

Verbeteren van AMAiWave en constructie van een golfabsorbeerder

De Romagnoli Jetro

Scriptie voorgedragen tot het behalen
van de graad van
Master in de Nautische Wetenschappen
aan de Hogere Zeevaartschool

Promotor: Kapt. dr. W. Jacobs

Academiejaar 2024-2025

Woord vooraf

In deze scriptie wordt de huidige golfgenerator, genaamd Antwerp Maritime Academy Induced Wave, omgebouwd tot een pneumatisch aangedreven constructie. De ontwikkeling en constructie van een golfabsorbeerder moet de creatie van een staande golf voorkomen. Deze testopstelling maakt deel uit van meerdere projecten waarin schepen gebruikt worden om golfenergie te oogsten en te gebruiken als voortstuwing of elektrische energie. Prototypes zullen geëvalueerd worden op tal van verschillende parameters zoals energieproductie, technische haalbaarheid en efficiëntie. Vervolgens zal het onderzoek worden voortgezet op een natuurlijk meer.

De technische aspecten achter dit project spraken mij het meeste aan in deze scriptie. Het ontwikkelen en uitwerken van een project geeft mij veel voldoening. Het concept om golfenergie te oogsten en te gebruiken in een maritieme context is veelbelovend en zeer interessant.

Graag wil ik in eerste plaats Kapitein dr. W. Jacobs bedanken voor alle hulp en begeleiding bij het schrijven van deze scriptie, evenals alle adviezen, technisch inzicht en maritieme ervaring die hij gedeeld heeft tijdens het ombouwen van de golfgenerator en ontwikkelen van de absorbeerder. Ik wil ook mijn ouders bedanken voor hun creatieve ideeën, het nalezen van deze scriptie en alle steun en vertrouwen het afgelopen jaar. Tenslotte wil ik graag mijn vrienden, medestudenten en kotgenoten bedanken voor hun steun en ontspanning.

Samenvatting

AMAIWave is een golfgenerator die zich bevindt in een testbassin van de Antwerp Maritime Academy. Deze scriptie richt zich op de ombouw van de golfgenerator naar een pneumatisch aangedreven systeem, evenals de ontwikkeling en realisatie van een golfabsorbeerder ter voorkoming van een staande golf. De installatie is ontworpen om prototypes van de projecten FinEShIP en AMARETO te testen in een gecontroleerde omgeving.

In eerste instantie onderzoeken we de toepassingen en benodigdheden voor de installatie, waarna elk onderdeel van de golfgenerator wordt toegelicht. De golfgenerator wordt aangestuurd via een Arduino in combinatie met een relaischakeling. Hierdoor kunnen consistente golven worden opgewekt met een periode tussen 300 milliseconden en 1 seconde.

In het tweede deel van deze scriptie analyseren we bestaande oplossingen en ontwikkelen we een schuine helling, geïnspireerd op een natuurlijk strand, om reflectie en de vorming van een staande golf tegen te gaan. Tot slot worden de prestaties van de golfgenerator en de golfabsorbeerder geëvalueerd, met aandacht voor mogelijke verbeteringen.

Abstract

AMAIWave is a wave generator located in a test basin of the Antwerp Maritime Academy. This thesis focuses on the conversion of the wave generator to a pneumatically driven system, as well as the development and realization of a wave absorber to prevent a standing wave. The installation is designed to test prototypes of the FinEShiP and AMARETO projects in a controlled environment.

First, we investigate the applications and requirements for the installation, after which each part of the wave generator is explained. The wave generator is controlled via an Arduino in combination with a relay circuit. This allows consistent waves to be generated with a period between 300 milliseconds and 1 second.

In the second part of this thesis, we analyse existing solutions and develop an inclined slope, inspired by a natural beach, to prevent the reflection and formation of a standing wave. Finally, the performance of the wave generator and the wave absorber is evaluated, with attention to possible improvements.

Inhoudsopgave

LIJST VAN FIGUREN	XII
LIJST VAN TABELLEN	XIV
LIJST VAN AFKORTINGEN.....	XV
1 INLEIDING	1
2 PROJECTEN	2
2.1 FinEShIP	2
2.2 AMARETO	3
2.3 Overige projecten	4
2.3.1 Oscillerende Water Kolom	4
2.3.2 Overslaginstallatie.....	5
2.3.3 Oscillerende stootvormer	6
2.3.4 Schepen voorbewogen door vinnen	7
3 GOLVEN	8
3.1 Wat zijn golven	8
3.2 Karakteristieken van een golf	8
3.3 Propagatie van oceaangolven.....	9
3.4 Golfdispersie.....	10
3.5 Reflectie	10
3.6 Refractie	11
3.7 Diffractie	11
3.8 Soorten Golven	12
3.8.1 Windgolven	12
3.8.2 Deining	13
3.8.3 Getijgolven.....	13
3.9 Creëren van de ideale golf.....	14
3.10 Breken van golven	15
3.10.1 Opkomende golf	15
3.10.2 Duikende golf	15
3.10.3 Instortende golf	16
3.10.4 Overstromende golf.....	16
4 GOLFGENERATOR	17
4.1 Principe	17
4.2 Originele golfgenerator	17
4.3 Pneumatische aandrijving	18
4.4 Hardware	19
4.4.1 Overzicht.....	19

4.4.2	Onderdelen	20
4.5	Besturing.....	26
4.5.1	Onderdelen	26
4.5.2	Schema.....	31
4.5.3	Software.....	32
4.6	Afstelling	34
4.7	Problemen	34
4.7.1	Arduino reset	34
4.7.2	Turbulentie achter golfgenerator	36
4.8	Testresultaten.....	40
4.8.1	Flexibiliteit.....	40
4.8.2	Uithoudingstest.....	41
4.8.3	Eigenschappen van de golven	42
4.8.4	Prestaties met een prototype	43
5	GOLFABSORBEERDER	45
5.1	Doel.....	45
5.2	Soorten Absorbeerders.....	45
5.2.1	Actieve compensatie.....	45
5.2.2	Passieve absorptie	45
5.3	Bestaande Absorbeerders	47
5.3.1	Cantabria Coastal and Ocean Basin	47
5.3.2	OMEY Labs	48
5.3.3	MIT Tow Tank Lab	49
5.4	Ontwerp.....	49
5.4.1	Ontwerp Criteria	49
5.4.2	Ontwerp 3D-model	50
5.4.3	Afstelbaarheid.....	51
5.5	Assemblage.....	51
5.6	Testen	53
5.6.1	Tijd tot stilstand	53
5.6.2	Flexibiliteit.....	54
6	CONCLUSIE	55
7	BIBLIOGRAFIE	56
	BIJLAGEN.....	60
A	AMAiWave Arduino Software.....	60
B	I2C Scanner	63
C	Beeldmateriaal golfhoogte 300ms.....	64
D	Beeldmateriaal golfhoogte 500ms.....	64
E	Beeldmateriaal golfhoogte 800ms.....	64

F	Beeldmateriaal golfhoogte 1000ms.....	64
G	Beeldmateriaal tijd tot stilstand 300ms.....	64
H	Beeldmateriaal tijd tot stilstand 500ms.....	64
I	Beeldmateriaal tijd tot stilstand 800ms.....	64
J	Beeldmateriaal tijd tot stilstand 1000ms.....	64
K	Beeldmateriaal absorbeerder 500ms	64
L	Beeldmateriaal schaalmodel 500ms.....	64

Lijst van figuren

Figuur 1 Wereldwijde energieproductie	1
Figuur 2 FinEShIP model	2
Figuur 3 Bassin	3
Figuur 4 Concept AMARETO	4
Figuur 5 Oscillerende Water Kolom	5
Figuur 6 Overtopping Bassin	5
Figuur 7 Oscillerende stootomvormer van WaveRoller	6
Figuur 8 Scheepspropulsie met vinnen	7
Figuur 9 Golfkarakteristieken	8
Figuur 10 Dispersie	10
Figuur 11 Reflectie, Diffractie en Refractie	11
Figuur 12 Refractie	11
Figuur 13 Golf refractie	12
Figuur 14 Creatie van windgolven	13
Figuur 15 Aantrekking van de maan op de aarde	14
Figuur 16 Breken van golven	15
Figuur 17 Constructie golfgenerator	18
Figuur 18 Pneumatisch schema	19
Figuur 19 Pneumatische Cilinder Festo	20
Figuur 20 Magneetventiel Festo	21
Figuur 21 Luchtstroom bij intrekken van de cilinder	21
Figuur 22 Luchtstroom bij uitschuiven van de cilinder	22
Figuur 23 Smoorventiel	23
Figuur 24 Illustratie volumes pneumatische cilinder	24
Figuur 25 Luchtcompressor	25
Figuur 26 Datafiche nr.1 Compressor	25
Figuur 27 Datafiche nr.2 Compressor	25
Figuur 28 2 kanaal relais HL-52S	27
Figuur 29 16x2 lcd-scherm	28
Figuur 30 Step up converter	28
Figuur 31 CAD model behuizing	29

Figuur 32 3D-modellen elektronische componenten	30
Figuur 33 AMAiWave bedrading.....	30
Figuur 34 AMAiWave besturing.....	31
Figuur 35 Schema elektronica	31
Figuur 36 Ruimte achter de golfgenerator	36
Figuur 37 Neutralisatie test nr. 1 met houten plaat	37
Figuur 38 Neutralisatie test nr. 2 met isolatie	37
Figuur 39 Neutralisatie test nr. 3 met houten plank	38
Figuur 40 AMAiWave herpositioneerd	39
Figuur 41 Verwijderen metalen plaat aan de voorzijde.....	39
Figuur 42 Golven met een periode van 500, 650 en 1000ms	40
Figuur 43 Testopstelling.....	41
Figuur 44 Hoogte markering	42
Figuur 45 Test schaalmodel met periode van 500ms	43
Figuur 46 Verticale absorbeerder	46
Figuur 47 Surf zone strand.....	46
Figuur 48 Shoaling effect	47
Figuur 49 Zijaanzicht absorbeerder CCOB	48
Figuur 50 Wave Absorber Module OMEY Labs.....	48
Figuur 51 MIT Tow Tank Golfabsorbeerder	49
Figuur 52 CAD model bassin	50
Figuur 53 Frame Golfabsorbeerder	52
Figuur 54 Golfabsorbeerder in het bassin	52
Figuur 55 Verschillende hoogtes helling.....	53
Figuur 56 Inkomende golven breken op de helling	54

Lijst van tabellen

Tabel 1 Technische specificatie pneumatische cilinder	20
Tabel 2 Technische specificatie magneetventiel	22
Tabel 3 Technische specificaties smoorventiel.....	23
Tabel 4 Technische specificaties luchtcompressor	26
Tabel 5 Technische specificatie drukregelaar	26
Tabel 6 Technische specificatie step up converter	28
Tabel 7 Bedrading I2C 16x2 LCD	32
Tabel 8 Bedrading rotary encoder	32
Tabel 9 Bedrading 2 kanaal 5V relais	32
Tabel 10 Voortplantingssnelheid	43
Tabel 11 Testresultaten absorbeerder	53

Lijst van afkortingen

AMARETO

Antwerp Maritime Academy Rolling Energy Transforming Oscillator

CAD

Computer Aided Design

FDM

Fused Deposition Modeling

FinEShip

Fin Energy for Ship Propulsion

PLA

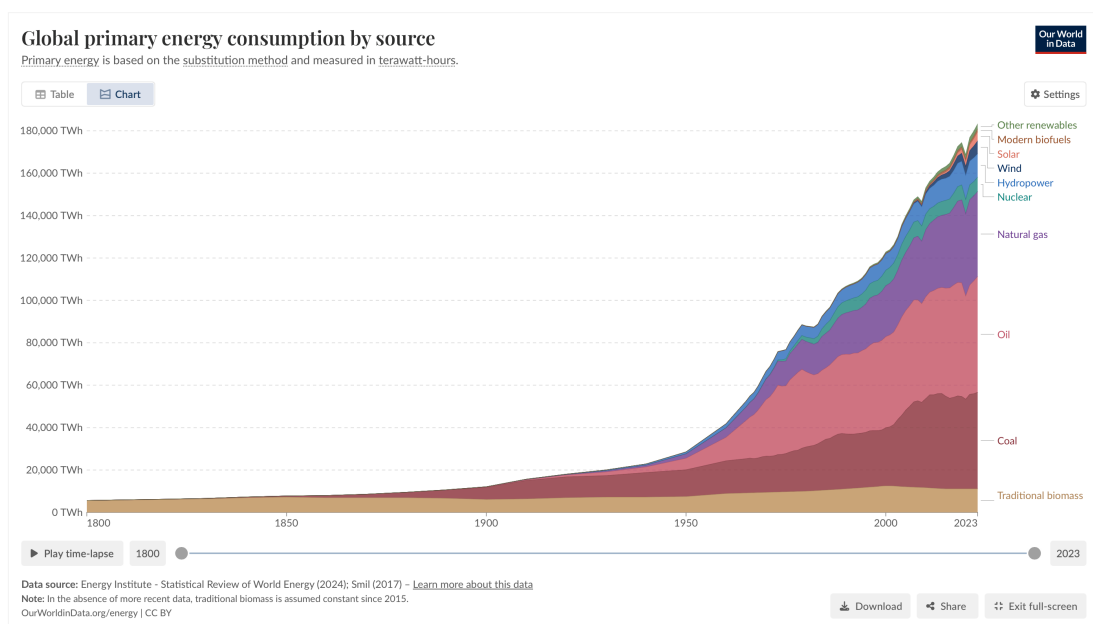
Polyactic Acid

WEC

Wave Energy Converter

1 Inleiding

De wereldwijde toename in energieverbruik (Our world in data, 2024), in combinatie met de groeiende vraag naar hernieuwbare energiebronnen (International Energy Agency, 2025), stimuleert de ontwikkeling van alternatieve methoden voor energieopwekking. Eén van deze bronnen is golfenergie, waarbij de natuurlijke beweging van water wordt omgezet in bruikbare duurzame energie via zogenaamde *Wave Energy Converters*, oftewel *WEC*. Water op aarde wordt door natuurlijke fenomenen in beweging gebracht, waaronder de wind, de aantrekkingskracht van de maan en de zon, en de rotatie van de aarde.



Figuur 1 Wereldwijde energieproductie
Bron: Our world in data (2024)

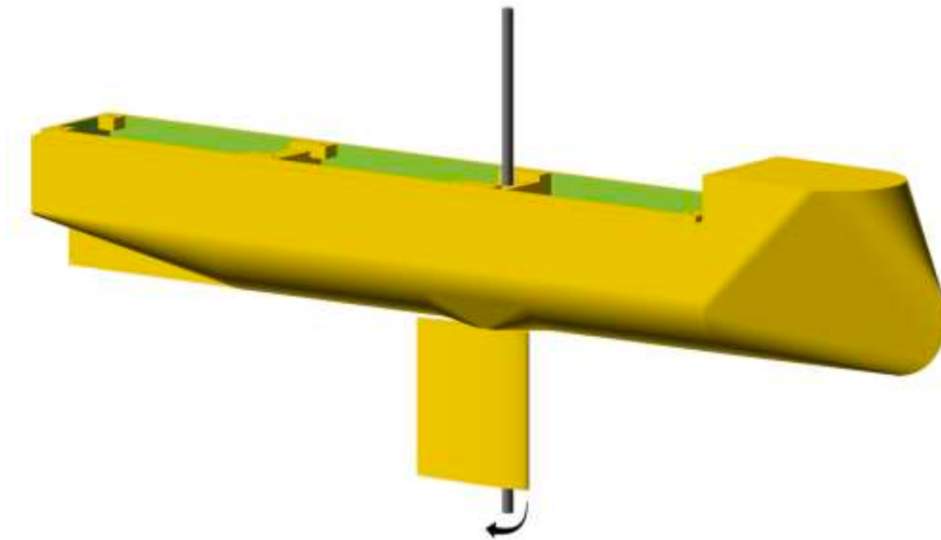
Hoewel golfenergie een veelbelovende technologie vormt, bevinden veel concepten zich nog in een experimentele fase. Kapt. Dhr. Jacobs bekeek het principe vanuit een andere hoek, en kwam met het idee om golfenergie om te zetten naar bruikbare energie met behulp van een schip. Om dit idee verder uit te werken is een experimentele testopstelling vereist waarin verschillende prototypes ontwikkeld en geëvalueerd kunnen worden in een gecontroleerde omgeving.

In dit onderzoek worden eerst de theoretische aspecten van golfvorming besproken. Vervolgens wordt ingegaan op de ontwikkeling van een golfgenerator aangedreven door een pneumatische cilinder en een golfabsorberend systeem. Tot slot wordt het volledige ontwerp geëvalueerd aan de hand van tests in een gecontroleerde omgeving.

2 Projecten

2.1 FinEShIP

Op dit moment lopen er twee projecten van de Antwerp Maritime Academy die door middel van schepen deze energie willen opvangen en gebruiken. FinEShIP, Fin Energy for Ship Propulsion, doet onderzoek naar het voortstuwten van een schip door onderaan het schip een vin te monteren. De energie uit de golven wordt door FinEShIP omgezet in voorwaartse kracht die het schip voortstuwt. Doordat schepen reeds een voorwaartse beweging hebben, verbetert de vin de efficiëntie en biedt deze een alternatief ten opzichte van traditionele manier van voortstuwing zoals motoren of zeilen.



Figuur 2 FinEShIP model
Bron: Tijs Defoor (2022)

Voor dit project is er een bassin geconstrueerd uit hout en glasvezel door Kapt. Dr. Jacobs, Stefaan Bueken en Ivan van Staeyen. Het bassin heeft een lengte van 4m85 en een breedte van 1m18. Het water is gevuld tot 70cm, dit geeft ons een inhoud van 4000 liter water. Waar vroeger tests uitgevoerd werden op het meer van de Antwerp Maritime Academy, werd het nu mogelijk om tests uit te voeren in een gecontroleerde omgeving zonder de invloed van natuurlijke fenomenen.

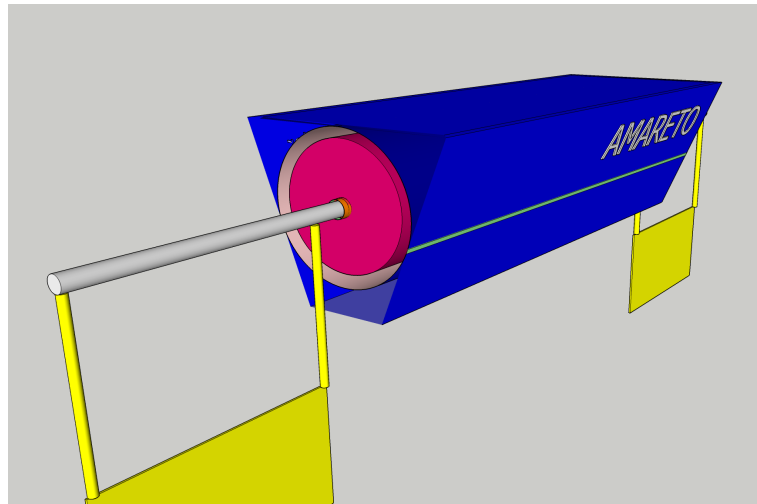


Figuur 3 Bassin
Bron: Peter Carlier (2023)

Tijdens het uitvoeren van tests voor FinEShIP ontstond het idee om een golfgenerator te installeren. Door de golfgenerator wordt het mogelijk om de prototypes bloot te stellen aan kunstmatige golven en zo FinEShIP te optimaliseren. De golfgenerator werd door Carlier Peter ontwikkeld en geconstrueerd.

2.2 AMARETO

Anderzijds hebben we het project AMARETO, Antwerp Maritime Academy Rolling Energy Transforming Oscillator, dat de rollende beweging van een schip dat voor anker ligt zal omzetten in elektrische energie. Een slinger blijft stabiel hangen door middel van een tegengewicht en beweegt enkel relatief gezien tegenover het schip. Mogelijks zal er ook gebruik gemaakt worden van een vin in het water dat een beweging tegenover het water beperkt. De slingerende beweging die binnenin het schip wordt waargenomen wordt door middel van een eenrichtingskoppeling en een vlieg wiel omgezet in een roterende beweging. De golven die nodig zijn voor de tests van dit project hangen sterk af van de grootte van het schaalmodel, en het wordt verwacht dat de periode zich tussen 500ms en 1000ms bevindt.



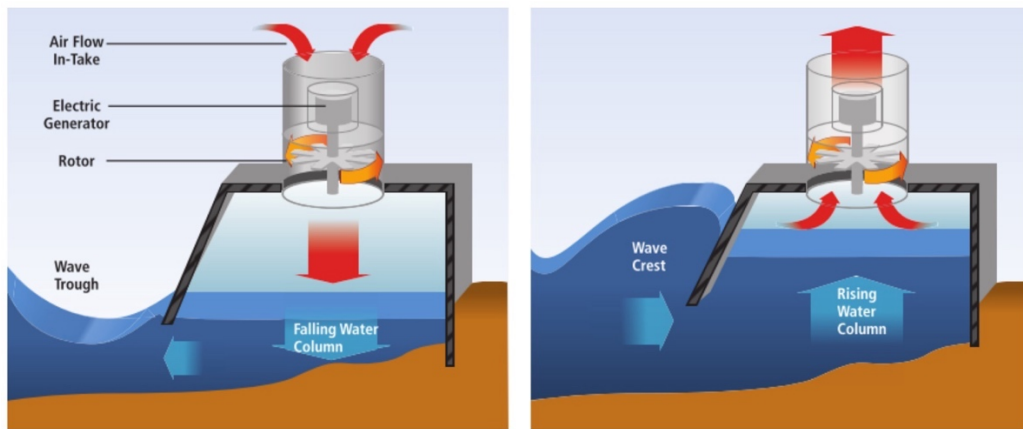
Figuur 4 Concept AMARETO
Bron: Kapt. Dhr. Jacobs

2.3 Overige projecten

De mogelijkheden voor wetenschappelijk onderzoek in een golfbassin zijn eindeloos. Er kan niet alleen onderzoek gedaan worden naar WECs maar ook schaalmodellen van windturbines, offshore constructies, schepen of zelfs kustbeveiligingsinstallaties kunnen ontwikkeld en geëvalueerd worden.

2.3.1 Oscillerende Water Kolom

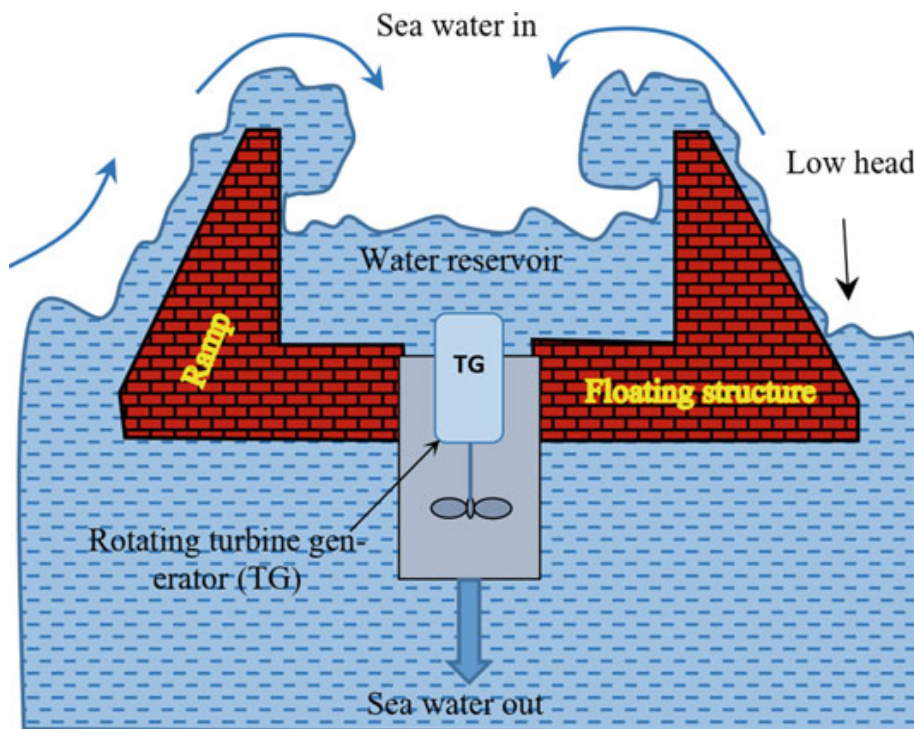
Een voorbeeld van een WEC is de Oscillerende Water Kolom. Dit is een kamer waar het waterniveau stijgt en daalt door de golven. Door het stijgende waterniveau wordt de aanwezige lucht via een turbine naar buiten geduwd, bij een dalend niveau wordt er dan weer lucht van buitenaf aangezogen. De turbine draait rond door de passerende lucht zodat er elektrische energie opgewekt kan worden. Voor een constructie zoals deze is er echter een speciale turbine nodig. Een zogenaamde Wells Turbine draait steeds in dezelfde richting bij de bi-directionele stroming (Dronkers, 2021). Dit verhoogt de efficiëntie van de installatie. Een gelijkaardig systeem is de *Spar boei*. Deze werkt op exact dezelfde manier als een Oscillerende Water Kolom maar bevindt zich op zee in plaats van op land.



Figuur 5 Oscillerende Water Kolom
Bron: Dronkers (2021)

2.3.2 Overslaginstallatie

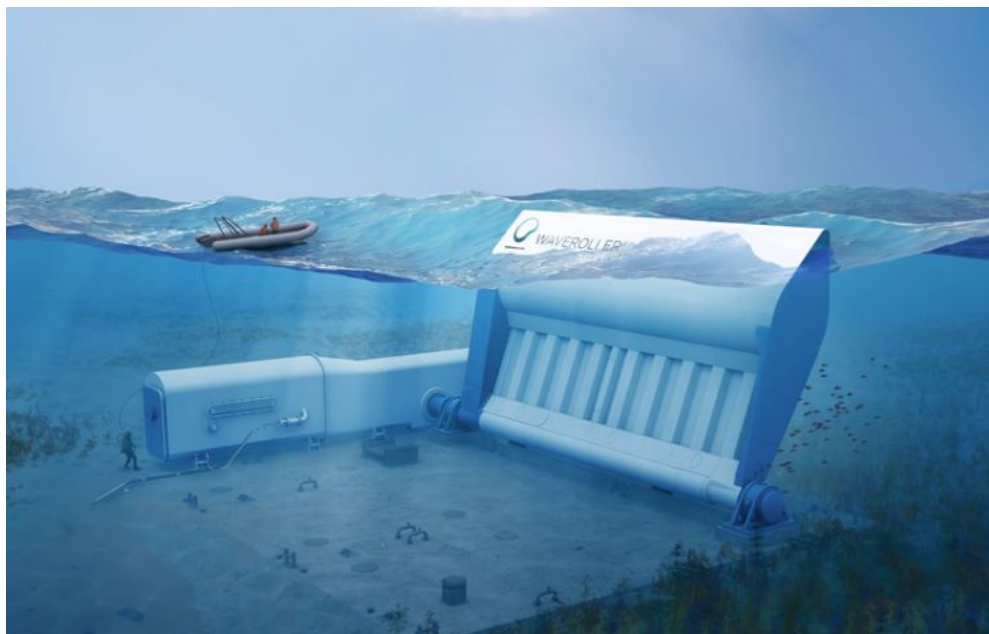
Een overslaginstallatie is een bassin dat hoger gelegen is dan het waterniveau. Wanneer de golven in contact komen met de constructie stromen ze via een helling omhoog en eroverheen naar een verhoogd waterreservoir om dit te vullen. Eenmaal opgevangen, wordt de potentiële energie van het ingesloten water in het bassin onttrokken door middel van een Kaplan turbine die zich onderaan de installatie bevindt. Het water vloeit via deze turbine terug naar de zee. Deze installatie kan vergeleken worden met een hydro-elektrische dam, met als verschil dat bij een overslaginstallatie water naar een hoger niveau gebracht wordt door golfenergie (Farrok et al., 2024).



Figuur 6 Overtopping Basin
Bron: Farrok et al. (2024)

2.3.3 Oscillerende stootomvormer

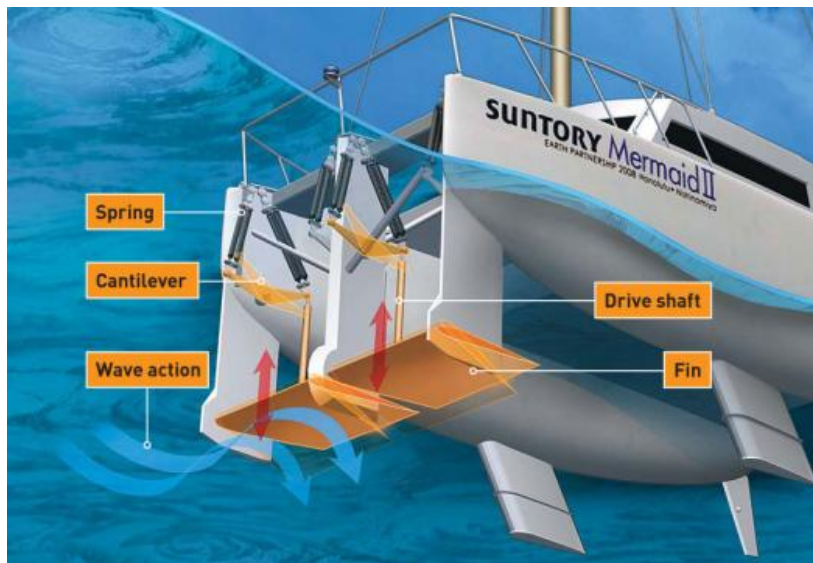
Een oscillerende stootomvormer bestaat uit één of meer flappen die met de golfbeweging meedraaien rond een as parallel aan het golffront. Het rotatiepunt kan zich op de bodem bevinden of aan het wateroppervlak. Hoewel ze golfenergie opvangen met een hoge efficiëntie zijn er nog geen grootschalige operationele installaties gerealiseerd. Vaak worden de stootomvormers niet ver van de kust geïnstalleerd met dieptes tussen 8 en 20 meter (Dronkers, 2021). Het voordeel aan deze locaties is dat de golven zich enkel in één richting bewegen, namelijk loodrecht aan de kust. WaveRoller produceert elektrische energie onmiddellijk op de bodem met een hydraulisch systeem dat een generator aandrijft. Om de langzaam fluctuerende oscillerende beweging om te zetten in elektrische energie wordt gebruik gemaakt van een energieopslag. In het geval van een hydraulisch systeem is dit vaak een accumulator dat op korte termijn energie opslaat (AW Energy, 2022).



Figuur 7 Oscillerende stootomvormer van WaveRoller
Bron: AW Energy (2022)

2.3.4 Schepen voorbewogen door vinnen

Golfenergie kan ook als voortstuwing gebruikt worden aan boord van een schip. Hoewel dit een veelbelovende technologie is, valt er nog veel onderzoek te verrichten. Figuur 8 toont een illustratie van de *Suntory Mermaid II*, een catamaran uitgerust met een *Wave Devouring Propulsion* systeem. Het beschikt over twee vinnen dat de beweging van een walvisstaart imiteert. Onder invloed van de op en neer beweging van de golven genereren de vinnen stuwkracht (Xing & Liang, 2023).



Figuur 8 Scheepspropulsie met vinnen
Bron: Bluebird Marine Systems Ltd (2014)

3 Golven

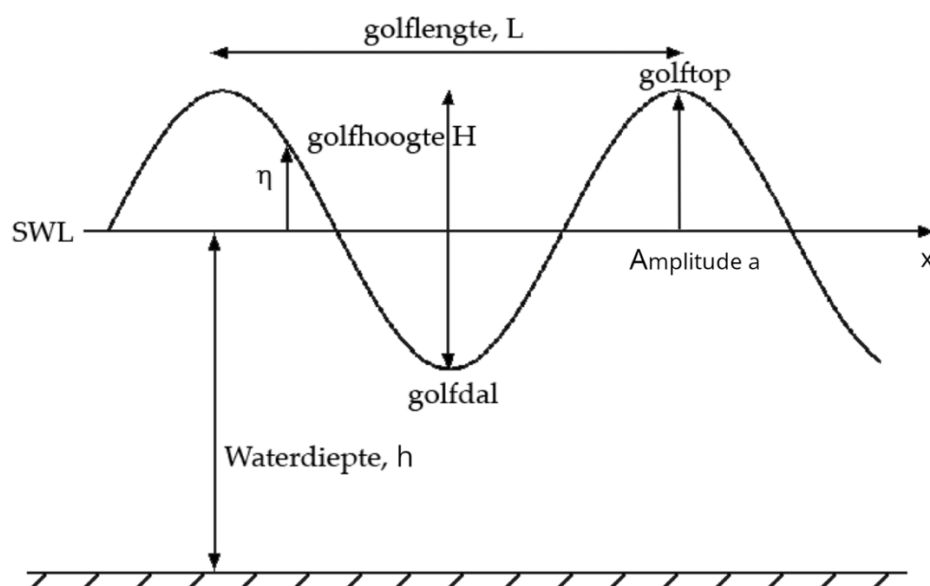
3.1 Wat zijn golven

Om zelf golven te produceren, moeten we eerst nagaan welke verschillende soorten golven er bestaan, hoe ze zich gedragen en in welke mate ze geschikt zijn om in ons testbassin gereproduceerd te worden.

In ons testbassin zal later voornamelijk onderzoek gedaan worden naar het oogsten van golfenergie voor de productie van elektriciteit of om schepen te voortstuwen door middel van een vin. Om accuraat onderzoek te kunnen uitvoeren is het een noodzaak om natuurlijke golven na te bootsen. Natuurlijke golven komen in allerlei verschillende vormen en groottes. Ze ontstaan door een combinatie van verschillende factoren en zijn altijd onder invloed van complexe fysische interacties. Dit zorgt ervoor dat golven onvoorspelbaar en moeilijk na te bootsen zijn.

3.2 Karakteristieken van een golf

Elke golf kan aan de hand van enkele parameters omschreven worden. Elke golf heeft een hoogtepunt en een laagtepunt. Het hoogtepunt noemen we een golftop en het laagtepunt noemen we een golfdal. De horizontale afstand tussen twee golftoppen of twee golfdalen is de golflengte. Het stilstaande waterniveau wordt op Figuur 9 weergegeven door de horizontale lijn met bijschrift *SWL, Sea Water Level*. Dit niveau dient als referentie voor de amplitude en voor de waterdiepte. Amplitude is dan weer de afstand vanaf het waterniveau tot een golftop of golfdal.



Figuur 9 Golfkarakteristieken
Bron: bewerkt van Willems (2008)

De tijd dat een golf nodig heeft om één golflengte te verplaatsen noemen we de periode T , meestal uitgedrukt in seconden. De frequentie f , in Hz, is het omgekeerde van de periode en vertelt ons hoeveel golflengtes er per tijdseenheid voorkomen.

$$f = 1/T \quad (3.1)$$

Het golfgetal k is gerelateerd aan de golflengte L . Dit getal geeft aan hoeveel golflengtes er per lengte-eenheid voorkomen, en is dus het omgekeerde van de golflengte.

$$k = 2\pi/L \quad (3.2)$$

De hoekfrequentie ω is omgekeerd evenredig met de periode.

$$\omega = 2\pi/T \quad (3.3)$$

3.3 Propagatie van oceaangolven

De voortplantsnelheid v van een golf is de snelheid waarmee de golf zich verplaatst en is afhankelijk van de golflengte en de waterdiepte h . In het algemeen is de snelheid van een golf:

$$v = \sqrt{\frac{g}{2\pi} L \tanh(kh)} \quad (3.4)$$

Echter bij een vergrotende waterdiepte heeft de bodem steeds minder invloed op de golf. Van zodra de waterdiepte meer is dan een halve golflengte beschouwen we de golf als een diepwater golf (Chadwick, 2025). En kunnen we de formule voor de voortplantsnelheid vereenvoudigen naar:

$$v = \frac{gT}{2\pi} \text{ voor } \frac{h}{L} \geq 0.5 \quad (3.5)$$

Het omgekeerde is ook waar voor ondiep water. Zodra de golflengte ongeveer 20 keer de waterdiepte is spreken we van ondiep water (University of Hawaiï, 2016).

$$v = \sqrt{gh} \text{ voor } \frac{h}{L} \leq 0.05 \quad (3.6)$$

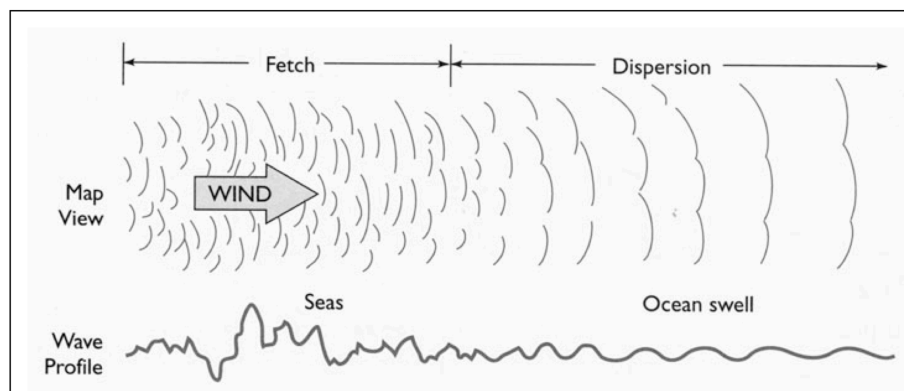
Er bestaan verschillende verbanden tussen de voortplantsnelheid en eerder vernoemde parameters, zoals de golflengte en periode, golflengte en frequentie, en de hoekfrequentie en het golfgetal.

$$v = \frac{L}{T} = Lf = \frac{\omega}{k} \quad (3.7)$$

Elke golf heeft zijn eigen steilheid H/L en is de verhouding van de golfhoogte H en de golflengte.

3.4 Golfdispersie

Golfdispersie is het fenomeen waarbij golven zichzelf sorteren op basis van de golflengte. Zoals eerder aangehaald is de voortplantingsnelheid van golven afhankelijk van de golflengte. Golven met een langere golflengte hebben een hogere voortplantingssnelheid waardoor na verloop van tijd de verschillende soorten golven zullen scheiden. Dit betekent dat elke golf, ongeacht wanneer of hoe die ontstaan is, uiteenvalt in verschillende groepen. Het kan gebeuren dat vergelijkbare groepen van verschillende golven uiteindelijk samenkomen en samen één groep vormen.

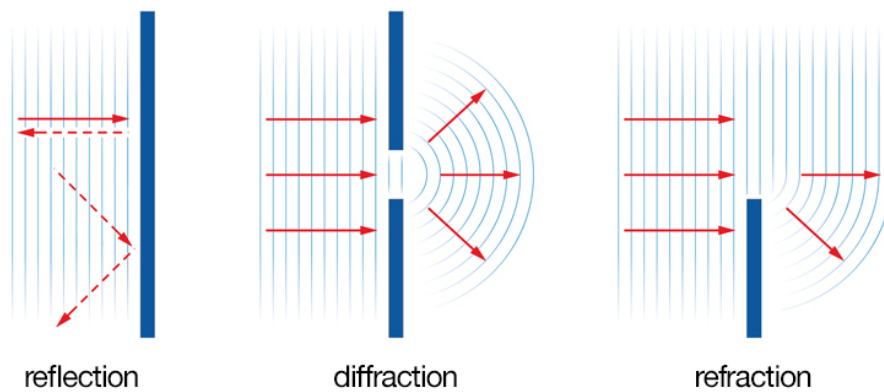


Figuur 10 Dispersie

Bron: Krauss (z.d.)

3.5 Reflectie

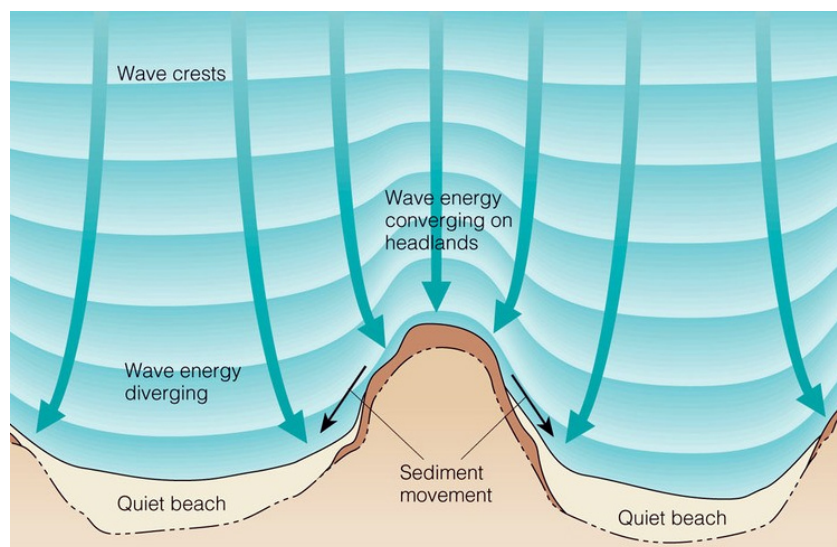
Reflectie is één van de drie verschillende manieren waarop een golf zijn richting kan worden aangepast. Wanneer een golf een verticaal oppervlak tegenkomt kan deze er niet doorheen. In plaats daarvan wordt de energie van de golf teruggeleid richting het water waarbij een deel van de energie verloren gaat door turbulentie en wrijving. Om reflectie te laten optreden moet het obstakel weerstand bieden waardoor de golf zich niet verder kan verplaatsen. Het obstakel mag ook niet bewogen worden door de golfenergie, aangezien het anders energie zou absorberen (Luís, 2025). Zoals bewezen door Leybold Didactic GMBH (z.d.) reflecteren watergolven, net zoals licht en geluid, volgens de Wet van Snellius. Deze vertelt ons dat de invalshoek en uitreedhoek steeds gelijk zijn bij volledige interne reflectie.



Figuur 11 Reflectie, Diffractie en Refractie
Bron: Luís (2025)

3.6 Refractie

Bij refractie verandert de richting van de golf wanneer deze een gebogen kust of onregelmatige waterdiepte tegenkomen. Door een veranderende voortplantingssnelheid ten gevolge van een verandering in waterdiepte verplaatst een deel van de golf zich sneller waardoor deze afbuigt (The Physics Classroom, z.d.). Cruciaal is dat de verandering in snelheid niet op hetzelfde moment gebeurt voor de volledige golf, anders vindt alleen een vertraging van de golf plaats en dan zouden we dit effect *Shoaling* noemen.



Figuur 12 Refractie
Bron: Luís (z.d.)

3.7 Diffractie

Diffractie is dan weer het fenomeen waarbij golven zich om een hoek, door een opening of langs een barrière voortplanten. Op Figuur 13 is zichtbaar waarneembaar dat de golven rond de golfbreker bewegen en het water achter deze barrière verstoren. De mate van diffractie neemt toe met een toenemende golflengte (Taveira Pinto & Dronkers, 2025; The Physics Classroom, z.d.). Wanneer de golflengte kleiner wordt dan het obstakel, treedt er geen merkbare diffractie

op. In een haven wordt diffractie vaak waargenomen rond kleinere schepen. De golven buigen rond het schip en verstoren het water over de volledige lengte van het schip. Indien dezelfde golven een groot schip tegenkomen, treedt er enkel diffractie op aan de uiteinden van het schip waarna de golven niet genoeg energie overhouden en geabsorbeerd worden (Anna V. & Valkyrie, 2015).

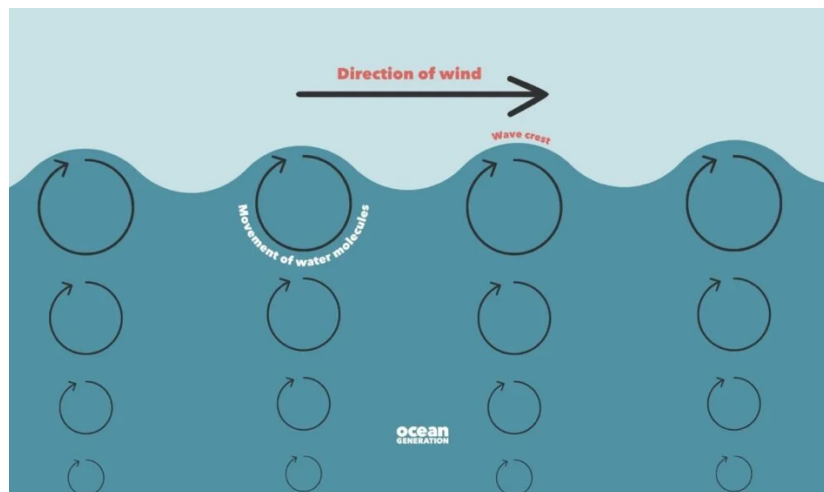


Figuur 13 Golf refractie
Bron: (Anna V. & Valkyrie, 2015)

3.8 Soorten Golven

3.8.1 Windgolven

Golven bestaan in verschillende groottes en vormen, variërend in golflengte van een fractie van een centimeter tot de helft van de omtrek van de aarde. Ze worden gevormd door tal van factoren waaronder de wind, zwaartekracht en aardbevingen. Eén van die verschillende soorten golven zijn de windgolven en worden voornamelijk gecreëerd door wrijving die plaats vindt tussen de wind en het wateroppervlak. Dit brengt water in een roterende beweging, de continue verstoring van het water creëert een golftop. Afhankelijk van de windsterkte, windrichting, tijdsperiode en de afstand, beter bekend als *fetch* of *windbaan*, wordt uiteindelijk de grootte en vorm van de golf bepaald (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2023). Deze golven kunnen een golfhoogte hebben van enkele centimeters tot wel 30 meter tijdens een storm (Tolman, 2008). Windgolven komen in de natuur vaak voor waardoor ze veel invloed hebben op hoe schepen zich gedragen. Alhoewel het onmogelijk is om windgolven exact na te bootsen zoals deze in oceaan of in zee voorkomen kunnen we deze golven wel op een consistente manier creëren.



Figuur 14 Creatie van windgolven
Bron: Sargeant (2024)

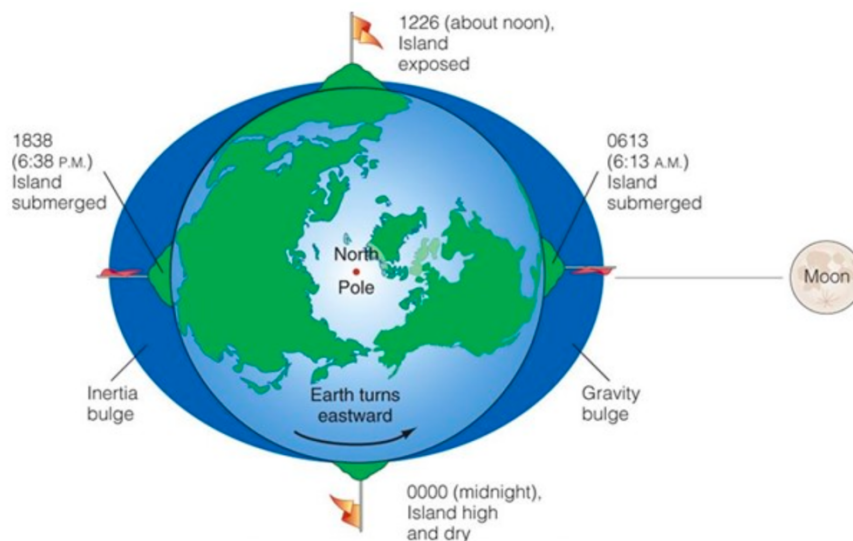
3.8.2 Deining

Deining ontstaat uit windgolven en door dispersie scheiden de golven met een langere golflengte zich van de overige golven (Temperville, 2025). Door hun lange golflengte, en dus hoge voortplantingssnelheid, kunnen deze golven duizenden kilometers reizen voordat ze de kust bereiken. Het kan voorkomen dat deining van verschillende origines elkaar kruisen en samenkomen en een zogenaamde *cross-sea* vormen, een gevaarlijk fenomeen waarbij zeer sterke stromingen gegenereerd kunnen worden. Deining is een specifiek type zwaartekrachtgolf dat niet meer onder invloed is van de wind. Ze bevatten veel energie waardoor ze minder gevoelig zijn aan meteorologische veranderingen. Als gevolg hiervan zijn ze consistent en betrouwbaarder om te gebruiken als bron voor golfenergie te oogsten. Gemiddeld gezien heeft deining een golflengte van 100 tot 200 meter, met een periode van 8 tot 11 seconden en een hoogte van 2 tot 4 meter (Australian Bureau of Meteorology, 2025).

3.8.3 Getijgolven

Water op aarde is ook onder invloed van de zwaartekracht van de zon en van de maan. Deze hemellichamen bevinden zich in een zeer stabiele baan waardoor men jaren op voorhand het getij kan voorspellen. De maan bevindt zich het dichtste bij de aarde waardoor het de meeste impact heeft op het produceren van de zogenaamde getijgolven. Dit zijn golven met een zeer lange golflengte. Afhankelijk van waar op aarde de waarnemer zich bevindt is het mogelijk dat er een ander type getij wordt waargenomen (Van Langenhoven, 2023). In de Noordzee is er zo een tweedaags getij met ongeveer 12 uur en 25 minuten tussen twee opeenvolgende hoog- of laagtijden. Door een verschil in waterniveau wordt water in beweging gebracht. Deze stromingen

worden al sinds 1966 gebruikt om in Brittannië jaarlijks ongeveer 600kWh elektrische energie op te wekken (Tethys, 2019).



Figuur 15 Aantrekking van de maan op de aarde

Bron: Van Langenhoven, (2023)

3.9 Creëren van de ideale golf

We beschouwen de golven die wij nodig hebben als 2-dimensionale golven die één front vormen in de breedte. De start-vergelijking van een sinusvormige golf kan in functie van de tijd t en positie x beschreven worden.

$$\eta(x, t) = a \cos(kx - \omega t) \quad (3.8)$$

met

η de vrije oppervlaktehoogte ten opzichte van het gemiddelde waterniveau

a de golf amplitude

k het golfgetal

ω de hoekfrequentie

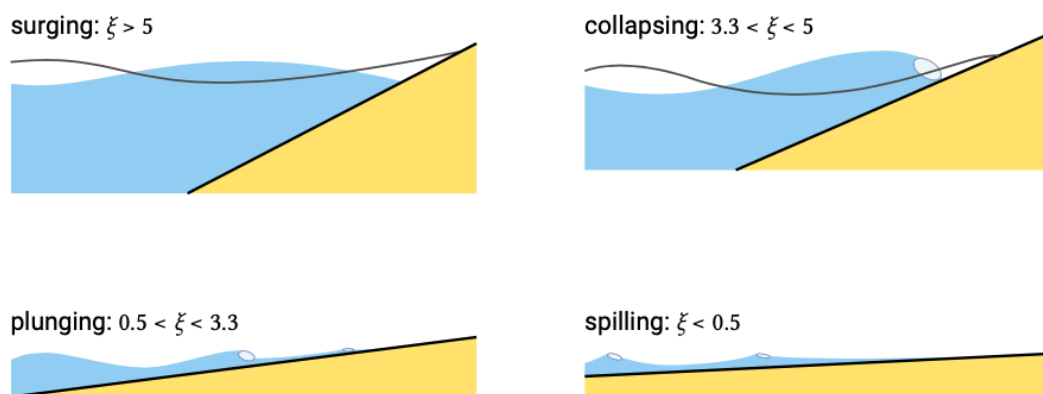
Door deze parameters samen met de waterdiepte h te gebruiken kunnen we onze golven beschrijven en alle andere parameters, zoals golfsnelheid en acceleratie, berekenen.

3.10 Breken van golven

De golven die we uiteindelijk zullen produceren moeten we op het einde ook wegwerken, anders zullen deze voor interferentie zorgen en onze proefopstelling verstoren. We moeten dus eerst theoretisch bekijken op welke mogelijke manieren we golven kunnen absorberen of wegwerken.

Wanneer de steilheid H/L van een golf groter is dan $1/7$, breekt de golf (Kolkman & Jongeling, 1996). Zodra de golf dit kritieke punt voorbij is kan de golf op vier mogelijke manieren breken. Afhankelijk van de steilheid van bodem α , de golflengte en golfhoogte treedt een van de vier mogelijkheden op. Met deze parameters bekomt men een zogenaamde *breaker index* ξ .

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L}} \quad (3.9)$$



Figuur 16 Breken van golven
Bron: Bosboom & Stive (2025)

3.10.1 Opkomende golf

Bij een opkomende golf, ofwel *surging breaker*, bewegen de golven op en neer langs de steile kant. De zone waar de golven in contact komen met de bodem is zeer klein waardoor de golf niet genoeg tijd heeft om zijn energie af te geven. Een groot deel van de golven, meer dan 50%, wordt dan ook gereflecteerd. De golftop van een opkomende golf wil aanvankelijk omrollen maar het uiteinde van de golf raakt de bodem voordat dit kan gebeuren.

3.10.2 Duikende golf

Een duikende golf, ofwel *plunging breaker*, heeft in tegenstelling tot een opkomende golf wel genoeg tijd om de golftop om te rollen. De opkrullende top breekt het onderste deel van de golf waardoor er veel energie verloren gaat in de turbulentie. Een deel van de energie wordt gereflecteerd en het ander deel spoelt aan waar het de kans krijgt om een nieuwe golf te vormen.

3.10.3 Instortende golf

Een instortende golf, ofwel *collapsing breaker*, bevindt zich tussen de opkomende golf en duikende golf. De omrollende golf krijgt meer tijd om het golfdal te bereiken maar nog niet genoeg om volledig neer te slaan.

3.10.4 Overstromende golf

Tenslotte is er de overstromende golf, ofwel *spilling breaker*. Deze komen voor op een zeer vlakke ondergrond. De golven beginnen reeds te breken op een relatieve lange afstand, ongeveer zes tot zeven keer de golflengte (Bosboom & Stive, 2025). Tijdens het breken ontstaat een schuimlijn op de golftop en laat een dun laagje schuim achter over een aanzienlijke afstand. Bij de overstromende golf is er het minste energie dat terug gereflecteerd wordt doordat praktisch alle golfenergie vrijkomt tijdens het proces.

4 Golfgenerator

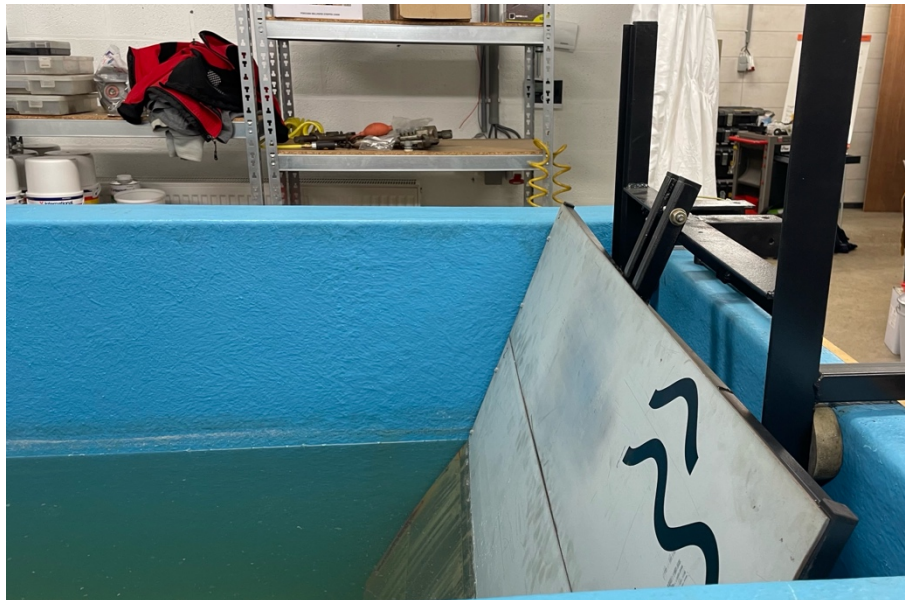
4.1 Principe

Een golfgenerator heeft de functie om voorspelbare, consistente golven te creëren. Deze machine(s) worden vaak gebruikt voor onderzoeken die plaatsvinden in of op het water. Voor ons zijn er enkele belangrijke zaken waar onze golfgenerator aan moet voldoen. Zo moet deze betrouwbaar zijn en voor een langere tijd consistente golven produceren. Ook moet het uitvoerbaar zijn om verschillende groottes golven te produceren. Veiligheid mogen we ook absoluut niet vergeten, de installatie moet veilig zijn op zowel elektrisch en mechanisch vlak.

4.2 Originele golfgenerator

Carlier Peter beschrijft de types golfgenerator zeer uitgebreid in zijn thesis. Hij heeft gekozen voor een golfgenerator van het flap type, omdat dit een vrij eenvoudig systeem is dat gemakkelijk te construeren en instelbaar is (Carlier, 2023). De installatie bestaat uit een metalen constructie die een bewegend deel en een gefixeerd deel bevat. Het gefixeerde deel staat in het bassin gemonteerd met klemmen en bevat ook de bevestigingspunten voor de elektromotor. Het bewegend deel is onderaan bevestigd aan het gefixeerde deel door middel van scharnieren. Bovenaan is deze verbonden met een elektromotor door middel van een stang dat de draaiende beweging van de motor omzet in een horizontale beweging die de flap heen en weer beweegt. De keuze om het bewegende deel niet rechtstreeks te bevestigen op de bodem van het bassin was een bewuste keuze. Het moet namelijk steeds mogelijk blijven om de volledige installatie uit het bassin te halen zodat deze eventueel omgebouwd kan worden voor een ander project indien nodig.

De metalen constructie is robuust, voldoet aan onze eisen en zullen we dus hergebruiken. Het probleem situeert zich echter bij de elektromotor. De golven die geproduceerd worden hebben een veel te lange golflengte ten gevolge van een te lage snelheid van de elektromotor, alhoewel deze snelheid wel perfect regelbaar is. De stang, die de golfgenerator en de elektromotor verbindt, kan ook slechts op enkele plaatsen bevestigd worden wat onze mogelijkheden aanzienlijk beperkt.



Figuur 17 Constructie golfgenerator
Bron: eigen werk

4.3 Pneumatische aandrijving

Door de beperkingen van het vorig systeem hebben we besloten om gebruik te maken van een pneumatische cilinder. Dit zal ons toelaten om via een microcontroller deze exact aan te sturen zoals we wensen. Als alternatief hadden we een elektrische lineaire actuator kunnen gebruiken maar door de voor- en nadelen van Swedberg (z.d.) en Tolomatic, Inc (2021) af te wegen, gaven we uiteindelijk de voorkeur aan een pneumatisch systeem. Zo is een pneumatische cilinder goedkoper in aankoop prijs, betrouwbaarder en kan het een hogere kracht en snelheid leveren. Veiligheid speelde ook een rol, want de installatie bevindt zich immers dicht bij water, wat geen goede combinatie vormt met elektriciteit.

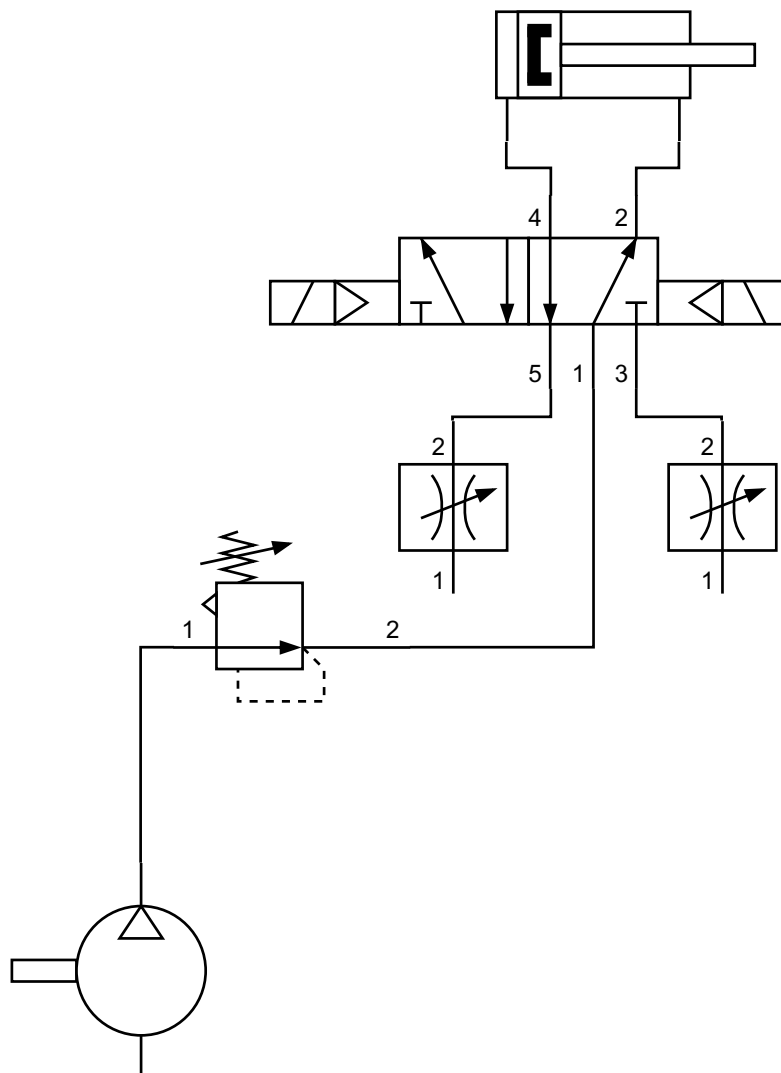
Er moet echter vermeld worden dat elektrische actuatoren op lange termijn goedkoper zijn doordat deze efficiënter zijn. Bij een pneumatisch systeem is er namelijk de tussenstap om luchtdruk te produceren, wat een beperkt rendement heeft (Tang, 2024). Er is ook kans op lekkage wat leidt tot energieverlies en het rendement doet zakken.

4.4 Hardware

4.4.1 Overzicht

Om een pneumatische cilinder te kunnen aansturen hebben we meer dan alleen de cilinder nodig. Zo is een compressor verantwoordelijk voor de productie van luchtdruk. Een elektrisch bediend magneetventiel, een drukregelaar en twee smoorventielen zorgen voor de flexibiliteit en afstelbaarheid.

Alle pneumatische leidingen zijn vervaardigd uit Polyamide. Ze hebben een buiten diameter van 6mm, en een binnendiameter van 4mm. De leidingen hebben een maximum werkdruk van 40 bar (Pneuparts, z.d.), vele malen hoger dan de druk die wij zullen gebruiken in ons systeem. Na de compressor bevindt er zich nog een manuele kogelkraan zodat het systeem gemakkelijk drukloos kan worden gemaakt indien nodig.



Figuur 18 Pneumatisch schema

Bron: eigen werk

4.4.2 Onderdelen

4.4.2.1 Pneumatische Cilinder

Tijdens onze zoektocht naar een pneumatische cilinder vernamen we dat een ander project beschikte over een pneumatische cilinder dat zij niet meer nodig hadden. Aangezien deze cilinder vrijwel de perfecte afmetingen had konden we deze probleemloos integreren in ons project.



Figuur 19 Pneumatische Cilinder Festo
Bron: eigen werk

Tabel 1 Technische specificatie pneumatische cilinder
Bron: (Festo AG & Co. KG, 2008)

Technische specificatie pneumatische cilinder	
Naam	Festo DNU-50-300-PPV-A
Slaglengthe	300mm
Diameter	50mm
Zuigerstang diameter	16mm
Demping	PPV (Pneumatic cushioning)
Bedieningsdruk	0.5 tot 12 bar
Dubbel/enkelwerkend	Dubbelwerkend
Theoretische kracht op 6 bar	924N
Terugslag	
Theoretische kracht op 6 bar	1131N
Voorwaartse slag	

4.4.2.2 Magneetventiel

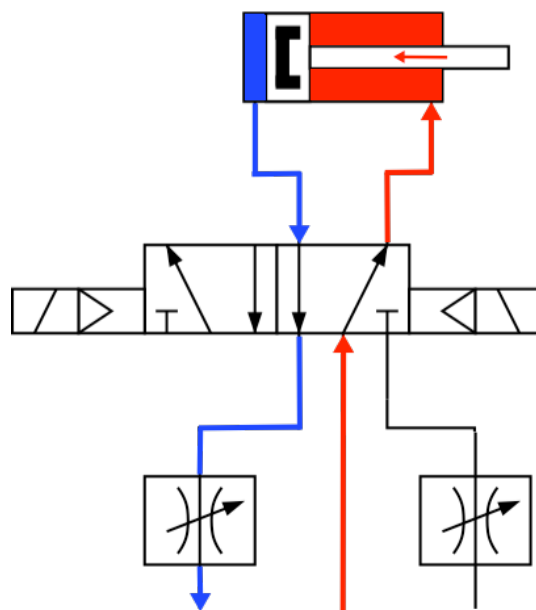
Het magneetventiel werd net zoals de pneumatische cilinder overgenomen van een vorig project. Dit ventiel stuurt altijd perslucht door naar de cilinder. Hierdoor wordt deze altijd ofwel ingetrokken ofwel uitgestrekt. Indien we de luchttoevoer wensen te stoppen moet dit voor de voor het ventiel gebeuren.



Figuur 20 Magneetventiel Festo

Bron: eigen werk

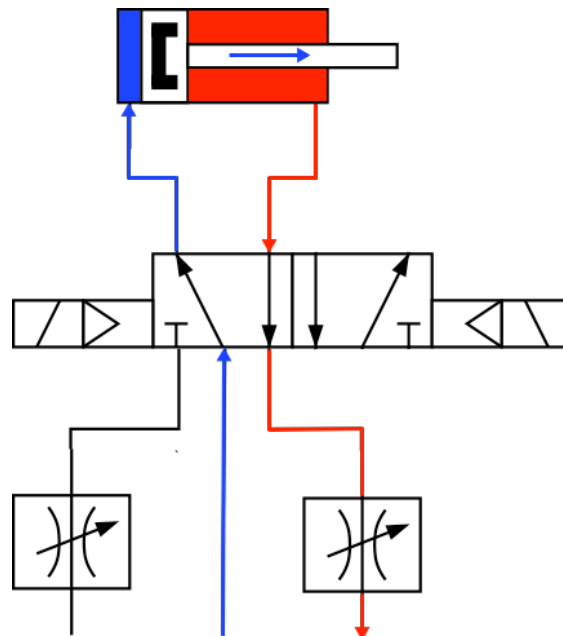
Het ventiel heeft vijf aansluitingen voor luchtdruk (zie Figuur 18). Aansluiting 2 en 4 zijn verbonden met de pneumatische cilinder. Deze sturen perslucht naar de cilinder of laten lucht uit de cilinder richting de uitlaat (aansluiting 3 en 5). De in- en uitlaten zijn zichtbaar op Figuur 20. De middelste aansluiting is de inlaat waar de perslucht van de compressor aangevoerd wordt (aansluiting 1).



Figuur 21 Luchtstroom bij intrekken van de cilinder

Bron: eigen werk

Een Arduino bedient dit ventiel via een relaisschakeling. Op Figuur 21 is zichtbaar hoe de lucht stroomt indien de Arduino geen signaal stuurt om het relais te activeren. In de rusttoestand is de inlaat verbonden met de voorzijde van de cilinder via aansluiting 2 (rode lijnen). De reeds aanwezige lucht in de achterzijde van de cilinder kan ontsnappen naar aansluiting 5, via aansluiting 4 (blauwe lijnen).



Figuur 22 Luchtstroom bij uitschuiven van de cilinder
Bron: eigen werk

Op Figuur 22 is dan weer zichtbaar hoe de lucht stroomt als het relais wel geactiveerd wordt, de inlaat wordt verbonden met de achterzijde van de cilinder via aansluiting 4 (blauwe lijnen). En de voorzijde wordt verbonden met aansluiting 3 zodat opnieuw de aanwezige lucht kan ontsnappen.

Tabel 2 Technische specificatie magneetventiel
Bron: Festo SE & Co. KG (2024)

Technische specificatie magneetventiel	
Naam	Festo CM-5/2-1/4-FH
Ventiel functie	5/2, monostabiel
Type bediening	Elektrisch
Nominaal debiet	1400 l/min
Bedieningsdruk	1.5 tot 8 bar
Max. frequentie	40 Hz

4.4.2.3 Smoorventiel

Op de uitgaande aansluitingen van het magneetventiel monteren we twee smoorventielen, één voor elke uitlaat van de cilinder. Met deze ventielen kunnen we beide kanten van de cilinder afzonderlijk bedienen. Dit is nodig omdat de perslucht, door een verschil in oppervlak aan beide zijden binnenin de cilinder, een verschillende kracht uitoefent. De stang van de cilinder vermindert het oppervlak namelijk aan de voorzijde. In een ideaal scenario zouden we een verschillende druk naar elke kant sturen zodat de resulterende kracht aan beide kanten gelijk is. Maar omdat er slechts met één inlaat wordt gewerkt is dit niet mogelijk. Als oplossing genereren we aan de gewenste zijde tegendruk zodat er in diezelfde tijdsperiode minder lucht kan ontsnappen en dus de cilinder minder kan bewegen in die richting.



Figuur 23 Smoorventiel
Bron: Pneuparts (2025)

Tabel 3 Technische specificaties smoorventiel
Bron: Pneuparts (2025)

Technische specificatie smoorventiel	
Naam	Kniesnelheidsregelventiel
Bedieningsdruk	-0.95 tot 20 bar
Diameter	6 mm
Schroefdraad	R 1/8''

4.4.2.4 Luchtcompressor

Voor de aandrijving van een pneumatische cilinder is er uiteraard een bron van luchtdruk nodig. Er zijn tal van verschillende types compressoren dat geschikt kan zijn. Voor ons is de belangrijkste factor dat de compressor het benodigde debiet kan produceren. Druk is ook van belang maar aangezien er gebruik gemaakt zal worden van een drukregelaar is dit niet een cruciale parameter.

De enige limitatie is de maximale werkdruk van onze overige pneumatische onderdelen. Het magneetventiel heeft de laagste maximale werkdruk, namelijk 8 bar. Verder is het een kwestie van een compressor te vinden dat ook in het budget past.

Om te berekenen hoeveel debiet we nodig hebben moeten we eerst weten hoeveel lucht onze opstelling maximaal zal verbruiken. Een cilinder bestaat uit twee afzonderlijke kamers. Wanneer luchtdruk geïntroduceerd wordt in de blauwe kamer op Figuur 24, schuift de cilinder open. Vice versa voor de groene kamer. Beide kamers verschillen in volume doordat de zuigerstang een deel van de groene kamer in beslag neemt.



Figuur 24 Illustratie volumes pneumatische cilinder

Bron: bewerkt van Wikimedia Commons (2007)

$$V_{\text{blauw}} = \frac{1}{4} \pi D^2 S (P + 1) \quad (4.1)$$

$$V_{\text{groen}} = \frac{1}{4} \pi (D^2 - d^2) S (P + 1) \quad (4.2)$$

V = volume

D = boring cilinder

d = diameter zuigerstang

S = slaglengte

P = werkdruk (in bar)

Op de website van Duursma (z.d.) vinden we twee formules voor beide volumes van een pneumatische cilinder, deze zullen ons helpen om het luchtverbruik te berekenen.

Uit de datasheet van Festo AG & Co. KG (2008) halen we de benodigde informatie over de cilinder, namelijk de boring is 50mm, en de diameter van de zuigerstang is 16mm. Voor de overige parameters gebruiken we de minst gunstige situatie om zo het maximale verbruik te achterhalen. De werkdruk mag maximaal 8 bar zijn, doordat dit de limiet is van het magneetventiel. Met een tijdelijke draagbare compressor op batterijen meten we een slaglengte van maximaal 50mm.

Het verbruik aan lucht om de cilinder eenmaal heen en weer te bewegen is dus:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{totaal}} &= V_{\text{blauw}} + V_{\text{groen}} \\
 &= \frac{1}{4} \pi D^2 S (P + 1) + \frac{1}{4} \pi (D^2 - d^2) S (P + 1) \\
 &= \frac{1}{4} \pi S (P + 1) (2D^2 - d^2) \\
 &= \frac{1}{4} \pi 0,5 \text{ dm} (8 \text{ bar} + 1) (2 \cdot 0,5^2 \text{ dm} + 0,16^2 \text{ dm}) \\
 &= 1,677 \text{ dm}^3 = 1,677 \text{ L}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

De slaglengte van 50mm werd bereikt met een periode van 500ms. De cyclus wordt dus 120 keer per minuut vervolledigd. Zo bekomen we een maximaal debiet van 201,24 L/min. Deze berekening werd gecontroleerd met de online tool van Shree Prayag Air Controls Pvt. Ltd. (z.d.).

Tijdens de uithoudingstest werd bevestigd dat de compressor gemakkelijk het benodigde debiet produceert. De compressor was uitgeschakeld gedurende 40 seconden, en had gemiddeld 25 seconden nodig om het opslagvat opnieuw aan te vullen tot 10,75 bar.



Figuur 25 Luchtcompressor
Bron: eigen werk



Figuur 26 Datafiche nr.1 Compressor
Bron: eigen werk



Figuur 27 Datafiche nr.2 Compressor
Bron: eigen werk

Tabel 4 Technische specificaties luchtcompressor
Bron: datafiches compressor

Technische specificatie luchtcompressor	
Naam	Workmaster F220
Inhoud vat	17 liter
Debiet	220 l/min
Toegestane maximum druk	10 bar

4.4.2.5 Drukregelaar

Onze compressor is helaas niet met een drukregelaar gemonteerd. Deze drukregelaar is van cruciaal belang voor verschillende redenen. Zo is de toevoerdruk naar de pneumatische cilinder één van de verschillende parameters die we kunnen aanpassen om onze gewenste golf te produceren. Maar belangrijker, de drukregelaar zorgt voor een constante druk. Wanneer het luchtverbruik laag is, is het mogelijk dat de compressor niet constant zal draaien. Hierdoor schommelt de druk in het buffervat tussen 9 en 10,75 bar.

Tabel 5 Technische specificatie drukregelaar
Bron: Festo SE & Co. KG (2024a)

Technische specificatie drukregelventiel	
Naam	Festo MS2-LR-QS6-D6-A8-B
Bedieningszekering	Draaiknop met vergrendeling
Regelaarsfunctie	Uitgangsdruk constant Met secundaire ontluchting Met terugstroomgedrag
Bedrijfsdruk	1 bar – 8 bar
Drukregelbereik	0.5 bar – 7 bar
Normaal nominaal debiet	350 l/min

4.5 Besturing

4.5.1 Onderdelen

4.5.1.1 Arduino

We gebruiken een Arduino UNO om de installatie te besturen. Hiermee zullen we elke gewenste golf, binnen de limieten van de golfgenerator, kunnen genereren door enkele parameters aan te passen. Om dit zo gebruiksvriendelijk mogelijk te maken wordt ook een Lcd-scherm en een “Rotary encoder” gebruikt om deze parameters aan te passen. Een rotary encoder is een draaiknop dat ook een drukknop bevat.

De Arduino wordt gevoed door een AC/DC adapter met een maximumvermogen van 50W op 12V. Deze voeding is direct aangesloten op de Arduino vanwaar de distributie van 5V verder wordt verdeeld.

4.5.1.2 Relais Module

De relais module is van het type HL-52S. Deze heeft 2 kanalen die werken op 5V voor de besturing van hun respectievelijke relais. Deze 5V kan perfect geleverd worden door de Arduino. De uitgangen hebben een maximum voltage van 250V AC / 30V DC en een maximum stroomsterkte van 10A voor zowel AC als DC. Uit de datasheet van magneetventielen van Festo AG & Co. KG (2022) weten we dat deze een maximum vermogen heeft van 6.8W bij 24V. Dit is ruim onder het maximum van 300W van het gebruikte relais.

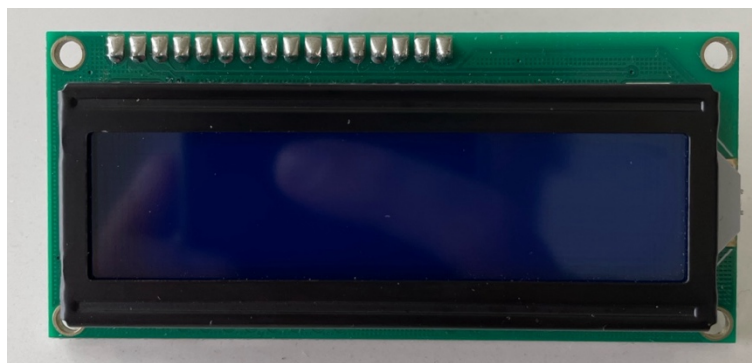


Figuur 28 2 kanaal relais HL-52S

Bron: eigen werk

4.5.1.3 Lcd-scherm

Voor het lcd-scherm maken we gebruik van een standard 16x2 Arduino LCD scherm met de I2C module. De I2C module is reeds gemonteerd op de achterkant van de LCD. I2C is een protocol dat het gebruik van allerlei accessoires, zoals een LCD scherm, vergemakkelijkt door data op een slimme manier door te sturen (Zambetti et al., 2024). Het zorgt ook voor minder verbindingen van en naar de Arduino. De enige verbindingen die we nodig hebben zijn 5V, nul, klok en data.

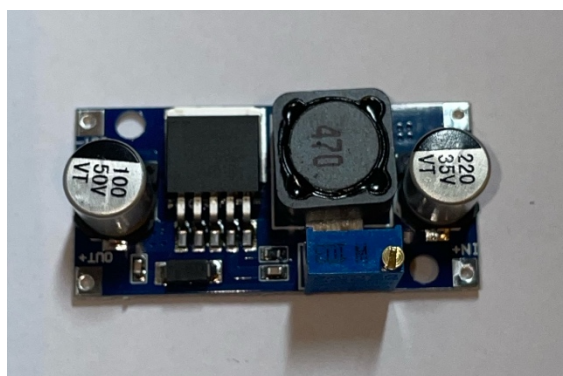


Figuur 29 16x2 lcd-scherm

Bron: eigen werk

4.5.1.4 Step up converter

Het magneetventiel heeft een voeding nodig van 24 Volt (Festo SE & Co. KG, 2024b), terwijl de Arduino UNO gevoed moet worden met 5 volt via USB, of 12 Volt via een 2.1x5.5mm DC jack (Arduino LLC, 2025). Om beide onderdelen te kunnen voeden met dezelfde voeding moeten we de spanning kunnen verdubbelen, dit doen we door middel van een *step up converter*. Met dit toestel kunnen we de ingangsspanning verhogen tot het gewenst niveau door de potentiometer op het bordje aan te passen. De uitgangsspanning dient wel steeds hoger zijn dan de ingangsspanning.



Figuur 30 Step up converter

Bron: eigen werk

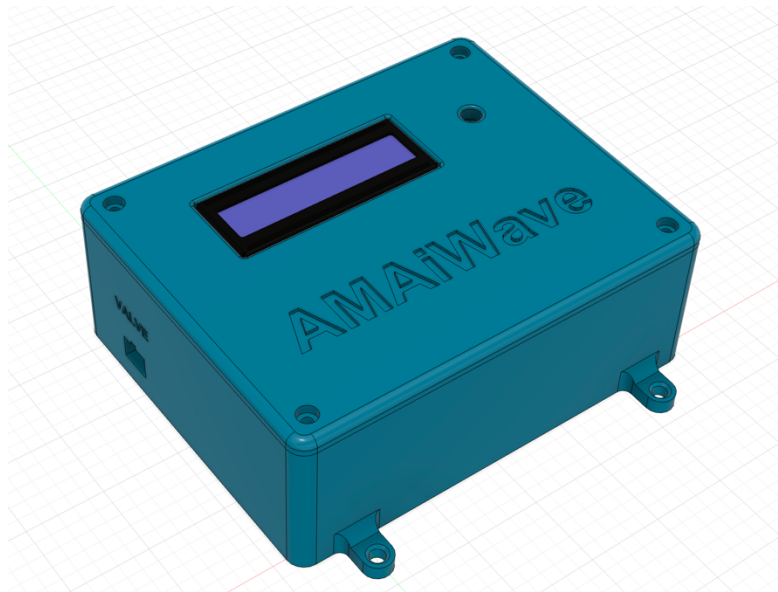
Tabel 6 Technische specificatie step up converter

Bron: XLsemi (z.d.)

Technische specificatie step up converter	
Naam	DC-DC XL6009E1
Ingangsspanning	5V tot 32V
Uitgangsspanning	Maximum 35V
Maximale uitgangsstroom	4A
Efficiëntie	Tot 94%

4.5.1.5 Behuizing

Om alle elektronica netjes te kunnen wegwerken is er gekozen om een behuizing te ontwerpen dat geprint wordt met een FDM, *Fused Deposition Modeling*, 3D-printer. 3D-printen is hiervoor de ideale oplossing, doordat we op deze manier snel een resultaat kunnen bekomen zonder al te veel kosten en tijd in beslag te nemen. De behuizing werd ontworpen met behulp van het CAD-programma *Fusion 360* van het bedrijf *Autodesk*. Het programma is gratis verkrijgbaar onder een persoonlijke licentie dat 3 jaar geldig is.



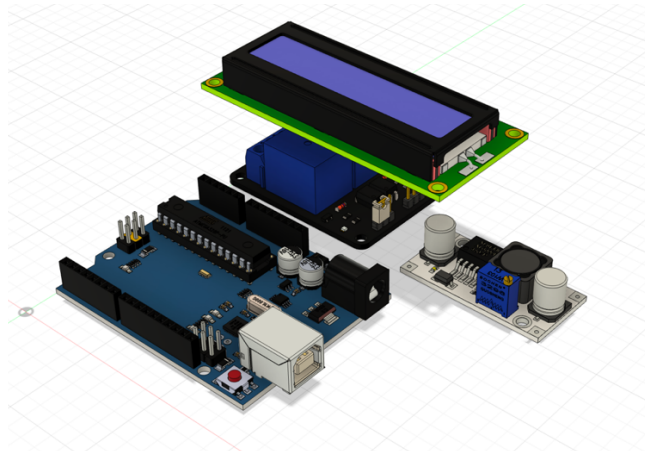
Figuur 31 CAD model behuizing
Bron: eigen werk

Initieel werd geprobeerd om alle elektronische onderdelen te bevestigen zonder gebruik van enige schroeven of lijm. Deze werden op hun plaats gehouden door de spanning tussen de twee helften van de behuizing. Uiteindelijk bleek dit niet een ideale oplossing omdat er veel speling was en de elektronische onderdelen rammelden, iets was de betrouwbaarheid ten nadele kan zijn. In de plaats werd gekozen voor *threaded inserts*. Dit zijn een soort van kleine moertjes die met behulp van een soldeerbout in een uitsparing in het plastic gesmolten wordt. De binnenkant bevat schroefdraad waar dan weer een bout of schroef in past.

Andere kleinere zaken dat we hebben kunnen verbeteren zijn onder andere de aanwezigheid van een aan/uit knop, en gebruik te maken van connectoren voor zowel de voeding als de verbinding naar het magneetventiel.

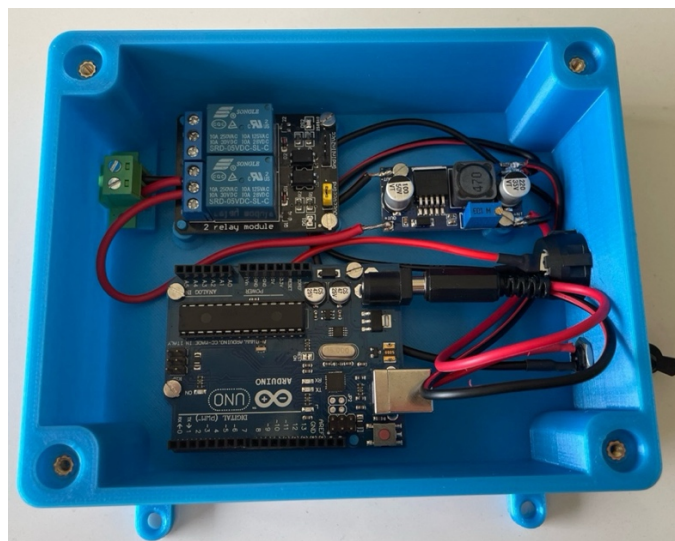
In dit CAD-programma is het mogelijk om een 3D-model van elk elektronisch onderdeel te importeren, wat het ontwerp van de behuizing aanzienlijk vergemakkelijkte. Er moet wel

rekening gehouden worden met enkele toleranties zodat het deksel en de elektronische onderdelen netjes in elkaar passen. Uit ervaring blijkt dat er ongeveer 0,15mm tolerantie nodig is voor onderdelen dat vervaardigd zijn met behulp van een FDM 3D-printer.



Figuur 32 3D-modellen elektronische componenten
Bron: Dvoretzkyi (2019); Scrtcwlv (z.d.); Whitham (2014a, 2014b)

De behuizing werd geprint uit een soort plastic genaamd polyactic acid, beter bekend als PLA. Het grote voordeel van PLA is dat het zeer gebruiksvriendelijk is en gemakkelijk is om te 3D-printen doordat het amper kromt tijdens het printen en relatief lage temperaturen nodig heeft om te smelten. Anderzijds is dat ook een nadeel, PLA kan niet tegen een omgeving met hogere temperaturen. Het begint te vervormen vanaf 55°C (BCN3D Technologies, z.d., z.d.), wat in ons geval geen probleem is omdat de behuizing gemonteerd zal zijn in een ruimte met kamertemperatuur.



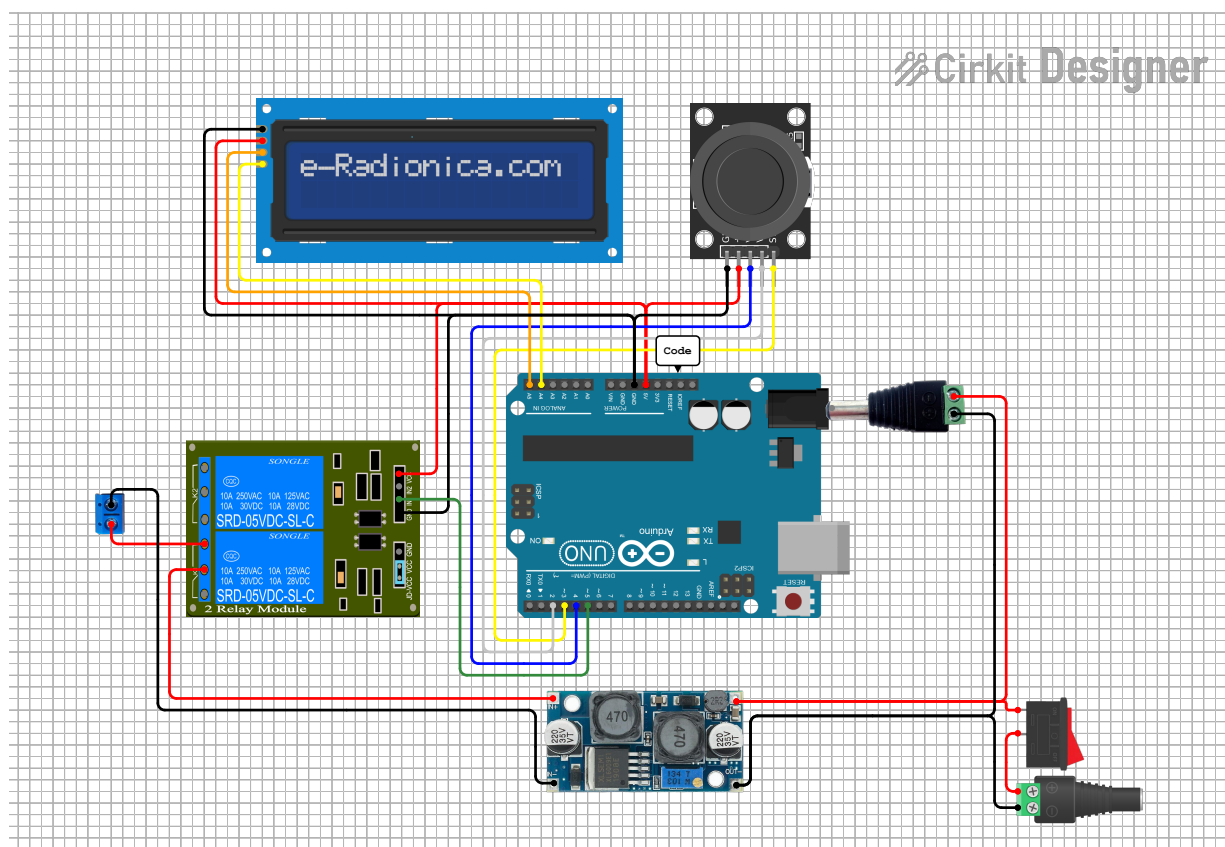
Figuur 33 AMAiWave bedrading
Bron: eigen werk



Figuur 34 AMAiWave besturing
Bron: eigen werk

4.5.2 Schema

De Arduino en het magneetventiel worden respectievelijke van 12 en 24 volt voorzien. Het lcd-scherm, de knop en de aansturing van het relais worden voorzien van 5 volt door de Arduino.



Figuur 35 Schema elektronica
Bron: eigen werk

Tabel 7 Bedrading rotary encoder
Bron: eigen werk

Rotary encoder		
Kleur	rotary encoder	Arduino
	+	5V
	GND	GND
	CLK	2
	DT	3
	SW	4

Tabel 8 Bedrading I2C 16x2 LCD
Bron: eigen werk

I2C 16x2 LCD		
Kleur	LCD	Arduino
	VCC	5V
	GND	GND
	SCL	A5
	SDA	A4

Tabel 9 Bedrading 2 kanaal 5V relais
Bron: eigen werk

2 kanaal 5V relais		
Kleur	relais	Arduino
	VCC	5V
	GND	GND
	In1	5

4.5.3 Software

Voor de Arduino te programmeren maken we gebruik van *Microsoft Visual Studio Code* en een extensie genaamd *Platformio*. Dit is louter gebaseerd op een persoonlijke voorkeur. Nadeel hier is dat de Arduino bibliotheek nog dient toegevoegd te worden in de code, wat niet het geval is indien het programmeren gebeurt met de officiële *Arduino IDE*.

```
#include <Arduino.h>
```

De rode draad in de software is als volgt. Bij het opstarten van de Arduino wordt eerst het lcd-scherm geconfigureerd. Hierdoor verschijnt de standaard periode en de algemene status op het scherm. Met behulp van de draaiknop kan deze periode aangepast worden binnen bepaalde limieten. Met de drukknop, welke ingebouwd zit in de draaiknop, activeert of deactiveert men de golfgenerator.

Het speciale aan deze draaiknop is dat deze van het type *rotary encoder* is. De draaiknop bevat fysieke inspringing. Dit zorgt voor een zeer goede feedback naar de gebruiker toe. Deze draaiknop is iets moeilijker te programmeren daar deze, in tegenstelling tot een potentiometer, niet constant uit te lezen valt door de Arduino. We moeten dus de huidige stand bijhouden en deze telkens opnieuw aanpassen wanneer er een signaal binnenkomt van de draaiknop.

In onze *loop* functie zijn we druk bezig met het luisteren naar het signaal van de drukknop en het besturen van het lcd-scherm. Omdat het signaal dat doorgestuurd wordt van onze draaiknop zeer kort is, bestaat de kans dat we deze missen (Arduino LLC, 2023). Dit zou voor een zeer onaangename ervaring zorgen. Hiervoor bestaat de *attachInterrupt()* functie op de Arduino. Deze functie staat toe alle huidige activiteiten te stoppen en eerst een subroutine uit te voeren alvorens verder te gaan waar hij gebleven was. Deze speciale functie is enkel bruikbaar op pin 2 en 3 voor een Arduino UNO, wat ook meteen verklaart waarom de draaiknop aangesloten is op deze pinnen. Doel is dus om de functie te gebruiken om steeds na te gaan of de positie van de draaiknop is gewijzigd.

Een tweede moeilijkheid aan het gebruik van een *rotary encoder* zorgt ervoor dat we een specifieke vertraging kunnen instellen. Dit is namelijk van cruciaal belang indien we later de testresultaten van de verschillende schaalmodellen onderling willen vergelijken. We zouden kunnen zeggen dat elke inspring één milliseconde verschil in periode is, maar dan worden grote veranderingen in de periode zeer omslachtig daar dit veel rotaties zou vergen.

Indien we dit interval zouden vergroten naar vijf of tien milliseconden verliezen we al snel onze nauwkeurigheid.

De oplossing is het interval evenredig verscalen met de snelheid waarmee we draaien. Deze logica wordt bereikt in de *read_encoder()* functie.

```
if ((micros() - _lastIncReadTime) < _pauseLength) {  
    changevalue = _fastIncrement * changevalue;  
}  
_lastIncReadTime = micros();
```

Deze eenvoudige *if* controleert of we de draaiknop heel snel draaien, sneller dan de vooraf ingestelde parameter *_pauseLength* van 25000 microseconden ofwel 25 milliseconden. We berekenen hiervoor het verschil van de huidige tijd, gegeven door *micros()* in microseconden, en de tijd wanneer we de knop de laatste keer verdraaid hebben, *_lastIncReadTime*. *_LastIncReadTime* wordt telkens direct na deze controle opnieuw opgeslagen zodat deze klaar is voor de volgende keer. Indien dit verschil kleiner is dan onze parameter *_pauseLength* draaien we snel aan onze knop en vermenigvuldigen we de verandering met *_fastIncrement* dat een waarde heeft van 10. Op deze manier verandert onze waarde veel als we snel draaien.

Deze functie is opgesteld met hulp van MoThunderz (2023).

Voor het lcd-scherm moeten we de bibliotheek *LiquidCrystal_I2C* installeren. Deze zal ons toelaten het lcd-scherm te bedienen.

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

Nadien moeten we eerst duidelijk maken aan de Arduino welk type LCD we gebruiken met desbetreffende adres. Op de achterkant van de I2C module zijn er drie jumper pinnen al dan niet geïnstalleerd. Deze bepalen het adres van onze I2C module. Dit maakt het mogelijk om verschillende I2C module te gebruiken zonder enige interferentie. Om te weten welk adres we dienen te gebruiken uploaden we tijdelijk een sketch die ons zal vertellen welke adressen teruggevonden worden. Dit is ook wel bekend als een “I2C scanner”. Wij gebruiken de I2C scanner van ESP32 Cube (z.d.)(bijlage B).

Verder is de software vrij eenvoudig en is het een kwestie van het relais te activeren enkel wanneer wij dit willen.

4.6 Afstelling

Door de aanwezigheid van de Arduino is het mogelijk om de golfgenerator af te stellen voor elke golven met een periode tussen 300ms en 1000ms. Alhoewel er geen concrete limiet is op de periode van de golven die gecreëerd kunnen worden, hebben we deze minimumperiode ingesteld om de golfgenerator te beschermen tegen vibraties. Vanaf dit punt worden de golven ook te klein om op onze schaal iets mee te bereiken. Op het moment dat de maximumperiode werd vastgelegd waren er geen modellen dat er periode nodig hadden langer dan 1 seconde. Inmiddels wordt er voor AMARETO op een grotere schaal gewerkt en zal deze limiet verhoogd moeten worden.

De drukregelaar kan vergrendeld worden door de draaiknop in te drukken. Hierdoor is het niet mogelijk om de druk accidenteel aan te passen tijdens het uitvoeren van de tests. Ook de smoorventielen kunnen vergrendeld worden op hun gewenste positie.

4.7 Problemen

4.7.1 Arduino reset

Tijdens het testen dook geregeld een probleem op met de elektronica. Na het activeren van de relaisschakeling viel deze na een tien tot dertigtal seconden uit en herstartte de Arduino. Dit probleem was zeer moeilijk op te sporen aangezien het zich niet op een consistente manier voordeed.

Tijdens het opsporen van de mogelijke oorzaak werd even vastgesteld dat het probleem zich voordeed enkel wanneer de ingestelde periode mooie, ronde getallen waren zoals 500ms. Met *Microsoft Visual Studio Code* is het mogelijk om je software te debuggen. Hieruit kwam tweemaal dezelfde foutmeldingen, namelijk: *“comparison between signed and unsigned integer expression”* voor lijn 43 en 53.

```
LIJN 43: if ((micros() - _lastIncReadTime) < _pauseLength) {
```

```
LIJN 53: if ((micros() - _lastDecReadTime) < _pauseLength) {
```

Het is onwaarschijnlijk dat dit ons probleem veroorzaakt aangezien dit deel van de code verantwoordelijk is voor het aanpassen van de periode via de draaiknop. Dit deel wordt ook genegeerd eenmaal het systeem actief is doordat er op lijn 29 een controle is. Lijn 43 en lijn 53 werden ook rechtstreeks is overgenomen van MoThunderz (2023).

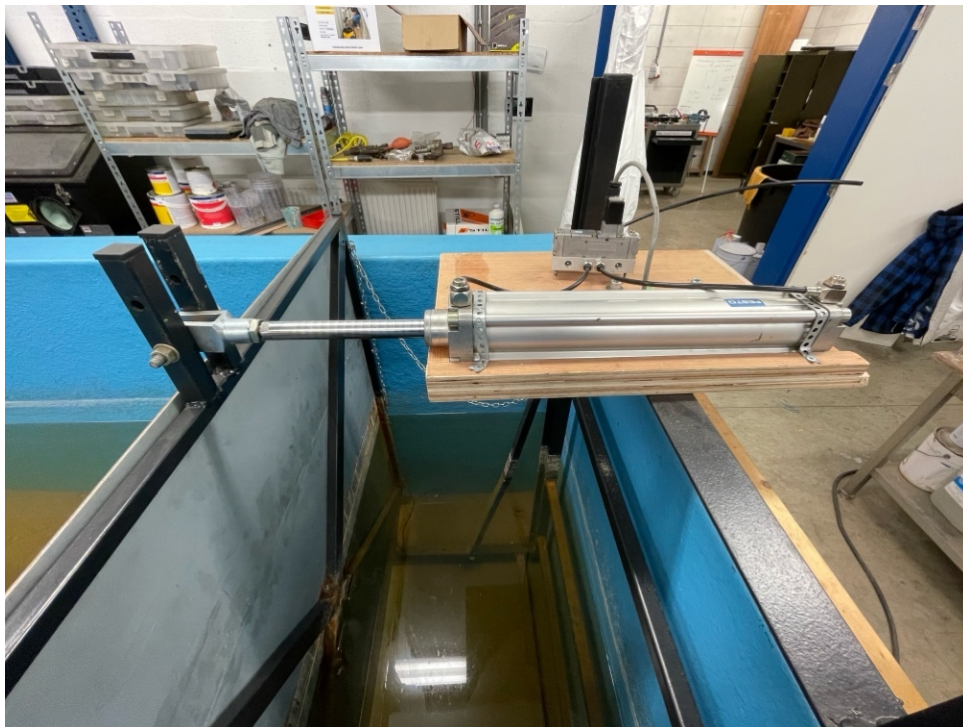
Ondertussen was ook duidelijk geworden dat enkel wanneer de Arduino en relaischakeling verbonden was met het magneetventiel het probleem zich voordeed. Een mogelijke verklaring zou kunnen zijn dat er een groter stroomverbruik is door het ventiel. Waardoor een spanningsval optreedt in de 12V voeding, de Arduino niet genoeg stroom krijgt en opnieuw opstart. Om deze hypothese te bevestigen werd een andere voeding gebruikt, met een maximaal vermogen van 80W maar ook hier werd het probleem vastgesteld. Er staat geen stroomverbruik op de datasheet van het magneetventiel maar in het vorige project, waar onze cilinder en magneetventiel vandaan komen, was deze aangesloten met een 220V naar 24V transformator met een maximumstroom van 0,34A voor 24V. Dit komt neer op een ruime 8W en dus zou onze 80W voeding moeten voldoen.

Na verdere inspectie van alle gesoldeerde onderdelen werd een los contact ontdekt op het zogenaamde *ProtoShield*, dit is een soort PCB dat op de Arduino wordt gemonteerd waar men verschillende connecties kan maken met de in-/uitgangen van de Arduino. Na het opnieuw vast solderen en een controle van alle andere verbindingen is het probleem niet meer voorgekomen.

De hypothese dat het probleem zich enkel voordeed bij mooie ronde getallen voor de periode is dus ongegrond. Hoogstwaarschijnlijk kwam ik op dit dwaalspoor doordat ik initieel voornamelijk testte met een periode van exact 500ms.

4.7.2 Turbulentie achter golfgenerator

Tijdens het uitvoeren van de tests met verschillende periodes werd er geconstateerd dat rond een periode van 800ms er zeer veel turbulentie achter de golfgenerator waargenomen werd. De achterzijde is immers identiek aan de voorzijde, waardoor we eigenlijk twee golfgenerators hebben. Door de korte afstand tot het uiteinde van het bassin worden de golven vrijwel onmiddellijk gereflecteerd en worden deze alleen maar versterkt door de continue beweging van de golfgenerator. Dit effect is het meeste waarneembaar bij periodes tussen 750ms en 850 ms. Het grote probleem hierbij is dat de golven aan de voorzijde beïnvloed worden. En zo is het ook zeer lastig om de golfgenerator op zijn middelste positie te houden, desondanks de vele afstel mogelijkheden.



Figuur 36 Ruimte achter de golfgenerator

Bron: eigen werk

Een eerste oplossing dat in gedachten kwam was een tweede golfabsorbeerder construeren, net zoals aan de voorzijde (meer info in hoofdstuk 5 *Golfabsorbeerder*). Maar we moesten uiteraard eerst weten of dit wel zou werken. Dus hebben we drie verschillende tests uitgevoerd. De eerste test was met een dunne houten plaat van ongeveer 2mm dik. Deze bleek niet sterk genoeg te zijn, en boog mee met het bewegende water. Er moet wel vermeld worden dat de plaat niet gemonteerd was zoals deze uiteindelijk zou gemonteerd zijn als we deze optie kozen. Maar het was duidelijk dat dit niet zou werken.



Figuur 37 Neutralisatie test nr. 1 met houten plaat

Bron: eigen werk

Een tweede test werd uitgevoerd met een stuk isolatie van ongeveer 5cm dik. Ook hier hadden we weinig resultaat. De helling is te steil waardoor het merendeel van de golven nog steeds gereflecteerd worden. Door de beperkte plaats is het zeer moeilijk om een helling te creëren die de golven geleidelijk aan laat vertragen waardoor deze in grootte groeien en uiteindelijk breken.



Figuur 38 Neutralisatie test nr. 2 met isolatie

Bron: eigen werk

Tenslotte werd een derde optie getest, een houten plank. Deze werd tegen de constructie van de golfgenerator geplaatst en was dus voornamelijk verticaal gemonteerd. Het idee was dat de golven over de plank heen spoelden. Maar ook hier hadden we weinig tot geen resultaat.

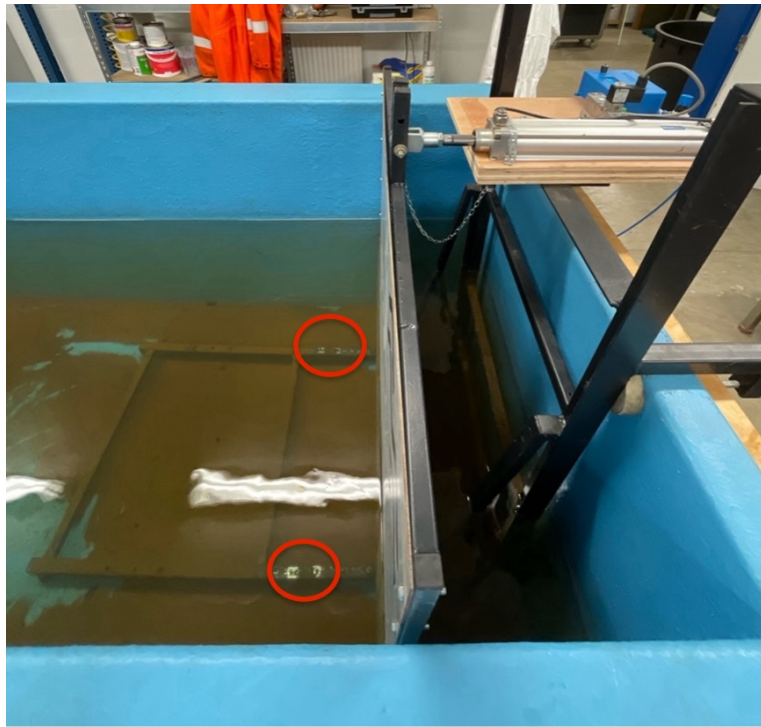


Figuur 39 Neutralisatie test nr. 3 met houten plank
Bron: eigen werk

Als we onze generator vergelijken met bijvoorbeeld deze van Edinburgh Designs Ltd (2024) en OMEY Labs (2016), beide een bedrijf gespecialiseerd in het maken van test bassins, golfgenerators en golfabsorbeers. Zij vermijden dit probleem omdat er achter de golfgenerator helemaal geen water aanwezig is. Voor ons is dit geen optie omdat er tijdens de constructie gekozen werd voor een niet ingrijpende installatie.

Bij golfgeneratoren waarbij er wel water aanwezig is aan de achterzijde, zoals die van Magistrale (2019), is de ruimte achter de generator aanzienlijk kleiner. Gelukkig heeft Peter Carlier vooruit gekeken en meerdere bevestigingspunten voorzien om de flap te positioneren (Carlier, 2023).

Op Figuur 40 is de nieuwe positie en de oude bevestigingspunten zichtbaar (rode cirkels) Er is nu veel minder ruimte achter de generator in vergelijking met eerder, zoals op Figuur 36.



Figuur 40 AMAiWave herpositioneerd
Bron: eigen werk

Na het verplaatsen van de golfgenerator is er merkbaar minder turbulentie maar deze is niet helemaal verdwenen. Op de zijkanten, tussen de flap en het bassin, valt het op dat er een verschil is in waterniveau tussen de voorkant en achterkant. Om het water de kans te geven om beter tussen beide zijden te vloeien hebben we de onderste metalen plaat verwijderd zoals zichtbaar op Figuur 41.

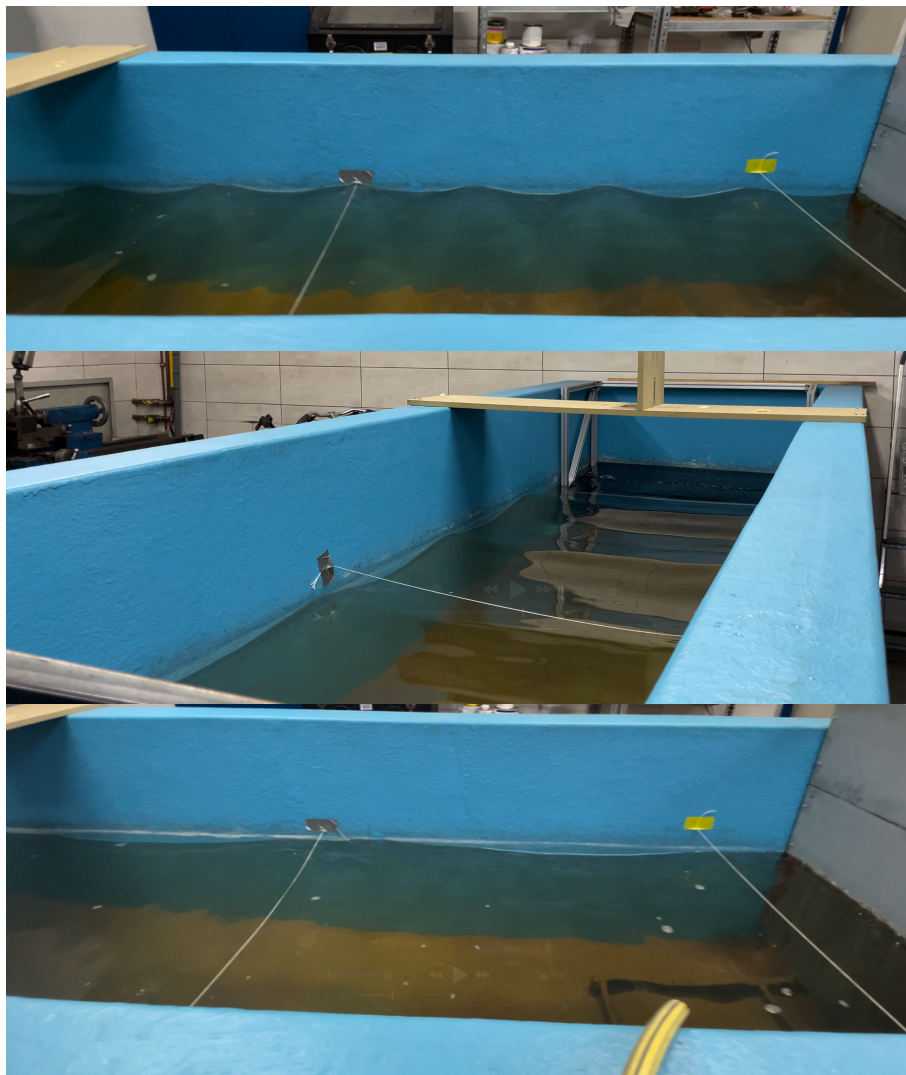


Figuur 41 Verwijderen metalen plaat aan de voorzijde
Bron: eigen werk

4.8 Testresultaten

4.8.1 Flexibiliteit

Door de vele afstel mogelijkheden is het mogelijk om een groot bereik aan golven te produceren. De golfgenerator wekt telkens mooie lopende golven op. Het overschakelen tussen de verschillende golven loopt echter niet zo soepel als gewenst. De periode kan gemakkelijk gewijzigd worden met de Arduino, een grotere golfhoogte kan dan weer bekomen worden door een hogere bedrijfsdruk. Maar door de veranderende slaglengte en druk verandert het debiet dat in en uit de cilinder loopt. En door het verschil in oppervlak binnenin de cilinder wordt er niet evenveel kracht uitgeoefend bij het intrekken en uitschuiven. Waardoor de cilinder zijn middelste positie verliest en tegen de uiteindes botst.



Figuur 42 Golven met een periode van 500, 650 en 1000ms

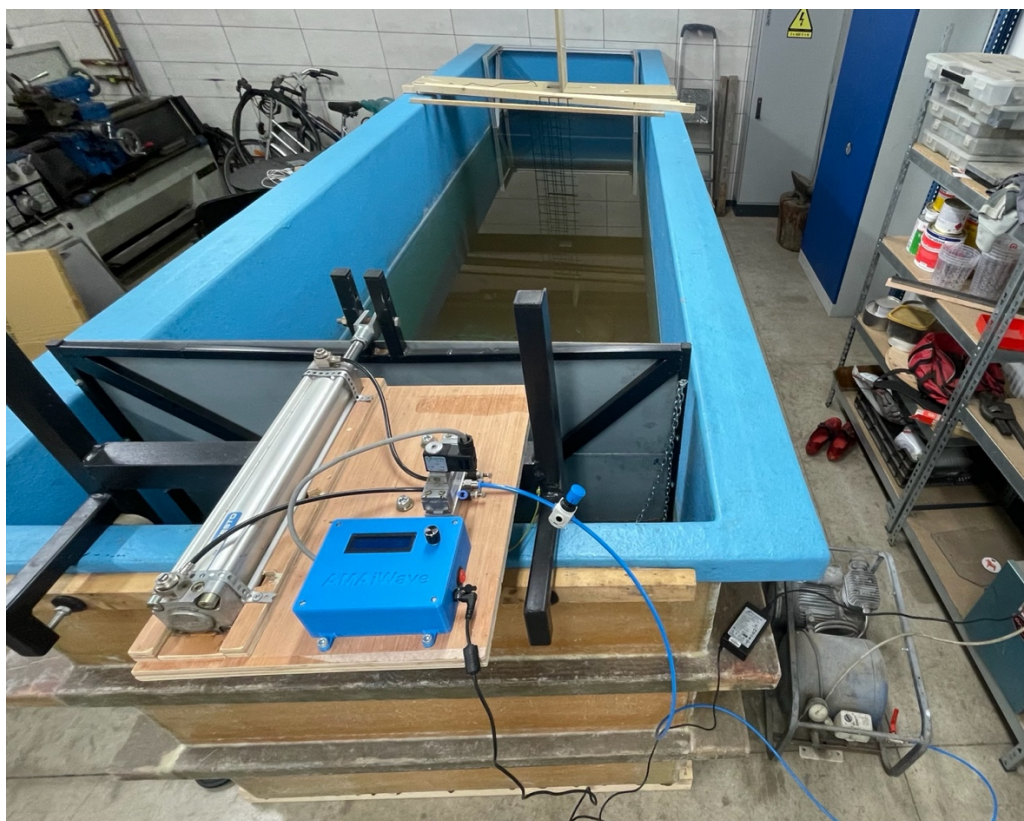
Bron: eigen werk

Uiteindelijk was er het meeste succes door het smoorventiel dat verantwoordelijk is voor de uitlaat tijdens het intrekken van de cilinder deels te sluiten (blauw systeem op Figuur 21) en de twee ventielen dat zich op de pneumatische cilinder bevinden volledig te openen. Het smoorventiel wordt hier gebruikt om tegendruk te creëren waardoor er minder lucht zal ontsnappen en de cilinder minder zal intrekken. Wanneer de cilinder naar achteren beweegt moet dit ventiel meer gesloten worden.

Hier is zeker nog ruimte voor verbetering, in een ideaal scenario wordt er gebruik gemaakt van een gesloten regelkring dat met behulp van een positiesensor de golfgenerator steeds in een middelste positie tracht te houden.

4.8.2 Uithoudingstest

Om vertrouwen te krijgen in het systeem trachten we golven te produceren over een zo lang mogelijke tijdsperiode. We slaagden erin om de golfgenerator 5 minuten lang golven te laten produceren voordat de golfgenerator terug zijn middelste positie verloor. De elektronica, luchtcompressor en overige hardware toonde geen enkel teken van vermoeidheid. De golfgenerator werd terug op positie gebracht en werd onmiddellijk terug geactiveerd waarna deze opnieuw zijn positie verloor na enkele minuten. Deze cyclus werd een drietal keer herhaald.

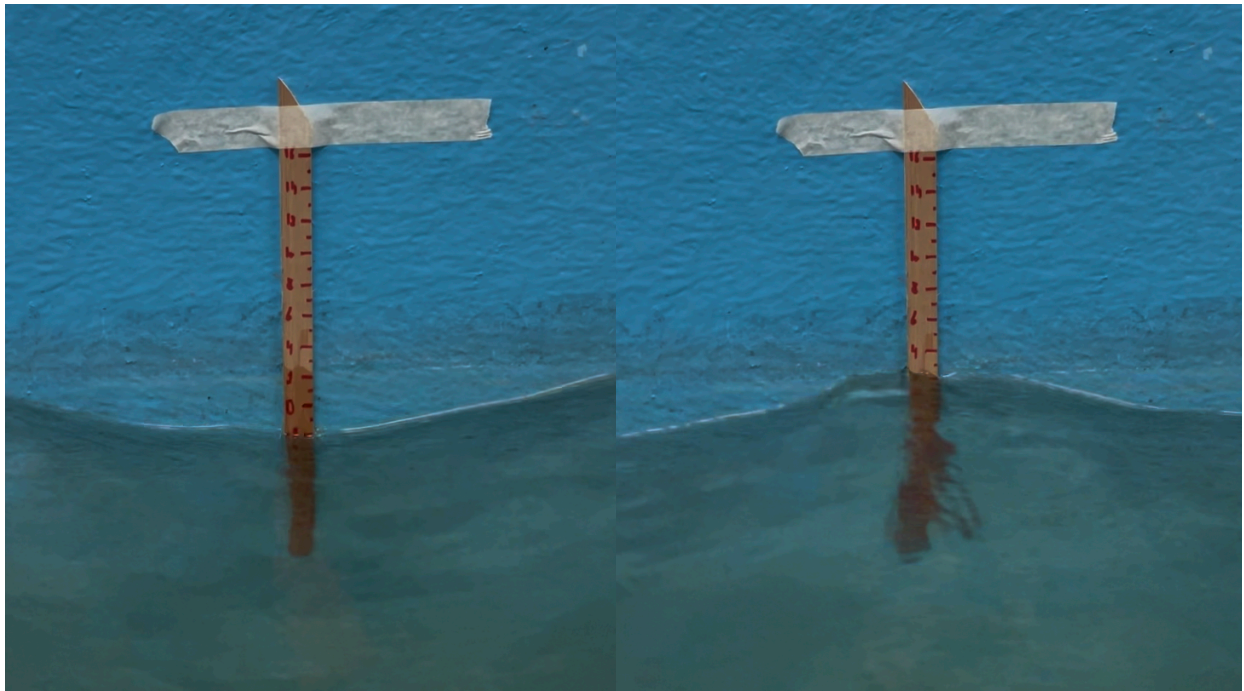


Figuur 43 Testopstelling
Bron: eigen werk

4.8.3 Eigenschappen van de golven

Om de eigenschappen van de geproduceerde golven te bepalen probeerden we met behulp van een golfhoogtemeter de golven te meten. Helaas slaagden we er niet in om op deze manier de golven betrouwbaar te meten. Initieel werd verondersteld dat de sensor aan de basis van het probleem lag, maar ook met een nieuwe sensor was het probleem niet opgelost. Door een gebrek aan tijd besliste we om de golven op een andere manier te meten.

Om de golfhoogte en amplitude te bepalen brachten we tijdelijk op twee locaties in het bassin markeringen aan. Elke centimeter werd er een markering aangebracht en het nulpunt kwam overeen met het waterniveau. Met behulp van beeldmateriaal werd de amplitude bij zowel een golftop als golfdal over meerdere golflengtes bepaald. De test werd uitgevoerd voor golven met een periode van 300ms, 500ms, 800ms en 1000ms.



Figuur 44 Hoogte markering

Bron: eigen werk

Bij 500ms, 800ms en 1000ms werd telkens een amplitude vastgesteld van ongeveer 2cm. Enkel bij 300ms was de amplitude aanzienlijk kleiner, namelijk 1,5 cm. Een mogelijke verklaring kan zijn dat door de specifieke configuratie van de ventielen en drukregelaar de pneumatische cilinder niet genoeg energie kan overbrengen om een grotere amplitude te bekomen. Door meer kracht te creëren met de pneumatische cilinder kunnen we meer energie overbrengen, maar bij een groter debiet en hogere werkdruk verliest de cilinder zijn ideale positie waardoor het niet mogelijk was om deze hypothese te testen.

Door het tijdsinterval te meten over een gekende afstand kunnen we ook voor elke golf de voortplantingssnelheid bepalen. De tijdsperiode werd gemeten tussen de twee markeringen dat 2m30 van elkaar verwijderd zijn. Zoals verwacht is de voortplantingssnelheid evenredig met de periode.

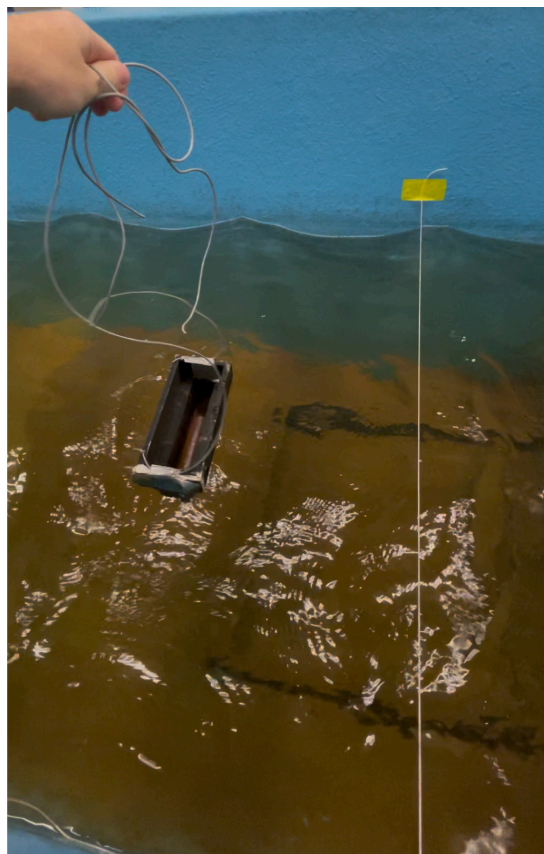
Tabel 10 Voortplantingssnelheid

Bron: eigen werk

Periode (ms)	Tijd (s)	Snelheid (m/s)
300ms	3,90s	0,589 m/s
500ms	2,53 s	0,909 m/s
800ms	1,90 s	1,211 m/s
1000ms	1,36 s	1,691 m/s

4.8.4 Prestaties met een prototype

Om een realistisch beeld te krijgen van hoe een schaalmodel zou reageren op onze golven plaatste we een symmetrisch prototype van ongeveer 20cm lang, 7cm breed in het water loodrecht op de golven. Het model beschikte over een gewicht zodat de kiel volledig is ondergedompeld.



Figuur 45 Test schaalmodel met periode van 500ms

Bron: eigen werk

Bij de test produceerden we golven met een periode van 500ms. Het model werd een zestal seconden blootgesteld aan de golven. Binnen deze tijdsperiode dreef het model ongeveer 1m af van de originele startpositie richting de golfabsorbeerder. Om de rolperiode van het model te bepalen gebruiken we het beeldmateriaal en laten we de tijdsbalk tellen in frames. Het prototype maakte acht volledige rolbewegingen in 145 frames. Het toestel waarmee het beeldmateriaal opgenomen werd filmt in 30 frames per seconden, wat ons een looptijd geeft van 4,833 seconden. Voor één rolperiode komt dit neer op 604ms. Dit is een vrij groot verschil met de geproduceerde golven dat ingesteld zijn op 500ms.

Dit verschil in periode valt te verklaren door het dopplereffect, door de afdrijving van het prototype wordt een andere frequentie waargenomen. De formule voor het dopplereffect is als volgt:

$$f_w = f_b \frac{c_s + v_w}{c_s - v_b} \quad (4.4)$$

met

f_w de waargenomen frequentie

f_b de frequentie van de golf die de bron uitzendt

c_s de voortplantingssnelheid van de golf

v_w de snelheid waarmee de waarnemer zich verplaatst

v_b de snelheid waarmee de golfbron zich verplaatst

Een golftop heeft ongeveer 4,70 seconden nodig om zich 3,75m te verplaatsen vanaf de golfgenerator tot de golfabsorbeerder, dit geeft ons een voortplantingssnelheid van ongeveer 0,80 m/s. De golfbron verplaatst zich niet en samen met de eerder vernoemde parameters kunnen we de waargenomen frequentie berekenen.

$$f_w = 500 \frac{0,80 \text{ m/s} + (\frac{1\text{m}}{6\text{s}})}{0,80 \text{ m/s} - 0 \text{ m/s}} = 604,56 \text{ ms}$$

Onze berekende waargenomen frequentie en effectief gemeten rolperiode zijn volledig met elkaar in overeenstemming waardoor we kunnen besluiten dat de golven waaraan het prototype blootgesteld was een periode hebben zeer dicht bij 500ms.

Naar de toekomst toe moet er dus rekening gehouden worden met een waargenomen periode dat verschilt van de opgewekte golf wanneer het model van zijn positie drift.

5 Golfabsorbeerder

5.1 Doel

Tijdens het beoordelen van vorige golfgenerator viel het op dat er na een aantal seconden een staande golf ontstond. Deze staande golf ontstaat doordat de golven vrijwel volledig gereflecteerd worden op de achterzijde en interfereren met de niet-gereflecteerde golven. We wensen een mooie lopende golf te creëren en dit is dus niet wat wij wensen. We moeten de reflectie tegengaan door de golven aan het uiteinde op te vangen en te neutraliseren.

5.2 Soorten Absorbeeders

5.2.1 Actieve compensatie

Er bestaan diverse methoden om golven te absorberen. We vergelijken en beoordelen een aantal types op hun toepasbaarheid en technische haalbaarheid. We kunnen een eerste onderscheid maken tussen actieve compensatie en passieve absorptie.

Systemen met actieve compensatie maken gebruik van sensoren en een golfgenerator om een inkomende golf te detecteren en een tegengolf te genereren. Door destructieve interferentie worden beide golven dan geneutraliseerd. In de praktijk is dit systeem zeer moeilijk te realiseren, het vereist uiterste precisie om beide golven exact te compenseren. Elk onderdeel zou dan een hoge nauwkeurigheid moeten hebben om dit foutloos te kunnen doen. Vaak betekent een hogere nauwkeurigheid een hogere aankoop prijs waardoor deze oplossing onbetaalbaar zou worden voor ons. We zouden ook een enorme hoeveelheid complexiteit toevoegen met een tweede golfgenerator.

5.2.2 Passieve absorptie

5.2.2.1 Verticale absorbeeders

Verticale absorbeeders bestaan uit verschillende lagen van een geperforeerd metaal plaat. De perforaties verstoren de inkomende golf door turbulentie en wrijving te creëren. Initieel wordt het merendeel van de golf doorgelaten en ontstaat er relatief weinig turbulentie om reflectie te beperken. Normaliter wordt laag per laag de porositeit afgebouwd met als gevolg dat er meer turbulentie en wrijving ontstaat waardoor energie van de golf verloren gaat.

Hoewel ze weinig ruimte in beslag nemen, zijn ze doorgaans moeilijker af te stemmen op variabele golfcondities. Veel parameters spelen een rol in het correct absorberen van de golven.

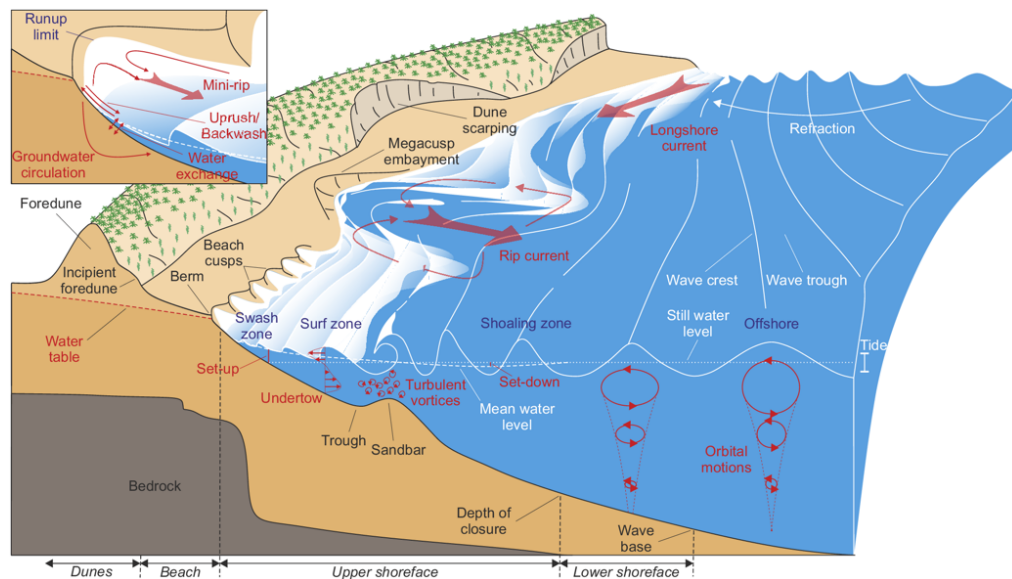
Zo kan de grootte en het aantal perforaties veranderd worden, de afstand tussen de verschillende lagen en de hoek van de gelijkzijdige driehoeken aan de voorzijde. De vermoeilijkt het proces aanzienlijk wanneer we een andere golf willen absorberen. Door de complexiteit en gebrek aan flexibiliteit lijkt ons dit niet hetgeen we wensen en zijn we opzoek naar een andere oplossing.



Figuur 46 Verticale absorbeerder
Bron: Klinghammer et al. (2012)

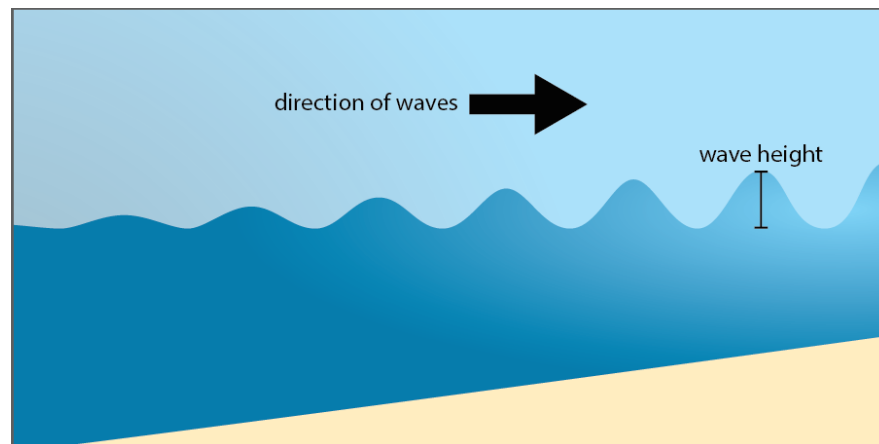
5.2.2.2 Schuine helling

Als we ons laten inspireren door de natuur, vormt een strand aan de kust ook een geleidelijke helling die golven laat afremmen en uiteindelijk laat breken. De meeste golfabsorptie van de golven op een strand gebeurt in de zogenaamde surf zone.



Figuur 47 Surf zone strand
Bron: Wikimedia Commons (2024)

Naarmate de golven land naderen, vermindert de waterdiepte. Hierdoor treedt een effect op genaamd *Shoaling*. Doordat de golfsnelheid afhankelijk is van de waterdiepte, zoals uitgelegd in hoofdstuk 3 *Golven*, zal deze snelheid en de golflengte steeds afnemen. Omdat de energie van één enkele golf steeds constant moet blijven maar over een kortere afstand wordt verdeeld zal de amplitude van de golf vergroten (Karin R. & Hannah E., 2020).



Figuur 48 *Shoaling effect*
Bron: *Exploring our Fluid Earth* (z.d.)

Een geleidelijke helling is een veel voorkomende oplossing als golfabsorbeerder en dat is vooral te danken aan zijn simpliciteit. Er zijn slechts twee parameters dat de absorptie van de golven kan beïnvloeden, de hellingshoek en hoogte van de helling. Doordat we ook enigszins beperkt zijn in ruimte kunnen we namelijk geen helling creëren dat volledig vanaf de bodem tot boven het wateroppervlak loopt. Gelukkig hangen de hellingshoek en de hoogte samen en kunnen we hopelijk deze twee parameters combineren in één mechanisme.

5.3 Bestaande Absorbeerdere

5.3.1 Cantabria Coastal and Ocean Basin

Het CCOB, *Cantabria Coastal and Ocean Basin*, construeerde een verticale golfabsorbeerder voor hun bassin waar ze multidirectionele golven kunnen genereren in zowel diep als ondiep water. Zij hebben gekozen om een verticale absorbeerder te construeren door de vele verschillende golven dat zij produceren. Een geleidelijke helling zou veel meer plaats in beslag nemen omdat er variërende golven uit verschillende richtingen aan komen. De voorzijde, zichtbaar op Figuur 46, bestaat uit gelijkzijdige driehoeken vervaardigd uit metalen geperforeerde platen. Hierna volgen nog acht geperforeerde platen, zichtbaar Figuur 49, dat evenwijdig geplaatst zijn met de zijkant van het bassin. Deze platen zijn niet allemaal gelijk in hun aantal perforaties en de grootte

van de perforaties. Klinghammer et al. (2012) voerde verschillende tests uit om deze parameters te optimaliseren.



Figuur 49 Zij aanzicht absorbeerder CCOB
Bron: Klinghammer et al. (2012)

5.3.2 OMEY Labs

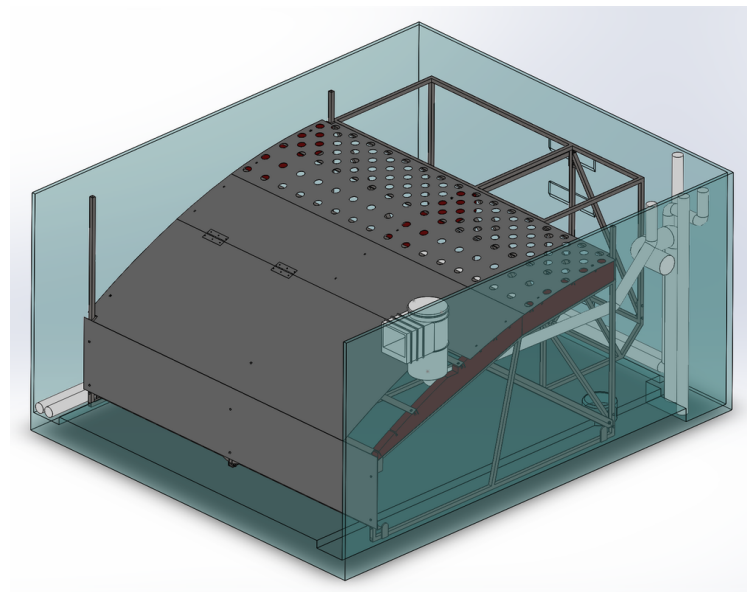
OMEY Labs, een bedrijf uit Ierland, dat zich specialiseert in het verkopen van golf bassins en tests tanks heeft een helling geïnstalleerd om de tijd te verminderen dat het water nodig heeft om volledig tot stilstand te komen. Zo heeft het water minder dan 1 minuut nodig om volledig tot stilstand te komen nadat golven geproduceerd zijn met een periode van 2,5 seconden.



Figuur 50 Wave Absorber Module OMEY Labs
Bron: Novatig Pte Ltd (z.d.)

5.3.3 MIT Tow Tank Lab

Hwang Rachel construeerde tijdens de zomer van 2017 een golfabsorbeerder voor de Towing Tank van MIT, *Massachusetts Institute of Technology*. Hun testbassin is ongeveer 30 meter lang en wordt gebruikt voor het testen van scheepsmodellen, offshore windturbines en veel meer (Massachusetts Institute of Technology, 2014). De absorbeerder beschikt over een parabolische vorm van het strand om de golfenergie optimaal te absorberen, een verticale plaat onder water dat reflectie van golven met een lange golflengte voorkomt, en een toenemende porositeit in het strandoppervlak. Eén van de grote uitdagingen dat zij tegen kwamen was de aanwezigheid van verschillende pijpleidingen waar omheen moest gewerkt worden.



Figuur 51 MIT Tow Tank Golfabsorbeerder
Bron: Hwang (2017)

5.4 Ontwerp

5.4.1 Ontwerp Criteria

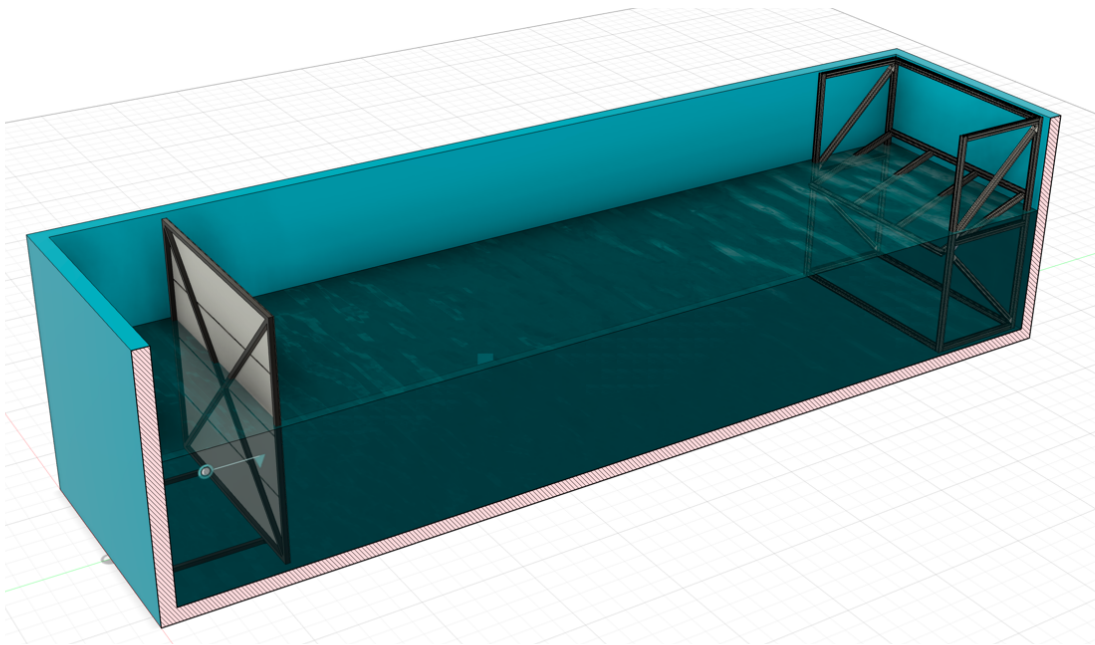
Door de simpliciteit en het type golven dat gegenereerd worden in ons bassin, lijkt ons een schuine helling de meest geschikt optie. Voordat we beginnen met het ontwerp moeten we eerst vastleggen wat onze doelen en behoeften zijn. Het viel ons op dat op de constructie van de golfgenerator reeds corrosie zichtbaar is. Deze is wel voorzien van een verlaag dat corrosie zou tegenhouden maar op lange termijn vereist dit onderhoud. Idealiter wordt de absorbeerder vervaardigd uit een metaal dat niet corrodeert om onderhoud te beperken.

Omdat er in de toekomst een mogelijkheid is dat het bassin voor een ander project gebruikt zal worden moet ook deze installatie volledig tijdelijk zijn.

Tenslotte moet het mogelijk zijn om de helling van positie te veranderen afhankelijk van de gewenste golven en het waterniveau.

5.4.2 Ontwerp 3D-model

Het ontwerp van de golfabsorbeerder werd gerealiseerd met behulp van het CAD-programma *Fusion 360* van het bedrijf *AutoDesk*. Om de golfabsorbeerder met de correcte afmetingen te kunnen ontwerpen werd eerst het bassin volledig nagetekend in 3D. Dit model kan dan gebruikt worden als referentie.



Figuur 52 CAD model bassin
Bron: eigen werk

Voor het materiaal van de golfabsorbeerder werd gekozen voor aluminium extrusie profielen voor meerdere redenen. Deze profielen zijn zeer gemakkelijk in gebruik, elk onderdeel heeft zijn eigen standaardmaat, wat ervoor zorgt dat alles precies past (Aluminum Extruders Council, 2025). Maar de standaardmaat zorgt er ook voor dat oneindig veel mogelijkheden zijn wat betreft montage. Aluminium is van nature zeer goed bestand tegen corrosie dankzij de vorming van een passieve oxidefilm op het metaaloppervlak. Dit in zowel zeewater als zoetwater en tal van andere stoffen (Vecom Group B.V., z.d.). Tevens zijn alle hoekverbindingen, waarmee de profielen op hun plaats gehouden worden, ook vervaardigd uit aluminium en alle bouten uit verzinkt staal.

Om de absorbeerder te voorzien van een mooie helling hebben we gekozen om een polyethyleen plaat van 4mm dik te gebruiken en te bevestigen op het frame. Polyethyleen is zeer gemakkelijk te bewerken en is tegelijk zeer slijtvast. Doordat het bestand is tegen allerlei chemische stoffen

is het ook zeer duurzaam (Muijlwijk, 2025). Polyethyleen heeft een zeer glad oppervlak wat ervoor zorgt dat het een lage wrijvingscoëfficiënt heeft. Hierdoor kunnen bacteriën of andere organismes zich moeilijk vasthechten (Groupe PolyAlto, 2023).

Er werd ook overwogen om enkele gaten te maken in de plaat zodat het water niet zou terugspoelen in het bad. Er werd uiteindelijk besloten om hiervan af te zien vanwege het grote succes in de huidige configuratie.

5.4.3 Afstelbaarheid

De golfabsorbeerder kan in hoogte en hoek versteld worden door middel van maximaal slechts zes bouten. De hoogte kan op eender welk punt ingesteld worden door vier bouten los te draaien, één op elke hoek. Het bereik van de hoogte is ongeveer vanaf acht centimeter vanaf de bodem tot drie centimeter tot de rand van het bassin. De helling kan versteld worden met dezelfde 4 bouten voor kleinere correcties. Bij grotere correcties is het ook noodzakelijk om twee extra bouten los te draaien aan de voorkant. De helling heeft een bereik van ongeveer 20 graden aan elke kant.

5.5 Assemblage

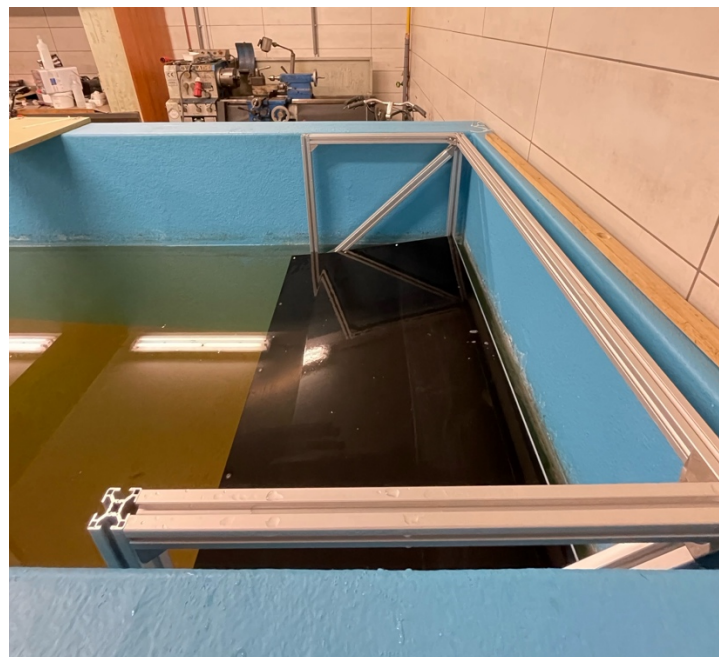
Voor de assemblage heb ik op voorhand met behulp van het CAD-programma de 3d-tekening omgezet in 2d vanuit verschillende perspectieven. De absorbeerder is opgebouwd uit vijf verschillende lengtes aluminium profielen waardoor overzicht een must is. De assemblage van de absorbeerder verliep vlekkeloos, grotendeels doordat de aluminium extrusie profielen zeer gemakkelijk in gebruik zijn.

De diagonale profielen worden bevestigd met een speciale profielverbinder. Deze verbinder wordt met een bout op de kopse kant bevestigd aan het profiel. Er was een optie om de profielen met schroefdraad te bestellen maar aangezien het benodigde materiaal ter beschikking was, was dit vrij gemakkelijk om zelf te doen.



Figuur 53 Frame Golfabsorbeerder
Bron: eigen werk

De polyethyleen plaat werd met negen bouten gemonteerd, telkens op de zijkanten. Er werden geen bouten gebruikt in het midden zodat het steeds mogelijk blijft om later, indien gewenst, de porositeit te verbeteren door gaten toe te voegen.



Figuur 54 Golfabsorbeerder in het bassin
Bron: eigen werk

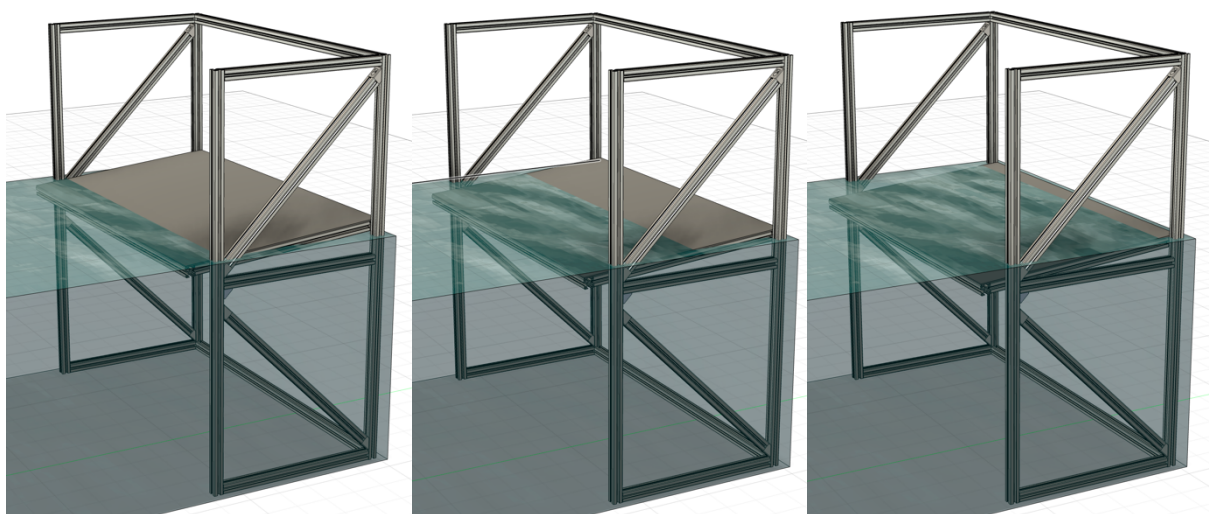
5.6 Testen

5.6.1 Tijd tot stilstand

Om de absorbeerder te kunnen evalueren moeten we enkele subjectieve tests uitvoeren. Een eerste parameter die kan gemeten worden is de tijd dat het water nodig heeft om volledig tot stilstand te komen. We voerde acht experimenten uit telkens met een verschillende hellingshoek en/of helling hoogte. De helling werd op drie verschillende posities getest, zichtbaar op Figuur 55, telkens met een hellingshoek van vijf of tien graden. De tijd tot stilstand werd gemeten vanaf dat de golfgenerator uitgeschakeld werd tot er op de zijkant van het bassin geen golven meer geprojecteerd worden.

Tabel 11 Testresultaten absorbeerder
Bron: eigen werk

Nr.	Periode	Stand	Tijd tot stilstand	Opmerkingen
1	500ms	Controle	7,66s	Initiële stand na installatie
2	500ms	10° HOOG	24,4s	Zeer veel reflectie Formatie van staande golf
3	500ms	5° HOOG	23,9s	
4	500ms	10° MIDDEN	9,0s	Kleine storingen zichtbaar Lichte reflectie
5	650ms	10° MIDDEN	8,7	
6	500ms	5° MIDDEN	6,7s	
7	500ms	10° LAAG	3,2s	Mooie lopende golven
8	500ms	5° LAAG	2,9s	Amper reflecties



Figuur 55 Verschillende hoogtes helling
Bron: eigen werk

Uit deze resultaten kunnen we afleiden dat de absorbeerder heeft geen enkele moeite heeft met een verandering in periode. Elke golf dat aanspoelt vertraagt door het *Shoalingeffect* en zal uiteindelijk breken. Hoewel er tussen experiment 4 en 5 een klein tijdsverschil is, is er geen waarneembare verandering zichtbaar. Het tijdsverschil is voornamelijk te danken aan een verschillende voortplantingssnelheid, golven met een langere golflengte zullen sneller de absorbeerder bereiken waar ze geneutraliseerd worden.

De helling presteert het beste onder een kleine hoek. Het ideaal punt bevindt zich rond vijf graden, bij een grotere hoek worden er meer golven gereflecteerd en een kleinere hoek wordt in de praktijk moeilijk realiseerbaar. Wanneer de hoek te klein wordt, wordt onze absorbeerder te klein in lengte om de golven geleidelijk aan te kunnen breken doordat deze de benodigde waterdiepte niet haalt. Deze bevindingen zijn in overeenstemming met wat we verwachtte in hoofdstuk 3.10 Breken van golven.

In de resultaten wordt het ook duidelijk dat bij een lage hoogte van de helling de golven meer tijd hebben om te vertragen waardoor ze beter zullen breken en minder reflectie zullen veroorzaken. Bij een goede afstelling, namelijk zo laag en zo vlak mogelijk, werkt de absorbeerder vele malen beter dan verwacht.



Figuur 56 *Inkomende golven breken op de helling*

Bron: eigen werk

5.6.2 Flexibiliteit

Tijdens het uitvoeren van de verschillende tests moest de hoogte en hellingshoek aangepast worden naargelang de verschillende test scenario's. Hoewel dit relatief vrij simpel is, door slechts 4 bouten los te draaien, is het toch aangeraden om een aanpassing minstens met 2 personen uit te voeren.

6 Conclusie

Door gebruik te maken van een pneumatisch systeem is de golfgenerator succesvol omgebouwd en hebben we een golfabsorbeerder met succes onderzocht, ontwikkeld en geconstrueerd. De golfgenerator heeft aangetoond in staat te zijn tot het produceren van consistente, lopende golven binnen een instelbaar bereik van 300 tot 1000 milliseconden. Dankzij de Arduino-gestuurde relaischakeling is het mogelijk om snel golven met de gewenste periode te produceren.

Een belangrijk knelpunt werd echter vastgesteld bij het behouden van een stabiele positie van de golfgenerator. Dit wordt verklaard door een asymmetrisch oppervlak binnenin de pneumatische cilinder. Dit fenomeen kan grotendeels gecompenseerd worden via het afstellen van de smoorventielen. Voor de toekomst wordt een gesloten regelkring met positie sensoren aanbevolen om de golfgenerator in een stabiele positie te houden. Een uithoudingstest bevestigde de mechanische en elektrische betrouwbaarheid van het systeem. Over een tijdsperiode van meerdere minuten vertoonde het systeem geen technische defecten of oververhitting.

De golfabsorbeerder werkt veel beter dan initieel verwacht en er is nu geen sprake meer van een staande golf ten gevolge van de reflectie van golven. De absorbeerder bestaat uit een helling gebaseerd op natuurlijke stranden dat de golven vertraagt en uiteindelijk doet breken. De beste resultaten werden behaald met een kleine hellingshoek van vijf graden en een lage positie van de plaat. De helling werd op een modulaire manier geconstrueerd waardoor het zeer gemakkelijk is om deze van positie te verplaatsen. Bovendien is de absorbeerder vervaardigd uit corrosiebestendig materiaal waardoor de duurzaamheid verzekerd wordt.

7 Bibliografie

- Aluminum Extruders Council. (2025). Extrusion advantages [Post]. <https://aec.org/features-benefits>*
- Anna V. & Valkyrie. (2015). Why water wave won't diffract or bend around a boat having a length longer than its wavelength? [Graphic]. <https://physics.stackexchange.com/questions/187595/why-water-wave-wont-diffract-or-bend-around-a-boat-having-a-length-longer-than>*
- Arduino LLC. (2023). attachInterrupt(). <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/external-interrupts/attachinterrupt/>*
- Arduino LLC. (2025). Arduino UNO R3 Datasheet. <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>*
- Australian Bureau of Meteorology. (2025). Waves [Post]. <http://www.bom.gov.au/marine/knowledge-centre/reference/waves.shtml>*
- AW Energy. (2022). Waveroller [Graphic]. <https://aw-energy.com/waveroller/>*
- BCN3D Technologies. (z.d.). Technical data sheet PLA. https://www.bcn3d.com/wp-content/uploads/2019/09/BCN3D_FILAMENTS_TechnicalDataSheet_PLA_EN.pdf*
- Bluebird Marine Systems Ltd. (2014). Wave Power History [Graphic]. https://www.bluebird-electric.net/wave_powered_ships_marine_renewable_energy_research.htm*
- Bosboom, J., & Stive, M. J. F. (2025, maart 26). Wave Breaking [Post]. [https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Oceanography/Coastal_Dynamics_\(Bosboom_and_Stive\)/05%3A_Coastal_hydrodynamics/5.02%3A_Wave_transformation/5.2.5%3A_Wave_breaking](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Oceanography/Coastal_Dynamics_(Bosboom_and_Stive)/05%3A_Coastal_hydrodynamics/5.02%3A_Wave_transformation/5.2.5%3A_Wave_breaking)*
- Carlier, P. (2023). Ontwerp en Constructie van AMAiWave [Masterscriptie]. Hogere Zeevaartschool Antwerpen.*
- Chadwick, A. (2025, februari 27). Shallow-water wave theory [Post]. https://www.coastalwiki.org/wiki/Shallow-water_wave_theory#Derivation_of_the_Airy_Wave_equations*
- Duursma. (z.d.). Hoe bereken ik het luchtverbruik van een pneumatische cilinder? [Post]. <https://duursma.nl/blog/luchtverbruik-pneumatische-cilinder-berekenen>*
- Dvoretzkyi, I. (2019, december 25). XL6009E1 DC-DC Step-Up Converter. <https://grabcad.com/library/xl6009e1-dc-dc-step-up-converter-1>*
- Edinburgh Designs Ltd. (2024). Wave Generator. <http://www.edesign.co.uk/waves/some-wave-1/>*
- ESP32 Cube. (z.d.). ESP32/Arduino finds the address of I2C device [Post]. https://esp32cube.com/basis/043_i2c_scanning/*
- Exploring our Fluid Earth. (z.d.). Wave-Coast Interaction [Post]. <https://manoa.hawaii.edu/exploringourfluidearth/physical/coastal-interactions/wave-coast-interactions>*

- Farrok, O., Farah, M., & Islam, M. R. (2024). *Introduction to the Principles of Wave Energy conversion*.
https://www.researchgate.net/publication/378287715_Introduction_to_the_Principles_of_Wave_Energy_Conversion
- Festo AG & Co. KG. (2008). *Datasheet Standard cylinder DNU-50-300-PPV-A*.
https://ftp.festo.com/public/PNEUMATIC/SOFTWARE_SERVICE/DataSheet/EN_GB/14152.pdf
- Festo AG & Co. KG. (2022). *Solenoid valves VZWD, directly actuated*.
<https://www.festo.com/media/pim/418/D15000100123418.PDF>
- Festo SE & Co. KG. (2024a). *Datasheet Drukregelventiel MS2-LR-QS6-D6-A8-B*.
<https://www.festo.com/be/nl/a/8086640/>
- Festo SE & Co. KG. (2024b). *Datasheet solenoid valve CM-5/2-1/4-FH*.
<https://www.festo.com/tw/en/a/download-document/datasheet/6154>
- Groupe PolyAlto. (2023). *Polyethylene: Advantages and Applications [Post]*.
<https://blogue.polyalto.com/en/polyethylene-advantages-and-applications#:~:text=The%20advantages%20of%20polyethylene&text=It%20is%20therefore%20possible%20to,is%20inexpensive%20and%20noticeably%20light>
- Hwang, R. (2017). *Tow Tank Wave Absorber [Post]*. <https://hwangrachel.weebly.com/tow-tank-wave-absorber.html>
- International Energy Agency. (2025, maart 24). *Growth in global energy demand surged in 2024 to almost twice its recent average*. <https://www.iea.org/news/growth-in-global-energy-demand-surged-in-2024-to-almost-twice-its-recent-average>
- Karin R., B., & Hannah E., P. (2020). *Sandy Beach Morphodynamics*.
<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/shoaling-wave>
- Klinghammer, C., Lomonaco, P., & Higuera, P. (2012). *Back wall wave absorber [Graphic]*.
https://www.researchgate.net/figure/Back-wall-wave-absorber-at-the-CCOB-Left-single-segment-Right-all-segments-installed_fig5_315049115
- Kolkman, P. A., & Jongeling, T. H. G. (1996). *Dynamisch gedrag van waterbouwkundige constructies [Ministerie van Verkeer en Waterstaat]*.
<https://publications.deltares.nl/WeL0427b.pdf>
- Krauss. (z.d.). *Waves*. http://www.geo.cornell.edu/ocean/p_ocean/ppt_notes/19_Waves.pdf
- Leybold Didactic GMBH. (z.d.). *Propagation of water waves*.
<https://fys.kuleuven.be/pradem/pdf-files/water-waves-leybold-leaflets/reflection-of-water-waves-at-a-straight-obstacle.pdf>
- Luís, M. (z.d.). *What is wave refraction? [Post]*. <https://www.surfertoday.com/surfing/what-is-wave-refraction>
- Luís, M. (2025, januari 6). *What is wave reflection? [Post]*.
<https://www.surfertoday.com/surfing/what-is-wave-reflection>
- Magistrale, L. (2019). *Design of a wavemaker for the water tank at the Politecnico di Torino [POLITECNICO DI TORINO]*. <https://webthesis.biblio.polito.it/13298/1/tesi.pdf>

- Massachusetts Institute of Technology. (2014, juni). *Large Towing Tank* [Post].
<https://web.mit.edu/towtank/www/facilities.html>
- MoThunderz (Regisseur). (2023, januari 5). *How to use a Rotary Encoder with an Arduino—CODE EXPLAINED!* [Video recording]. <https://www.youtube.com/watch?v=fgOfSHTYeio>
- Muijhwijk, I. (2025, maart 12). *Wat is polyethyleen? Alles wat u moet weten over dit veelzijdig materiaal.* [Post]. <https://kunststofplaten.be/blog/wat-is-polyetheen/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023, september 20). *Waves* [Post].
<https://www.noaa.gov/jetstream/ocean/waves>
- Novatiq Pte Ltd. (z.d.). *Wave Absorber Module* [Graphic]. <https://www.novatiq.sg/wave-absorber-module>
- OMEY Labs (Regisseur). (2016, oktober 30). *OMEY Labs wave maker* [Video recording].
<https://www.youtube.com/watch?v=xCgVaumSSNo>
- Our world in data. (2024). *Global primary energy consumption by source* [Graphic].
<https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>
- Pneuparts. (z.d.). *Polyamide slang 6x4mm.* <https://www.pneuparts.com/nl/item/PA6X4BL25>
- Pneuparts. (2025). *Knie snelheids regelventiel R1/8'' x 6.*
<https://www.pneuparts.com/nl/item/GRLAIPS186>
- Sargeant, J. (2024, juni 19). *The motion of the ocean explained: Waves and tides* [Post].
<https://oceangeneration.org/the-motion-of-the-ocean-explained-waves-and-tides/>
- Scrtcwlvl. (z.d.). *2 Channel 5V Arduino Relay Board.* <https://grabcad.com/library/2-channel-5v-arduino-relay-board-1>
- Shree Prayag Air Controls Pvt. Ltd. (z.d.). *Cylinder Air Consumption* [Post].
<https://www.spacpneumatic.com/cylinder-air-consumption.php>
- Swedberg, T. (z.d.). *Electric vs. Pneumatic Actuators: Which One is Right for You?*
<https://jhfooster.com/automation-blogs/electric-vs-pneumatic-actuators-which-one-is-right-for-you/#:~:text=feasible%20and%20practical.-,Advantages,lives%20and%20require%20little%20maintenance.&text=Simplicity%20of%20operation%3A%20Pneumatic%20systems,electrical%20counterparts%20in%20many%20applications.>
- Tang, J. (2024, januari 30). *Pneumatic Actuators vs. Electric Actuators: Which is Better?*
<https://blog.orientalmotor.com/pneumatic-actuators-vs-electric-actuators-which-is-better>
- Taveira Pinto, F., & Dronkers, J. (2025). *Wave Diffraction* [Graphic].
<https://www.coastalwiki.org/wiki/Diffraction>
- Temperville, A. (2025, januari 5). *Waves and swells.* *Encyclopedia of the Environment.*
<https://www.encyclopédie-environnement.org/en/water/waves-swells/>
- Tethys. (2019). *La Rance Tidal Barrage.* <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/la-rance-tidal-barrage>

- The Physics Classroom.* (z.d.). *Reflection, Refraction and Diffraction* [Post].
<https://www.physicsclassroom.com/class/waves/lesson-3/reflection,-refraction,-and-diffraction#:~:text=Regardless%20of%20the%20angle%20at,they%20reflect%20off%20the%20barrier.>
- Tolman, H. L.* (2008). *Practical Wind Wave Modeling* [NOAA].
https://polar.ncep.noaa.gov/mmab/papers/tn270/Howard_08.pdf
- Tolomatic, Inc.* (2021). *Electric vs. Pneumatic cylinders: A comparison based on total cost of ownership.* <https://www.tolomatic.com/info-center/resource-details/electric-actuators-vs-pneumatic-cylinders/>
- University of Hawai.* (2016). *Waves.*
https://www.soest.hawaii.edu/oceanography/courses_html/OCN201/instructors/Carter/SP2016/waves2_2016_handout.pdf
- Van Langenhoven, P.* (2023). *Tidal Analysis.*
- Vecom Group B.V.* (z.d.). *Corrosie van aluminium* [Post].
<https://www.alurvs.nl/aluminium/artikelen/7763/#:~:text=Aluminium%20beschikt%20door%20gaans%20over%20een,passieve%20oxidefilm%20op%20het%20metaaloppervlak.>
- Whitham, A.* (2014a, januari 3). *Arduino UNO R3.* <https://grabcad.com/library/arduino-uno-r3-1>
- Whitham, A.* (2014b, januari 15). *16 x 2 LCD Display Module with IIC (I2C) Module.*
<https://grabcad.com/library/16-x-2-lcd-display-module-with-iic-i2c-module-1>
- Wikimedia Commons.* (2007). *Double acting cylinder* [Graphic].
https://nl.m.wikipedia.org/wiki/Bestand:Double_acting_cylinder_%28symbol,differential,I%20SO1219%29.svg
- Wikimedia Commons.* (2024). *Schematic representation of the shoreface profile* [Graphic].
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_representation_of_the_shoreface_profile.png
- Willems, Y.* (2008). *Onderzoek naar snelheidsafhankelijke demping bij point absorbers aan de hand van numerieke en fysische modellering* [Universiteit Gent].
https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/001/312/384/RUG01-001312384_2010_0001_AC.pdf
- Xing, J., & Liang, Y.* (2023). *Wave devouring propulsion: An overview of flapping foil propulsion technology* [Cranfield University].
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212300446X>
- XLsemi.* (z.d.). *Datasheet XL6009E1.* https://www.addicore.com/products/xl6009e1-step-up-adjustable-dc-dc-switching-boost-converter?srltid=AfmBOorYtYGmi_FHI8FJy8HBbRdlJvGh706eucQwPygbuN1taiOqlW1S
- Zambetti, N., Söderby, K., & Hylén, J.* (2024). *Inter-Integrated Circuit (I2C) Protocol.*
<https://docs.arduino.cc/learn/communication/wire/>

Bijlagen

A AMAiWave Arduino Software

```
// Libraries
#include <Arduino.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x20, 16, 2);

// Variables
#define Relay_In1 5
#define RotaryEncoder_SW 4
#define RotaryEncoder_DT 3
#define RotaryEncoder_CLK 2

#define counter_min 300
#define counter_max 1000
volatile int counter = 500;

unsigned long _lastIncReadTime = micros();
unsigned long _lastDecReadTime = micros();
int _pauseLength = 25000;
int _fastIncrement = 10;

bool lastButton = false;
bool Enable_Valve = false;

// Function to read the rotary encoder when an interrupt is triggered.
// Source: Modified from MoThunderz (2023, Jan 5). How to use a Rotary Encoder
with an Arduino – CODE EXPLAINED! [video]. Youtube.
https://www.youtube.com/watch?v=fg0fSHTYeio
void read_encoder() {
    // Prohibit the encoder to change the 'counter' value when the valve is active
    if (not(Enable_Valve)) {
        static uint8_t old_AB = 3;
        static int8_t encval = 0;
        static const int8_t enc_states[] = {0,-1,1,0,1,0,0,-1,-1,0,0,1,0,1,-1,0};

        old_AB <=>2;

        if (digitalRead(RotaryEncoder_CLK)) old_AB |= 0x02;
        if (digitalRead(RotaryEncoder_DT)) old_AB |= 0x01;

        encval += enc_states[(old_AB & 0x0f)];
    }
}
```

```

// Configure the arduino pins and LCD.
void setup() {
  pinMode(RotaryEncoder_CLK, INPUT_PULLUP);
  pinMode(RotaryEncoder_DT, INPUT_PULLUP);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(RotaryEncoder_CLK), read_encoder, CHANGE);
// Allow the rotatry encoder to trigger an interrupt.
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(RotaryEncoder_DT), read_encoder, CHANGE);

  pinMode(RotaryEncoder_SW, INPUT_PULLUP);
  pinMode(Relay_In1, OUTPUT);
  digitalWrite(Relay_In1, true);

  lcd.init();
  lcd.backlight();
}

void loop() {
  static int lastCounter = 0;

  // Display information on the LCD.
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Periode: " + String(counter) + " ");
  lcd.setCursor(14,0);
  lcd.print("ms");

  // Check the push button on the rotary encoder.
  if ((digitalRead(RotaryEncoder_SW) == false) & (lastButton == false)) {
    Valve_Switch();
    lastButton = true;
  } else if ((digitalRead(RotaryEncoder_SW) == true) & (lastButton == true)) {
    lastButton = false;
  }

  // Display more information on the LCD.
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Status: ");

  // Enable relay and configure LCD when valve is active.
  Valve();

  if (counter != lastCounter) {
    lastCounter = counter;
  }
}

```

```

    if (encval > 3 ) {
        int changevalue = 1;
        if ((micros() - _lastIncReadTime) < _pauseLength) {
            changevalue = _fastIncrement * changevalue;
        }
        _lastIncReadTime = micros();
        if ((counter + changevalue) <= counter_max) {
            counter = counter + changevalue;
        }
        encval = 0;
    } else if (encval < -3) {
        int changevalue = -1;
        if ((micros() - _lastDecReadTime) < _pauseLength) {
            changevalue = _fastIncrement * changevalue;
        }
        _lastDecReadTime = micros();
        if ((counter + changevalue) >= counter_min) {
            counter = counter + changevalue;
        }
        encval = 0;
    }
}

// Function to switch the valve state
void Valve_Switch() {
    if (Enable_Valve == true) {
        Enable_Valve = false;
    } else {
        Enable_Valve = true;
    }
}

// Controlling the Valve and LCD
void Valve() {
    if (Enable_Valve) {
        lcd.print("ON ");
        digitalWrite(Relay_In1, false);
        delay(counter/2);
        digitalWrite(Relay_In1, true);
        delay(counter/2);
    } else {
        lcd.print("OFF");
    }
}

```

B I2C Scanner

```
#include <Wire.h>

void setup() {
  Wire.begin();
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("I2C device scanner.");
}

void loop() {
  byte error, address;
  int nDevices;

  Serial.println("Scanning...");

  nDevices = 0;
  for(address = 1; address < 127; address++ )
  {
    // The i2c_scanner uses the return value of
    // the Wire.endTransmission to see if
    // a device did acknowledge to the address.
    Wire.beginTransmission(address);
    error = Wire.endTransmission();

    if (error == 0)
    {
      Serial.print("I2C device found at address 0x");
      if (address<16)
        Serial.print("0");
      Serial.print(address,HEX);
      Serial.println(" !");

      nDevices++;
    }
    else if (error==4)
    {
      Serial.print("Unknow error at address 0x");
      if (address<16)
        Serial.print("0");
      Serial.println(address,HEX);
    }
  }
  if (nDevices == 0)
    Serial.println("No I2C devices found\n");
  else
    Serial.println("done\n");

  delay(5000);          // wait 5 seconds for next scan
}
```

- C Beeldmateriaal golfhoogte 300ms
- D Beeldmateriaal golfhoogte 500ms
- E Beeldmateriaal golfhoogte 800ms
- F Beeldmateriaal golfhoogte 1000ms
- G Beeldmateriaal tijd tot stilstand 300ms
- H Beeldmateriaal tijd tot stilstand 500ms
- I Beeldmateriaal tijd tot stilstand 800ms
- J Beeldmateriaal tijd tot stilstand 1000ms
- K Beeldmateriaal absorbeerder 500ms
- L Beeldmateriaal schaalmodel 500ms