G_{n,m}$ die in SWASH zit worden berekend. De waarde van $G_{n,m}$ uit SWASH kan nu worden vergeleken met de theoretische waarde van $G_{n,m}$ die uit de grafiek van Sand wordt afgelezen.

6.2. Vergelijking resultaten bij verschillende waterdieptes

Bij de eerste vergelijking met de overdrachtsfunctie van Sand(1981) wordt voor de verschillende waterdieptes 2, 2.5, 5, 10, 15, 30, 50, 100 en 200 meter de amplitude van de ontstane lange golf bepaald aan de hand van de methode die besproken is in hoofdstuk vijf.

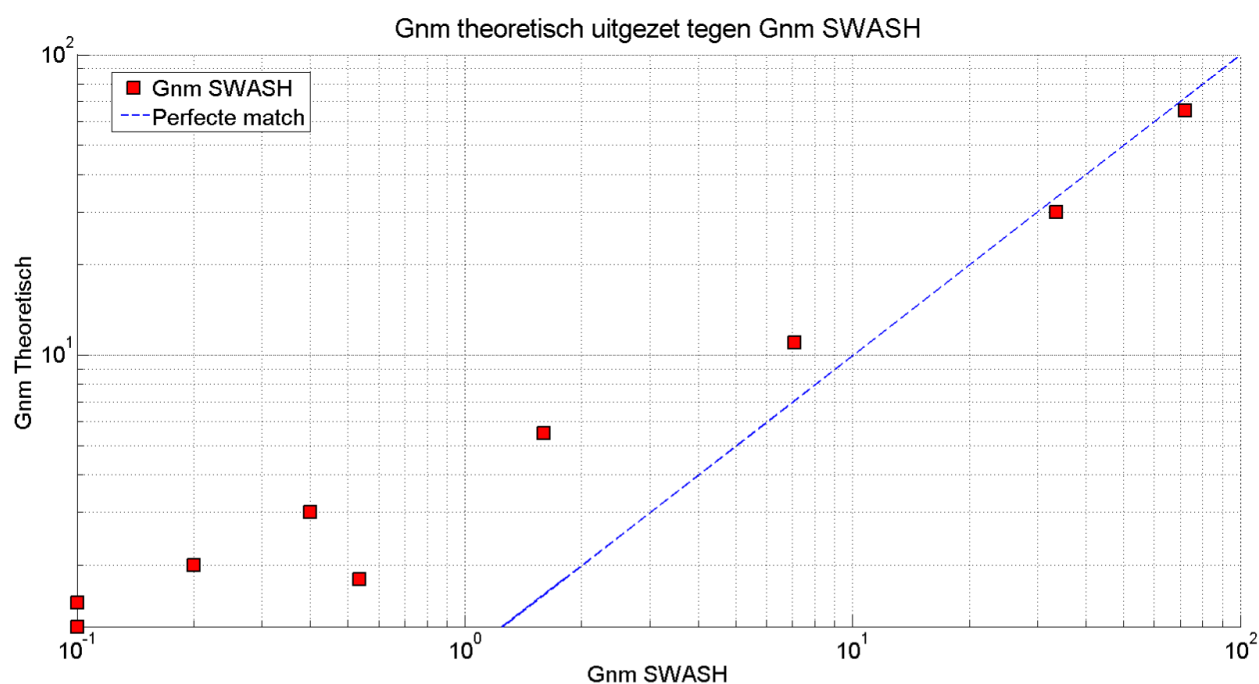
Bij deze vergelijking is een amplitude van $a=0.01$ gekozen en zijn frequenties weer gelijk zijn aan $f_m = 0.0977$ en $f_n = 0.1172$. Verdere randvoorwaarden voor deze analyse gelijk gebleven aan die van hoofdstuk 5. Voor de verschillende dieptes wordt eerst de waarde van $\sqrt{\frac{h}{g}} f_m$ berekend om zo een betere vergelijking met Sand te maken.

Met behulp van de opgelegde amplitudes van de twee monochromatische golven en de amplitude van ontstane de lange golf in SWASH kan nu de waarde van $G_{n,m}$ in SWASH worden bepaald. Deze waarde van SWASH wordt vergeleken met de theoretische waarde van $G_{n,m}$ (zie Figuur 15).



FIGUUR 15 THEORETISCHE WAARDE $G_{n,m}$ VERGELEKEN MET DE WAARDE VAN $G_{n,m}$ IN SWASH VOOR VERSCHILLENDE DIEPTES BIJ EEN AMPLITUDE VAN 0.01 M

Het eerste wat opvalt is dat waarde van SWASH dezelfde trend vertoond als de theoretische waarde van Sand. Voornamelijk voor ondiep water lopen de lijnen nagenoeg gelijk met elkaar. Om beter beeld te krijgen van het verschil tussen de beide waarden worden ze gerelativeerd door de theoretische waarde van $G_{n,m}$ uit te zetten tegenover de waarde van $G_{n,m}$ van SWASH (zie Figuur 16).

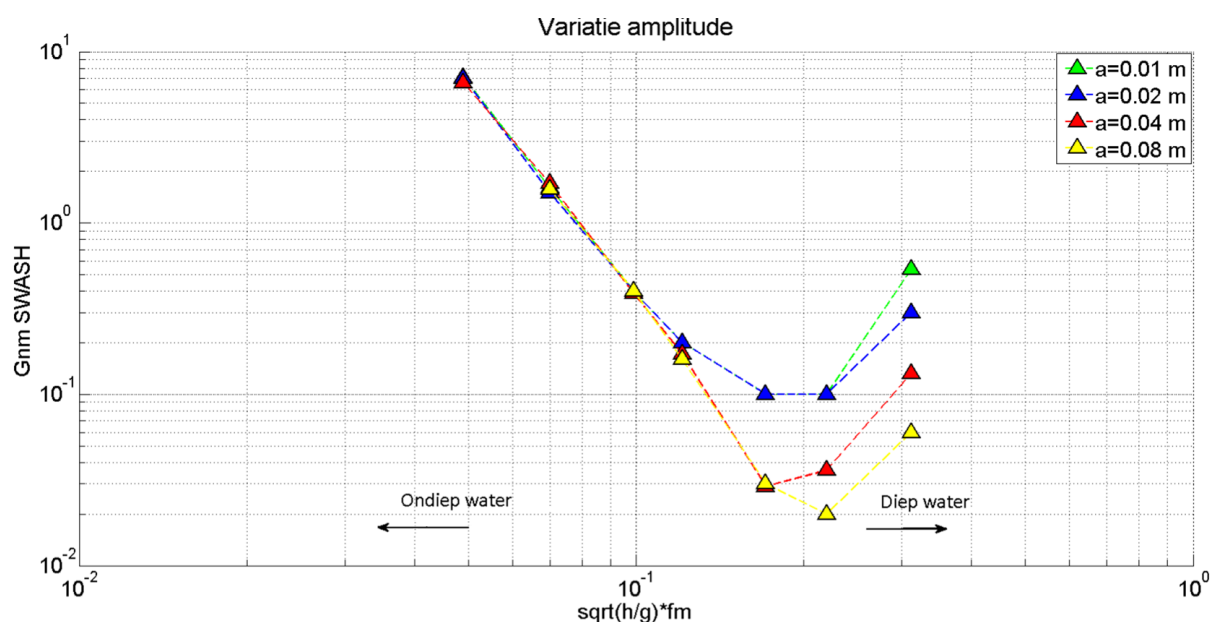


FIGUUR 16 THEORETISCHE WAARDE VAN GNM VERGELEKEN MET DE WAARDE VAN GNM IN SWASH

De theoretische waarde van $G_{n,m}$ komt voor ondiep water goed overeen met de waarde die bepaald is aan de hand van SWASH. Voor tussenliggend en diep water is dit echter niet het geval, de waarde van SWASH wijkt hier af van de theoretische waarde.

6.3. Invloed Amplitude

Volgens de grafiek van Sand zou een variatie van de amplitude van de twee monochromatische golven niet uit mogen maken voor de waarde van de overdrachtsfunctie $G_{n,m}$. Om deze theorie te bevestigen zijn vier verschillende amplitudes geanalyseerd bij dezelfde opgelegde frequenties als in het voorgaande hoofdstuk. Voor de amplitudes 0.01, 0.02, 0.04 en 0.08 is de waarde van de $G_{n,m}$ in SWASH bepaald en weergegeven in Figuur 17 voor de verschillende waterdieptes.

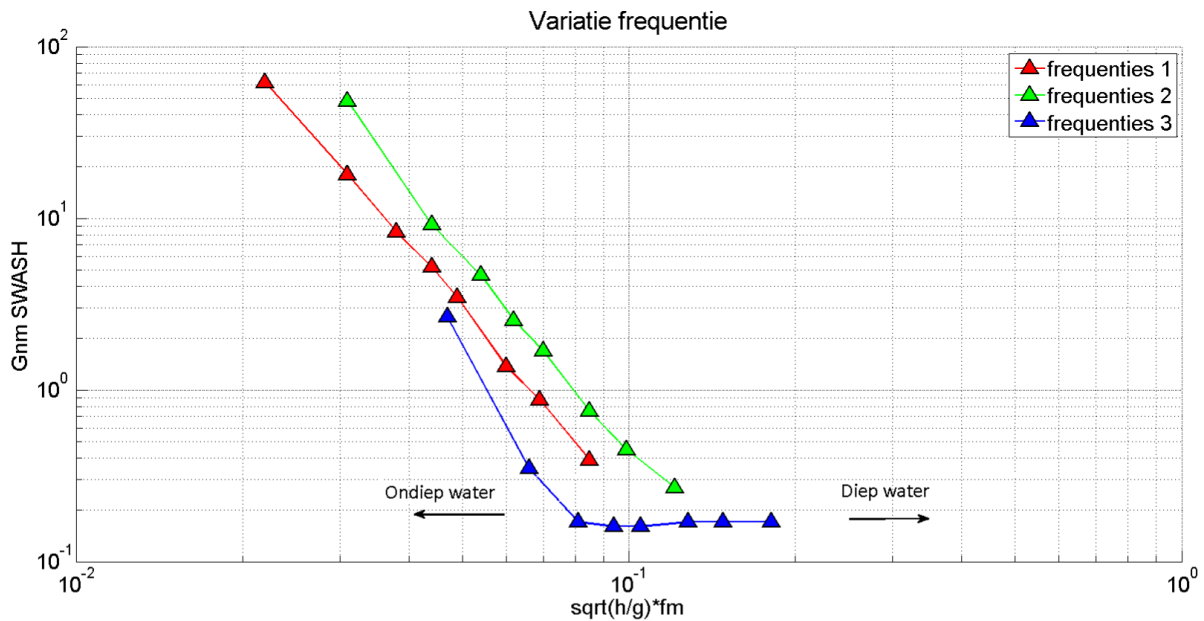


FIGUUR 17 INVLOED VAN DE VARIATIE VAN DE AMPLITUDE VAN DE TWEE OPGELEGDE MONOCHROMATISCHE GOLVEN

Het blijkt dat de twee verschillende amplitudes van de twee korte golven ongeveer dezelfde waarden van SWASH produceren. Wanneer het water dieper wordt is het te zien dat een variatie van de amplitude van de twee korte golven welk degelijk een verschil heeft.

6.4. Invloed Frequentie

In dit hoofdstuk wordt de invloed van verschillende frequenties voor de twee monochromatische golven bepaald (zie Figuur 18). Er zijn drie verschillende frequenties geanalyseerd welke terug te vinden zijn in Tabel 8. Bij deze analyse zijn ditmaal meerdere dieptes in het ondiepe water gekozen.



FIGUUR 18 VARIATIE VAN DE FREQUENTIE VAN DE TWEE OEGELEGE MONOCHROMATISCHE GOLVEN.

Frequenties	Tm (sec)	Tn (sec)	fm (Hz)	fn (Hz)	$\Delta f/f_m$	Amplitudes(m)
1	10.2	8.5	0.0977	0.1172	0.2	0.01
2	14.6	11.4	0.0683	0.0879	0.28	0.01
3	6.8	6.4	0.1465	0.1563	0.06	0.01

TABEL 8 OEGELEGE FREQUENTIES VAN DE TWEE MONOCHROMATISCHE GOLVEN.

Uit de resultaten valt het op dat bij de variatie van de frequentie van de twee monochromatische golven de grafieken dezelfde trend vertoont als bij de overdrachtsfunctie van Sand. De grafiek van Sand laat zien dat wanneer $\frac{\Delta f}{f_m}$ gelijk is aan 0.2 de overdrachtsfunctie $G_{n,m}$ een hogere waarde heeft dan wanneer $\frac{\Delta f}{f_m}$ ongeveer gelijk is aan 0.3. Deze trend is ook duidelijk te zien in SWASH in de vorm van de groene en rode lijn. De blauwe lijn voldoet wat minder aan dit statement, dat heeft er mee te maken dat bij deze frequenties een kleine periode en een kleine verschilfrequentie zijn gekozen.

6.5. Conclusie vergelijking met Sand:

Het eerste wat opvalt uit de theoretische vergelijking met Sand is dat er dezelfde trend ontstaat voor de overdracht van twee korte monochromatische golven naar de gebonden lange golf in SWASH. De grote van de overdracht komt goed overeen voor ondiep water. Voor tussenliggend en diep water komt de waarde van overdracht niet goed overeen. Hieruit kunnen we opmaken dat SWASH met behulp van deze methode niet goed geschikt is voor het modelleren van gebonden lange golven in tussenliggend en diep water.

Voor ondiep water ligt dit anders, de mate van overdracht naar de lange golf komt qua grootte overeen met de overdracht van energie naar de gebonden lange golf. Of deze lange golf ook echt als een gebonden lange golf door het domein gaat valt niet met zekerheid te zeggen omdat het niets bekend is over de snelheid en de golflengte van deze golf.

Bij de variatie van de amplitude van de twee opgelegde monochromatische golven is te zien dat deze bij ondiep water nagenoeg geen invloed heeft op de grote van overdracht tussen de groep korte golven en de lange golf. Alleen bij dieper water gaat deze relatie niet helemaal op, dit komt omdat de lange golf bij grotere dieptes nagenoeg niet meer ontstaat.

Bij de variatie van de frequentie van de twee opgelegde monochromatische golven valt op dat dezelfde trend terug is te vinden als in de grafiek van Sand. Net zoals in de grafiek van Sand te zien is wordt er bij een $\frac{\Delta f}{f_m}$ van 0.2 meer energie overgedragen naar de lange golf dan bij een $\frac{\Delta f}{f_m}$ van ongeveer 0.3.

7. Golfspectrum randvoorwaarde

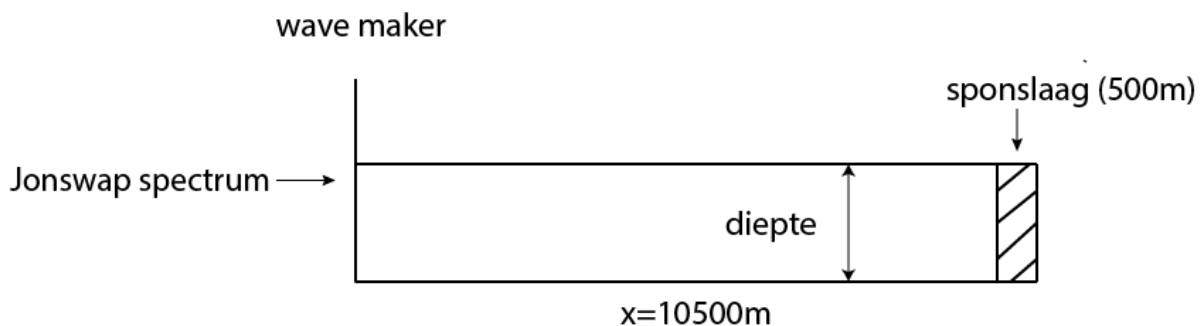
In dit hoofdstuk zal aan de inkomende rand van het domein een één dimensionaal golfspectrum worden opgelegd. Bij opleggen van het spectrum zal gebruik gemaakt worden van een tweede orde correctie waarbij gebonden lange golven aan de rand van het domein worden toegevoegd aan het gegenereerde tijdsignaal. Deze tweede orde correctie functie zal eerst worden toegelicht en de randvoorwaarden voor de nieuwe situatie worden weergegeven. Hierna wordt met behulp van een spectrumanalyse bepaald wat deze functie doet. Daarna wordt het variantie dichtheidsspectrum van het opgelegde golfspectrum in kaart gebracht om de resultaten te kunnen analyseren. Tot slot is er een theoretische vergelijking gemaakt om te kijken hoe goed de gebonden lange golven in SWASH worden opgelegd met behulp van de tweede orde correctie.

7.1. Tweede orde correctie:

Recentelijk is SWASH uitgebreid met een tweede orde correctie voor de generatie van de randvoorwaarden. Deze correctie zorgt ervoor dat er geen ongewenste lange vrije golven in het domein komen en legt een gebonden lange golf op bij twee golfcomponenten (Rijnsdorp et al., 2012). Met behulp van deze correctie zou het mogelijk moeten zijn om gebonden lange golven beter te modelleren.

7.2. Situatieschets en randvoorwaarden:

De nieuwe situatie van de spectrumanalyse is weergegeven in Figuur 19. Wat in deze situatie veranderd is vergeleken met de voorgaande experimenten is dat er nu een Jonswap spectrum aan de inkomende rand van het domein wordt opgelegd in plaats van twee monochromatische golven. De significante golfhoogte is hierbij gelijk aan 0.5 meter en er is een piekperiode gekozen van 10 seconden. Verdere randvoorwaarden zijn nagenoeg gelijk gebleven aan die van de voorgaande experimenten en zijn weergegeven in Tabel 9 en Tabel 10.



FIGUUR 19 SITUATIESCHETS BIJ HET OPLEGGEN VAN EEN GOLFSPECTRUM

Significante golfhoogte (H_s)	0.5m
Piekperiode(T_{peak})	10 sec
Soort Spectrum	Jonswap spectrum
Diepte	5 m
Domein lengte	10500m
Waterdiepte	10 m
Soort bodem	1D, wrijvingsloze, vlakke bodem

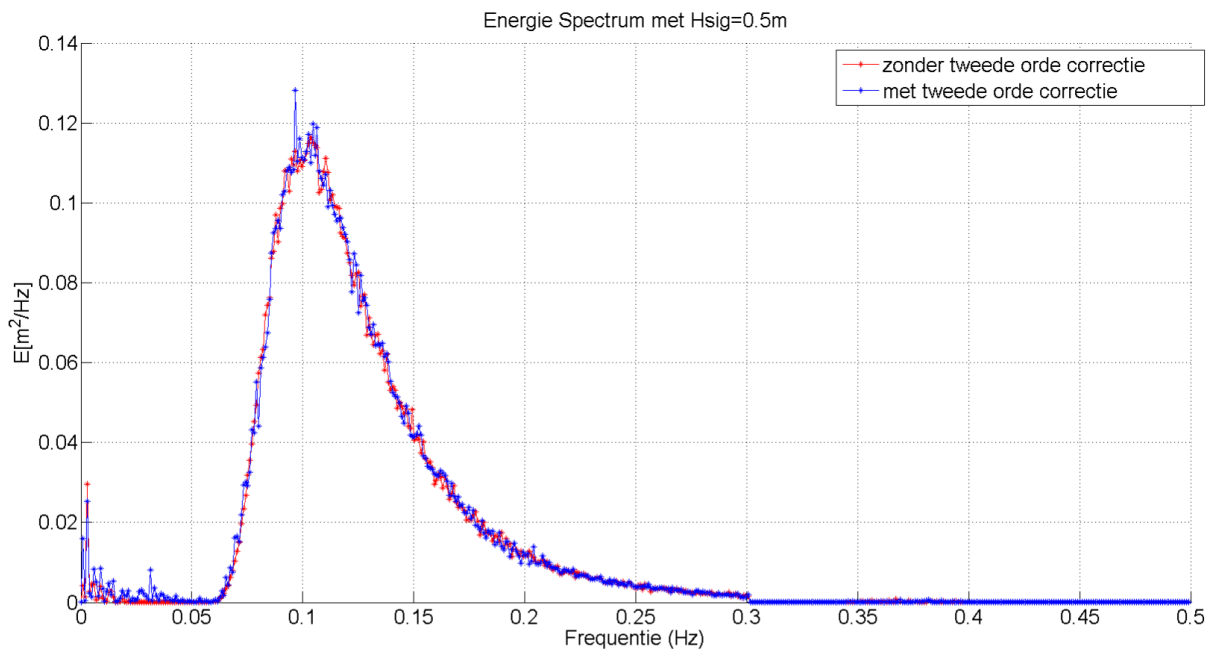
TABEL 9 FYSISCH RANDVOORWAARDE BIJ HET OPLEGGEN VAN EEN SPECTRUM

Aantal verticale lagen	3
Opstarttijd	3600 sec
Lengte tijdsignaal	1024 sec
Grid cellen	10500
Δt	1 sec
Reflectieconditie	Sponslaag (500 m) +Radiation

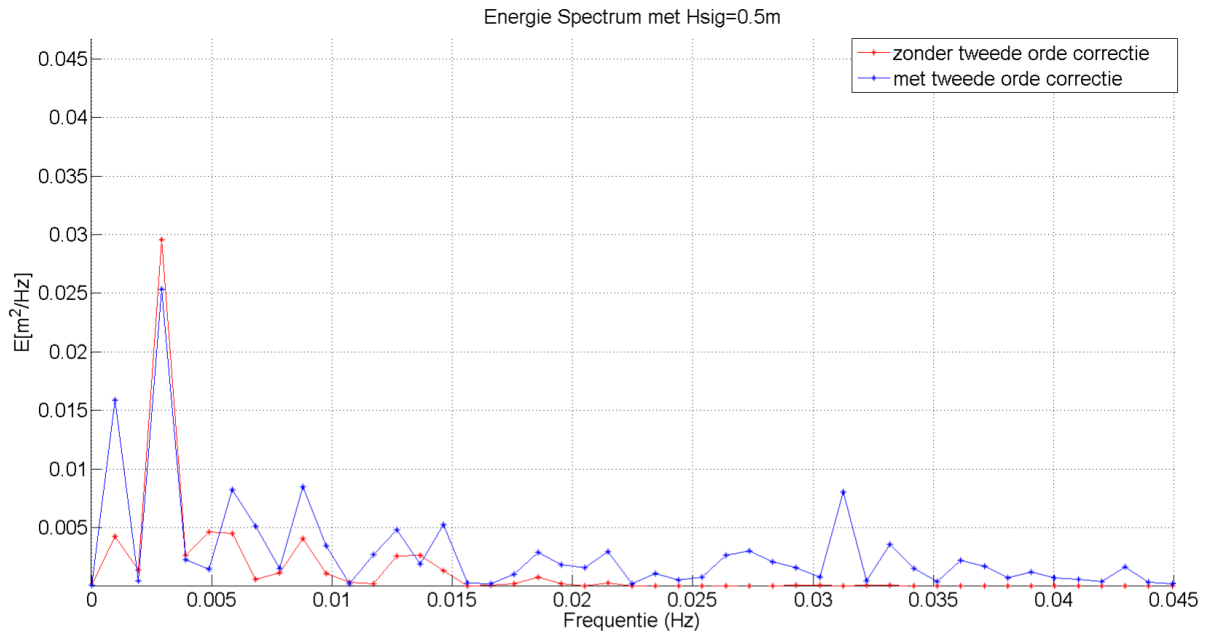
TABEL 10 NUMERIEKE RANDVOORWAARDEN BIJ DE OPLEGGING VAN EEN SPECTRUM

7.3. Variantie dichtheidsspectrum

Met behulp van de hierboven geschetste randvoorwaarden is er door SWASH een tijdsignaal geproduceerd. Dit tijdsignaal is voor verdere analyses omgezet met een fast fourier transformatie naar een variantie dichtheid spectrum (Figuur 20). Het spectrum is weergegeven op $x=0$ van het domein zodat de invloed van de tweede orde correctie functie goed waarneembaar is.



FIGUUR 20 VARIANTIE DICHTHEIDSSPECTRUM BIJ H_{SIG} = 0.5 M OP $x=0$ M



FIGUUR 21 VARIANTIE DICHTHEIDSSPECTRUM INGEZOOMD BIJ Hsig =0.5 M OP X=0 M

Om een theoretische vergelijking te maken wordt gebruik gemaakt van de significante golfhoogte van het spectrum van de gebonden lange golf. Deze kan worden berekend door de oppervlakte onder het variantie dichtheidsspectrum te berekenen. Deze wordt voor de lange gebonden golf bepaald door de oppervlakte onder de grafiek te berekenen van 0 Hz tot en met 0.04 Hz. Hiervoor wordt de onderstaande integraal opgelost.

$$m_0 = \int_0^{0.4} E(f) df \quad (7.1)$$

Hierna wordt met behulp van de berekende energie de significante golfhoogte van de gebonden lange golf bepaald aan de hand van de onderstaande theoretische relatie.

$$H_{slb} = 4 * \sqrt{m_0} \quad (7.2)$$

Hieruit volgt dat de significante golfhoogte van gebonden lange golf gelijk is aan 0.065 meter bij het opgelegde golfspectrum met het gebruik van de tweede orde correctie functie in SWASH.

7.4. Theoretische vergelijking

De theoretische relatie voor het spectrum van de lange gebonden golf wordt weergegeven door een vergelijking te maken met een praktische toepassing die gegeven wordt in Vis(1986). In dit paper wordt een uitdrukking gegeven voor de significante golfhoogte van de gebonden lange golf voor ondiep water en voor diep water. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van de relatie voor ondiep water aangezien $\frac{h}{g \cdot T_p^2} < 0.04$.

Voor ondiep water wordt in Vis(1986) de onderstaande relatie gegeven voor de significante golfhoogte van de gebonden lange golf.

$$H_{slb} = \frac{0.08}{h^2} * T_p^2 * H_s^2 \quad (7.4)$$

Aan de hand van deze vergelijking kan de theoretische significante golfhoogte worden vergeleken met de significante golfhoogte die door de tweede orde correctie functie in SWASH wordt opgelegd. Uit deze vergelijking valt op dat de theoretische waarde goed overeenkomt met de waarde van SWASH (zie Tabel 11).

H_{slb} theoretisch ($H_s = 0.5 \text{ m}$)	0.08 m
H_{slb} SWASH met tweede orde correctie ($H_s = 0.5 \text{ m}$)	0.065 m

TABEL 11 DE SIGNIFICANTE GOLFHOOGTE IN SWASH VERGELEKEN MET DE THEORETISCHE SIGNIFICANTE GOLFHOOGTE.

7.5. Conclusie opleggen spectrum

Bij het gebruik van de tweede correctiefunctie wordt aan het begin van het domein extra golfenergie toevoegt aan de lagere frequenties. Daarnaast valt op uit een eerste vergelijking met de theorie dat de significante golfhoogte van de theoretisch gebonden lange golf goed overeenkomt met die van de opgelegde gebonden lange golf in SWASH bij een significante golfhoogte van 0.5 meter.

8. Conclusie

Uit de resultaten van deze test kan geconcludeerd worden dat door het opleggen van twee monochromatische golven in SWASH een bi-chromatische golf signaal zichtbaar is dat voldoet aan de lineaire golftheorie. Daarnaast blijkt uit de spectrumanalyse dat de twee opgelegde monochromatische golven een lange golf produceren die gelijk is aan de verschilfrequentie van de twee opgelegde monochromatische golven. Tevens is bevestigd dat SWASH andere golfcomponenten genereert welke voortkomen uit de interacties tussen verschillende golffrequenties.

Uit de spectrumanalyse van de ontstane lange golf kan geconcludeerd worden dat er bij verschillende kleinere dieptes een grotere lange golf ontstaat uit de twee opgelegde monochromatische golven. Daarnaast is in de analyse te zien dat er een zweving is ontstaan in het domein bij het opleggen van twee monochromatische componenten. Dit komt omdat er van nature een niet-lineaire component in de vorm van een lange golf bij zitten. Deze is echter niet opgelegd waardoor SWASH een vrije lange golf aan de inkomende rand produceert welke 180 graden uit fase wordt opgelegd. De zweving wordt hierna verholpen door zelf lange golf energie toe te voegen aan de inkomende rand van het domein. Uiteindelijk kan op deze manier de zweving geminimaliseerd worden zodat een betere inschatting kan worden gemaakt van de amplitude van de lange golf die behoort bij de bi-chromatische randvoorwaarde.

Een theoretische vergelijking is gemaakt met de formule van Sand(1981) die een overdrachtsfunctie geeft voor de overdracht tussen twee korte golven en een gebonden lange golf. Het eerste wat opvalt uit de theoretische vergelijking met Sand is dat er dezelfde trend ontstaat voor de overdracht van twee korte monochromatische golven naar de gebonden lange golf in SWASH. Voor tussenliggend en diep water komt de waarde van overdracht niet goed overeen met de overdracht in SWASH. Hieruit kunnen we dus opmaken dat SWASH met behulp van deze methode niet goed geschikt is voor het modelleren van gebonden lange golven in tussenliggend en diep water. Een mogelijke oorzaak hiervan is dat SWASH gebaseerd is op ondiep watervergelijking.

Voor ondiep water ligt dit anders, de mate van overdracht naar de lange golf komt qua grootte overeen met de overdracht van energie naar een gebonden lange golf. Of deze lange golf ook echt als een gebonden lange golf door het domein gaat valt niet met zekerheid te zeggen omdat daarvoor meer geavanceerdere spectrale technieken nodig zijn.

Bij de variatie van de amplitude van de twee opgelegde monochromatische golven is te zien dat deze bij ondiep water nagenoeg geen invloed heeft op de mate van overdracht tussen de groep korte golven en de lange golf. Alleen bij dieper water gaat deze relatie niet helemaal op, dit komt omdat de lange golf bij grotere dieptes nagenoeg niet meer ontstaat.

Bij de variatie van de frequentie van de twee opgelegde monochromatische golven valt op dat dezelfde trend is te zien als bij de grafiek van Sand. Net zoals in de grafiek van Sand te zien wordt er bij een $\frac{\Delta f}{f_m}$ van 0.2 meer energie overgedragen naar de lange golf dan bij een $\frac{\Delta f}{f_m}$ van 0.3.

Bij het gebruik van de tweede correctiefunctie is te zien dat indien deze wordt ingeschakeld aan het begin van het domein er extra golfenergie in de vorm van een lange gebonden golf aan de inkomende rand van het domein wordt toegevoegd. Daarnaast valt op dat uit een eerste vergelijking met de theorie de significante golfhoogte van de theoretisch gebonden lange golf goed overeenkomt met die van de opgelegde gebonden lange golf in SWASH.

Kortom, er is met behulp van dit onderzoek een goede eerste stap gezet voor het modelleren van gebonden lange golven in SWASH. SWASH is in staat om de lange golf te modelleren en speelt in op de generatie van de super harmonische componenten. Daarnaast komt de overdrachtsfunctie van de gemodelleerde lange golf voor ondiep water goed overeen met de theoretische waarde voor de gebonden lange golf. Tevens valt uit een eerste analyse van de tweede orde correctie functie op dat deze goede resultaten vertoont. Uiteindelijk zal er wel meer onderzoek moeten worden gedaan naar de ontstane lange golf om te kijken of SWASH daadwerkelijk geschikt is voor het modelleren van gebonden lange golven.

9. Aanbevelingen

Het wordt aanbevolen om meer onderzoek te doen naar de stoorgolf die ontstaat bij het opleggen van twee monochromatische golven. Het is niet haalbaar om zelf steeds handmatig een lange golf op te leggen aan de inkomende rand van het domein omdat dit een tijdrovend proces is.

Om te kijken of de ontstane lange golf werkelijk een gebonden lange golf is wordt het aanbevolen om de verder onderzoek te doen naar de golfsnelheid en golflengte om zo daadwerkelijk vast te stellen of de gemodelleerde lange golf in SWASH een gebonden lange golf is.

Daarnaast is het gewenst om een exactere vergelijking met de theorie maken, nu werden de waarden steeds afgelezen uit de grafiek wat onnauwkeurigheden met zich mee brengt. Voor betere resultaten wordt het aanbevolen om de grafiek van Sand digitaal na te bootsen of om andere theoretische vergelijkingen te maken die nauwkeuriger zijn.

Om SWASH echt in de praktijk toe te passen wordt het aanbevolen om verdere experimenten uit te voeren over een twee dimensionale vlakke dimensionale bodem. Hierbij kan de invloed van een hoek tussen twee monochromatische golven worden bepaald.

Het wordt aanbevolen om meer onderzoek te doen naar het opleggen van een spectrum aan de inkomende rand van het domein. In dit onderzoek is er slechts een enkel geval getoetst. Het wordt aanbevolen om dit uit te voeren voor meerdere significante golfhoogtes en verschillende periodes.

10. Referenties:

Brown, E., Colling, A., Park, D., Philips, J., Rothery, D., & Wright, J. (1999). *Waves, tides and shallow-water processes*. Oxford: Butterworth Henemann.

Hansen, O. (1978). *long period waves in natural wave trains*. Institute of Hydrodynamics, Denmark.

Rijnsdorp, D. P., Smit, P. B., & Zijlema, M. (2012). *Non-hydrostatic modelling of infragravity waves using SWASH*. Delft: TU Delft.

Sand, S. E. (1981). *Long waves in directional seas*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.

The SWASH Team (2014, januari 12). *SWASH user manual*. Received from SWASH Simulating WAVes till SHore: <http://swash.sourceforge.net>

Vis, F. C., Mol, A., Marcos Rita, M. A., & Deelen, C. (1986). *Long waves and harbour design*. Lissabon: Ministério das obras.

Zijlema, M., Stelling, G., & Smit, P. (2011). *SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal water*. Delft: Elsevier.

11. Lijst van symbolen

11.1. Algemeen

Symbool	Betekenis	Eenheid
g	Valversnelling	$m^2 s^{-1}$
L	Golflengte	m
T	Periode	s
f	Frequentie	s^{-1}
ω	Hoekfrequentie	$rad s^{-1}$
k	Golfgetal	m^{-1}
h	golfhoogte	m
f_N	Nyquist frequentie	s^{-1}
D	Lengte van het tijdsignaal	s
Δf	Verschilfrequentie of frequentieresolutie	s^{-1}
m_0	Energieoppervlakte	m^2
$E(f)$	Energie op punt f	$N m^{-2}$
H_s	Significante golfhoogte	m
H_{slb}	Significante golfhoogte gebonden lange golf	m
T_p	Piekfrequentie	s

TABEL 12 ALGEMENE LIJST VAN SYMBOLEN

11.2. Basisvergelijkingen SWASH

Symbool	Betekenis	Eenheid
ζ	Oppervlakte uitwijking	m
h	Hoogte van het waterniveau gemeten vanaf de bodem	m
u	Gemiddelde diepteafhankelijke stroomsnelheid in x-richting	$m s^{-1}$
v	Gemiddelde diepteafhankelijke stroomsnelheid in y-richting	$m s^{-1}$
q	Hydrostatische druk	$N m^{-2}$
c_f	Dimensie loze bodem wrijvingscoëfficiënt	—
τ_{ij}	De horizontale turbulente spanningen gegeven in de richting i, j .	$N m^{-2}$

TABEL 13 LIJST VAN SYMBOLEN BIJ DE BASISVERGELIJKINGEN VAN SWASH

11.3. Overdrachtsfunctie SAND

Symbool	Betekenis	Eenheid
η	Hoogte van het waterniveau voor korte golven	m
c_n	Amplitude van golf n	m
ω_n	Hoekfrequentie van golf n	$rad\ s^{-1}$
k_n	Golfgetal van golf n	m^{-1}
ϕ_n	Fase van de golf n	s
t	Tijd op tijdstip t	s
x	Afstand op punt x	m
c_m	Amplituden van golf m	m
ω_m	Hoekfrequentie van golf m	$rad\ s^{-1}$
k_m	Golfgetal van golf m	m^{-1}
ϕ_m	Fase van golf m	s
$\Delta\omega_{nm}$	$(\omega_n - \omega_m)$	$rad\ s^{-1}$
Δk_{nm}	$(k_n - k_m)$	m
$\xi_{n,m}$	Golfhoogte gebonden lange golf	m
$G_{n,m}$	Overdrachtsfunctie Sand	—

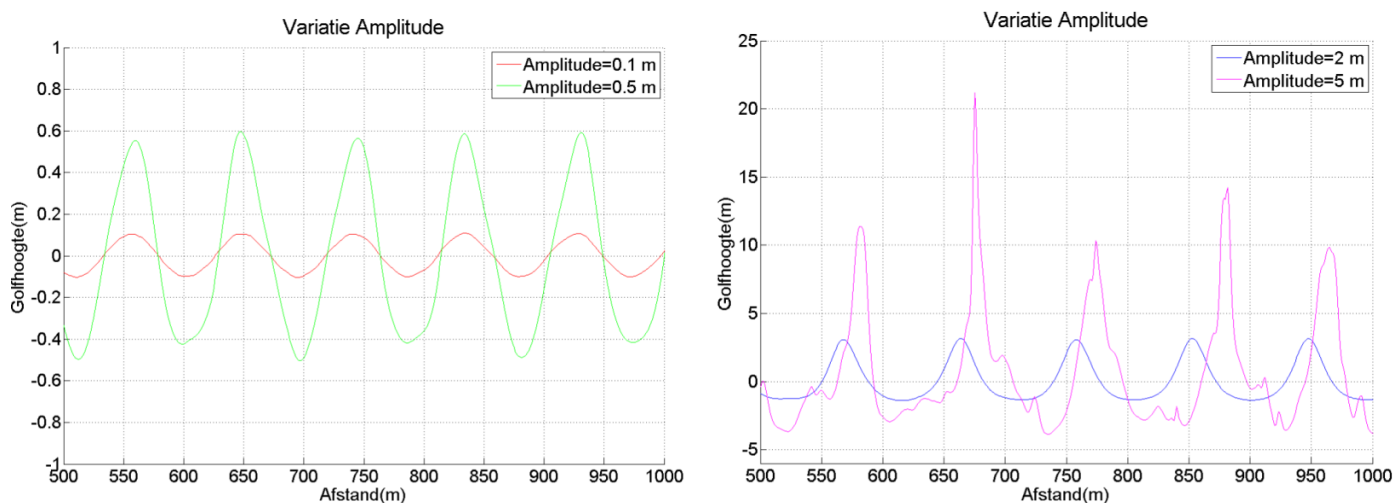
TABEL 14 LIJST VAN SYMBOLEN BIJ DE OVERDRACHTSFUNCTIE VAN SAND

12. Bijlagen

Bijlage A1 Variatie amplitude en periode

Variatie Amplitude:

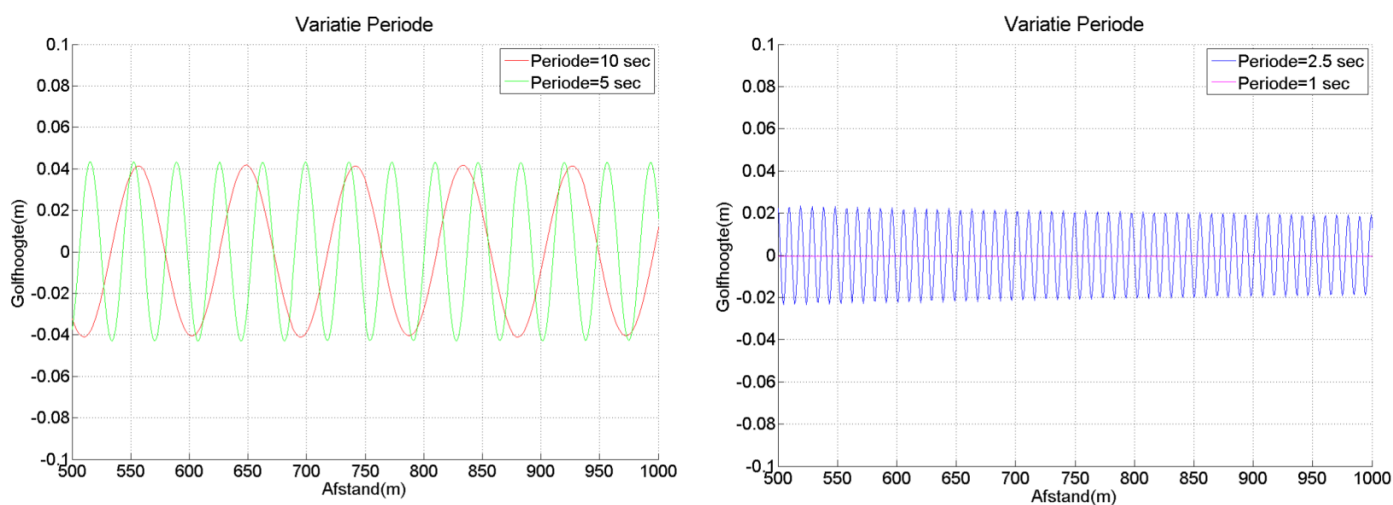
Er is gekeken hoe SWASH inspringt op de variatie van de amplitude en de periode en wat hierbij de beperkingen zijn bij een opgelegde diepte van 10 meter. Indien de amplitude wordt gevarieerd tot en met 2 meter is te zien dat de golf zijn monochromatische eigenschappen nog behoudt (zie Figuur 22). Wanneer de amplitude groter wordt dan vertoont de golf geen monochromatische eigenschappen meer en komt de amplitude niet meer overeen met de opgelegde amplitude. Bij hogere amplitudes dan 5 meter geeft het model een error.



FIGUUR 22 A EN B INVLOED VAN DE VARIATIE VAN DE AMPLITUDE BIJ EEN MONOCHROMATISCHE GOLF.

Variatie Periode:

Er is tevens gekeken wat de invloed van de variatie van de periode is (Figuur 23). Het is te zien dat vanaf 2.5 seconden de periode al niet meer goed overeenkomt met de opgelegde amplitude van 0.04 m. Daarnaast wordt bij een periode van 1 seconde er al helemaal geen golf meer geproduceerd. Dit komt door de resolutie van het rekengrid en de gekozen tijdstappen.

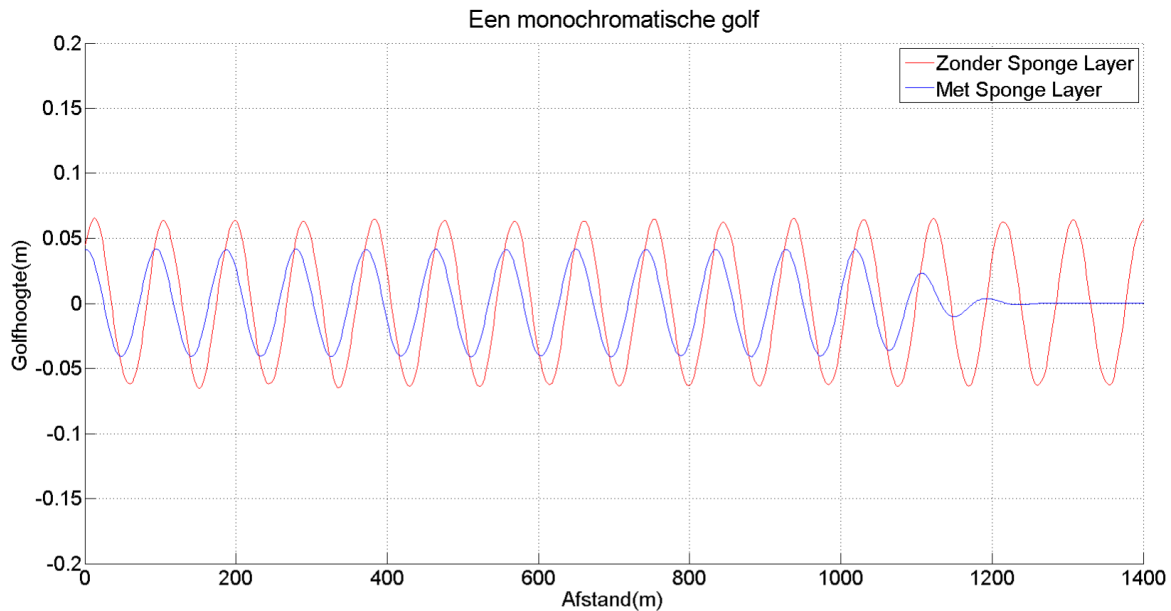


FIGUUR 23 A EN B INVLOED VAN DE PERIODE BIJ EEN MONOCHROMATISCHE GOLF.

Bijlage A2 Sponslaag en Radiation

Werking sponslaag

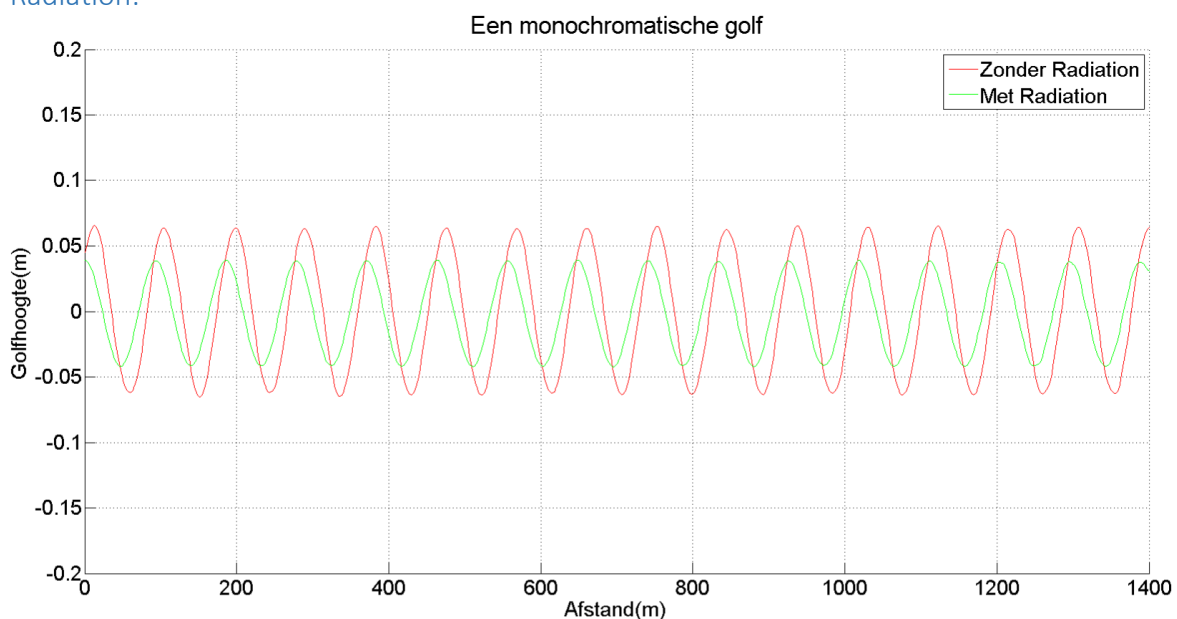
In Figuur 24 wordt de werking van de Sponslaag weergegeven. Er is hier te zien dat er reflectie optreedt doordat de amplitude van de golf zonder spons hoger is dan de amplitude met spons. Er is een sponslaag van 400 meter gekozen, wat in het Figuur 24 terug te zien is doordat de amplitude van de golf met spons langzaam uit dempt.



FIGUUR 24 INVLOED VAN DE SPONSLAAG OP DE UITDEMPING VAN EEN MONOCHROMATISCHE GOLF WAARBIJ $T=10$ SEC $L=93$ M EN $D=10$ M

Naast de invloed van de sponslaag is ook de invloed van het commando radiation uitgezocht Figuur 25. Het is te zien dat Radiation niet de golf uitdempt zoals de sponslaag doet maar wel ervoor zorgt dat er geen reflectie is aangezien de opgelegde amplitude gelijk is aan de amplitude die op de rand wordt opgelegd. Een grotere amplitude wijst op het bestaan van een staande golf ten gevolge van reflecties.

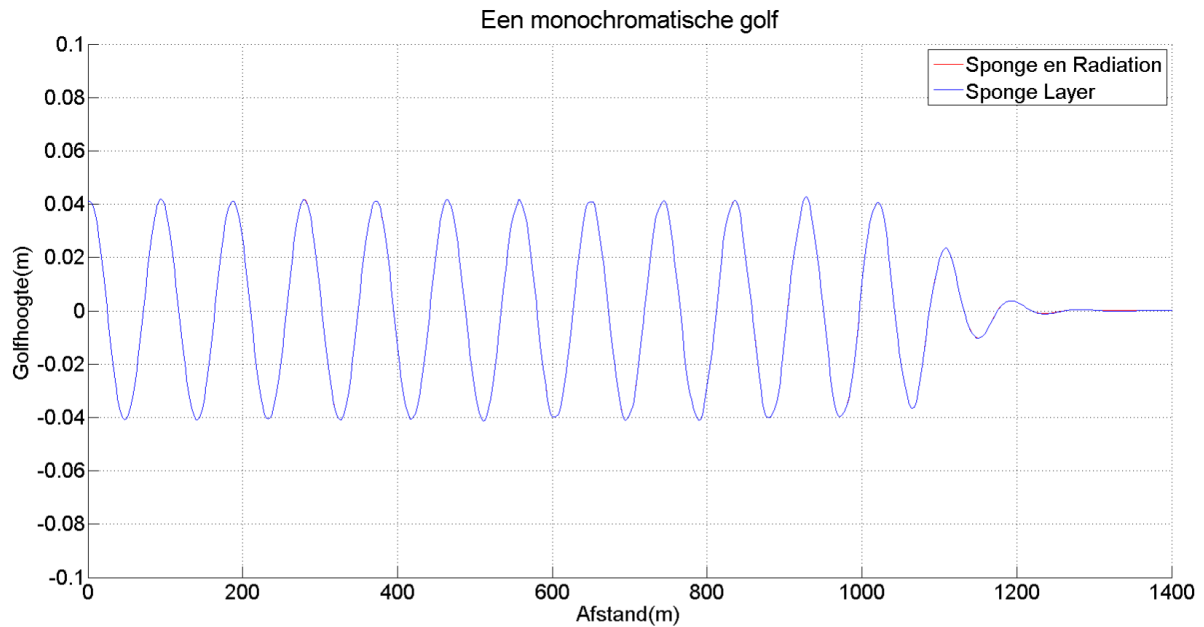
Radiation:



FIGUUR 25 INVLOED VAN RADIATION OP EEN MONOCHROMATISCHE GOLF, WAARBIJ $T=10$ SEC $L=93$ M EN $D=10$ M

Radiation en Sponslaag

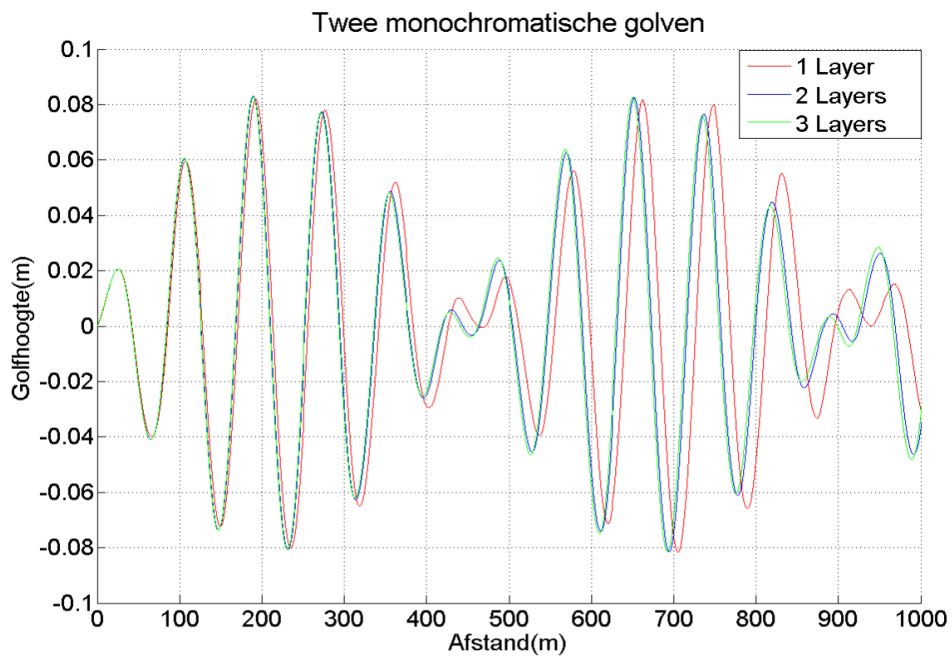
In Figuur 26 is de invloed van een sponslaag in combinatie met Radiation weergegeven. Het valt op dat er nauwelijks verschil is. Om er zeker van te zijn dat de golven volledig uitdempen wordt er gebruik gemaakt van beide commando's.



FIGUUR 26 INVLOED WEERGEGEVEN VAN DE COMBINATIE VAN EEN SPONSLAAG SAMEN MET RADIATION, WAARBIJ $L=93$ M EN $T=10$ SEC

Bijlage A3 Keuze van het aantal verticale lagen

In Figuur 27 is de invloed van het aantal verticale lagen weergegeven. Hoe meer lagen er worden gekozen des te nauwkeuriger is de dispersierelatie kan worden afgeleid. De SWASH manual adviseert bij onze opgelegde randvoorwaarden het gebruik van drie verticale lagen.



FIGUUR 27 EFFECT VAN DE KEUZE VAN HET AANTAL VERTICALE LAGEN BIJ EEN BICHROMATISCHE GOLF, WAARBIJ $T_1=10,2$ SEC, $T_2=8,5$ SEC, $L_1=94$ M EN $L_2=$ EN DIEPTE=10 M

Bijlage B1 Frequentiekeuze voor de spectrumanalyse

Voor de spectra analyses is een tijdsignaal van 1024 seconden gebruikt. Bij het tijdsignaal zijn de frequenties zo gekozen dat er een zodanig interval is bij de spectrumanalyse geen problemen ontstaan met betrekking tot de discrete waarden van de frequentie.

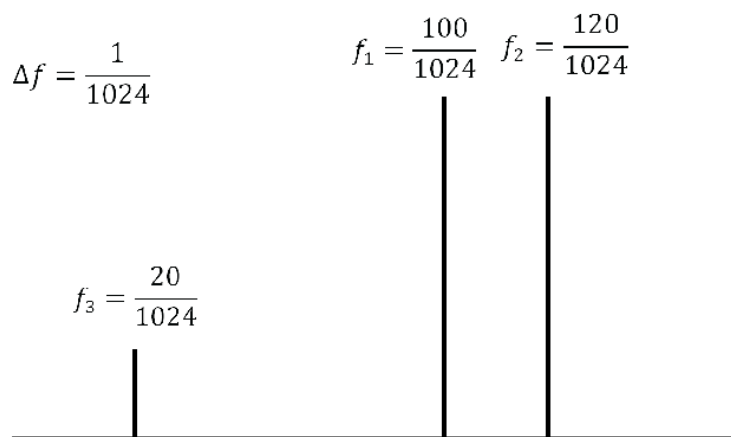
$$f_1 = \frac{100}{1024} = 0.0977 \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{120}{1024} = 0.1172 \text{ Hz}$$

$$f_3 = \frac{120}{1024} - \frac{100}{1024} = \frac{20}{1024} = 0.0195 \text{ Hz}$$

$$\Delta f = \frac{1}{1024} = 9.4 * 10^{-4}$$

Aan de hand van de bovenstaande frequenties en tijdsignaal zijn de grootte worden de pieken van de spectrumanalyse goed weergegeven doordat f_1 , f_2 en f_3 een veelvoud zijn van Δf . (Figuur 28)



FIGUUR 28 SPECTRUM VAN DE GEKOZEN FREQUENTIES.