

Een getijden energie convertor te Zeebrugge

Björn Buysse

Promotor: prof. dr. ir. Julien De Rouck
Begeleiders: Pieter Mathys, Koen Vandoorslaer

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Vakgroep Civiele techniek
Voorzitter: prof. dr. ir. Julien De Rouck
Faculteit Ingenieurswetenschappen
Academiejaar 2008-2009



Een getijden energie convertor te Zeebrugge

Björn Buysse

Promotor: prof. dr. ir. Julien De Rouck
Begeleiders: Pieter Mathys, Koen Vandoorslaer

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Vakgroep Civiele techniek
Voorzitter: prof. dr. ir. Julien De Rouck
Faculteit Ingenieurswetenschappen
Academiejaar 2008-2009



Dankwoord

Opstellen van ontwerpregels allerhande lukt niet van de ene op de andere dag. Dit gebeurt door jarenlang onderzoek. Dit is uiteraard niet anders voor het onderzoek naar het getijden convertoren. Het onderzoek naar getijden energie zit in het prille beginstadium. Naar de toekomst toe zijn er zeker opportuniteiten. In dit onderzoek kadert mijn afstudeerwerk. Hopelijk draagt mijn afstudeerwerk dan ook een steentje bij tot de ontwikkeling van getijden energie of duurzame energie in het algemeen.

Bij het voorleggen van dit eindwerk wil ik de mensen bedanken die me nu en in de voorbije jaren geholpen hebben.

Een woord van dank is hier zeker op zijn plaats voor mijn thesisbegeleider ir. P. Mathys die op elk moment bereid was al mijn vragen te beantwoorden. Ook mijn promotor Prof. dr. ir. J. De Rouck wil ik graag bedanken voor de geboden kans.

Mijn broer ir. D. Buysse wens ik te bedanken om de elektromechanische achtergronden van turbines te verduidelijken.

Als laatste maar zeker niet als minst, dank ik mijn ouders die me alle kansen gaven om deze studies te voltooien en me steeds motiveerden in de moeilijkere perioden.

Björn Buysse, juni 2009.

Bruikleen

De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.

Björn Buysse, juni 2009.

Overzicht

Titel: Een Getijden Energie Converter te Zeebrugge

Auteurs: Björn Buysse

Promotor: prof. dr. ir. Julien De Rouck

Begeleiders: ir. Pieter Mathys , ir. Koen Vandoorslaer

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van Master in de ingenieurswetenschappen: Bouwkunde.

Academiejaar: 2008 - 2009

Faculteit Ingenieurswetenschappen

Voorzitter: prof. dr. ir. Julien De Rouck

Vakgroep Civiele techniek

Korte samenvatting:

Deze masterproef bespreekt een aantal ontwerpprincipes van getijden energie convertoren in de Noordzee. Er wordt een locatie gezocht op het Belgisch Continentaal Plat waarbij er de mogelijkheid bestaat om de getijden convertor er effectief te plaatsen. Hierbij worden alleen deze plaatsen met hoogst mogelijke energieopbrengst bekeken. De grootste stromingen treden op in de buurt van de haven van Zeebrugge. Een voorontwerp van een monopaal en een gravitaire fundering worden berekend.

Aan de hand van een analytisch model voor de stroming en datasets van golven, kunnen de krachten op de getijden convertoren en de fundering bepaald worden. Naast de krachten, is ook de energieopbrengst geschat. Omdat de stroming in de omgeving van Zeebrugge te klein is, worden enkele technische hulpmiddel aangewend.

Het blijkt dat getijdenenergie te Zeebrugge waarschijnlijk economisch (op heden) niet haalbaar is.

Trefwoorden: getijdenenergie, getijdenstroming, TEC, monopaal, gravitaire fundering.

Design of a Tidal Energy Converter in the North Sea

Björn Buysse

Supervisor(s): Prof. dr. ir. J. De Rouck, ir. P. Mathys

Abstract—This thesis describes the design of a Tidal Energy Converter at Zeebrugge (North Sea). Special attention is made on the foundation, the current, the forces on the structure and the turbine and some tricks to increase the power output. A monopile and a gravity based foundation is calculated on spot (51.3675 ; 3.1801) at Zeebrugge.

Keywords— Tidal Energy Converter, Zeebrugge, Renewable energy, monopile, gravity based foundation.

I. INTRODUCTION

This thesis describes Tidal Energy Convertors (TECs). Those are turbines in the sea who can extract energy out of the flow. The currents are caused by tides. Tidal energy can be sorted under sustainable energy. Energy policy is high priority in all political debates. The recent developments in the climate are increasingly concerning us. The European Union [1] wants an increase of sustainable energy up to 6 percent by 2010 and 13 percent by 2020 for Belgium. Today it seems impossible to reach the deadlines. Even the offshore windfarm of C-Power [2] can not ensure of reaching the deadlines. Maybe tidal energy can increase the amount of renewable energy.

Sustainable energy is a long-term investment. It is in full expansion and demands huge costs. Especially marine energy is at an early stage of development.

Some basic ideas in this thesis can be used in the future to develop some real life TEC in the North-Sea. Figure 1 gives an overview of what people can expect in this thesis.

II. RESOURCE MANAGEMENT

The quest for an optimal location for placing TECs is crucial. The power of a flow (in free air) is given by the following formula. It is clear that the velocity is really important to make the TEC as economical as possible.

$$P = 0.5\rho \cdot A \cdot v^3$$

The flow is strongly site dependent. It's well known that the currents on the Belgian Continental Shelf are not that high. It is easy noticeable that the highest currents occur at Zeebrugge and in its nearest distance. At spring tide you can notice a velocity up to 2.1 meter per second. Though, the frequency of occurrence of that speed is very limited.

An analytical model [3] is used to predict the velocity of the current at each spot near Zeebrugge. Besides the variation of the flow in the horizontal plane, the flow rate varies also with depth. The closer to the soil, the less the flow will be and the closer to the surface, the higher the flow. Logically, the TEC would be as close as possible to the water surface. Although, at the water surface, we need to take the waves into account.

B. Buysse is with the Civil Engineering Department (Water and transport), Ghent University (UGent), Gent, Belgium. E-mail: Bjorn.Buysse@UGent.be .

The analytical model makes clear that most of the time the current is under the cut-in speed. For the cut-in speed 0.7 m/s is supposed. Therefore, the use of a venturi tube is considered. At some spots, we can increase the time of energy production by almost 85 percent. It is clear that every spot has other characteristics. Only these spots are chosen which can create the most energy.

There is one big advantage at almost every spot near the port of Zeebrugge. The current always appears in the same direction. This phenomenon is illustrated in figure 2. It means that the use of a venturi tube to increase the speed can be considered.

The waves are not interesting for the energyproduction of the TECs. They are able to create huge forces on the TEC and the foundation. They also have an influence on the current what can make that TECs are less productive.

III. TURBINES

Turbines are able to create energy out of current. It is highly important to extract as much energy as possible to make tidal energy profitable. But also the forces on the turbine can increase a lot. Forces and power output can be calculated on both turbines. The calculations are based on the Glauert BEM theory.

Two sorts of turbines are used in the thesis. A propeller type has wings (2 wings are used) on a center point. This type of turbine has the advantage that we can use pitch controlled wings. The other, the openhydro [4] turbine, has a lot of wings who are fixed on an outer ring structure. In the middle of the turbine, there is a hole.

IV. FOUNDATIONS

On the Belgian Continental Shelf, there is a variation in depths from 10 to 30 meters. Monopiles (Figure 3) are mostly used in shallower waters. Gravity based foundations (Figure 4) can be used everywhere. Those two types of foundations are calculated by using geotechnical software based on FEM software or similar. Other foundation systems do not agree with the preconditions.

V. ENERGY PRODUCTION

Off course, energy production is the most important part of Tidal Energy Convertors. It is clear that the Belgian Continental Shelf does not contain the most energy. But with some tricks, we can increase the production time and reduce the costs. The venturi tube makes the productiontime longer. On spot (51.3675 ; 3.1801) the time increases from 35 percent up to 66 percent by using a venturi tube.

However, the amount of power in the flow is limited. Theoretically there can be produced a maximum of 71.5 MWh a year by a convertor of 7.5 meter in diameter at spot (51.3675 ; 3.1801).

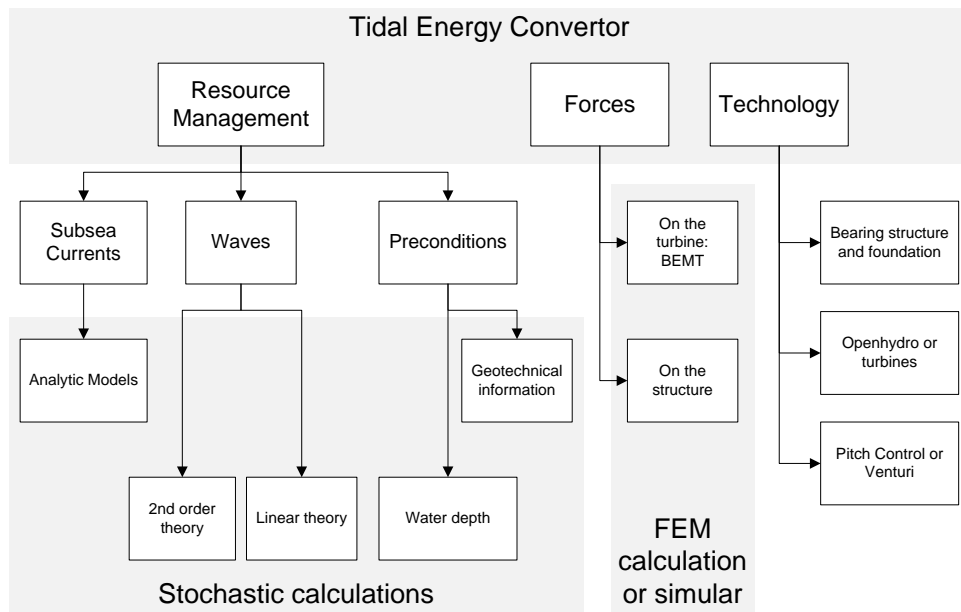


FIGURE 1. Work Breakdown Structure of a Tidal Energy Converter.

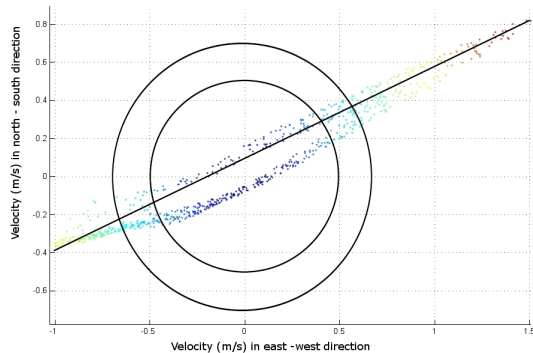


FIGURE 2. The current on spot (51.3675 ; 3.1801) is highly oriented in east-northeast direction. The circles illustrate the cut-in speed (0.7 and 0.5 m/s).

VI. CONCLUSION

It doesn't seem that Tidal Energy converters on the Belgian Continental Shelf will become profitable. Not today and not in the future. The amount of energy on the BCP is too limited. But, because the lack of information about tidal energy converters, Zeebrugge can be a good spot to collect crucial information about forces, energyproduction and turbines. A prototype can offer more information than modeltests should do.

ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to acknowledge ir. P. Mathys and Prof. dr. ir. J. De Rouck for their support.

REFERENCES

- [1] European Commission, "The European Climate Change Program." European Union. —2006—.
- [2] C-Power, "Windfarm at the Thorntonbank." —2009—.

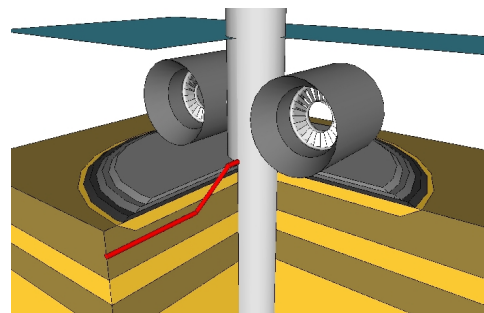


FIGURE 3. Monopile with 2 Tidal Energy Converters.

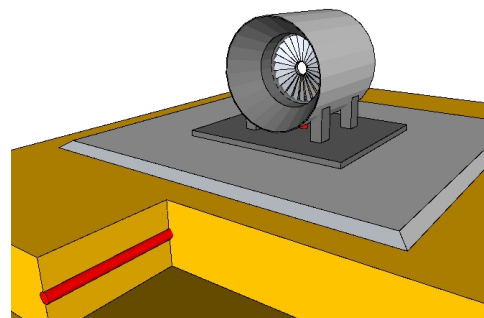


FIGURE 4. Gravity Based Foundation with one Tidal Energy Converter.

- [3] P. Mathys, "Analytical model of the tidal current at Zeebrugge." Ghent University. —2008—.
- [4] Group Limited OpenHydro, "Patent Openhydro." —2004—.

Inhoudsopgave

Dankwoord	iv
Bruikleen	v
Overzicht	vi
Symbolen	xiii
Afkortingen	xv
1 Ontwerpanalyse	1
1.1 Inleiding	1
1.2 Exploratie naar natuurlijke rijkdommen	1
1.3 Locaties	3
1.4 Sedimenten en erosie	3
1.5 Golfklimaat en voorspellingen	4
1.6 Technologieën	4
1.7 Krachten	5
1.8 Kosten, certificaten en subsidies	5
1.9 Impact op het marineleven	6
2 Locaties	7
2.1 Situering van Zeebrugge	7
2.2 Situering van de Thorntonbank	8
2.3 Het Belgisch Continentaal Plat	8
2.3.1 Gebruiksdoeleinden	9
2.4 Getijdenstroming	11
2.4.1 Zeebrugge	11
2.4.2 Thorntonbank	11
2.5 Besluit	12
3 Toestellen	13
3.1 Bronnen van de getijdenenergie	13
3.1.1 Getijdendam	13
3.1.2 Getijdenlagunes	13
3.1.3 Getijdenstroming	14
3.1.4 Toepassingsgebied	14
3.2 Getijdenturbines	15
3.2.1 Propeller type	16
3.2.2 Openhydro type	16
3.3 Ecologie	18
3.3.1 SIF	18

3.3.2	Aangroei	18
3.4	Besluit	19
4	Berekening van turbines	20
4.1	BEMT	20
4.2	Schets	20
4.3	Drukkracht en Torsie	21
4.4	Lift- en sleepkracht	23
4.5	Lift- en sleepcoëfficiënt	24
4.5.1	2D vleugel	24
4.5.2	3D vleugel	24
4.5.3	Invloed van het getal van Reynolds	24
4.6	Materialen	25
4.6.1	Vermoeiing	25
4.6.2	Oppervlakte afwerking en aangroei	25
4.6.3	Ouderdom	25
4.7	Berekeningswijze	25
4.7.1	Open mariene turbines	26
4.7.2	Gesloten mariene turbines	26
4.8	Correctiefactoren	27
4.8.1	Prandtl's verliesfactor	27
4.8.2	Correctie voor inductie	27
4.9	Toepassen op mariene turbines	27
4.9.1	NACA 0018	28
4.9.2	Vlakke plaat	29
4.10	Besluiten uit BEMT	30
4.10.1	Voorbeelden	30
4.10.2	Keuze van de vleugels	30
4.10.3	Turbine in gebruik	30
4.10.4	Propeller of openhydro type	31
5	Straalbuis	32
5.1	Probleemstelling	32
5.2	Principe van een straalbuis	32
5.2.1	Ideale stroming	32
5.2.2	Niet-ideale stroming	33
5.3	Bijkomende gevolgen	34
5.4	Krachten op een straalbuis	34
5.4.1	As evenwijdig met de golfkruinen	34
5.4.2	As loodrecht op de golfkruinen	35
5.5	Stromingseisen	36
5.6	Besluit	36
6	Modellering van getijden en golven	37
6.1	Getijden	37
6.2	Golven	40
6.2.1	De lineaire golftheorie	40
6.2.2	Tweede orde theorieën	40
6.2.3	Hogere orde theorieën	42
6.2.4	Golfperiode	42
6.2.5	Keuze van een golftheorie	44
6.2.6	Stroming door golven	44

6.2.7	Ontwerpgolf	45
6.3	De volledige zone Zeebrugge	51
6.3.1	Sommatie van de getijdenstroming	51
6.3.2	Maximale opbrengst	51
6.3.3	Maximale getijdenstroming	51
6.3.4	Gemiddelde getijdenstroming	51
6.4	Plaatsen en zones met toekomst	56
6.4.1	Het punt (51.3675 ; 3.1801)	56
7	Funderingen en draagsystemen	60
7.1	Gravitaire fundering	60
7.1.1	Plaatsing	60
7.1.2	Berekening	61
7.1.3	Schets	62
7.2	Monopaal	62
7.2.1	Design en plaatsing	63
7.2.2	Berekening	63
7.2.3	Schets	66
7.3	Driepoot fundering	66
7.3.1	Plaatsing	66
7.3.2	Berekening	67
7.4	Vlottende fundering	68
7.4.1	Design en plaatsing	68
7.4.2	Berekening	69
7.5	Krachten op statische structuren	70
7.5.1	Archimedes kracht	70
7.5.2	Statische drukken	71
7.5.3	Stromingsdrukken	71
7.6	Besluit	72
8	Berekening van een monopaal	73
8.1	Materiaal	73
8.2	Grondkarakteristieken	74
8.2.1	Verenmodel versus Passief / Actief model	74
8.2.2	Modellering van de grond	75
8.2.3	Sonderingen en grondkarakteristieken	77
8.2.4	Waterniveau	80
8.3	Belasting	82
8.3.1	Golven en stroming	83
8.3.2	Krachten op de TEC	83
8.3.3	Eigengewicht	85
8.3.4	Windkrachten	85
8.4	Criteria	85
8.4.1	Draagvermogen	85
8.4.2	Verticale vervormingen - zettingen	85
8.4.3	Horizontale vervormingen	85
8.4.4	Inheien	86
8.4.5	Spanningen	86
8.5	Software	86
8.5.1	Sigma/W	87
8.5.2	MPile	87
8.6	Resultaten	87

8.6.1	Monopaal met 2 TECs in een straalbuis	87
8.7	Bodembescherming	90
8.8	Kosten	92
8.9	Besluit	93
9	Gravitaire fundering	94
9.1	Turbine en straalbuis	94
9.2	Krachten	96
9.2.1	Stromingskrachten	96
9.2.2	Golfkrachten	96
9.2.3	Eigengewicht	96
9.2.4	Krachtencombinaties	96
9.3	Bepaling van de gravitaire fundering	97
9.3.1	Draagvermogen van de grond	97
9.3.2	Kantelevenwicht	98
9.3.3	Glijdingsevenwicht	98
9.3.4	Geometrie bij een ontwerpgolf van 9 meter	99
9.4	Erosiebescherming	99
9.5	Kosten en aandachtspunten	100
9.6	Besluit	100
10	Energie opbrengst	101
10.1	Stroomsnelheid en getijden	101
10.2	Opbrengst bij een TEC	102
10.3	Schatting van rendementen	106
10.4	Invloed van de golven	109
10.5	Besluit	110
11	Slotsom en discussie	111
A	Turbine met NACA0018 profielen	115
B	Turbine van het openhydro type	118
C	Voorkomensfrequenties golven Bol van Heist	120
D	Karakteristieken van monopalen	127
E	Interessante locaties voor een TEC	128
F	Monopaal met 2 TECs van het propellertype	134
G	Grondmechanische parameters te Zeebrugge	137

Symbolen

a	Inductiefactor (Eng.: Induction)
a_ω	Inductiefactor in het rotorvlak
a_c	Kritische inductie (Eng.: Critical induction))
A	Oppervlakte (Eng.: Area)
AR	Aspect ratio (Eng.: Aspect ratio)
c	Koorde van een profiel (Eng.: Chord)
	Cohesie (Eng.: Cohesion)
c_u	Ongedraineerde cohesie (Eng.: Undrained Cohesion)
b	Spanwijdte (Eng.: Span)
B	Aantal schoepen
C_d	Sleepcoëfficiënt (Eng.: Drag)
C_D	Sleepcoëfficiënt (Morison) (Eng.: Drag)
C_k	Von Karman coëfficiënt
C_l	Liftcoëfficiënt (Eng.: Lift)
C_M	Inertiecoëfficiënt (Morison)
D	Sleepkracht (Eng.: Dragforce)
	Diameter
e	Efficiëntiefactor
F	Prandtl's topverliesfactor (Eng.: Prandtl's tip loss factor)
H	Golfhoogte (Eng.: Wave Height)
k	Golfgetal (Eng.: Circular Wavenumber)
K_0	Neutrale gronddruk coëfficiënt (Eng.: Lateral Earth pressure coefficient at rest)
K_a	Actieve gronddruk coëfficiënt (Eng.: Active Earth pressure coefficient)
K_p	Passieve gronddruk coëfficiënt (Eng.: Passive Earth pressure coefficient)
L	Liftkracht
	Golflengte (Eng.: Wave Length)
M	Torsiemoment (Eng.: Torsion)
p	Druk (Eng.: Pressure)
P	Vermogen (Eng.: Power)
q_c	Conusweerstand (Eng.: Cone Resistance)
Q	Debiet
Re	Getal van Reynolds
s_u	Ongedraineerde schuifspanning (Eng.: Undrained Shear Strength)
T	Tangentiële kracht (Eng.: Transversal)
	Golfperiode
u	Horizontale orbitaalsnelheid

v_0	Stromingssnelheid voor de turbine op oneindig
v_1	Stromingssnelheid voor de turbine
v_2	Stromingssnelheid in het spoor van de turbine
v_k	Kritische stroomsnelheid
v_p	Pieksnelheid (Eng.: Peak)
v_r	Resulterende stromingssnelheid
v_ω	Stromingssnelheid in het rotorvlak
w	Verticale orbitaalsnelheid
α	Aanvalshoek (Eng.: Angle of attack)
α_0	Hoek bij nullift (Eng.: zero-lift angle)
θ	Twisthoek
ϕ	Aanvalshoek en twist samen
	Hoek van inwendige wrijving (Eng.: Friction Angle)
ω	Hoeksnelheid (Eng.: Angular Frequency)
ρ	Massadichtheid
ρ_w	Massadichtheid van (zout) water

Afkortingen

AS	Starre Ankers (Eng.: Rigid Anchor)
AF	Flexibele Ankers (Eng.: Flexible Anchor)
BCP	Belgisch Continentaal Plat (Eng.: Belgian Continental Shelf)
EC	Energie Converter (Eng.: Energy Converter)
DM	Dubbele monopaal (Eng.: Double Monopile)
GBF	Gravitaire fundering (Eng.: Gravity Based Foundation)
GLLWS	Gemiddeld Laag Laagwater Spring
GSC	Groene Stroom Certificaten (Eng.: Renewable Energy Certificates)
MHW	Maatgevend Hoogwater
MLW	Maatgevend Laagwater
MSL	Gemiddeld zeeniveau (Eng.: Mean Sea Level)
SIF	Significant Impact Factor
SM	Enkele monopaal (Eng.: Single Monopile)
SWL	Niveau van het water zonder golven (Eng.: Still Water Level)
TEC	Getijdenenergie converter (Eng.: Tidal Energy Converter)
TF	Driepoot fundering (Eng.: Tripod Foundation)
TSR	Ratio voor de snelheid aan de vleugeltip (Eng.: Tip Speed Ratio)
ULS	Bezwijkgrenstoestand (Eng.: Ultimate Limit State)
VREG	Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt
WEC	Golfenergie converter (Eng.: Wave Energy Converter)

Hoofdstuk 1

Ontwerpanalyse

Als inleidend hoofdstuk wordt een overzicht en ontwerpanalyse gegeven. Bepaalde zaken zijn uitermate belangrijk bij het ontwerp van een getijdenenergie convertor. Het ontwerpen in een offshore, maritiem klimaat vraagt specifieke voorzorgen en brengt risico's met zich mee. Het doel van dit hoofdstuk is om een getijdenenergie convertor te gaan onderverdelen in enkele deelprojecten. Elk deelproject wordt dan in een hoofdstuk uitvoerig besproken.

1.1 Inleiding

Energiebeleid komt steeds meer op de politieke agenda. De recente ontwikkelingen van het klimaat baren ons steeds meer zorgen. De massale uitstoot, het gebruik van petroleumproducten,... is vandaag geen maat van ontwikkeling meer. De publieke opinie wenst een oplossing voor de problemen met het klimaat en daar kunnen wij, als ingenieur, een antwoord op bieden. De recente technische ontwikkelingen lijken ons in het voordeel te spelen. Tegenwoordig zijn al vele groene alternatieven technisch mogelijk. Het is nog de vraag wat de economische ontwikkeling zal zijn. Er is een grondige aanpak noodzakelijk indien we wensen onze planeet door te geven aan de volgende generatie, zoals we ze hadden gekregen. Het spreekt echter voor zich dat een drastische ommekeer moet gebeuren op lange termijn. Het politieke toneel is niet doof voor de noden. Het promoten van alternatieve energie is een goed begin. Het eisen is een volgende stap. Zo wilt de Europese Unie [EU, 2006] tegen 2010 het aandeel van de alternatieve energie in Europa tot 12 procent zien stijgen. Zelfs 20 procent tegen 2020. Dit is een gezamenlijk cijfer. Voor België is dit 6 procent tegen 2010 en 13 procent tegen 2020. Tot op vandaag lijkt het onmogelijk om deze deadlines te halen. Zelfs het windmolenpark van C-Power [C-Power, 2009] in de Noordzee, met een vermogen van 300 megawatt, kan niet zorgen voor het halen van de deadline. En zo lijkt België af te stevenen op een aandeel kleiner dan 6 procent tegen 2010.

De uitstoot van CO₂ is ook gereguleerd. Het verdrag van Kyoto wenst een uitstoot van CO₂ in 2012 die met 5.2 procent mindert ten opzichte van 1990. Aangezien de energieproductie een grote invloed heeft op de CO₂ uitstoot, lijkt het duidelijk dat de energieproductie voor een historische omwenteling staat.

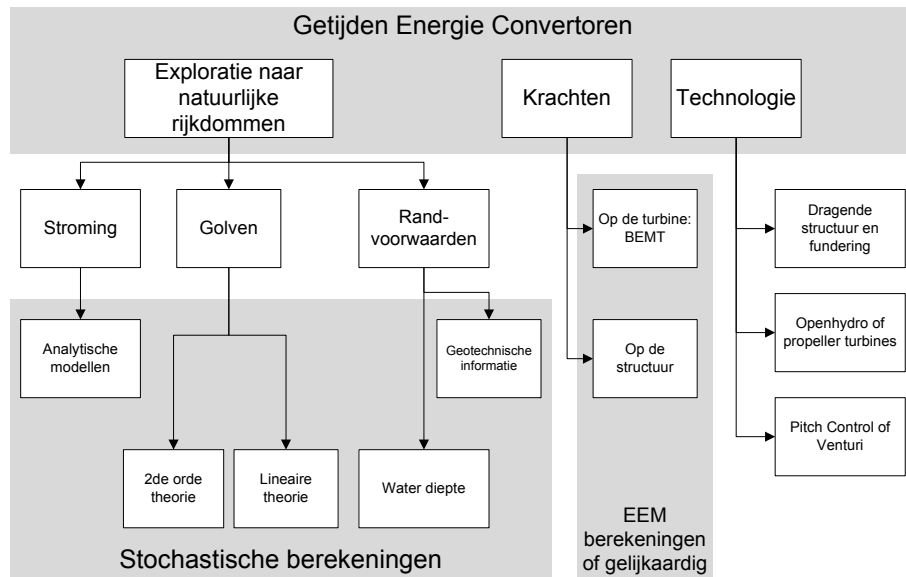
Alternatieve energie is een investering op lange termijn. Het is in volle expansie en vraagt dus een enorme investerings- en leerkost. Stel de alternatieve energie voor in een levenscyclus en men ziet dat deze zich in een beginstadium bevindt. Dit geldt met stip voor de maritieme energie. Hopelijk draagt dit eindwerk ook een steentje bij tot de ontwikkeling van maritieme energie.

1.2 Exploratie naar natuurlijke rijkdommen

De rijkdom van getijdenenergie ligt in de energie-inhoud van de stroming. De zoektocht naar een optimale plaats voor het plaatsen van getijdenconvertoren is van cruciaal belang. In figuur 1.1 is

weergegeven welke factoren van belang kunnen zijn. Naast een sterke getijdenstroming en een voldoende waterdiepte, zijn ook nog andere zaken bepalend.

De stroomsnelheid is in sterke mate bepalend voor het vermogen van een stroming. Het vermogen is immers evenredig met de derde macht van de stroomsnelheid. Daarnaast is het vermogen ook recht evenredig met de massadichtheid van het fluïdum. In een maritiem klimaat is de massadichtheid goed gekend en bedraagt ongeveer 1025 kg per kubieke meter, althans wat de Noordzee betreft. De stroming daarentegen is sterk plaatsafhankelijk. Analytische modellen en/of meetproeven kunnen een gedetailleerder beeld geven van het stromingsveld. Naast de variatie van de stroming in een horizontaal vlak, varieert de stromingssnelheid ook over de diepte. Hoe dichter tegen de bodem, hoe minder de stroming zal worden en hoe dichter tegen het wateroppervlak, hoe hoger de stroomsnelheid wordt. Logisch zou zijn om de convertor zo dicht mogelijk aan het wateroppervlak te plaatsen. Hoewel aan het wateroppervlak zeker rekening moet gehouden worden met golven. Het modelleren van getijden en golven moet gebeuren aan de hand van stochastische modellen. Hierbij is de getijdenstroming bijna perfect gekend in de tijd, dit in tegenstelling tot de golven.



Figuur 1.1: Overzicht van de verschillende onderdelen om een getijdenconvertor te ontwerpen.

De diepte van het water is van belang bij de keuze van het concept van een TEC. Het funderings-type is in sterke mate afhankelijk van de waterdiepte. Bij ondiepere, nearshore constructies zullen monopalen en gravitaire funderingen het leeuwendeel uitmaken. Bij diepere wateren kunnen vlottende funderingen een oplossing bieden. Diepere zones zullen verder liggen van de kust, waardoor de opgewekte energie verder zal moeten getransporteerd worden. Bovendien moet er ook een connectie zijn met de bekabeling op de bodem. Voor vlottende funderingen zou dit een probleem kunnen zijn. De waterdiepte varieert met de getijden (langere periode) en de golven (korte periode). Hier is dus evenzeer een stochastisch model van belang.

De hoogte van de getijden is belangrijk als randvoorwaarde voor de TEC. Op de Noordzee kan het verschil in getijden al vlug oplopen tot enkele meters. Dit wil zeggen dat de grootte van de convertor hierdoor beperkt moet worden. Ook bij laagste laagwater moet de TEC operationeel zijn. Voor gravitaire funderingen en monopalen kan het gevaar bestaan dat de turbine boven het wateroppervlak uitsteekt. Bij vlottende funderingen is er gevaar voor contact met de bodem.

Getijdenmodellering, golven en de getijdenstroming worden in hoofdstuk 6 uitgewerkt.

1.3 Locaties

Niet overal kunnen er energie convertoren geplaatst worden. Er mag hoe dan ook nooit interactie komen met de economische scheepvaart. Wat wil zeggen dat de plaatsing moet gebeuren buiten de vaargeulen. In dat opzicht lijkt het verstandiger om vlottende funderingen te verbieden in de buurt van die trajecten. Bij het loskomen van een vlotter, kan dit economische gevolgen hebben, wat ten alle tijden moet vermeden worden. Op het Belgisch Continentaal Plat (BCP) liggen er ook leidingen en bekabeling. Dit moet zeker bekeken worden bij het heien van monopalen. Gasleidingen en telecomkabels komen toe in de haven van Zeebrugge. Ook over de bodem van de Thorntonbank lopen enkele cruciale kabels en leidingen. Belangrijk is om een bepaalde veiligheidsmarge in te bouwen. De veiligheidszone zal beduidend groter zijn op zee dan op land.

Er zijn nog andere plaatsen in de Noordzee waarbij energieopwekking uitgesloten is. Een deel van de Thorntonbank dient als zone voor zandwinning. Andere gebieden op het BCP zijn voorbehouden als militaire zone. Binnen die zogenaamde concessiezones, die wettelijk bepaald werden, is de volledige functie waarvoor die zone beschreven staat, voor handen. Dit betekent dat bijvoorbeeld een zandwinningsgebied in de concessiezone voor zandwinning alles in het werk mag stellen om zijn functie, zand te winnen, te vervullen. Op het BCP is ook een concessiezone voorzien voor energieopwekking allerhande. Dit kan zowel energieopwekking uit wind als uit water en stroming zijn. Binnen deze zone mag men dus sowieso TECs voorzien. Buiten de bestaande concessiezones, is dit ook mogelijk maar zal het noodzakelijk zijn om vergunningen aan te vragen. Meer informatie omtrent het Koninklijk Besluit betreffende de voorwaarden en de procedure voor de toekenning van domeinconcessies voor de bouw en de exploitatie van installaties voor de productie van elektriciteit uit water, stromen of winden, is te vinden in [Mathys, 2008b].

In hoofdstuk 2 wordt dieper ingegaan op de plaatsbepaling van convertoren op het BCP.

1.4 Sedimenten en erosie

Door de verandering in stroming ontstaat er sedimenttransport. Het sedimenttransport heeft een typisch dwarsprofiel. Tegen de bodem is er veel sediment aanwezig. Naar de oppervlakte toe, daalt de concentratie aan sediment. Sedimenten kunnen zorgen voor een belasting op de TEC, waardoor de levensduur zou kunnen dalen. Ook de plaatsing van een TEC zorgt voor een ingrijpende verandering in stromingssnelheden en dus ook sedimenttransport.

Wanneer een TEC wordt geplaatst, verwacht men dat het energie opwekt. Energie onttrekken uit een stroming komt neer op het onttrekken van de snelheid. Hierdoor gaat de stromingssnelheid dalen achter de turbine. Indien een stroming een hoeveelheid sediment bevat, zal bij het dalen van die stromingssnelheid ook de hoeveelheid sediment dalen. Daardoor gaat achter de TEC afzetting plaats vinden. In een volgende tijdsperiode zal het nog niet geconsolideerde sediment makkelijker terug in suspensie komen. In één cyclus van het getijde, zal er zich zowel erosie als afzetting voordoen. Theoretisch zou er, indien alle getijdencycli dezelfde zijn, geen drift voordoen. De drift is de resultante van alle stroomvectoren. In praktijk zal er echter wel een drift zijn. Daardoor zal er voortdurend erosie of afzetting zijn, tot wanneer een bepaalde evenwichtssituatie gevonden is.

De aanwezigheid van het sediment in de stroming zorgt voor een kortere levensduur van de structuur. De fijne en harde zandkorrels kunnen zorgen voor een snellere slijtage van de turbinebladen en de TEC in het algemeen.

Het plaatsen van een TEC in een stroming zorgt voor een verandering in het stromingsbeeld. Monopalen en gravitaire funderingen zullen een verhoogde stroming opwekken waardoor er erosie rond de

fundering te verwachten valt. Er zal voldoende erosiebescherming moeten aangebracht worden. Het laten weg eroderen van de grond rond bijvoorbeeld een monopaal is uitgesloten. Hierdoor wordt een onvoorspelbaar stromingspatroon gecreëerd en zal waarschijnlijk de stromingssnelheid lager liggen. Dit is in tegenstelling tot de wens van zoveel mogelijk energie op te wekken.

1.5 Golfklimaat en voorspellingen

Getijden zijn vanuit economisch standpunt interessant omdat ze zeer voorspelbaar zijn. Getijdenstromingen hebben een repetitief karakter en hebben op die manier een zeer gekende energieopbrengst. Maar naast getijden kunnen ook golven stroming opwekken. De golven op zee kunnen in sterke mate de stroming beïnvloeden. Dit in zowel een positieve (verhogen stroomsnelheid) als in een negatieve (verlagen stroomsnelheid) mate.

Het golfklimaat hangt onder meer af van de windsnelheid, waarmee de onvoorspelbaarheid is aangetoond. De superpositie van de onvoorspelbare golfstroming op de voorspelbare getijdenstroming, kan de grootste troef van getijdenenergie teniet doen. Naarmate men dichter tegen de kust gaat en in ondieper water komt, is de invloed van de golfstroming op de getijdenstroming nog meer bepalend.

Bij de keuze van het concept van een TEC en de geschikte plaats, zal met golfklimaat zeker rekening moeten gehouden worden. In praktijk is dit zeer ingewikkeld. De onvoorspelbaarheid van golven zal leiden tot het gebruik van kansberekeningen en voorkomensfrequenties. En dit samen met analytische modellen die getijdenstroming kunnen voorspellen. De superpositie van getijden die zich voorspelbaar gedragen in het tijdsdomein en van golven die op elk moment kunnen voorkomen, levert zo oneindig veel mogelijkheden.

Het golfklimaat en voorspelling van de invloed van de golven op de energieproductie is terug te vinden in hoofdstuk 6 en 10.

1.6 Technologieën

Er zijn verscheidene technologieën om uit de stroming energie te extraheren. De stroming drijft vleugels aan die gemonteerd zijn op een as. Zoals bij windmolens, kan de as horizontaal staan. Hierbij draaien de vleugels in een verticaal vlak. Daarnaast bestaan er ook convertoren met verticale as. Bij de convertoren met horizontale as kan nog een onderscheid getrokken worden door de plaatsing van de generator.

Indien de vleugels samenkomen in een naaf, dan bevindt de generator zich ook in het middelpunt. Doordat de vleugels allemaal moeten gemonteerd worden op één naaf, is het onmogelijk om vele vleugels te laten aangrijpen. Daarom beperkt het propeller type zich meestal tot 2 à 3 vleugels. Bij het openhydro type komen de vleugels toe op een lager. De lager bevindt zich rond de tippen van de vleugels. Door de grotere plaatsingsmogelijkheid, kunnen veel meer vleugels geplaatst worden. Het middelste deel van de turbine kan worden uitgesneden, waardoor er een doorgang ontstaat voor marineleven en waterstroming. Door de lager aan te sluiten, via tandwielen of hydraulisch, wordt de generator buiten het stromingsveld geplaatst.

De generatoren hebben een bepaalde traagheid en wrijving te overwinnen. Dit wil zeggen dat er een bepaald moment moet overwonnen worden om dan pas energie te beginnen opwekken. De snelheid waarbij dit gebeurt noemt men de cut-in snelheid. Dit is een belangrijke parameter voor de turbines.

Er bestaan hulpmiddelen om de snelheid te verhogen. Het plaatsen van een straalbuis zorgt voor een vergroten van de stroomsnelheid. Het principe is eenvoudig. Door het verkleinen van de doorstroomopening stijgt de stroomsnelheid. Hierdoor zijn de convertoren langer in gebruik en kunnen er kleinere turbines aangewend worden.

Getijden zijn gekenmerkt door hun cyclische stromingscondities. Bij het ontwerp echter, moet een bepaalde operationele conditie gevonden worden, waarbij een vleugel optimaal werkt. Dit wil zeggen dat voor andere snelheden, de vleugel niet meer op optimaal rendement werkt. Dit kan deels verholpen worden door de vleugels van pitch controllers te voorzien. Hierdoor is de aanvalshoek van de vleugels wijzigbaar. Uiteraard zal de vorm van de vleugels niet veranderen. Om gebruik te maken van pitch controllers moet voldoende plaats voorzien zijn op de naaf. De pitch controllers zijn ook enkel bruikbaar bij convertoren met een centrale naaf. Het openhydro type zal hiervan geen gebruik kunnen maken.

Over technologieën en verschillende soorten turbines wordt gepraat in hoofdstukken 3 en 5.

1.7 Krachten

Onder invloed van de stroming en de golven moet een kracht over gedragen worden naar de zeebodem. Verschillende soorten funderingen zijn voor handen. Hiervoor moeten grondmechanische parameters gekend zijn. Enkele types funderingen zijn bijvoorbeeld monopalen, gravitaire funderingen,... Technische gezien verdienen de monopalen en de gravitaire funderingen de voorkeur. Naast de technische mogelijkheden, moeten ook de organisatorische beperkingen in rekening gebracht worden. Dit kan immers in sterke mate de kostprijs van het project bepalen.

Naast de krachten die werkzaam zijn op de structuur, wordt er ook een kracht opgewekt door stroming en golfkrachten op de turbines. Deze krachten kunnen berekend worden aan de hand van een BEM theorie. Nog beter zijn modelproeven in reële omstandigheden. In hoofdstuk 4 worden enkele ontwerpregels voor turbines gegeven.

Meer over de funderingen is te vinden in hoofdstukken 7, 8 en 9.

1.8 Kosten, certificaten en subsidies

Energie opgewekt uit getijdenstroming kan rekenen op de steun van Groene Stroom Certificaten (GSC). Volgens het de Vlaamse reguleringsinstantie voor de elektriciteits- en gasmarkt [VREG, 2009] zijn de GSC van energie opgewekt uit stroomsnelheid van water hetzelfde als waterkracht. Getijdenenergie is voorbehouden voor toestellen die gebruik maken van de potentiële energie. Een GSC wordt bekomen bij de productie van 1 MWh uit hernieuwbare energie. Volgens het VREG is de gegarandeerde minimumprijs 95 euro per MWh en dit voor 10 jaar lang.

De distributienetbeheerder is verplicht om het GSC van de producent te kopen aan de opgelegde minimum prijs indien de producent hierom verzoekt. De producent kan ook de keuze maken om het GSC te verkopen op de vrije markt. De prijs [VREG, 2009] schommelt gemiddeld rond de 108 euro per GSC, met een minimum van ongeveer 104 euro. Dit betekent dat de verkoop van GSC op de vrije markt meer winst oplevert dan de wettelijk bepaalde minimum prijs. Het nadeel is dat de prijs op de vrije markt niet gegarandeerd is, in tegenstelling tot de minimum prijs over 10 jaar.

Typisch voor de exploitatie van hernieuwbare energiebronnen is de hoge investeringskost en de minimale operationele kost. Het is duidelijk dat periodes van niet operationeel zijn zo veel mogelijk moeten vermeden worden. De onderhoudskost is in offshore milieu ook niet te onderschatten. Aangroei op TECs is niet te verwaarlozen. Wanneer er aangroei is op de turbine zelf, dan daalt de energieopwekking zienderogen. Bijgevolg zal op een bepaald tijdstip, de TEC moeten gelicht worden en een grondige onderhoudsbeurt ondergaan. Een typische grootteorde is hiervoor 5 jaar. Het ontwerpen in maritiem klimaat brengt hogere risico's met zich mee. Zeker wat betreft bedrijfszekerheid, zal hiermee rekening moeten gehouden worden.

De energie opbrengst wordt besproken in hoofdstuk 10.

1.9 Impact op het marineleven

Het plaatsen van bewegende toestellen in een maritiem milieu heeft zeker invloed op het maritieme leven. Bewegende onderdelen kunnen zeedieren verwonden. De vraag is of er veel leven zal zijn in de buurt van de TECs. Wanneer die operationeel zijn, is er immers ook een bepaalde hoeveelheid geluid en/of trillingen waardoor dieren uit de buurt kunnen wegblijven. Dit heeft uiteraard ook een negatieve invloed op de omgeving.

Om aangroei tegen te gaan, zullen maatregelen moeten getroffen worden. De meest efficiënte oplossingen echter, zijn niet de meest ecologische oplossingen. Door speciale verflagen te voorzien kan aangroei verminderen, maar meestal hebben deze een bepaalde toxiciteit. Het kan en mag niet de bedoeling zijn om duurzame energie te promoten, indien dit ten koste gaat van de ecologie. Groene en duurzame energie is zoveel meer dan enkel het hernieuwbaar zijn van de energiebron. Althans, dat is mijn mening.

In hoofdstuk 3 wordt dieper ingegaan op zowel de invloed van een TEC op de omgeving (SIF) als de omgeving op de TEC (aangroei).

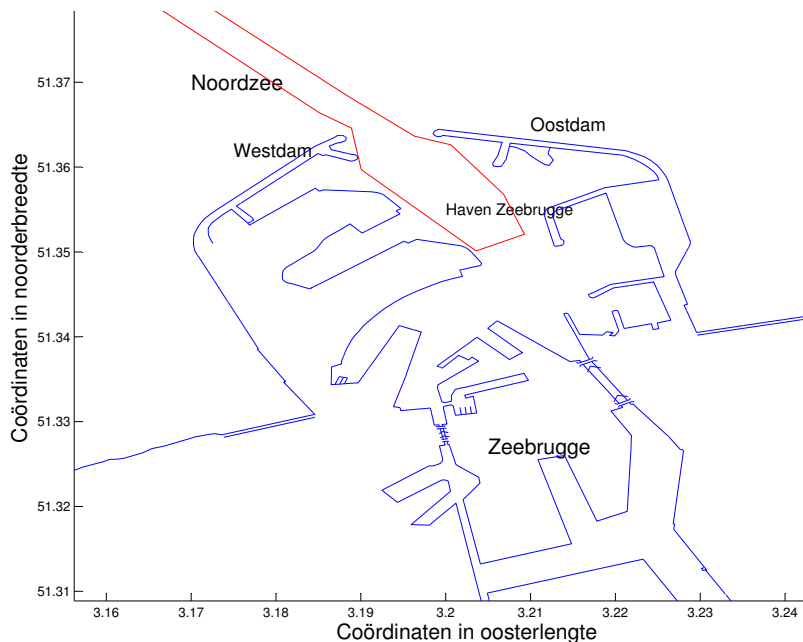
Hoofdstuk 2

Locaties

Dit hoofdstuk handelt over enkele specifieke plaatsen op het Belgisch Continentaal Plat. De locatie van een getijden energie convertor zal sterk afhankelijk zijn van enerzijds economische parameters en anderzijds van stromingskarakteristieken.

2.1 Situering van Zeebrugge

Zeebrugge is gekend vanwege zijn zeehaven. De haven is gekenmerkt door 2 grote golfbrekers. Het verste punt van de dammen ligt op ongeveer 3 kilometer van de kust. De breedte tussen de bochten van de west- en oostdam is 4 kilometer. Het is dus logisch dat de stromingen rond de dammen ingrijpend veranderd zijn, zowel wat de grootte van de snelheid als de richting van de stroming betreft. De haven van Zeebrugge wordt voorgesteld in figuur 2.1. De haven strekt zich uit van $51^{\circ}19'48''$ tot

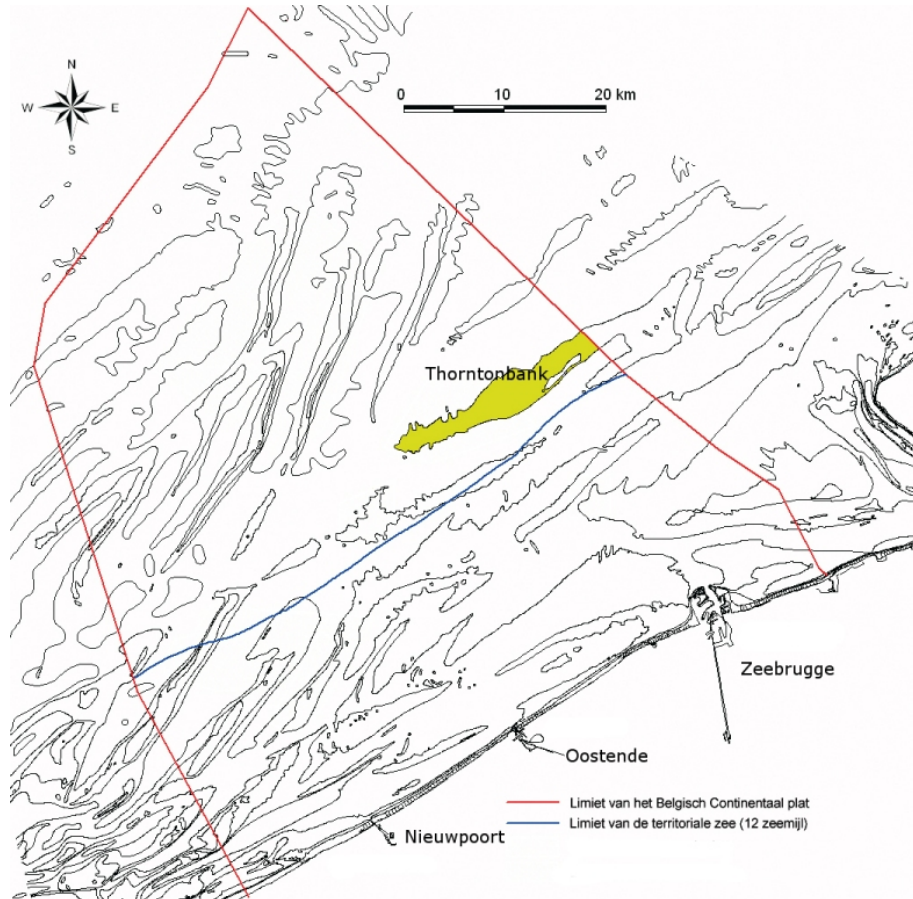


Figuur 2.1: Een weergave van de zeehaven en de vaargeul van Zeebrugge, met bijhorende ligging in decimale coördinaten.

$51^{\circ}21'54''$ noorderbreedte en van $3^{\circ}10'12''$ tot $3^{\circ}14'24''$ oosterlengte. Op figuur 2.1 zijn de coördinaten weergegeven in decimale vorm.

2.2 Situering van de Thorntonbank

De Thorntonbank is een zandbank die zich gedeeltelijk op het Belgisch en op het Nederlands Continentaal Plat bevindt. De zandbank situeert zich op ongeveer 30 kilometer uit de kust. Het is 18 kilometer lang en 2 tot 4 kilometer breed. De waterdiepte bedraagt 6 tot 20 meter. Een deel van die zone is voorbehouden voor energieopwekking. Op de oostelijke kant is er een windmolenpark [C-Power, 2009] in aanbouw. De Thorntonbank is weergegeven in figuur 2.2.



Figuur 2.2: Locatie van de Thorntonbank op het BCP. De originele figuur is volgens [Mineco, 2009].

2.3 Het Belgisch Continentaal Plat

Het Belgisch Continentaal Plat is het Belgische deel van de Noordzee [MUMM, 2008b]. Het BCP is in het noordoosten grenzend aan het Nederlandse Continentaal Plat. Ten westen ligt het Kanaal en in het noorden het Plat van het Verenigd Koninkrijk. Het volledige gebied beslaat een oppervlakte van 3600 vierkante kilometer. De waterdieptes op het BCP zijn vrij beperkt. De gemiddelde waterdiepte is 20 meter waarbij er een maximum waterdiepte optreedt van ongeveer 35 meter. Er zijn zandbanken aanwezig die zich evenwijdig richten met de Belgische kust. Ze zijn dus meestal geïoriënteerd in zuidwestelijke - noordoostelijke richting. In het algemeen is de stroming hoofdzakelijk in ZW - NO richting. Naar de kust toe, neemt de stroming een evenwijdige richting met de kuststrook aan. In figuur 2.2 is een voorstelling gegeven van het BCP met de aanwezige zandbanken.

2.3.1 Gebruiksdoeleinden

Op het BCP zijn sommige plaatsen voorbehouden voor een bepaalde functie. Men kan niet om het even waar convertoren neer planten. Een goede locatie zou bijvoorbeeld de Thorntonbank kunnen zijn. Omdat er reeds een zone voorzien is op de Thorntonbank met de functie 'energieproductie' is het mogelijk om die zone te exploiteren voor TECs. Het reeds aanwezige windmolenpark (6 stuks) [C-Power, 2009] zorgt voor een stromingswijziging, ... Omwille van contracties, kunnen er plaatselijk hogere stroomsnelheden voorkomen.

Maar de Thorntonbank is niet de meest interessante plaats wat energieopbrengst uit getijdenstroming betreft. De stroomsnelheid is te beperkt. Hoewel op het BCP de stroomsnelheid zelden meer bedraagt dan 1.5 m/s, is er toch rond de haven van Zeebrugge een hogere plaatselijke stroomsnelheid te merken. De aanwezigheid van de dammen zorgt voor een insnoering van stroomlijnen en werkt zo hogere stroming in de hand.

In de omgeving van Zeebrugge echter, dient men rekening te houden met allerlei andere gebruiksdoeleinden.

Zandwinningsgebieden

Op het BCP zijn zones voorzien waar er zandwinning mag gebeuren. Het spreekt vanzelf dat op die zones geen TECs kunnen geplaatst worden. In figuur 2.3 is duidelijk dat een deel van de Thorntonbank gebruik wordt voor zandwinning. In de omgeving van Zeebrugge is er geen activiteit wat zandwinning betreft.



Figuur 2.3: Zandwinningsgebieden op het BCP [C-Power, 2009].

Militaire zones

De zones op het BCP voorbehouden voor militaire activiteiten zijn weergegeven in figuur 2.4. Men ziet dat enkele zones rond de Thorntonbank hiervoor benut zijn.

Gasleidingen en telecomkabels

In figuur 2.5 zijn de gasleidingen en telecomkabels op het BCP weergegeven. Zowel in Zeebrugge als op de Thorntonbank moet hiermee rekening gehouden worden. Er zal een zekere veiligheidszone moeten gekozen worden.



Figuur 2.4: Militaire zones op het BCP [C-Power, 2009].



Figuur 2.5: Gasleidingen en bekabeling op het BCP [C-Power, 2009].

Vaargeulen

De vaargeulen dienen voor de scheepvaart en zijn een belangrijke economische activiteit. Het is dus in geen geval toegestaan om TECs te plaatsen in de vaargeulen. Figuur 2.6 heeft een overzicht weer van de geulen. Het is duidelijk dat bij plaatsing van een TEC in Zeebrugge en omgeving, hier zeker rekening mee moet gehouden worden. Een ander aandachtspunt is het uitzicht. Er mogen geen obstakels gebouwd worden die het zicht kunnen belemmeren en zo de veiligheid van de scheepvaart in gevaar brengen.



Figuur 2.6: Vaargeulen op het BCP [C-Power, 2009].

2.4 Getijdenstroming

De getijdenstroming en de golven worden besproken in hoofdstuk 6. Om een idee te krijgen over de grootte van de stroming wordt het referentiewerk [Lammertyn en Depraetere, 2008] gebruikt.

2.4.1 Zeebrugge

Tabel 2.1 geeft enkele karakteristieken weer. Zeebrugge B is een smalle zone langsheen de westdam. De lengte bedraagt ongeveer 1.5 kilometer en de breedte bij benadering 260 meter. Zeebrugge A is een zone die ten westen van de vaargeul ligt. Dit is weergegeven in figuur 2.7. Merk op dat de pieksnelheden

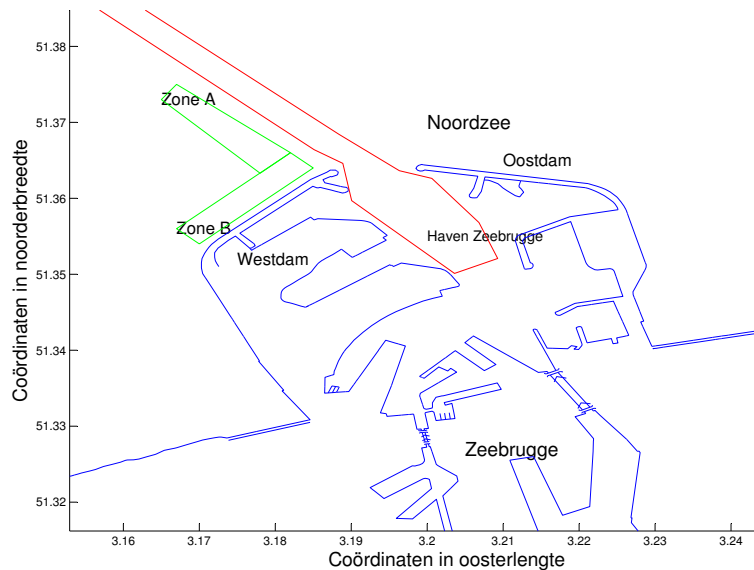
	Zeebrugge A	Zeebrugge B
Grootte (km ²)	0.48	0.40
Minimale diepte (m)	10	10
Maximale diepte (m)	14	14
Pieksnelheid (m/s)	1.53	1.76
Stroomrichting	O-W	O-W

Tabel 2.1: Gegevens Zeebrugge [Lammertyn en Depraetere, 2008]

uitgemiddeld zijn over een groter gebied. Plaatselijk kunnen de snelheden hoger oplopen. In hoofdstuk 6 wordt de stroming exacter bekeken aan de hand van een analytisch model [Mathys, 2008a]. Het MSL wordt geschat op 12 meter. De waterdiepte bij laag- en hoogtij zal een grote invloed hebben op de keuze van een juiste energie convertor. Een blik op de commerciële toestellen (een interessant werk hiervoor is [Lammertyn en Depraetere, 2008]) leert dat turbines van 10 meter en kleiner zelden gebruikt worden.

2.4.2 Thorntonbank

In tabel 2.2 worden enkele karakteristieken gegeven van de Thorntonbank. De gemiddelde water is veel dieper dan in Zeebrugge. Dit zal resulteren in gebruik van andere turbines. De pieksnelheid van de stroming ligt echter lager dan in Zeebrugge.



Figuur 2.7: Ligging van de zones A en B volgens [Lammertyn en Depraetere, 2008].

Grootte (km ²)	5
Minimale diepte (m)	22.5
Maximale diepte (m)	25
Pieksnelheid (m/s)	1.27
Stroomrichting	NO-ZW

Tabel 2.2: Gegevens van de Thorntonbank volgens [Lammertyn en Depraetere, 2008].

2.5 Besluit

Uit alle modellen en metingen blijkt dat in de omgeving van Zeebrugge de grootste stroming wordt aangetroffen. Plaatsing van getijden energie convertoren in deze omgeving zou theoretisch het meest rendabel zijn. Op de Thorntonbank zijn de stroomsnelheden beperkt, maar door de aanwezigheid van de funderingen van de windmolens kan er plaatselijk hogere stroming gevonden worden.

Indien men deze stromingen wenst te kennen, zal men moeten meetproeven uitvoeren of stromingsmodellen opstellen. Voor de omgeving van Zeebrugge is er een analytisch model [Mathys, 2008a] van de stroming ter beschikking.

De keuze van een ontwerp van een TEC gaat uit naar Zeebrugge. Er is niet alleen hogere stroming te vinden, maar bovendien bevindt deze site zich kort bij het vaste land. Dit kan de kost van bekabeling zeker reduceren. Zowel aan de westelijke als aan de oostelijke dam kunnen er TECs geplaatst worden. Enige voorzichtigheid is geboden in de omgeving van de vaargeul en de telecomkabels en gasleidingen.

Hoewel er zich al een elektrisch netwerk bevindt op de Thorntonbank, kan hier niet worden op gerekend. Evenmin kan dit op de funderingen van de windmolens. Het lijkt een mogelijkheid om turbines te koppelen aan de gravitaire funderingen, maar in verdere hoofdstukken zal blijken dat de krachten behoorlijk groot worden. Hierdoor kan de veiligheid misschien niet meer gegarandeerd worden.

Hoofdstuk 3

Toestellen

Een getij is een periodieke beweging van het waterniveau ten gevolge van de veranderende aantrekkingskracht van de hemellichamen op de watermassa's. De getijden bezitten potentiële en kinetische energie. Samen met het waterniveau, varieert de stroomsnelheid mee. Potentiële energie ontstaat door de verheffing van het waterpeil, kinetische energie is het gevolg van de stromingssnelheid. Het ontstaan van getijden en hun werking kan terug gevonden worden in de literatuur, zoals bijvoorbeeld [Troch en Verhoeven, 2006].

3.1 Bronnen van de getijdenenergie

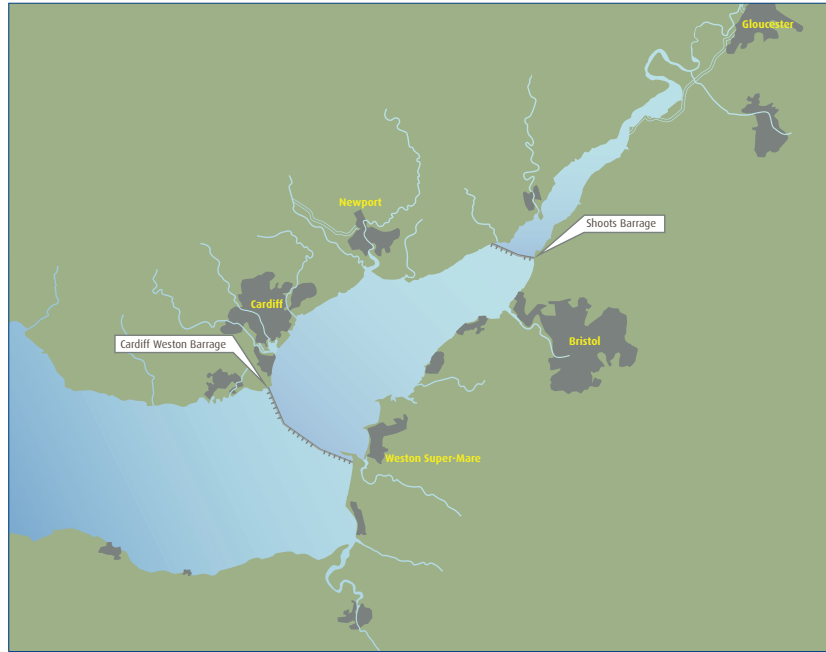
Men kan energie onttrekken op verschillende wijzen. Ter informatie staan hieronder de belangrijkste principes. Daarvan zal blijken dat slechts één bruikbaar is voor het Belgisch Continentaal Plat. Nuttige literatuur die deze bronnen zeer uitgebreid beschrijft is [SDC, 2007].

3.1.1 Getijdendam

Een getijdendam bestaat uit een dam die wordt opgetrokken in een gebied met werkende getijden. Figuur 3.1 toont een getijdendam die is ontworpen in een afgesloten zeearm. Er ontstaat een hoogtevverschil tussen op- en afwaarts. Turbines in de dam zetten de potentiële energie om in elektrische energie. Dergelijke dammen hebben als voordeel dat zij gemakkelijk grote hoeveelheden elektrische energie produceren. De volledige hoeveelheid energie die aanwezig is, kan immers worden omgezet. Het elektrische netwerk die moet worden aangelegd is relatief goedkoop. Dit omdat de turbines rechtstreeks toegankelijk zijn van op de dam. De dam is rechtstreeks verbonden met het vaste land. Een groot nadeel is dat een zeer grote kost gepaard gaat met het aanleggen van de dam. Bovendien zal de ecologie te lijden hebben onder het afsluiten van een zee- of rivierarm. Visueel is een getijdendam ook niet aan te bevelen. Het aanleggen van dammen in de omgeving van de Belgische kust is dus uitgesloten.

3.1.2 Getijdenlagunes

Getijdenlagunes zijn hetzelfde opgevat als de getijdendammen. Maar bij de lagunes wordt er geen rivier- of zeearm afgesloten. Men zorgt voor stromingsmogelijkheden langs de lagunes. In extreme vorm kan men zelfs een volledige lagune ontwerpen op zee. Zo krijgt men lagunes als figuur 3.2. De te bouwen dammen zijn nog duurder dan getijdendammen. Maar men zal lagunes trachten te vinden die van nature ondieper zijn. In praktijk worden de getijdenlagunes nauwelijks gebruikt. Wat ecologie betreft scoren zij beter dan de getijdendammen omdat de stroming buiten de lagune minder wordt beïnvloed. Er is weinig of niets gekend over de lange termijn visie van deze lagunes.



Figuur 3.1: Een getijdendam in de UK [SDC, 2007].

Het aanleggen van getijdenlagunes op het BCP is uitgesloten. De diepte in de Noordzee gaat al vlug tot enkele tientallen meter. Hierdoor loopt de bouwkost veel te hoog op.

3.1.3 Getijdenstroming

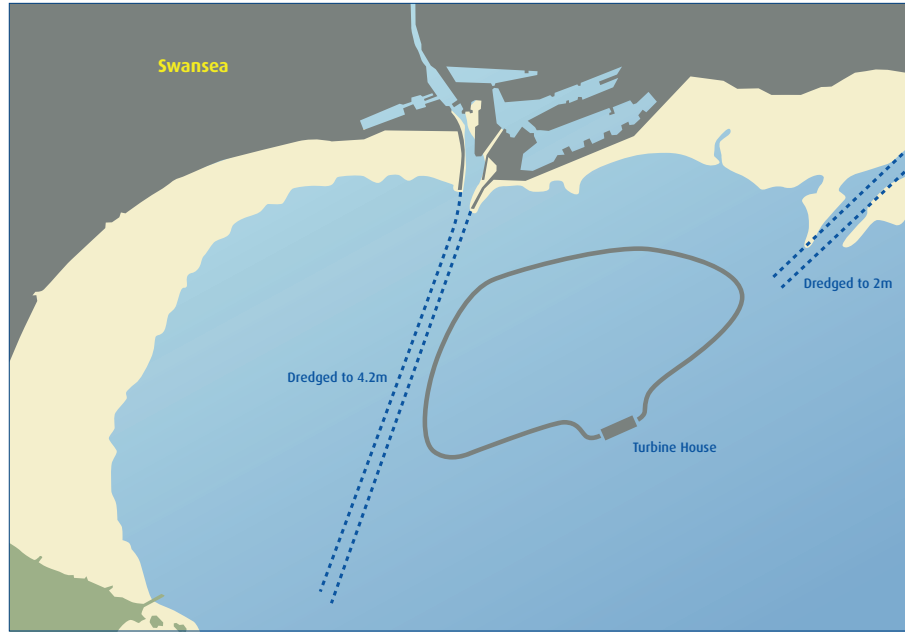
De getijden veroorzaken een verplaatsen van watermassa. Hierdoor wordt er een stroming ontwikkeld die wordt gekenmerkt door een bepaalde cyclus en stromingssnelheid. Het plaatsen van turbines kan voor energieopwekking zorgen. In dat geval maakt de turbine gebruik van de kinetische energie van de getijden. Er bestaan verschillende methodes om de kinetische energie te onttrekken aan de stroming.

Het grote nadeel is dat een turbine slechts energie kan onttrekken op een bepaalde plaats. Er zullen plaatsen moeten trachten gevonden te worden waar er voldoende energie kan onttrokken worden, ten einde om toch een rendabel toestel te ontwerpen. Omdat de toestellen per punt worden opgesteld, is er ook een netwerk aan bekabeling noodzakelijk. Het aanleggen van kabels in offshore omstandigheden is een zeer grote kost.

Vermoedelijk zijn er meerdere types bruikbaar op het BCP. In deze thesis, zijn de toestellen beperkt tot deze met een horizontale as. Toestellen met verticale assen en alternatieven worden buiten beschouwing gelaten. De thesis van [Lammertyn en Depraetere, 2008] heeft een duidelijk overzicht van wat eventueel mogelijk zou kunnen zijn.

3.1.4 Toepassingsgebied

Getijdendammen en de getijdenlagunes werken op potentiële energie. Om dit op te wekken zijn structuren nodig die het water kunnen ophouden gedurende een voldoende lange tijd. Door het ophouden van het water ontstaat er een hoogteverschil die op deze manier kan zorgen voor energieopwekking. De infrastructuur die gebouwd moet worden, is slechts in bepaalde gevallen economisch verantwoord. In België is geen enkele geschikte plaats gevonden voor deze toepassingen. Als er al een inwaartse inham aanwezig is, heeft deze een andere toepassing (zoals bijvoorbeeld natuurgebied Het Zwin) of is



Figuur 3.2: Een offshore getijdenlagune [SDC, 2007].

zij geschikt voor scheepvaart (bijvoorbeeld Westerschelde te Nederland). Het ontwerpen van getijdenlagunes op het Belgisch continentaal plat is eveneens uitgesloten. Plaatsen waar de Noordzee ondieper is, zijn voorbehouden voor windenergie (bijvoorbeeld Thornton zandbank), zandwinningsgebieden of andere gebruiksfuncties.

De enige mogelijke vorm van energieopwekking uit getijden is door gebruik te maken van turbines. Dit heeft ook de minst negatieve invloed op het milieu.

3.2 Getidenturbines

Er bestaan verschillende types toestellen om uit de stroming energie te halen. Een overzicht van commerciële modellen en prototypes zijn te vinden in [Lammertyn en Depraetere, 2008]. De meest gebruikte types toestellen zijn de turbines. Men kan ze verder opdelen in volgende categorieën:

- Propeller type: vleugels zonder omhuizing, zoals een propeller en met centrale naaf.
- Openhydro type: turbine met een opening in het midden, geen naaf aanwezig.

Een turbine geplaatst in een stroming kan theoretisch maximaal het vermogen produceren van de energie-inhoud van de stroming. Dit maximum wordt berekend aan de hand van formule 3.2

$$P = 0.5\rho Av^3 \quad (3.1)$$

Dit vermogen moet vermenigvuldigd worden met passende rendementen om de output aan energie te kennen.

$$P = 0.5\rho Av^3 \eta_1 \eta_2 \eta_3 \quad (3.2)$$

Hierbij is:

- η_1 : Rendement van de versnellingsbak.
- η_2 : Rendement van de generator.

- η_3 : Rendement van de vleugels.

Het rendement van een versnellingsbak is groot. Men kan rendementen van 95 procent halen. Het rendement van de generatoren is zeer afhankelijk van het type. Een alternator haalt een rendement van 0.5 daar waar een synchrone generator 80 procent [Nilsson et al., 2007] kan halen. Het gehele rendement van een propeller type is beperkt tot 0.59. Dit is de Betz-limiet en staat bewezen in de literatuur. Gemiddeld zijn totale rendementen van in de grootteorde van 0.35 te halen.

3.2.1 Propeller type

De turbines van het propeller type hebben een aantal vleugels verbonden met een centrale naaf. In de naaf zit er ofwel een koppeling ofwel een generator. Indien de turbine zich op die plaats bevindt, dan kan de diameter van de naaf al vlug groot worden. De afmeting kan oplopen tot gemakkelijk 10 procent van de diameter. De vleugel heeft een bepaalde vorm die slechts in 1 richting optimaal gebruikt wordt. Bij elke stroomsnelheid kan er een optimale geometrie van de vleugel gevonden worden. Net zoals bij windmolens, is het mogelijk om pitch-controllers te installeren op de turbine. Meestal zijn de propeller types beperkt tot 2 vleugels indien ze een pitch-controller bezitten, omdat deze dan kleiner kunnen uitgevoerd worden. In offshore milieu zal het nog moeten blijken of pitch-controllers voldoende bestand zijn tegen het agressieve klimaat. Het lijkt logisch dat een turbine met 3 vleugels een groter vermogen kan ontwikkelen. Maar veelal wordt er geopteerd voor 2 vleugels, omdat er minder vermoeiing optreedt en dat een betere krachtenbalans mogelijk is in vergelijking met 3 vleugels [Seaflo, 2005].

De krachten op de vleugels zijn groot. In vergelijking met windmolens zullen de vleugels veel hoger belast worden. De afmetingen van getijdenturbines is wel veel kleiner, maar ze worden blootgesteld aan hogere belastingen.

Er kan eveneens een sturing voorzien zijn om het valk van de turbine loodrecht te plaatsen op de aanstroomrichting. Bij schuine invallen zal de energie opbrengst dalen en zouden er kunnen extra momenten optreden op de vleugels. Hiervoor kan de TEC kan voorzien worden van een gieren mechanisme. Maar er moet op gelet worden dat de hoeveelheid aan bewegende onderdelen in een maritiem klimaat niet leidt tot frequenter falen. Dit zou een hoger risico met zich meebrengen.

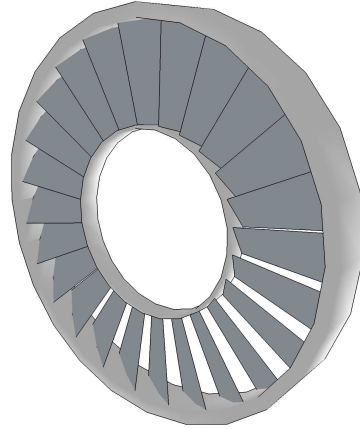
Er kan een venturibuis geplaatst worden rond de turbine. Daardoor kan er bij intredende lage snelheden in het toestel een hogere snelheid worden gecreëerd. In een volgend hoofdstuk wordt hierop dieper ingegaan.

3.2.2 Openhydro type

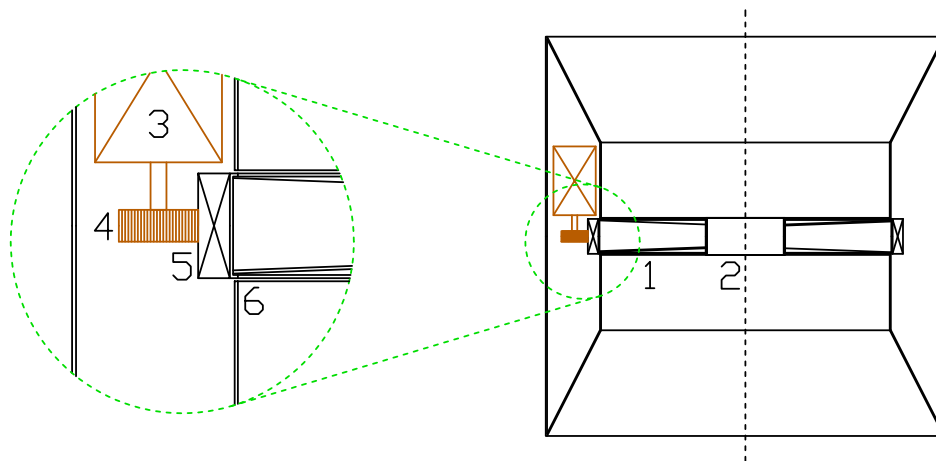
De turbine bestaat uit een aantal schoepen met een opening in het midden zoals in figuur 3.3. Aan deze opening heeft openhydro zijn naam te danken. Het design van een openhydro is beschermd door een patent [OpenHydro, 2004]. Doordat er een opening is, kan er geen naaf aanwezig zijn. De generator voor de TEC kan dus niet in het midden geplaatst worden. Deze wordt aangesloten op de buitenste lager. Indien er een straalbuis voorzien is, kan de turbine in de straalbuis geplaatst worden.

Aangezien er veel vleugels aanwezig zijn, is het praktisch onmogelijk om pitch-controllers toe te passen. Voor een openhydro turbine worden er dus vaste vleugels gebruikt. De vleugels zijn in feite dunne platen. Het voordeel van een plaat is dat er geen voorkeursrichting bestaat (figuur 4.5).

Figuur 3.4 toont het inwendige van een turbine van het openhydro type. De lager (5) van de turbine is verbonden met een tandwiel overbrenging (4) met de generator (3). De vleugels (1) zijn geplaatst op de buitenste lager (5) en op een holle cilinder (2).



Figuur 3.3: Een turbine van het openhydro type.



- 1 Vleugels
- 2 Opening
- 3 Generator

- 4 Tandwielverbinding
- 5 Lager
- 6 Verbinding lager - buis

Figuur 3.4: Een turbine van het openhydro type inwendig bekeken.

3.3 Ecologie

De aanwezigheid van een opening in de openhydro turbine zorgt voor een vluchtweg voor de fauna. De opening is ook nuttig bij het in stand houden van voldoende stroomsnelheid achter de turbine. Indien teveel energie wordt ontnomen, dan kan dit negatieve invloeden hebben op de ecologie. In de literatuur wordt dit vastgelegd met een SIF factor.

Turbines kunnen ontworpen worden voor een bepaald toerental. Het toerental van de turbine wordt beperkt. Bij een propeller type is het denkbeeldig dat zeedieren zouden verwond raken door de vleugels. Door de snelheid te beperken, reduceert men het risico.

3.3.1 SIF

De Significant Impact Factor (SIF) beschrijft in welke mate er energie mag onttrokken [ESRU, 2009] worden zonder dat dit een negatieve invloed zou hebben op economische activiteiten of op de omgeving. Tot op heden is de SIF meer een begrip dan een exacte waarde. In de literatuur [Bryden et al., 2007] vermeld men onder andere volgende hoofdvragen. Wat is de verandering aan de omgeving indien een bepaalde energiehoeveelheid wordt onttrokken? Welke nefaste invloed heeft het onttrekken van energie op het maritieme milieu?

Aangezien stroomsnelheid een onderdeel zal uitmaken ter bepaling van de impact, wordt in tabel 3.1 een korte berekening weergegeven. Er kan een zeer eenvoudige schatting gemaakt worden van de stroomsnelheid voor en na de TEC. Tabel 3.1 werd berekend op basis van volgende formule.

E	$\frac{v_2}{v_0}$	Δ
[%]	[%]	[%]
10	96.55	3.45
20	92.93	7.07
30	88.79	11.21
40	84.34	15.66
50	79.37	20.63

Tabel 3.1: Het onttrekken van een hoeveelheid energie E door de TEC, reduceert de stroomsnelheid achter de TEC. De daling van de stroomsnelheid bedraagt Δ procent.

$$0.5\rho \cdot A \cdot v_0^3 - E = 0.5\rho \cdot A \cdot v_2^3$$

Het is duidelijk, dat de significante impact factor in de toekomst zeker zal verder moeten onderzocht worden. In de omgeving van de vaargeul te Zeebrugge kan de factor bepalend zijn, omwille van economische activiteiten. De stroomsnelheidsreductie zal een belangrijke factor zijn.

3.3.2 Aangroei

Aangroei (Eng.: Fouling) is het fenomeen waarbij dieren en planten in het maritieme milieu zich gaan hechten aan een structuur. Wanneer de aangroei geen direct invloed heeft op de energieopbrengst is dit nog aanvaardbaar. Wanneer de aangroei echter gaat zorgen voor extra sleep op de vleugels of extra stromingsweerstand in de venturibuis, dan moeten er voorzorgsmaatregelen genomen worden. Er bestaan verschillende methoden om aangroei te minderen. Een goede samenvatting van alle mogelijke antifoulingmethoden is te vinden bij [Abdul Azis et al., 2003]. Enkelen hebben zeer negatieve gevolgen op de ecologie. Er bestaan anti-aangroei middel zoals het injecteren van biocides (bijvoorbeeld chloor), opwarming van de toestellen, het verspreiden van radioactieve of UV straling, kortstondige stroomstoten, ...

Uiteindelijk blijven er slechts beperkte mogelijkheden over. Zoals bij de scheepvaart zullen mariene verven (Eng.: antifouling paints) en coatings de beste oplossing bieden. De koperoxide coatings zijn het meest gebruikt voor antifouling. De kwaliteit van de verf hangt grotendeels af van de toxiciteit. Hoe langer een verf toxisch blijft, hoe langer het zal duren totdat er zich aangroei zal aan hechten. Qua levensduur scoren de antifouling elastomeren goed. Ze zijn echter een stuk natuuronvriendelijker. Een levensduur met een coating kan geschat worden op 5 jaar.

Een andere mogelijkheid is om speciale legeringen te kiezen. De koper nikkel legering is goed bestendig tegen aangroei en corrosie. Een andere legering van koper, mangaan, cerium en gallium is nog beter bestendig tegen aangroei. Om betonnen structuren te beschermen tegen aangroei kan men polymeren of monomeren aanbrengen. Die lagen bevatten biocides. De biocides verhinderen de aangroei door langzaam af te scheiden.

Het is duidelijk dat op het gebied van materialen voor turbines in een maritieme omgeving nog veel onderzoek noodzakelijk is.

3.4 Besluit

Getijdendammen en getijdenlagunes hebben geen toekomst op het BCP. Er moet dus gebruik gemaakt worden van turbines. Enerzijds is er het propeller type waarbij pitch-controllers zijn aangeraden. Hierbij zijn er een beperkt aantal vleugels aanwezig (meestal 2) omwille van het de bedrijfszekerheid. Anderzijds is er het openhydro type die vaste vleugels heeft. Hierbij is het aantal bewegende onderdelen beperkt. Bovendien kunnen meerdere vleugels geplaatst worden wat het vermogen van een TEC kan opdrijven.

Tot op heden is het onduidelijk welk type de voorkeur verdient. Maar verder in deze thesis zal vooral gewerkt worden rond het openhydro type. Dit om volgende reden: men zal zien dat er in Zeebrugge een stroming optreedt die bijna 180 graden verschilt. Dit is ideaal voor een openhydro type die kan bedient worden langs 2 richtingen. Bij een propeller zou er zeker een pitch-controller moeten worden ingebouwd.

Er is nog veel onderzoek nodig naar turbines in maritiem klimaat. Niet alleen de aangroei zal voor problemen zorgen, maar ook het maritiem klimaat. Bepaalde bewegende en niet bewegende onderdelen zouden in die mate kunnen belast worden, dat het risico op falen onaanvaardbaar hoog wordt.

Hoofdstuk 4

Berekening van turbines

In dit hoofdstuk worden de druk, het torsiemoment en het vermogen bepaald. Dit gebeurt op basis van de Glauert [Glauert, 2007] turbine theorie. Dit hoofdstuk heeft geenszins de bedoeling om exacte waarden te berekenen. Er zijn immers teveel onbekenden in het spel. De bekomen waarden zullen wel een grootteorde schetsen. Het lijkt dan ook logisch om bij definitieve ontwerpen meer gegevens te gaan bekomen uit modelproeven.

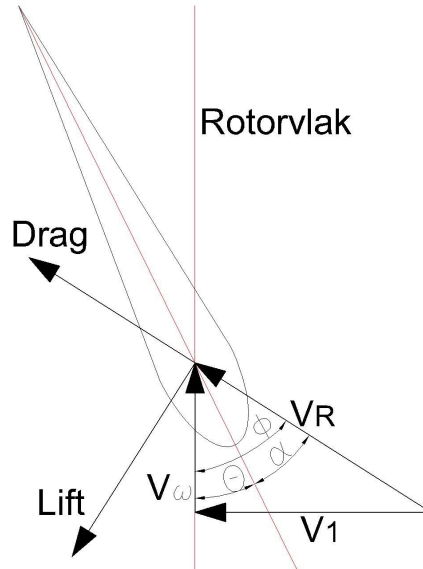
4.1 BEMT

BEMT staat voor Blade Element Momentum Theory en is een verzameling van rekenmodellen om turbines te berekenen. De drukkracht (Eng.: Thrust), het torsiemoment (Eng.: Torsion), de liftkracht (Eng.: Lift) en de sleepkracht (Eng.: Drag) kunnen er mee bepaald worden. Hier wordt gebruik gemaakt van de Glauert BEM theorie [Glauert, 2007]. Het is een 2D theorie en steunt op de veronderstelling dat de aanstromingsrichting loodrecht is op het rotorvlak. Indien dit niet het geval is kunnen er formules worden opgesteld. Een tweede veronderstelling is dat de krachten constant zijn per langselement op de vleugel. Het tweede criterium wordt bekomen door voldoende kleine elementen in de langsrichting van de vleugel te beschouwen.

4.2 Schets

Figuur 4.1 is een schets van een vleugel. Wanneer er water instroomt in de turbine, ontstaan er krachten die de turbine laten ronddraaien. Het roteren van de turbine resulteert in een ronddraaiende watermassa. De zin van het roterende water is tegengesteld aan de draaiingszin van de turbine. Beide snelheidscomponenten leveren een resultante op. Evenwijdig met de resulterende snelheid staat de sleepkracht. De liftkracht staat hier loodrecht op. De lift- en de sleepkracht kunnen opgesplitst worden in een loodrechte en evenwijdige component op het rotorvlak. De loodrechte zal de drukkracht bepalen (en dus de reactiekracht) De evenwijdige zal het torsiemoment bepalen.

Hoek α is de aanvalshoek. Hoek θ is de hoek tussen de nulliftlijn en het rotorvlak. Bij symmetrische vleugels is θ nul.



Figuur 4.1: Schets van vleugel

4.3 Drukkracht en Torsie

Het ontstaan van de drukkracht op een turbineschoep is het gevolg van een aanstromende massa. De wet van Newton kan toegepast worden:

$$F = ma = m \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Toegepast op een infinitesimaal vleugelement en wetende dat het massadebiet gelijk is aan snelheid maal oppervlakte wordt dit:

$$dT = \frac{dm}{dt}(v_0 - v_2) = 2\pi r \rho v_1 (v_0 - v_2) dr$$

$$dT = 4\pi r \rho v_0^2 a(1 - a) dr \quad (4.1)$$

In formule 4.1 wordt het massadebiet geschreven als $\pi 2r \rho v_1 dr$. Figuur 4.2 verklaart deze formule. De eenheden van vergelijking 4.1 zijn

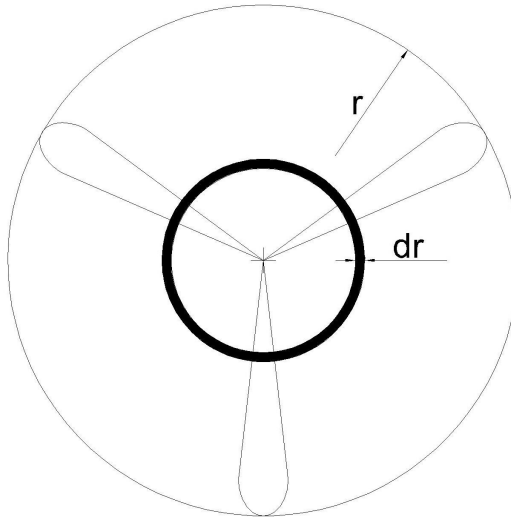
$$[m] \left[\frac{kg}{m^3} \right] \left[\frac{m^2}{s^2} \right] [m] = [N]$$

Hierbij is v_0 de stroomsnelheid op oneindig; of nog, de stroomsnelheid waar er geen invloed is van de turbine. v_1 is de snelheid net voor de turbine. v_2 is de stroomsnelheid achter de turbine. In het spoor van de turbine ligt deze snelheid altijd lager dan v_1 . Deze snelheden zijn sterk afhankelijk van de gekozen turbines. Bij een turbine in een buis, de zogenaamde venturi turbine, kan v_1 hoger zijn dan v_0 . Bij turbines zonder buis, zoals windmolens, zal v_1 lager liggen dan v_0 . Bij turbines zonder buis kan v_1 en v_2 begroot worden als volgt:

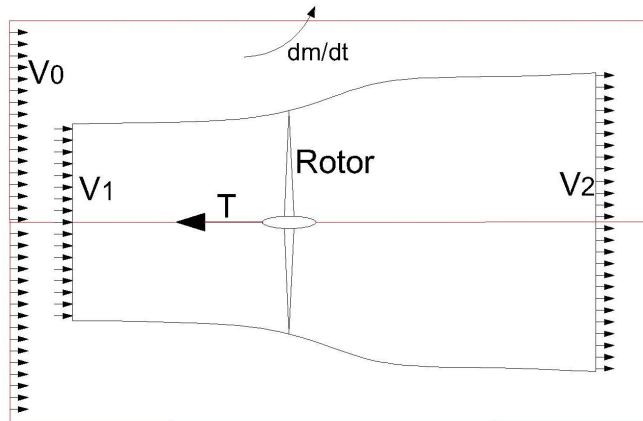
$$v_1 = v_0(1 - a)$$

$$v_2 = v_0(1 - 2a)$$

Zij volgen uit de theorie van Bernoulli. Dit kan terug gevonden worden in [Glynn et al., 2005]. In een open turbine is figuur 4.3 geldig. Het ontstaan van een torsiemoment rond de turbine as is het gevolg



Figuur 4.2: Betekenis van formule 4.1.



Figuur 4.3: Bernoulli vergelijking

van de roterende watermassa. De snelheden in het rotorvlak vermenigvuldigd met het massadebiet en een hefboomsarm levert een moment.

$$dM = \frac{dm}{dt} r v_{\theta} = 2\pi r^2 \rho v_1 v_{\theta} dr$$

$$dM = 4\pi r^3 \rho v_0 \omega (1 - a) a_{\omega} dr \quad (4.2)$$

Vergelijking 4.2 heeft als eenheden:

$$[m^3] \left[\frac{kg}{m^3} \right] \left[\frac{m}{s} \right] \left[\frac{rad}{s} \right] [m] = [Nm]$$

Met v_{θ} de snelheidscomponent in het rotorvlak. Ze heeft een grootte van:

$$v_{\omega} = \omega r (1 + a_{\omega})$$

ω is de hoeksnelheid van de turbine.

4.4 Lift- en sleepkracht

De rechtstreekse krachten die werken op een vleugel zijn de lift- en sleepkrachten. De liftkracht staat loodrecht op de stroming. De sleepkracht is er evenwijdig mee. De liftkracht is begroot op:

$$L = 0,5\rho v_r^2 c(r)C_l$$

De eenheid van de liftkracht is berekend per lopende meter

$$\left[\frac{kg}{m^3}\right] \left[\frac{m^2}{s^2}\right] [m] = \left[\frac{N}{m}\right]$$

De sleepkracht heeft identieke eenheden en bezit een grootte van:

$$D = 0,5\rho v_r^2 c(r)C_d$$

Hierbij is v_r de resulterende stroomsnelheid. Men kan v_r ook schrijven als:

$$v_r = \frac{v_0(1-a)}{\sin(\phi)} = \frac{\omega r(1+a_\omega)}{\cos(\phi)} \quad (4.3)$$

De C_d en de C_l waarden zijn te vinden in tabellen. De normaalkracht en tangentiële kracht wordt opgesteld met behulp van de lift- en sleepkracht. Men bekomt:

$$F_n = \cos(\phi)L + \sin(\phi)D$$

$$F_t = \sin(\phi)L - \cos(\phi)D$$

In feite zijn de krachten F_n en F_t gelijklopend aan de drukkracht en het torsiemoment (op hefboomsarm na) van het hoofdstuk hiervoor. Echter, F_n en F_t zijn krachten per lengte eenheid. Het verband tussen deze krachten is:

$$dT = BF_n dr \quad (4.4)$$

$$dM = BF_t r dr \quad (4.5)$$

Hierbij is B het aantal schoepen van de turbine. Ook de lift- en sleepcoëfficiënt kunnen omgevormd worden tot:

$$C_n = \cos(\phi)C_l + \sin(\phi)C_d$$

$$C_t = \sin(\phi)C_l - \cos(\phi)C_d$$

Het samenvoegen van vergelijking (4.3), (4.4) en (4.5) levert volgende vergelijkingen:

$$dT = \frac{1}{2}\rho B \frac{v_0^2(1-a)^2}{\sin^2(\phi)} c C_n dr \quad (4.6)$$

$$dM = \frac{1}{2}\rho B \frac{v_0(1-a)\omega r(1+a_\omega)}{\sin(\phi)\cos(\phi)} c C_t r dr \quad (4.7)$$

Substitutie van vergelijking (4.1) en (4.2) in (4.6) en (4.7) levert vergelijkingen van a en a_ω :

$$a = \left[1 + \frac{4\sin^2(\phi)}{\sigma C_n}\right]^{-1}$$

$$a_\omega = \left[\frac{4\sin(\phi)\cos(\phi)}{\sigma C_t} - 1\right]^{-1}$$

Hierbij is σ gelijk aan:

$$\sigma(r) = \frac{c(r)B}{2\pi r}$$

De fysische betekenis van a is dat er fluidum kan ontsnappen. De rotor, die een bepaalde weerstand heeft, kan ervoor zorgen dat het fluidum de weg van minste weerstand kiest. Hierdoor zal de aanstroomsnelheid trager worden. Een zelfde redenering geldt voor a_ω .

4.5 Lift- en sleepcoëfficiënt

De coëfficiënten hangen af van het gebruikte type profiel. De aanvalshoek en het getal van Reynolds zijn hierbij van belang, alsook het gebruikte materiaal.

4.5.1 2D vleugel

Een 2D vleugel heeft een oneindige lengte. De liftcoëfficiënt kan worden gelineariseerd voor kleine aanvalshoeken. Daarbij wordt volgens [Lacor, 2005]

$$C_l = 2\pi(\alpha - \alpha_0) \quad (4.8)$$

Met α de aanvalshoek en α_0 de nullift in radialen. De sleepcoëfficiënt heeft een grootte [Lacor, 2005] van:

$$C_d = C_{d_0} + kC_l^2 \quad (4.9)$$

Merk dat de sleepcoëfficiënt uit 2 delen bestaat. Enerzijds is er de C_{d_0} die de sleep voorstelt bij nullift. Deze term is afhankelijk van het soort materiaal, de omstandigheden en de turbulentie van de stroming. Dit is de term die de wrijving voorstelt (Eng.: Skin or friction drag). De tweede term is functie van de lift. Dit wordt de lift geïnduceerde sleep genoemd (Eng.: Form drag). Ze is, zoals de naam zegt afhankelijk van de vorm. De totale sleep (Eng.: Profile drag) is de som van beide. In praktijk is de lift geïnduceerde sleep vaak niet voldaan aan de kwadratische functie. Dit hoeft echter geen probleem te vormen. In een maritieme omgeving zal de C_{d_0} veel groter zijn. De k in formule 4.9 heeft 0.01 als grootteorde voor aërodynamische profielen. Bij hogere aanvalshoeken zal de tweede term ook niet meer te verwaarlozen zijn. Een grootteorde voor C_{d_0} is 0.02 à 0.1 voor aërodynamische profielen. Dit kan zeer hoog oplopen bij niet aërodynamische vormen.

4.5.2 3D vleugel

Aangezien geen enkele vleugel oneindig lang is, worden kleine correcties toegepast op de sleepcoëfficiënt. Formule 4.9 wordt volgens [Lacor, 2005]

$$C_d = C_{d_0} + C_l^2 \left(k + \frac{1}{\pi e AR} \right) \quad (4.10)$$

Met e een rendementsfactor, meestal tussen 0.85 en 1. AR is de aspect ratio en is gelijk aan

$$AR = \frac{b^2}{A}$$

Met b de vleugelwijdte en A het vleugeloppervlak. Er valt weer op te merken dat de tweede term terug te verwaarlozen valt bij aërodynamische profielen en kleine aanvalshoeken.

4.5.3 Invloed van het getal van Reynolds

De sleepcoëfficiënt is afhankelijk van de aanvalshoek en het Reynoldsgetal. Het Reynoldsgetal wordt gedefinieerd als:

$$Re = \frac{vD}{\nu}$$

Het getal van Reynolds duidt aan in welke mate een stroming turbulent is. Hoe groter Re , hoe turbulenter de stroming zal zijn. Bij turbulente stromingen ontstaan er wervels. Het aantal wervels is een maat voor de grootte van de sleep. De sleep wordt groter naarmate de stroming meer laminair wordt. Of nog, hoe lager Re is, hoe groter C_{d_0} is. Voor mariene turbines is slechts een beperkt gebied voor Re geldig. De ondergrens bedraagt ongeveer $0.7 \cdot 10^5 Re$. Dit is bij een cut-in snelheid van 0.7 m/s, een aangestroomde oppervlakte van $0.1 m^2$ en de dynamische viscositeit van zout water $\nu = 10^{-6} m^2/s$. Een bovengrens kan berekend worden op $Re = 2 \cdot 10^6$. Hierbij geldt er voor de Noordzee

een maximale snelheid van ongeveer 2 m/s en een aangestroomde oppervlakte van $1m^2$. Let wel dat deze bovengrens nog zeer ruim kan variëren, afhankelijk van de stand van de vleugels. Er is een variërende stromingssnelheid veroorzaakt door de getijdenstroming. Dit wil zeggen dat ook het getal van Reynolds (en dus de sleepcoëfficiënt) verandert. Het is dan waarschijnlijk dat op elk ogenblik een andere sleepcoëfficiënt geldt. Er zullen andere waarden voor C_l over C_d gevonden worden. Dit is echter voor elk profiel anders en moet dan ook berekend worden.

4.6 Materialen

4.6.1 Vermoeiing

Aangezien mariene turbines zijn blootgesteld aan een agressief klimaat, moeten goede materialen worden gekozen. Voor windmolens worden enkel nog composietmaterialen gebruikt, althans wat de vleugels betreft. De vleugels worden dynamisch belast waardoor er vermoeiing zou kunnen optreden. Bij turbines in een zout klimaat zijn er nog andere nadelen. Het zout water zou zorgen voor een nadelige invloed op de vermoeiing [Davies et al., 2008].

4.6.2 Oppervlakte afwerking en aangroei

De bloei van planten en de aangroei van dieren is van minder belang bij de bewegende onderdelen, hoewel zij niet volledig is uit te sluiten. Bij stroomsnelheden kleiner dan de cut-in snelheid staat de turbine stil, waardoor er aangroei kan gebeuren. Wanneer de schoepen bestendig zijn tegen corrosie en ze doorheen de tijd niet ruwer worden, zal er minder aangroei plaatsvinden. Als dit toch plaats vindt, dan zal de lift- en sleepcoëfficiënt veranderen in de tijd. Dit kan de turbine minder rendabel maken. Het is logisch dat deze factoren in rekening worden gebracht in de sleepcoëfficiënt. De bloei en het soort oppervlakte bepaalt de C_{d_0} term uit formule 4.10. C_{d_0} kan bepaald worden met software [Hepperle, 2006]. Maar veeleer zal men in grotere projecten dit toetsen met modelproeven.

4.6.3 Ouderdom

De meeste mariene turbines hebben een ontwerp levensduur van 20 jaar. Doorheen de jaren zal het oppervlak van de vleugels lijden onder de agressieve omstandigheden van het zeewater, waardoor de sleep kan toenemen. In de fluidomechanica is het gebruikelijk om de weerstandcoëfficiënt te vermenigvuldigen met een factor afhankelijk van de ouderdom van een leiding. Volgens Russel, uit het boek van [Bonami, 2004] bedraagt die factor 1.75 na 20 jaar.

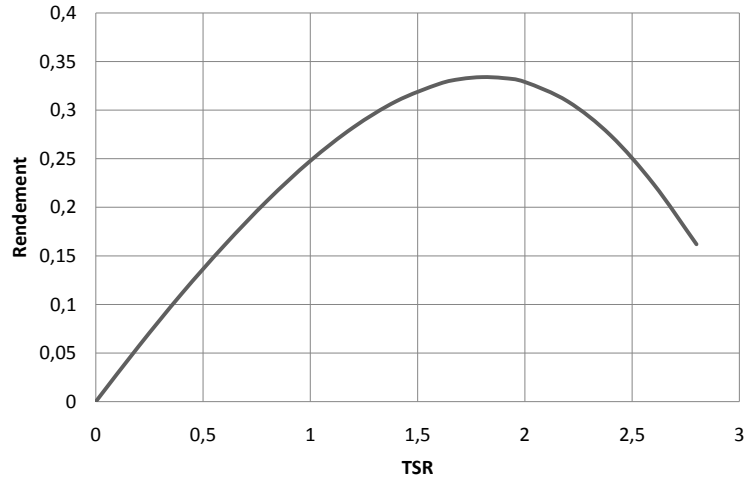
4.7 Berekeningswijze

Er moeten enkele data gekend zijn om de berekening uit te voeren. Het aantal schoepen (B), de straal van de schoepen (R), de watersnelheid (v_0), de lift- en sleepcoëfficiënten (C_l en C_d) in functie van de aanvalshoek (α). De tip speed ratio (TSR) wordt meestal ook gekozen. Uit de praktijk is het gekend dat het beste vermogen bereikt wordt bij een TSR van ongeveer 5 à 6. Toch wat betreft windmolens met 3 wieken. Voor maritieme turbines worden lagere TSR waarden gebruikt die schommelen rond de 2. De TSR wordt berekend als:

$$TSR = \frac{\omega R}{v_0}$$

Figuur 10.6 geeft het rendement in functie van TSR weer. Merk op dat de waarden geen representatieve waarden zijn. De turbine kan optimaler ontworpen worden. Het verloop daarentegen, is een indicatie voor alle mariene turbines.

De TSR waarde kan beperkt worden om hinder voor het maritieme leven uit te sluiten of te beperken. Bovenstaande formules zijn iteratief te berekenen. Dit komt doordat a priori de grootte en richting



Figuur 4.4: Rendement in functie van de TSR voor een openhydro turbine van 5.46 meter. De berekeningen zijn aan de hand van bovenstaande formules.

van de snelheidsvector niet gekend is. Er zal een iteratieve berekening moeten gebeuren om tot een oplossing te komen.

Er wordt een startwaarde gekozen voor a en a_ω , bijvoorbeeld $a = 0$ en $a_\omega = 0$. De aanvalshoek wordt bepaald. Een goede keuze voor α is wanneer de liftcoëfficiënt over de sleepcoëfficiënt maximaal is. Dit zal voor elk profiel anders zijn. De C_n en C_t waarde kan worden bepaald door bovenstaande formules. Een nieuwe a en a_ω kan worden bepaald en begint terug van in het begin. Wanneer voldoende nauwkeurigheid bereikt is, worden de BEM krachten bepaald. Om een zo efficiënt mogelijk turbine te hebben, wordt het vermogen geoptimaliseerd. Dit kan men doen door de twist (hoek θ in figuur 4.1) te wijzigen van moot tot moot. Het vermogen heeft een grootte van:

$$dP = dM \cdot \omega \quad (4.11)$$

De eenheid van vermogen is Watt:

$$[Nm] \left[\frac{rad}{s} \right] = [W]$$

Het vermogen staat in verband met het koppel en de hoeksnelheid van de turbine. Hoe hoger de hoeksnelheid ligt, hoe hoger het vermogen zal zijn. Het vermogen is dus een functie van de TSR.

4.7.1 Open mariene turbines

De open mariene turbines hebben geen omhulling rond de vleugels. Ze lijken op windmolens die onder water worden geplaatst. De berekeningswijze voor dergelijke turbines is zoals hierboven staat beschreven. Maar wegens verliezen (omdat het een open turbine is) is er een correctiefactor noodzakelijk.

4.7.2 Gesloten mariene turbines

De gesloten turbine heeft een omhulling rond de vleugels. Het is alsof een turbine in een buis geplaatst is. Voor turbines waar er een vernauwing is, zijn bovenstaande formules niet geldig, indien men de verhoogde snelheid in rekening brengt (wegens drukvermindering in de buis). Bij de gesloten turbines moet er geen tipverlies factor worden berekend. Dit omdat er geen fluïdum kan worden weggeslingerd. De OpenHydro [OpenHydro, 2004] turbine is hiervan een speciaal type.

4.8 Correctiefactoren

4.8.1 Prandtl's verliesfactor

Een eerste correctie is om rekening te houden met de topverlies factor. De roterende watermassa ondervindt een kracht die uitwendig gericht is. Er is fluïdum die uit de rotor geslingerd wordt. Hiervoor past men de Prandtl topverliesfactor F toe. Voor deeltjes meer naar de top toe, zal de verliesfactor groot zijn. Deeltjes die zich dicht tegen de naaf bevinden, zullen hier minder last van hebben.

$$a_{corr} = \left[1 + \frac{4F \sin^2(\phi)}{\sigma C_n} \right]^{-1} \quad (4.12)$$

$$a_{\omega,corr} = \left[\frac{4F \sin(\phi) \cos(\phi)}{\sigma C_t} - 1 \right]^{-1} \quad (4.13)$$

Met de factor F [Cuerva et al., 2007]

$$F(r) = \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \arccos \left(e^{-\frac{B(R-r)}{2R \sin(\theta)}} \right) \arccos \left(e^{-\frac{B(R-r_0)}{2R \sin(\theta)}} \right)$$

Deze laatste is een empirische formule geldig voor windmolens. Wegens de treffende gelijkheid kan dit ook gebruikt worden voor getijdenmolens.

4.8.2 Correctie voor inductie

Er is een tweede correctiefactor voor handen. Wanneer de a boven de 0.4 ligt, moet zij berekend worden volgens [Spera, 1994]

$$a = \frac{1}{2} \left[2 + K(1 + 2a_c - \sqrt{(K(1 - 2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)}) \right] \quad (4.14)$$

Waarbij a_c (kritische inductie) op 0.2 geschat wordt. De K factor is:

$$K = \frac{4F \sin^2(\phi)}{\sigma C_n} \quad (4.15)$$

4.9 Toepassen op mariene turbines

In de aërodynamica is het gekend dat de meest effectieve aanvalshoek deze is waarvoor de verhouding van de lift over sleep maximaal wordt. De verhouding is van groot belang bij vliegtuigen. Wanneer de lift te hoog oploopt en dus de aanvalshoek groot wordt, is de sleepkracht zodanig groot dat de motoren een te grote stuwkracht moeten leveren om de sleep te overwinnen. Bij maritieme turbines speelt de verhouding echter een kleinere rol. Het is voldoende om de funderingen groter te dimensioneren om zodoende een groter koppel te krijgen. Het vermogen van de turbine wordt berekend door formule 5.2. Of nog door formule 4.2. Het maximaliseren van het koppel kan gebeuren door grotere diameters van turbines te kiezen. Helaas is dit meestal een randvoorwaarde waarvan niet kan afgeweken worden. De F_t kan worden gemaximaliseerd door:

$$F_t = 0.5 \rho c \frac{v_0(1-a)}{\sin(\phi)} [\sin(\phi) C_l(\alpha) - \cos(\phi) C_d(\alpha)] \quad (4.16)$$

Merk op dat de lift- en sleepcoëfficiënt afhankelijk zijn van de aanvalshoek. Uit figuur 4.1 blijkt echter dat α afhankelijk is van ϕ .

Zo gemakkelijk is het echter niet. De hoek ϕ ligt vast door vergelijking 4.3. De enige mogelijkheid om vergelijking 4.16 te maximaliseren is door te spelen met aanvalshoek en twisthoek. Het uitschrijven van vergelijking 4.16 levert:

$$F_t \sim \frac{A}{\sin(\phi)^2} \left(\frac{C_l}{C_d} \sin(\phi) - \cos(\phi) \right)$$

$\frac{C_l}{C_d}$	ϕ [graden]
1	45.00
2	26.57
3	18.43
4	14.04
5	11.3
10	5.71
15	3.81
20	2.86
25	2.29
30	1.91

Tabel 4.1: Minimum ϕ bij een bepaalde verhouding lift over sleep.

Hier is toch te zien dat een maximale verhouding van lift en sleep een positief effect heeft op het koppel. Er moet voor gezorgd worden dat de 2de term niet negatief wordt. Dit zou een negatief koppel veroorzaken waardoor het vermogen van de turbine daalt.

Een andere redenering:

$$\frac{dF_t}{d\phi} \sim \frac{\frac{C_l}{C_d} \sin(\phi) \cos(\phi) - \cos(\phi)^2}{\sin(\phi)^3} + \frac{\frac{C_l}{C_d} \cos(\phi) - \sin(\phi)}{\sin(\phi)^2} = 0$$

$$\phi \sim \arctan \frac{C_d}{C_l}$$

4.9.1 NACA 0018

Er wordt gebruik gemaakt van een NACA0018 profiel. De berekening gebeurt met 2 vleugels die op 180 graden van elkaar staan. De totale diameter is 7 meter. De NACA profielen zijn een verzamelnaam voor gestandaardiseerde vleugelprofielen. Het is opgesteld door de NASA. Elk profiel wordt gekenmerkt door een nummer. Met het nummer is het volledige profiel gekend. Het NACA 0018 profiel is een type dat wordt gebruikt voor energie convertoren. De vleugel heeft een nullifhoek van nul graden. Dit komt omdat het profiel symmetrisch is ten opzichte van de koorde. De dikte bedraagt 18 procent van de koorde. Het getal van Reynolds kan een gebied van $1.26 \cdot 10^5$ (horende bij de cut-in snelheid van $0.7m/s$) tot $17.5 \cdot 10^5$ (bij $1.75m/s$, ongeveer het maximum aangetroffen op de Noordzee) doorlopen. Dit is als men een profiel gebruikt met koorde 1 meter. Het kleinste aanstroomoppervlak is dan 0.18 en het grootste 1 meter.

Een berekening in [Hepperle, 2006] heeft de lift- en sleepcoëfficiënten bij variërende aanvalshoeken en Reynoldsgetalen. Er wordt een oppervlakte ruwheid van 'aangroei' verondersteld. Figuur A.1 stelt de lift voor in functie van het getal van Reynolds en de aanvalshoek. Merk dat de lift niet sterk afhankelijk is van Re . Bij alle turbulenties ligt de stalhoek (Eng.: Stall) tussen 18 en 20 graden. De sleepcoëfficiënt is, zoals in figuur A.2 meer afhankelijk van Re . De liftcoëfficiënt delen door de sleepcoëfficiënt levert figuur A.3. De tabel horende bij $Re = 10 \cdot 10^6$ wordt opgesteld. Uit tabel 4.9.1 volgt dat de grootste lift over sleep bekomen wordt bij een aanvalshoek 10 graden. Wanneer de aanstromingsrichting van het fluidum met deze hoek invalt, dan zal de vleugel de grootste lift ondervinden. De grootste lift wordt gevonden bij 18 graden. Dit is de stalhoek.

De meest effectieve aanvalshoek is rond de 8 à 9 graden indien men de verhouding lift over sleep maximaal wenst. De verhouding van lift over sleep bedraagt 42.6 bij 8 graden. Behoudt men over de volledige langsrichting van de vleugel 8 graden als aanvalshoek, dan kan men de twisthoek bepalen. De grootte van ϕ is immers opgelegd. Een berekening is te vinden in bijlage F.

α	C_l	C_d	$\frac{C_l}{C_d}$
0	0	0.0156	0
5	0.621	0.0175	35.5
7	0.858	0.0208	41.3
8	0.972	0.0228	42.6
9	1.08	0.0255	42.4
10	1.18	0.0273	43.3
11	1.27	0.0313	40.6
15	1.502	0.0594	25.3
18	1.54	0.1047	14.7
20	1.524	0.1446	10.5

Tabel 4.2: Lift- en sleepcoëfficiënten bij een NACA0018 profiel.

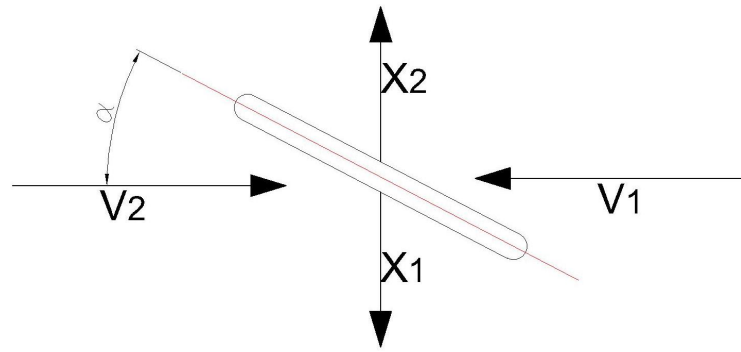
α	C_l	C_d	$\frac{C_l}{C_d}$
0	0	0.04	0
1	0.110	0.041	2.7
3	0.329	0.048	6.9
5	0.548	0.061	9.0
7	0.7	0.074	9.4
9	0.75	0.079	9.45
15	0.7	0.074	9.42

Tabel 4.3: Lift- en sleepcoëfficiënt bij een vlakke plaat (dunne vleugel theorie).

4.9.2 Vlakke plaat

Een vlakke plaat die in een stroming geplaatst wordt bezit ook een lift- en sleepcoëfficiënt. De vlakke plaat is een extreem geval van de zogenaamde dunne vleugel profielen (Eng.: Thin foils). Ze worden dun genoemd als de dikte kleiner is dan 8 procent van de koorde. Reeds bij kleine aanvalshoeken treden er turbulenties op. Wanneer de aanvalshoek (bij een dikte gelijk aan 2 procent van de koorde) 9 procent bedraagt, is de lift maximaal. Bij opdrijven van de aanvalshoek valt de lift terug, omdat er zoveel turbulenties aanwezig zijn [Lacor, 2005]. Voor kleine aanvalshoeken (kleiner dan 5°) kan de lift en de sleep geschat worden met formule 4.8 en 4.10. De maximale verhouding voor lift over sleep bedraagt 9.45 bij een aanvalshoek van 9 graden. Door aangroei van planten en dieren, zal de sleepcoëfficiënt toenemen in de tijd. Dit kan hoog oplopen. Hoe vuiler de vleugel wordt, hoe meer de sleep zal afnemen. De maximale verhouding zal echter rond de 9 graden blijven liggen.

Het kennen van het gedrag bij vlakke platen is interessant indien men dubbelzijdige turbines wenst. De aanvalshoek blijft identiek als de stromingszin wijzigt. Dit is weergegeven op figuur 4.5. De turbine zal afhankelijk van de instroomrichting links- en rechtsdraaiend zijn.



Figuur 4.5: Een vlakke plaat: dubbel werkende turbineschoepen.

4.10 Besluiten uit BEMT

4.10.1 Voorbeelden

In bijlage A en B worden er 2 turbines uitgerekend. Een eerste type is van het propeller type met een diameter van 7 meter. Het tweede type is van het openhydro type die in een straalbuis wordt geplaatst. Hierbij bedraagt de diameter 7.5 meter.

De berekeningen gebeuren aan de hand van een rekenblad. Deze waarden zijn in geen geval exacte waarden, maar geven een goede indicatie van de grootteorde. Exacte waarden kunnen immers niet bekomen worden met theorieën. In definitieve ontwerpen zullen er modelproeven moeten gebeuren.

4.10.2 Keuze van de vleugels

Wanneer het vermogen bekeken wordt over de lengte van de vleugel, dan merkt men een verloop als in figuur 4.6. Het is duidelijk dat het verloop regressief daalt ten opzichte van de lineaire bij de aanvang. Dit komt door het effect van de crossflow. Op de tip van de vleugel valt het vermogen terug tot nul. Het is duidelijk dat een hogere vermogenswinst kan verwezenlijkt worden door gebruik te maken van een straalbuis. Hierdoor is er geen crossflow over de vleugels.

Indien er een openhydro turbine wordt gebruikt, dan kan men zien dat dit slechts een gering invloed heeft op het totale vermogen. Stel dat de opening een grootte heeft van 0.3 keer de diameter, dan is er slecht een vermindering van het vermogen van 9 procent omwille van de opening.

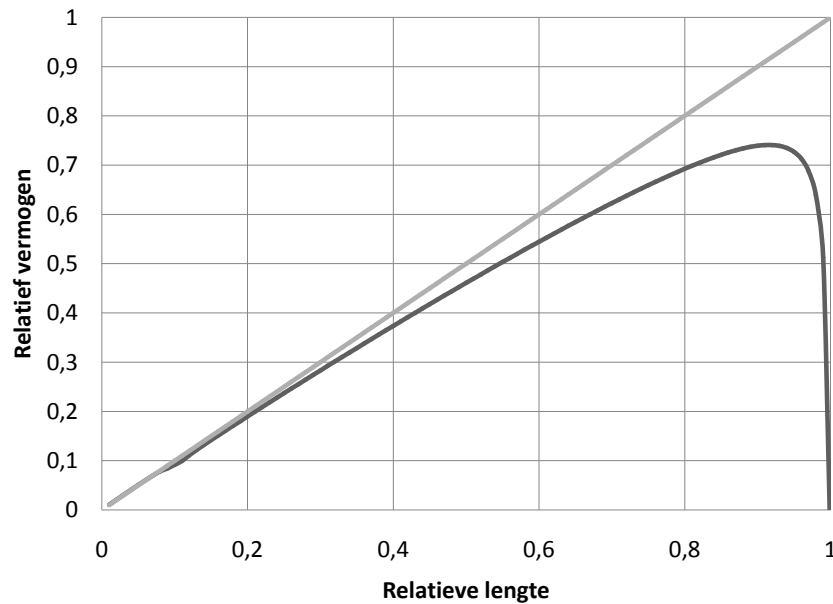
4.10.3 Turbine in gebruik

Uit de BEM theorie kunnen er enkele interessante conclusies getrokken worden. Aan de hand van bovenstaande formules, kan tabel 4.10.3 opgesteld worden.

	TSR ↑	C_d ↑
Vermogen	↑	↓
Torsie	↓	↓
Druk	↑	↑

Tabel 4.4: Resultaten uit de BEM theorie.

Door aangroei, ouderdom en slijtage is er een stijging van C_d . Bij toename van de C_d coëfficiënt gaat het vermogen af nemen. Dit kan deels opgevangen worden indien men pitch controllers toepast.



Figuur 4.6: Vermogen in functie van de lengte van een vleugel. Door crossflow vermindert het vermogen naar de vleugeltip toe.

Naarmate de C_d coëfficiënt toeneemt, en dus de verhouding lift over sleep toeneemt, kan de aanvalshoek aangepast worden om vooralsnog een maximaal vermogen te halen. De aanvalshoek zal toenemen naarmate de C_d toeneemt. Dit volgt uit tabel 4.9.

4.10.4 Propeller of openhydro type

Door gebruik te maken van vlakke platen als vleugels is het mogelijk om de stromingszin te laten omkeren zonder de vleugels bij te stellen. Wanneer deze vleugels nog eens in een buis geplaatst zijn, dan is het rendement vrij hoog.

Wanneer men vleugels met profielen wil plaatsen, kan het rendement hoog liggen (profielen voor optimaal vermogen en met minimale sleep) maar moet er voor gezorgd worden dat ten alle tijde de aanvalshoek optimaal is. Dit kan alleen door zogenaamde pitch controllers te installeren. Dit gaat met een grote kost en onderhoud gepaard. Bovendien is het aantal vleugels zeer beperkt. Bij windmolens zijn dit meestal 3 vleugels, maar bij reeds actieve getijdenmolens zijn 2 vleugels het meest voorkomend. Het voordeel is dat men bij pitch controllers kan spelen met toerentallen en koppels om in alle omstandigheden het maximale rendement te halen.

Een ander aandachtspunt bij turbines van het propellertype, is de crossflow. De crossflow kan de toplaag aanvallen zodat deze groter moet gedimensioneerd worden. Tot op heden is hierover geen literatuur te vinden.

Hoofdstuk 5

Straalbuis

Dit hoofdstuk is gewijd aan de straalbuis. Door de aanwezigheid van de straalbuis wordt er een grotere snelheid opgewekt. Maar ook de golf- en stromingskrachten worden beïnvloed.

5.1 Probleemstelling

Het plaatsen van een straalbuis wekt hogere snelheden op. Volgens de formule ter bepaling van het vermogen van een stroming neemt het vermogen evenredig toe met de derde macht van de snelheid. Dit betekent dat men zou in staat zijn om in ideale gevallen (geen wrijving, geen turbulenties) een oneindig groot vermogen op te wekken. Dit is wanneer men een zeer kleine doorstroom opening heeft waarbij de snelheid zeer groot is.

Fysisch bekeken kan dit uiteraard niet. Er kan geen energie gecreëerd worden. Aangezien vermogen geformuleerd wordt als energie per tijdseenheid, kan het vermogen ook niet verhoogt worden. Het enige wat verhoogt, is de energiedichtheid. Maar dit heeft geen invloed op het vermogen. Ook is het onmogelijk om een groot debiet door een kleine doorstroom opening te jagen. Bij ideale vloeistoffen kan dit verwezenlijkt worden. In praktijk bestaan ideale vloeistoffen uiteraard niet en dus zal de wrijving stijgen bij toenemende snelheid.

5.2 Principe van een straalbuis

Er worden 2 gevallen beschouwd. In één geval is de stroming ideaal. Hierbij worden turbulenties en wrijving buiten beschouwing gelaten. De wet van Bernoulli is geldig. In een tweede geval worden de gevolgen bekeken wanneer de vloeistof niet meer ideaal is.

5.2.1 Ideale stroming

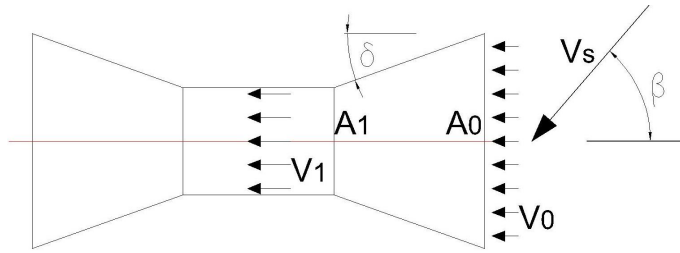
Door het vernauwen van de straalbuis wordt de stroomsnelheid verhoogt. Het ingaande debiet moet hetzelfde zijn als het uitgaande debiet. De continuïteitsvergelijking 5.1 is geldig.

$$v_0 \cdot A_0 = v_1 \cdot A_1 \quad (5.1)$$

Waarbij de factoren worden weergegeven in figuur 5.1. Volgens de algemene vergelijking 5.2 kan het vermogen van een stroming berekend worden. Het vermogen van de stroming in de straalbuis wordt dus

$$P = 0.5\rho \cdot A_1 \cdot v_1^3 \quad (5.2)$$

Aangezien de snelheid vergeven wordt tot de derde macht, zou men kunnen oordelen dat het vermogen stijgt door het plaatsen van een straalbuis. Dit is echter tegen alle natuurwetten in. Door het plaatsen van een stroombuis kan er geen energie gecreëerd worden.



Figuur 5.1: Schets van de straalbus.

Volgens de wet van Bernoulli krijgt men ook drukverschillen. De druk kan in ideale omstandigheden gemakkelijk bepaald worden door de wet van Bernoulli als in vergelijking 5.3.

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = C^{te} \quad (5.3)$$

Het opdrijven van de snelheid in de straalbus zorgt voor een daling van de druk. Indien de druk daalt, daalt ook het vermogen volgens formule 5.4.

$$P = Q\Delta p \quad (5.4)$$

Het drukverschil Δp in de straalbus heeft een grootte van:

$$\Delta p = p_0 - p_1 = 0.5\rho(v_1^2 - v_0^2)$$

Hierdoor treedt er een vermogensdaling op volgens formule 5.4 met grootte:

$$P = 0.5\rho A_1 v_1 (v_1^2 - v_0^2)$$

Naast de stijging van het vermogen door grotere stromingssnelheid, treedt er ook een daling op. Het totaal vermogen is gelijk aan:

$$P = 0.5\rho A_1 v_1^3 - 0.5\rho A_1 v_1 (v_1^2 - v_0^2)$$

Na vereenvoudiging leidt dit tot

$$P = 0.5\rho A_1 v_1 v_0^2$$

Aangezien nog steeds de continuïteitsregel geldig is, kan men ook schrijven:

$$P = 0.5\rho \cdot A_0 \cdot v_0^3$$

Deze uitkomst was te verwachten. Het vermogen door een straalbus te plaatsen kan niet stijgen. Er kan immers geen energie bijgemaakt worden. In ideale stroming is er dus geen energiewinst of verlies. Bij niet-ideale stromingen kan er alleen energieverlies zijn.

5.2.2 Niet-ideale stroming

Bij een niet-ideale stroming wordt er wrijving meegerekend. Het plaatsen van een straalbus heeft de volgende gevolgen.

- Snelheid neemt toe.
- De wrijving neemt (kwadratisch) toe met snelheid.
- Grotere weerstand ten gevolge van doorstroming door nauwere opening.
- Minder doorstroming.

• ...

Indien er teveel weerstand wordt ondervonden in de straalbuis, dan gaat het water niet meer door maar langs de buis stromen. Het is een vergelijkbaar fenomeen als parallelle weerstanden waardoor elektriciteit stroomt. Samen met de turbine, zal de straalbuis een bepaalde weerstand veroorzaken. Indien de weerstand te groot wordt, zal de stroming de weg van de minste weerstand zoeken en dus langsheen de buis stromen.

5.3 Bijkomende gevolgen

Hoewel er geen verhoging is van het vermogen, wordt met het plaatsen van een straalpijp de crossflow over de vleugels verhinderd. Hierdoor is de Betz limiet niet meer geldig en wordt zo het vermogen omhoog gehaald. Naast dit positieve effect op het vermogen is er ook nog het feit dat men kleinere turbines kan gebruiken. De kleinere turbines draaien in een hoger regime en moeten dus voldoende sterk gemaakt worden.

Stel dat de cut-in snelheid identiek blijft, dan is het toch mogelijk om de turbines gedurende langere tijd te laten draaien.

In de figuur 5.1 wordt een straalbuis weergegeven. Het aanstromen van de stroombuis kan geschieden onder verschillende hoeken. Indien de stroming evenwijdig instroomt met de as van de straalbuis, dan zal het volledige aandeel ($v_0 = v_s$) van de stroming door de buis stromen. Indien de stroming niet evenwijdig is, dan zal het aandeel van de stroming zich gedragen als ($v_0 = v_s \cdot \cos\beta$). De stroomlijnen worden afgebogen en zodoende zorgen voor een rechte aanstroom op de vleugels.

5.4 Krachten op een straalbuis

De straalbuis wordt horizontaal in het water geplaatst. De golfkrachten zullen dus anders zijn dan diegene die werken op een verticale paal. In volgende paragraaf wordt verwezen naar de literatuur om de krachten op een rechthoekige cilinder te bepalen.

5.4.1 As evenwijdig met de golfkruinen

De formules van Morison zijn oorspronkelijk geldig voor verticale cilinders. Hierbij wordt enkel rekening gehouden met de horizontale stroming. Bij horizontale cilinders is dit echter niet meer het geval. Hierbij komt er ook een verticale stroomsnelheid. Volgens [Venugopal et al., 2006] worden de golfkrachten op een horizontale cilinder berekend als volgt.

$$F_x = \rho C_{Dx} \frac{D}{2} u \sqrt{u^2 + w^2} + \rho C_{Mx} A \frac{du}{dt} \quad (5.5)$$

$$F_y = \rho C_{Dy} \frac{B}{2} w \sqrt{u^2 + w^2} + \rho C_{My} A \frac{dw}{dt} \quad (5.6)$$

Hierbij is F_x de golfkracht in horizontale richting; F_y de golfkracht in verticale richting; C_{Dx} de sleepcoëfficiënt in horizontale richting; C_{Mx} de inertiecoëfficiënt in horizontale richting; C_{Dy} de sleepcoëfficiënt in verticale richting; C_{My} de inertiecoëfficiënt in verticale richting; D de cilinderdiameter in verticaal vlak; B de cilinderdiameter in horizontaal vlak en A is het oppervlak van de dwarsdoorsnede van de cilinder.

Afhankelijk van de verhouding lengte / diameter, kan een formule voor C_{Mx} en C_{My} opgesteld worden in functie van KC. Voor een verhouding van 1 krijgt men volgens [Venugopal et al., 2006]

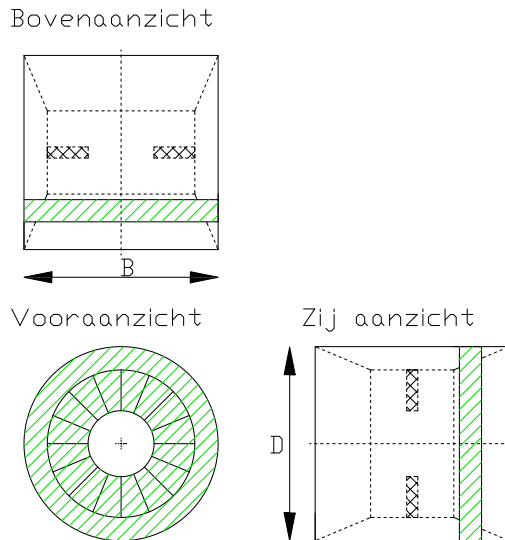
$$C_{Mx} = C_{My} = 2.2 - 0.08 \cdot KC^2$$

Hierbij is KC het Keulegan - Carpenter getal. Het wordt begroot op

$$KC = \frac{U_m T}{D}$$

U_m is de maximale horizontale watersnelheid ter hoogte van het middelpunt van de cilinder. De coëfficiënten C_{D_x} en C_{D_y} zijn eveneens afhankelijk van de stromingssnelheid en liggen in dezelfde grootteorde als de C_D coëfficiënten van Morison (ongeveer 1).

Figuur 5.2 maakt duidelijk hoe F_x en F_y werkzaam zijn. F_x is de grootte van de kracht op het gearceerde gebied van het zijaanzicht. F_y werkt op het gearceerde gebied van het bovenaanzicht. In de thesis is de afmeting D en B hetzelfde, omdat een turbine niet anders kan dan cirkelvormig te zijn.



Figuur 5.2: Aanzichten van een horizontale buis.

Indien de stroming niet loodrecht staat op de as, wordt F_x en F_y vermenigvuldigd met de cosinus van de hoek tussen stromingsrichting en de loodrechte.

5.4.2 As loodrecht op de golfkruinen

Indien de as van de straalbuis loodrecht staat op de golfkruinen, dan kunnen de orbitalen opgewekt door de golven binnendringen in de buis. Bij aanwezigheid van een turbine in de straalbuis en bij het optreden van cyclische golfbelasting, kan de druk hierbij hoog oplopen. Door de traagheid zal de turbine niet in staat zijn om te reageren op korte golfbelastingen. Daardoor zal er een grotere kracht optreden op turbine.

Men zou kunnen stellen dat de wet van impulsbehoud kan toegepast worden. Maar dit is niet exact zo omwille de mogelijkheid dat er toch een lichte doorstroming mogelijk is. De kracht die zal optreden zal afhankelijk zijn van de golfslamming coëfficiënt en zal dus bijna uitsluitend door modelproeven moeten gestaafd worden. Om toch een poging te doen tot berekening van de kracht, kan men het volgende doen.

Indien men de formules van Morison bekijkt voor krachten op een verticale paal (enkel de sleepkracht) en deze vergelijkt met de krachten bepaald door de wet van impulsbehoud, dan merkt men hier ongeveer een factor 2 op. De wet van impulsbehoud heeft uiteraard de grootste kracht. Een

zelfde grootteorde is te vinden bij het bepalen van krachten op een horizontale straalbuis. Tussen de gemodificeerde formules van Morison en de wet van impulsbehoud bestaat een factor van ongeveer 2.

Wanneer er naast de sleepkracht ook een inertiekracht in rekening wordt gebracht, ziet men een factor van 1.95 tussen Morison en de wet van impulsbehoud voor een horizontale straalbuis.

Gevoelsmatig leunt de kracht op de straalbuis bij horizontale belasting hier vrij dicht tegen aan. In wat volgt zal men de factor 2 toepassen voor horizontale golfkrachten veroorzaakt door de golven die de straalbuis binnen treden. Daarom wordt formule 5.7 toegepast.

$$F = 0.5\rho \cdot A \cdot v^2 \quad (5.7)$$

Hierbij is A de oppervlakte van de doorsnede van de straalbuis vermindert met de openingen in de turbine. In figuur 5.2 is dit gearceerd in het vooraanzicht.

Om de coëfficiënten te toetsen op de realiteit zullen modelproeven zeker noodzakelijk zijn.

5.5 Stromingseisen

Hoe kleiner de doorstroomsectie zal worden, hoe hoger de stroomsnelheid maar ook hoe groter de weerstand. Er zal een bepaald optimale verhouding zijn. Dit zal moeten blijken uit modelproeven. De krachten op de vleugels worden ook groter bij het opdrijven van de snelheid. Verder in de thesis wordt een maximaal toelaatbare stroming doorheen de buis van 3 meter per seconde aangenomen.

5.6 Besluit

De formule voor het bepalen van het vermogen van de stroming is slechts toepasbaar indien het een vrije stroming betreft. Het vermogen in een straalbuis kan immers niet toenemen. Men mag niet vergeten dat de druk in de straalbuis aanzienlijk verkleint. Door de drukverlaging kan de formule 5.2 niet meer toegepast worden en moet dit aangepast worden. In niet-ideale gevallen, met wrijving, kan het vermogen alleen maar afnemen door het plaatsen van een straalbuis.

Hoewel een straalbuis geen vermogenswinst heeft, is er toch een voordeel te vinden uit het feit dat crossflow verhinderd wordt. Hierdoor kan het rendement van de turbine sterk toenemen. Eveneens zal de straalbuis ervoor zorgen dat de stroming rechter op de vleugels invalt. Indien de getijdenstroming voornamelijk snelheidscomponenten heeft die 180 graden op elkaar staan (wat in Zeebrugge het geval is) dan betekent dat een straalbuis hier goed bruikbaar is.

Indien de cut-in snelheid van een turbine gelijk blijft, dan kan de turbine gedurende langere tijd operationeel zijn. Immers, bij een lagere ingangssnelheid zal de stroming in de straalbuis voldoende zijn om de turbine aan te drijven. Aangezien er een zekere drukdaling zal zijn, moet er op gelet worden dat er geen cavitatie optreedt. In deze thesis is cavitatie buiten beschouwing gelaten, maar dit zal in een definitief ontwerp wel degelijk een factor zijn om rekening mee te houden.

De straalbuis zorgt ook voor een vermindering van zonlicht op de vleugels. Hierdoor wordt de aangroei verminderd.

Hoofdstuk 6

Modellering van getijden en golven

De karakteristieken van een stroming zijn zeer bepalend bij het bepalen van de energieopbrengst uit getijdenconvertoren. Naast de stroming veroorzaakt door het potentiaalverschil van de getijden, is er nog een stroming veroorzaakt door golven aanwezig. Golven worden gekenmerkt door hun grote onvoorspelbaarheid. Dit in tegenstelling tot de exact gekende getijdenstroming. Het superponeren van beide stromingen kan en zal leiden tot een onvoorspelbare stroming. De analyse van het probleem is gebaseerd op kansberekening. Dit kan een serieuze streep door de rekening zijn van getijdenconvertoren. Het grote voordeel, een voorspelbaar karakter, kan vervallen en zal misschien niet meer rendabel zijn.

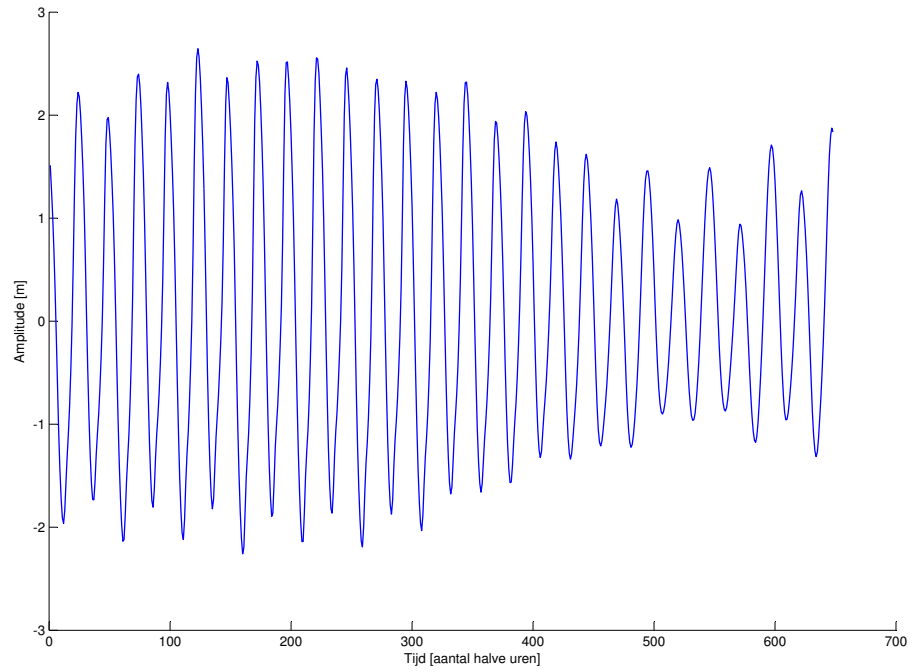
De getijdenconvertoren zullen geplaatst worden waar de stroming het grootste is. In wat volgt, wordt ervan uitgegaan dat enkel de getijdenstroming plaatselijk bepaald is. De golven worden over het gehele gebied als hetzelfde beschouwd. De beste plaats zal dus zijn daar waar de stroming van de getijden het sterkste is. Het is te zeggen, waar er het meeste energie kan onttrokken worden.

6.1 Getijden

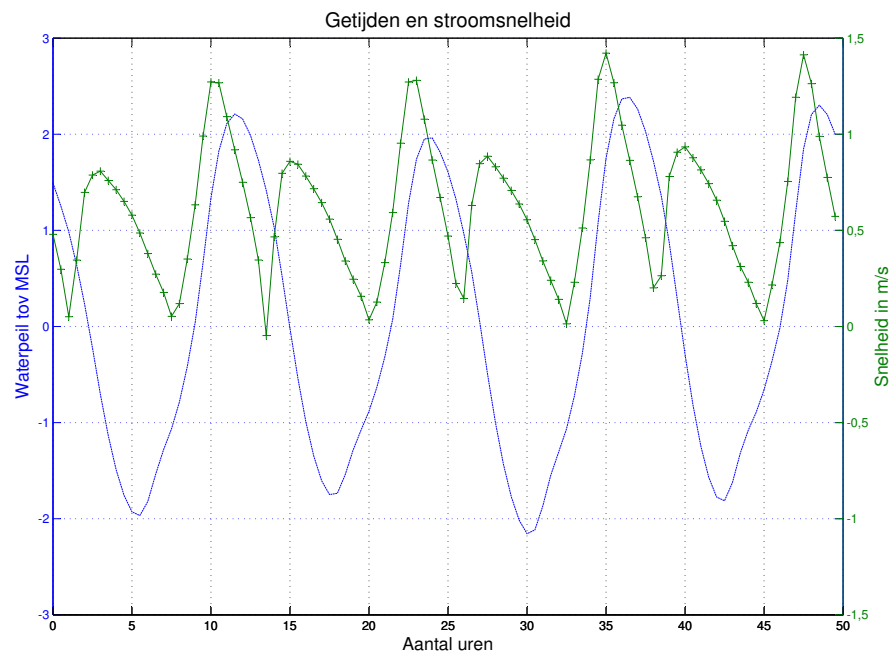
Getijden zijn periodieke veranderingen van het waterpeil in de tijd, zoals te zien is in figuur 6.1. Door het variërende waterpeil ontstaan er stromingen. Getijden ontstaan door aantrekkingskracht van de maan en de zon. Daardoor zijn getijden uiterst voorspelbaar. De cycli van de hemellichamen zijn duidelijk herkenbaar in periodes. Er bestaan halfdagelijkse en dagelijkse, halfmaandelijke en maandelijke, halfjaarlijkse, ... cycli. In figuur 6.1 wordt een tijdsperiode van 16 dagen beschouwd. Dit komt overeen met één cyclus doottij - springtij. Variaties met een periode groter dan 16 dagen zijn buiten beschouwing gelaten. Deze hebben echter een zeer kleine invloed op de amplitude van het getijde. Naast de variatie in waterpeil is er ook een variatie in stroomsnelheid te merken. Figuur 6.2 geeft de stroomsnelheid weer naast de waterpeil variatie in een bepaalde locatie weer. Gebaseerd op deze snelheden zal er een energieopbrengst kunnen berekend worden.

De stroming in de buurt van Zeebrugge is hoger dan in de rest van de Noordzee, hoewel dit nog vrij beperkt is. Over een groter gebied kan men de voorkomingsfrequenties bepalen zoals weergegeven in figuur figuur 6.3. Men ziet duidelijk in figuur 6.3 dat indien de cut-in snelheid van de TEC op ongeveer 0.7 meter per seconde ligt, dat de TEC gedurende ongeveer 21 procent van de tijd werkzaam is. Let wel dat figuur 6.3 een uitmiddeling weergeeft over een groter gebied in de omgeving van Zeebrugge. Plaatselijk zijn kleinere zones met hogere snelheden mogelijk.

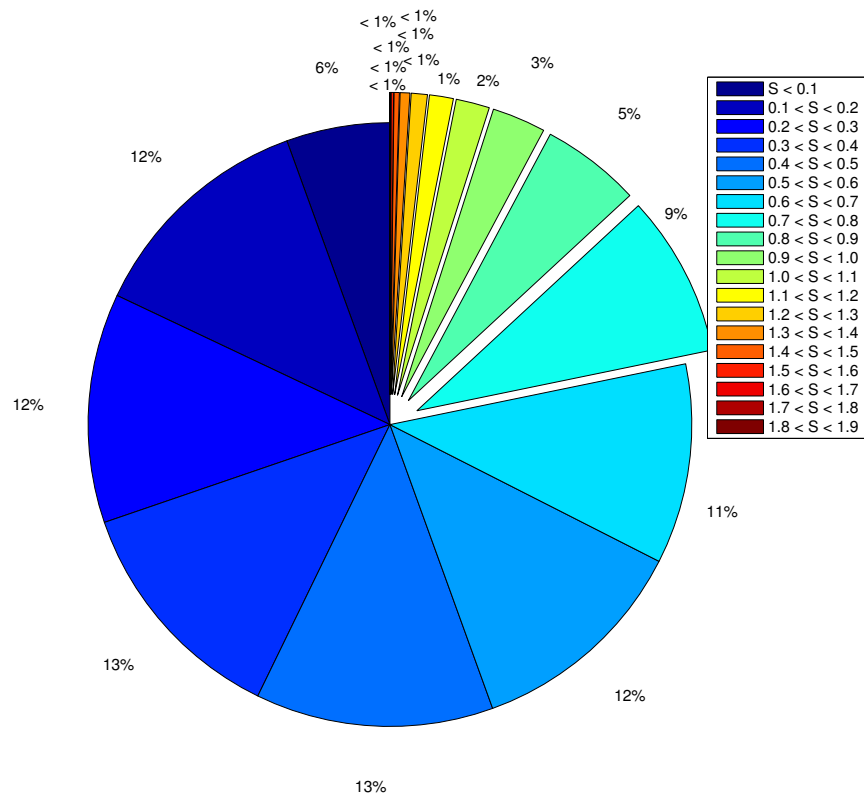
Het MSL wordt begroot op 12 meter boven de bodem. In het referentiestelsel van GLLWS, bedraagt het MSL 2.44 meter. Het hoogwater bedraagt 5.085 meter en het laagwater 0.182 meter. Deze waarden zijn bekomen met het analytische model [Mathys, 2008a].



Figuur 6.1: De amplitude van het getijde in Zeebrugge over een periode van 16 dagen. Gebaseerd op een analytisch model [Mathys, 2008a].



Figuur 6.2: Het waterpeil en de stroomsnelheid (uitgemiddeld over de diepte) in functie van de tijd op een bepaalde locatie.



Figuur 6.3: De voorkomensfrequenties van de stroming. De zone is de volledige zone in de nabije omgeving van Zeebrugge.

6.2 Golven

Naast getijden zorgen ook golven voor een stroming. De horizontale stroming hierdoor opgewekt kan van een grotere grootteorde zijn dan getijdenstroming. Bovendien varieert de stroming in cycli. De periode van een cyclus is de periode van een golf. Zo krijgt men, volgens de lineaire golftheorie, figuur 6.4.

6.2.1 De lineaire golftheorie

De lineaire golftheorie is gebaseerd op de potentiaalstroming. Ze wordt opgelost met behulp van de stelling van Laplace. Om de vergelijking te kunnen oplossen, moeten enkele veronderstellingen aangenomen worden. De veronderstellingen zijn te vinden in [CEM, 2006] of [Troch, 2008]. Men krijgt het snelheidsveld \vec{V}

$$\vec{V} = \nabla\varphi$$

met

$$u(x, z, t) = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}$$

$$w(x, z, t) = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}$$

Indien irrotationaliteit geldt, wordt de Laplace vergelijking omgevormd tot:

$$\nabla(\nabla\varphi) = \Delta\varphi = 0$$

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 0$$

Verdere oplossing is zoals gegeven in [CEM, 2006] en [Troch, 2008]. Zo bekomt men de vergelijkingen voor de horizontale en de verticale snelheden, respectievelijk u en w (Zie figuur 6.4).

$$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh(2\pi(z+d)/L)}{\cosh(2\pi d/L)} \cos\theta \quad (6.1)$$

$$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh(2\pi(z+d)/L)}{\cosh(2\pi d/L)} \sin\theta \quad (6.2)$$

Het snelheidsprofiel veroorzaakt door de golven is afhankelijk van de golfhoogte, de periode en de waterdiepte. De grootte van de snelheidsvectoren is afhankelijk van de tijd en van de plaats. In ondiepere wateren zullen de waterpartikels zich verplaatsen als de links figuur 6.5. Bij diep water, verplaatst een waterpartikel zich als de rechtse figuur 6.5. Naast de onvoorspelbaarheid van de grootte van de golven, is er nog de onzekerheid van de richting. De richting van de golven is meetbaar. Zo kan men golven opdelen in bepaalde zones zoals in figuur 6.6.

6.2.2 Tweede orde theorieën

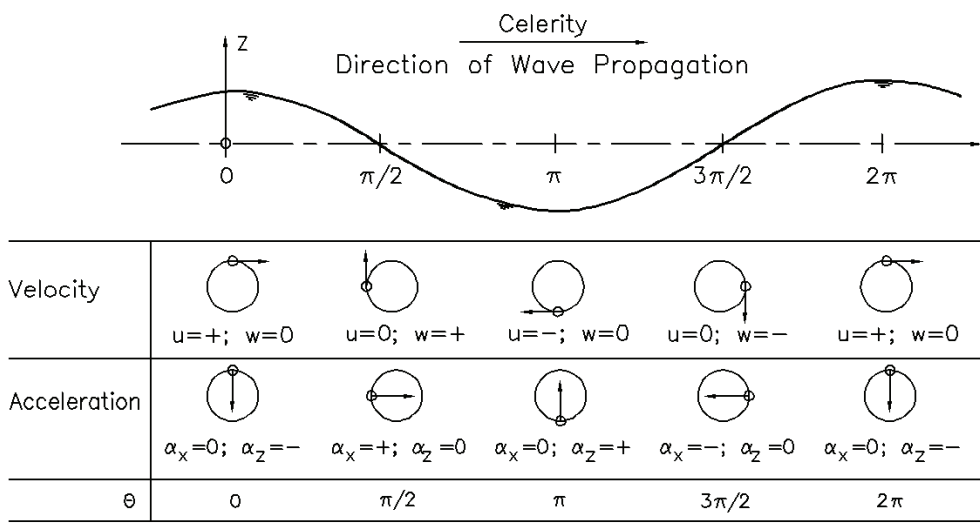
Lineaire golven komen in praktijk niet voor. De theorie van de lineaire golf is opgesteld aan de hand van enkele veronderstellingen. In praktijk gaan golven een niet-lineariteit vertonen, daarom kunnen de vergelijkingen 6.1 en 6.2 aangepast worden.

$$u = u_1 \cos\theta + \varepsilon u_2 \cos(2\theta) + \dots \quad (6.3)$$

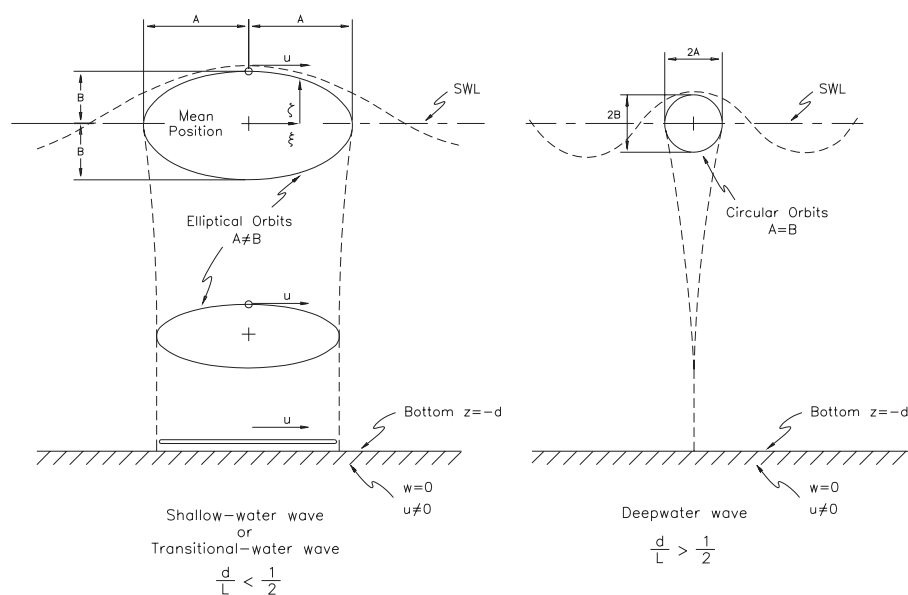
$$w = w_1 \sin\theta + \varepsilon w_2 \sin(2\theta) + \dots \quad (6.4)$$

Naarmate men meer termen beschouwt, spreekt men van de tweede, derde, ... orde theorie. Indien men de tweede orde theorie beschouwt, dan worden:

$$u_1 = \frac{H}{2} \frac{gk}{\omega} \frac{\cosh(k(z+d))}{\cosh(kd)}$$



Figuur 6.4: De snelheidsvectoren bij de lineaire golftheorie volgens [CEM, 2006].



Figuur 6.5: Verplaatsing van een waterpartikel in ondiep (links) en diep (rechts) water volgens [CEM, 2006].

$$u_2 = \frac{3}{4} \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh(2k(z+d))}{\sinh^4(kd)}$$

$$w_1 = \frac{H}{2} \frac{gk}{\omega} \frac{\sinh(k(z+d))}{\cosh(kd)}$$

$$w_2 = \frac{3}{4} \frac{H}{2} \omega \frac{\sinh(2k(z+d))}{\sinh^4(kd)}$$

En

$$\varepsilon_i = ka_i$$

$$a_1 = \frac{H}{2}$$

$$a_2 = \frac{a_1}{4} \frac{\cosh(kd)}{\sinh^3(kd)} (2 + \cosh(2kd))$$

6.2.3 Hogere orde theorieën

Hogere orde theorieën worden gebruikt om een nauwkeuriger beeld te krijgen van de exacte golven in ondiepere wateren. Hiervoor is het aangeraden software pakketten te gebruiken. Het verschil tussen tweede orde en hogere orde theorieën is niet meer danig groot.

6.2.4 Golfperiode

Naast de golfhoogte is ook de golfperiode een parameter ter bepaling van de stroming veroorzaakt door golven. Hoewel golfhoogte en golfperiode geen rechtstreekse betrekking hebben op elkaar, is in praktijk merkbaar dat met hogere golfhoogtes hogere perioden overeen stemmen. Dit is te zien in tabel 6.1 die gegevens bevat van in situ metingen op de Bol van Heist.

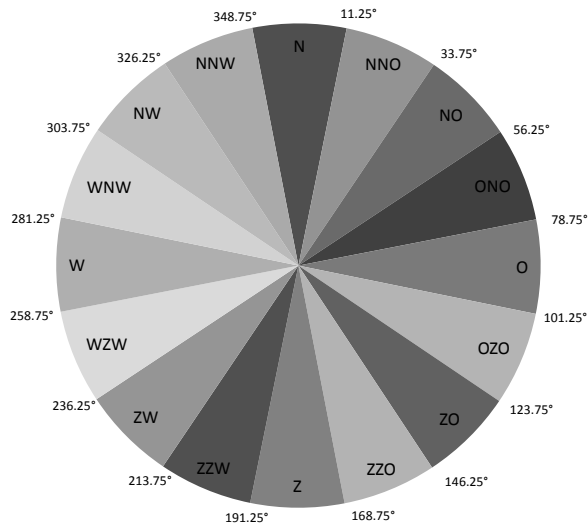
	2.5-3.5 s	3.5-4.5 s	4.5-5.5 s	5.5-6.5 s	6.5-7.5 s	Totaal
0.00-0.25 m	0.06	0.13	0.09			0.28
0.25-0.50 m	0.39	0.47	0.14	0.03		1.03
0.50-1.00 m	0.21	0.93	0.31	0.06		1.51
1.00-1.50 m		0.22	0.25	0.05	0.01	0.53
1.50-2.00 m		0.02	0.13	0.07	0.01	0.23
2.00-2.50 m			0.02	0.06	0.01	0.09
2.50-3.00 m				0.01	0.01	0.02
Totaal	0.66	1.77	0.94	0.28	0.04	3.69

Tabel 6.1: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het Noorden volgens [MUMM, 2008a].

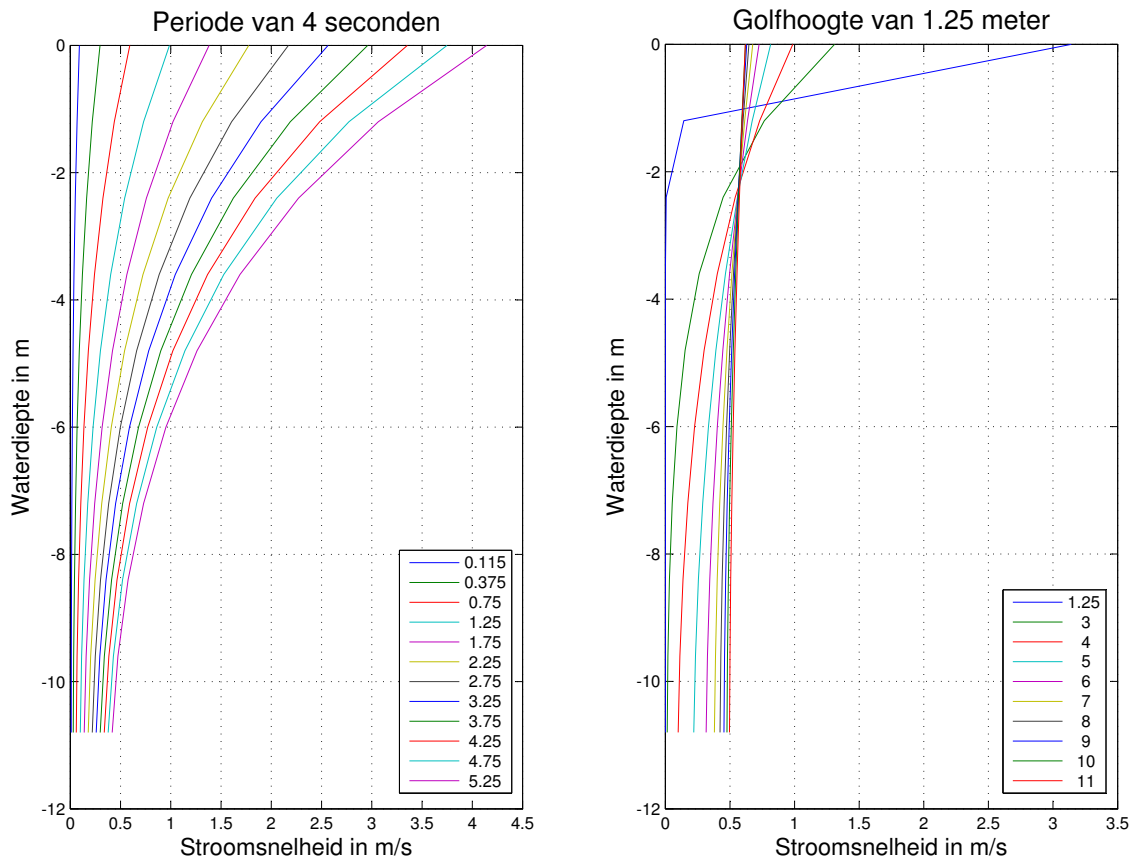
Tabellen van voorkomensfrequenties voor elke windrichting zijn te vinden in bijlage C.

Het is duidelijk dat de periode ook een stochastisch verschijnsel is. Samen met de variërende golfhoogte en de variërende richting, vormt dit een oneindigheid aan mogelijkheden. Echter, elke mogelijkheid zal getypeerd worden door een voorkomensfrequentie. In tabel 6.1 is duidelijk te zien dat golven het frequentst voorkomen met periodes tussen de 3.5 en de 5.5 seconden. In 74 procent van de gevallen ligt de periode tussen 3.5 en 5.5 seconden. In respectievelijk 18 en 8 procent is de periode kleiner en groter.

Dat de periode en golfhoogte van een golf een grote invloed heeft op de stroomsnelheid, is te zien in figuur 6.7. Voor een golf met golfhoogte 1.25 meter (de klasse van 1.00 tot 1.50 meter) en met een periode van 4 seconden (de klasse van 3.5 tot 4.5 seconden) wordt de stroomsnelheid aan de SWL al bijna 1 meter per seconde. In de figuur is een maximale stroming weergegeven. Door de cyclische



Figuur 6.6: De windrichting vanwaar golven kunnen optreden, onderverdeeld in 16 richtingen. Nul graden komt overeen met het noorden.



Figuur 6.7: Een dwarsprofiel van de stroming opgewekt door (links) eenzelfde periode en variërende golfhoogte en (rechts) eenzelfde golfhoogte met variërende golfperiode. Dit is gebaseerd op de tweede orde golftheorie en op het ogenblik dat de horizontale stroomsnelheid maximaal is, dus $\cos(\omega t - kx)$ gelijk aan 1.

beweging van de golven, zal in één periode de stroomsnelheid wijzigen. Dit voor zowel wat grootte als wat voor richting betreft. Figuur 6.7 is het dwarsprofiel van de stroming onder de golfkruin. In dat geval zijn de verticale snelheden nul.

Het is duidelijk dat hoe groter de golf is, hoe groter de horizontale stroming wordt. Een grotere periode zorgt ervoor dat de invloedsdiepte van de golf toeneemt.

6.2.5 Keuze van een golftheorie

De keuze van een golftheorie hangt af van de diepte, de golfhoogte en de golfperiode. Om een juiste keuze te maken, moeten enkele parameters [SPM, 1984] berekend worden.

$$\frac{H}{gT^2}$$

$$\frac{d}{gT^2}$$

De keuze van de golftheorie moet gemaakt worden voor elke golfhoogte en bijhorende golfperiode. Dit wil zeggen dat in principe voor elke voorkomende golf een andere theorie zou kunnen gebruikt worden. De waterdiepte bedraagt in alle gevallen 12 meter. De golfperiode wordt gevonden vanuit

H [m]	T [s]	Golftheorie
0.125	4.08	Lineaire
0.375	3.98	2de orde
0.75	4.14	2de orde
1.25	4.61	2de orde
1.75	5.14	3de orde
2.25	5.79	3de orde

Tabel 6.2: Toepasbaarheid van een theorie bij bepaalde golfkarakteristieken.

tabel C door per golfhoogte een gewogen gemiddelde te bereken. De grafiek vanuit de Shore Protection Manual [SPM, 1984] wordt gebruikt voor het schatten van de golftheorie. In tabel 6.2 ziet men dat voor grotere golven hogere theorieën moeten gebruikt worden. Maar men kan ervan uitgaan dat het toepassen van een tweede orde theorie voldoende is. Het verschil in de stromingen tussen de theorieën is miniem, zoals te zien is in figuur 6.8.

6.2.6 Stroming door golven

In het bovenste deel van tabel 6.3 is de voorkomingsfrequentie gegeven van golven per richting. De richtingen met bijhorende naam worden gegeven in figuur 6.6. In de tabel wordt er een klasse van golfhoogtes beschreven door de mediaan van de klasse. De klassen zijn [0, 0.25], [0.25, 0.50], [0.50, 1.00], [1.00, 1.50], ... In het onderste deel van de tabel wordt de gemiddelde horizontale stroomsnelheid gegeven. Dit is uitgemiddeld over de diepte. De horizontale snelheid wordt berekend aan de hand van de tweede orde theorie. Als periode wordt er een gewogen gemiddelde beschouwd per richting en per golfhoogte. De waarden worden teruggevonden in de dataset in bijlage C.

Bijvoorbeeld voor tabel 6.1 wordt er voor golven komende uit het noorden en met een golfhoogte van 1.75 meter een gewogen gemiddelde periode gevonden van 5.304 seconden. Overeenkomstig wordt een horizontale snelheid gevonden van 0.607 meter per seconde. In figuur 6.9 wordt de horizontale stroming met behulp van de tweede orde theorie gegeven voor enerzijds golven met periode 5 en variabele golfhoogte, en anderzijds voor golven met hoogte 1.75 meter en variabele periode.

In de rechtse kolom van tabel 6.3 is de som gegeven van alle richtingen. Hierbij kan men zien dat ongeveer 70 procent van de golven een golfhoogte tussen de 0.25 en 1.00 meter heeft. Zo'n 97.5 procent

van de golven is kleiner dan 2 meter. Dit wil zeggen dat gedurende zeker 97.5 procent van de tijd de gemiddelde horizontale stroomsnelheid lager ligt dan 0.707 meter per seconde. Het getal 0.707 wordt bekomen door het gemiddelde tussen 0.600 (bij golfhoogte 1.75 meter) en 0.814 (bij golfhoogte 2.25 meter) te nemen.

De Bol van Heist ligt enkele kilometers ten noorden van de oostdam van Zeebrugge. Wegens de beperkte strijklengte, zullen veel minder grote golven optreden tussen oostelijke en zuidwestelijke richting. Dit is ook merkbaar in tabel 6.3. De aanwezigheid van relatief veel kleinere golven kan verklaard worden door de reflectie van de kust. Op plaatsen in de nabije omgeving van Zeebrugge zal de strijklengte nog beperkter zijn.

6.2.7 Ontwerpgolf

De distributie van het golfklimaat is nuttig voor het bepalen van extreme golven. Die extreme golven zijn noodzakelijk om de sterkte van de structuur te bepalen.

Golfhoogte

De distributie van de golfhoogte wordt weergegeven in figuur 6.10. Dit is bekomen uit de dataset van tabel C. Voor overschrijdingsfrequenties kleiner dan 0.01 wordt een theoretische Weibull distributie gebruikt. Deze distributie is niet 100 procent bruikbaar bij het berekenen van de structuur. Het nadeel van deze gegevens is dat zij een set zijn van een volledige meting. Bij Goda [Goda, 2000] wordt dit de 'Total Sample Method' genoemd. Het gebruik van een total sample methode is af te raden volgens [van Vledder et al., 1993] omdat zij zouden leiden tot een te grote ontwerpgolf. Dit omdat er een grote correlatie bestaat tussen de metingen onderling. Daarom zijn die gegevens niet bruikbaar voor het bepalen van de maximale golfhoogte in een ontwerpstorm.

Grafiek 6.11 heeft de significante golfhoogte weer in functie van de voorkomingsfrequentie. Hieruit kan er wel een ontwerpgolf berekend worden. Een ontwerpstorm is niet gekend en daarom wordt een algemene duur van 6 uur aangenomen. Voor de retourperiode wordt 100 jaar genomen. In [De Wolf et al., 1994] en [Zaajer, 2003] wordt er respectievelijk een retourperiode van 150 en 50 jaar beschouwd. Daarom lijkt een retourperiode van 100 jaar aanvaardbaar. Dit levert een overschrijdingsfrequentie van ongeveer $6.85 \cdot 10^{-4}$ op. Volgens de Coastal Engineering Manual [CEM, 2006] is een golf in een storm met golfhoogte H_{max} gekenmerkt door de significante golfhoogte H_S met 1.87 te vermenigvuldigen ((indien de golfverdeling een Rayleigh distributie beschrijft). De maximale golf is dan $1.87 \cdot 4.75$ of ongeveer 8.9 meter. Het is duidelijk dat de distributie nogal verschillend zijn over de jaren heen. Zo zou men bijvoorbeeld voor het jaar 1981 een significante golfhoogte hebben van 5.25 meter. De maximale golf is dan 9.8 meter. Om veilig te rekenen, wordt overgegaan op een ontwerpgolf van 10 meter.

Indien de keuze gemaakt wordt om te ontwerpen op $H_{1\%}$ dan bedraagt de ontwerpgolf ongeveer 9 meter. De golfhoogte $H_{1\%}$ wordt bekomen door H_S te vermenigvuldigen met 1.67 (indien de golfverdeling een Rayleigh distributie beschrijft).

Golfperiode

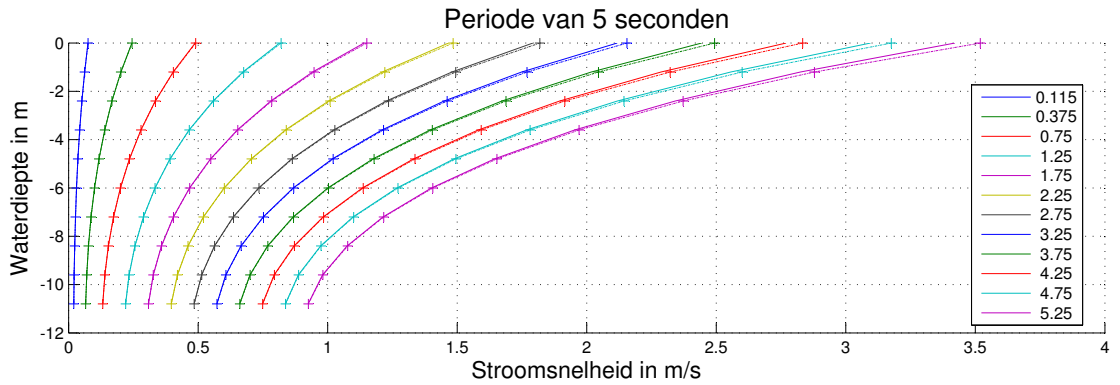
Wanneer men de golfhoogte uitzet in functie van de golfperiode, dan merkt men dat bij grote golven geen kleine periodes aanwezig zijn. In figuur 6.12 ziet men dat bij bijvoorbeeld golven met hoogte 2.75 meter een periode bezitten van 5 tot 7 seconden. Hoe groter de cirkel, hoe groter het voorkomen is. Men ziet hier gemakkelijk dat golven van 0.75 meter en periode 4 seconden het meeste voorkomen. Voor een ontwerpgolf van 10 meter, is het dus niet logisch om een kleinere golfperiode te kiezen. Er zijn geen metingen van langere perioden dan 8 seconden. Het lijkt dan ook logisch om 8 seconden te kiezen.

	N	NNO	NO	ONO	O	OZO	ZO	ZZO	Z	ZZW	ZW	WZW	W	WNW	NW	NNW	Tot.
0.125	0.28	0.43	0.60	0.61	0.64	0.81	1.04	1.03	0.84	0.46	0.38	0.29	0.27	0.16	0.14	0.14	8.12
0.375	1.03	1.71	2.08	2.10	1.97	2.13	2.22	3.00	4.20	2.92	2.27	1.89	1.44	0.93	0.76	0.69	31.34
0.75	1.51	2.66	2.45	2.57	1.69	0.79	0.39	0.88	3.75	5.50	5.21	4.30	2.35	1.70	1.39	1.25	38.39
1.25	0.53	0.96	0.77	0.70	0.29	0.05	0.03	0.06	0.36	1.38	2.64	2.65	1.33	1.20	0.92	0.72	14.59
1.75	0.23	0.26	0.26	0.11	0.02		0.01		0.03	0.16	0.82	0.99	0.67	0.64	0.51	0.34	5.05
2.25	0.09	0.11	0.07	0.01							0.14	0.26	0.28	0.33	0.37	0.21	1.87
2.75	0.02	0.02									0.01	0.03	0.07	0.14	0.15	0.07	0.51
3.25														0.01	0.03	0.01	0.05
3.75																	
Tot.	3.69	6.15	6.23	6.10	4.61	3.78	3.69	4.97	9.18	10.42	11.47	10.41	6.41	5.11	4.27	3.43	99.92
	Gem.																
0.125	0.038	0.037	0.037	0.037	0.037	0.038	0.038	0.037	0.038	0.037	0.037	0.038	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037
0.375	0.108	0.109	0.11	0.111	0.111	0.112	0.113	0.11	0.11	0.111	0.111	0.11	0.109	0.109	0.111	0.111	0.110
0.75	0.226	0.227	0.227	0.226	0.223	0.232	0.24	0.221	0.221	0.225	0.225	0.225	0.228	0.231	0.231	0.233	0.228
1.25	0.406	0.409	0.401	0.4	0.402	0.421	0.436	0.37	0.382	0.392	0.397	0.398	0.405	0.41	0.413	0.412	0.403
1.75	0.607	0.618	0.608	0.601	0.62	0.593			0.586	0.572	0.575	0.585	0.599	0.61	0.615	0.612	0.600
2.25	0.821	0.831	0.835	0.831							0.758	0.787	0.815	0.824	0.821	0.819	0.814
2.75	1.04	1.04									0.931	0.988	1.02	1.02	1.04	1.05	1.016
3.25														1.2	1.26	1.27	1.243
3.75																	

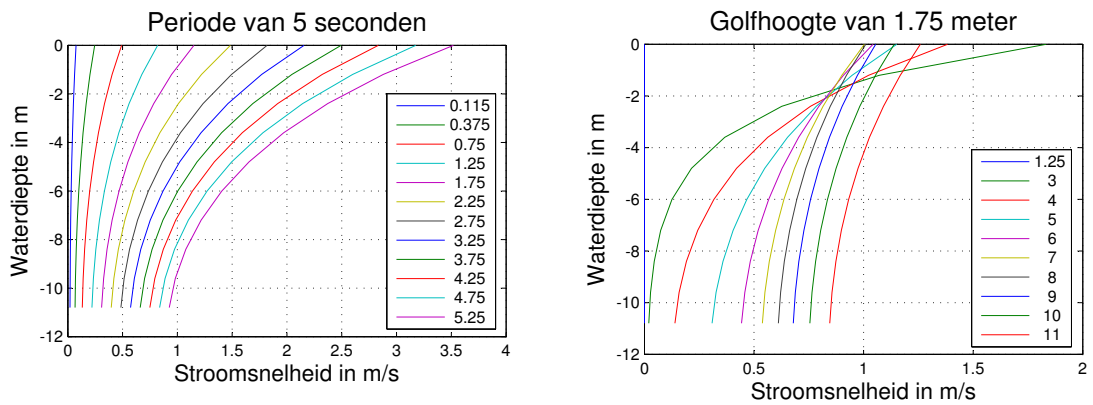
Tabel 6.3: Voorkomensfrequenties van golven (Bol van Heist) in functie van golfhoopte en per windrichting. Overeenkomstige maximale stroomsnelheden (in meter per seconde) zijn uitgemiddeld over de diepte. De periode is een gewogen gemiddelde bekomen uit de dataset van de Bol van Heist (Zie bijlage C).

Voorkomensrichting

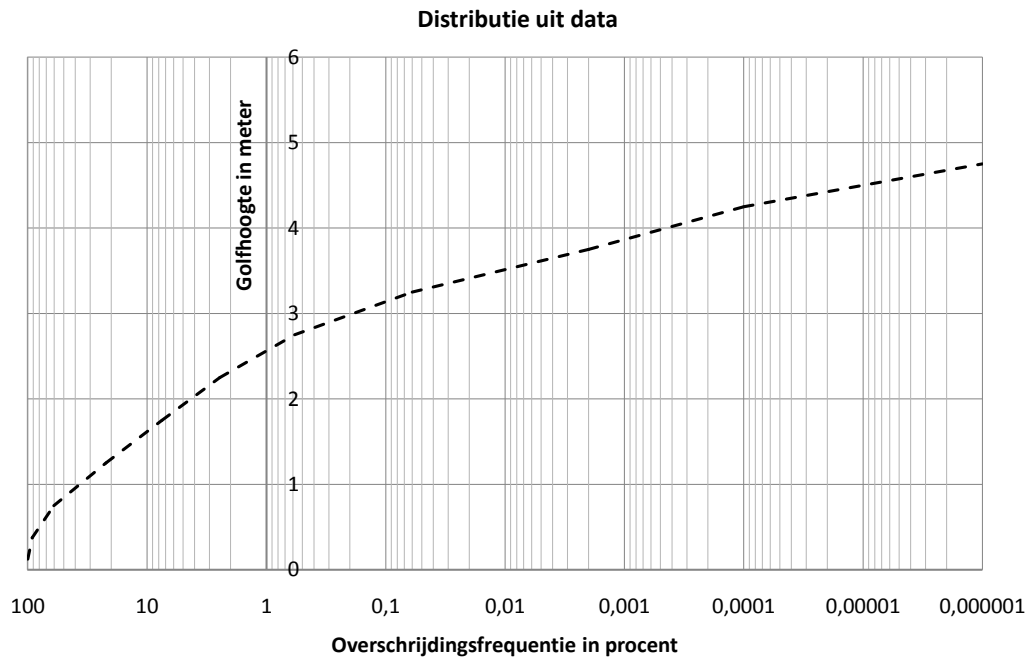
Voor het bepalen van golfrichting en met bijhorende hoogten in de omgeving van Zeebrugge is de Bol van Heist in feite niet erg geschikt. Op de Bol van Heist zullen golven gemeten worden in richtingen waarin dit in Zeebrugge niet kan. In Zeebrugge is het onmogelijk dat een ontwerp golf uit bijvoorbeeld zuidelijke richting komt. De beperkte strijklengte zorgt hiervoor. Er wordt aangenomen dat de ontwerp golf kan optreden van west zuidwestelijke richting (247.5 graden op figuur 6.6) tot oostelijke richting (90 graden op figuur 6.6). Dit is evenwijdig met de Belgische kust.



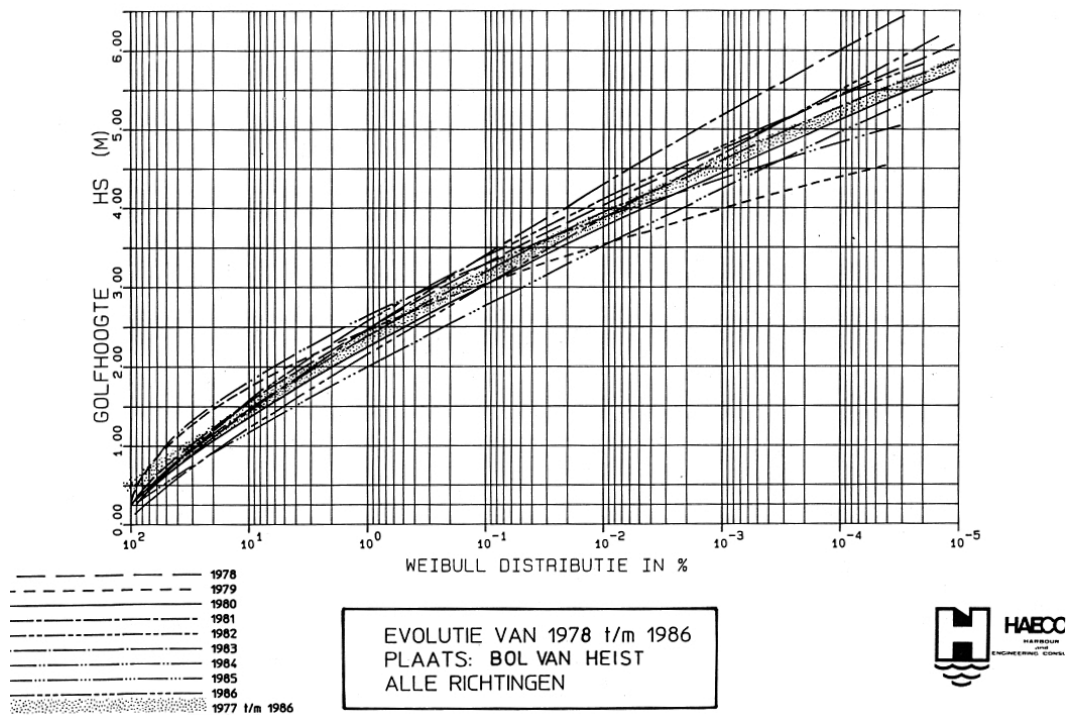
Figuur 6.8: Een dwarsprofiel van de stroming berekend met de (-+-) tweede orde theorie en met de (—) derde orde theorie.



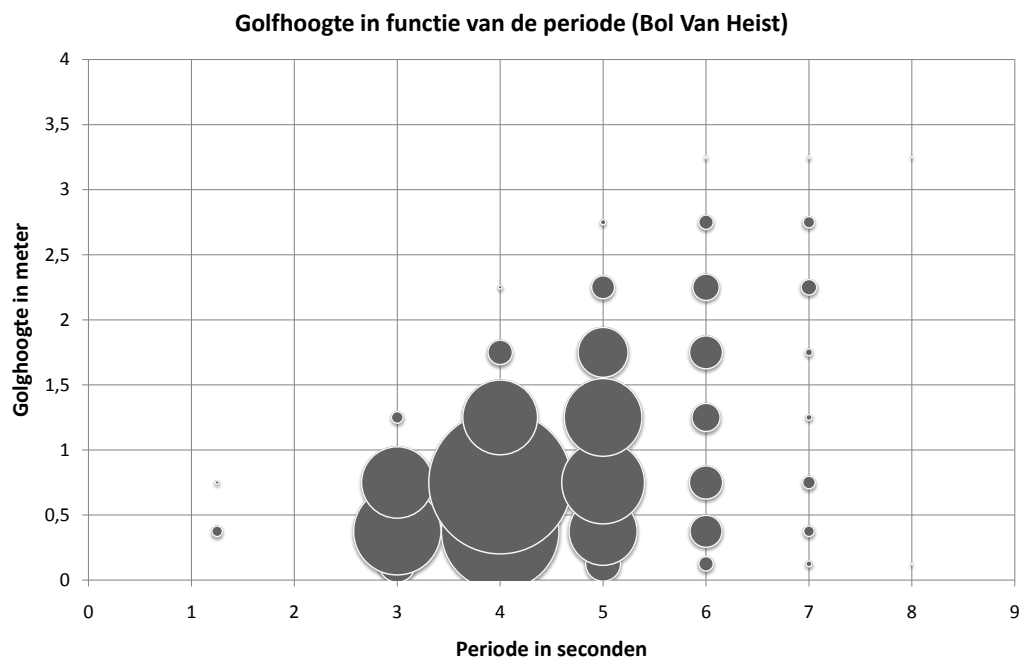
Figuur 6.9: Dwarsprofiel van de horizontale stromingssnelheid berekend met de tweede orde theorie bij variabele hoogte en periode. Het dwarsprofiel beschrijft enkel de maximale stroming gedurende 1 golfperiode. De gemiddelde stroomsnelheid van de golf (1.75 meter hoogte, periode 5.304 seconden) bedraagt 0.607 m/s.



Figuur 6.10: De distributiecurve van golven uit alle richtingen met dataset C.



Figuur 6.11: De distributiecurve van golven uit alle richtingen [De Rouck, 2008c].



Figuur 6.12: De golghoogte in functie van de golfperiode voor golven gemeten op de Bol van Heist.

6.3 De volledige zone Zeebrugge

Er wordt een analytisch model [Mathys, 2008a] gebruikt voor het bepalen van de stroming in de buurt van Zeebrugge. Het model zal gebruikt worden voor het bepalen van de meest gunstige plaatsen. Op sommige plaatsen, dicht tegen de kust, vertoont het model onnauwkeurigheden. Deze resultaten moeten dus weggefilterd worden. Het model beschrijft een getijdenstroming over 16 volledige dagen. Dit wil zeggen dat er één cyclus dood en springtij beschouwd wordt. Met elk waterpeil komt een stroming overeen. De voorkomingsfrequentie van een bepaalde stroming op elk punt wordt geven in figuur 6.18.

In onderstaande figuren wordt er per punt telkens uitgemiddeld over de diepte. Een exacte berekening voor een bepaalde locatie wordt uitvoeriger besproken in hoofdstukken 8, 9 en 10.

6.3.1 Sommatie van de getijdenstroming

De sommatie van de stromingsvectoren levert een beeld als in figuur 6.13. Indien de sommatie hoger ligt dan zal ook de getijdenstroming op die plaatsen hoger liggen. Er is echter geen rekening gehouden met de richting van de stroming, omdat de sommatie gebeurt met absolute waarden. Boven de oostelijke dam is er een betrekkelijk groot gebied waar er een grote som is van stromingsvectoren. Aan de westelijke dam is er een kleine zone net naast de vaargeul die kan dienst doen.

6.3.2 Maximale opbrengst

Het vermogen van een stroming staat in verband met de stroomsnelheid tot de derde. Onder een bepaalde snelheid echter, is de turbine niet in staat om vermogen te onttrekken aan de stroming. Dit wordt de cut-in snelheid genoemd. Indien men gebruik maakt van een straalbuis, is het mogelijk om bij een kleinere stroomsnelheid reeds vermogen te leveren. In figuur 6.14 wordt de sommatie van de snelheid tot de derde over een periode van 16 dagen weergegeven. In formule vorm wordt dit:

$$\sum v^3 \quad \forall v \geq v_{cut-in}$$

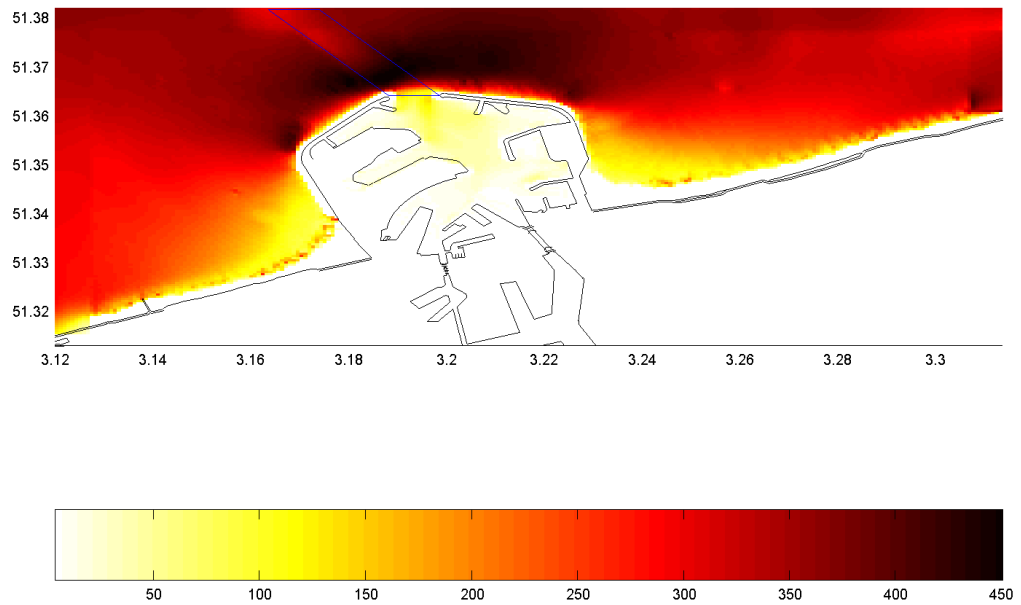
In figuur 6.14 bedraagt de cut-in snelheid 0.7 m/s. In figuur 6.15 bedraagt de cut-in snelheid 0.4 m/s. Het is duidelijk dat in beide gevallen dezelfde interessante gebieden naar voor komen.

6.3.3 Maximale getijdenstroming

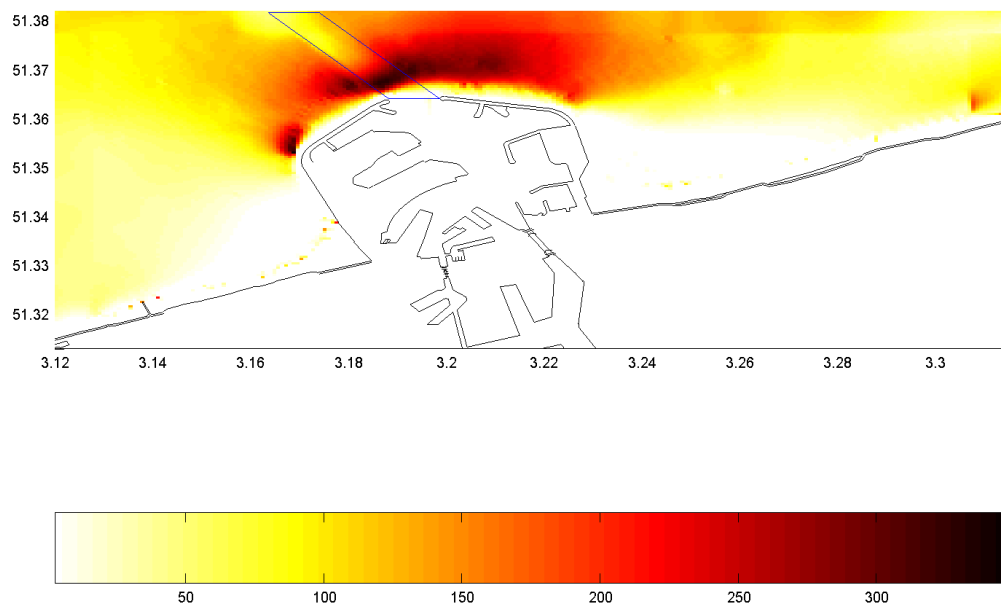
In figuur 6.16 wordt gekeken welke de maximale getijdenstroming is per punt. De punten met een hoge getijdenstroming zijn vanzelfsprekend interessanter. Maar dit is uiteraard niet het enige criteria. Het zou immers mogelijk zijn dat een bepaalde grote snelheid slechts 1 keer optreedt en dat de overige snelheden laag liggen. Hoewel men in figuur 6.16 merkt dat ongeveer dezelfde gebieden interessant blijven.

6.3.4 Gemiddelde getijdenstroming

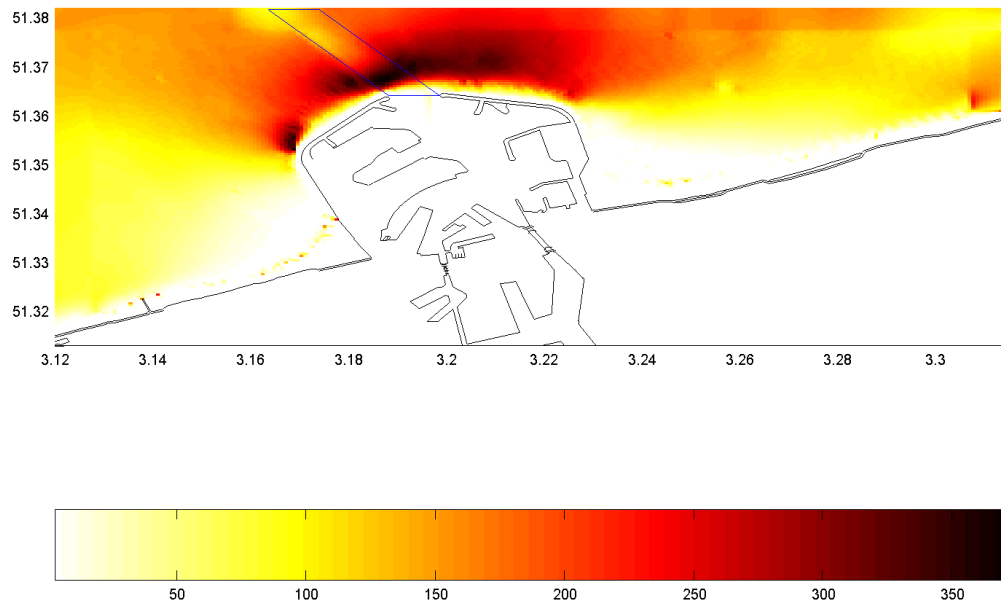
Figuur 6.17 heeft aan hoe de resultante ligt indien men alle stroming vectorieel optelt. Wanneer de stromingsroos in een bepaald punt een grote puntsymmetrie vertoont ten opzichte van de oorsprong, dan nadert de vectoriële sommatie in dat punt naar nul. Indien er een grote waarde gevonden wordt, dan wil het zeggen dat de stroming vooral een grote invloed zal hebben in een bepaalde richting. In de figuur is duidelijk te zien dat voor de kust van Knokke een sterke variatie aan stroomrichtingen heerst. Eenzelfde fenomeen is de zien ten westen van de haven en in de haven zelf. Het is logisch te verklaren omdat de strekdammen van de haven een sterke invloed hebben op de stroming. Er ontstaan 'wervels' ten westen en oosten van de haven.



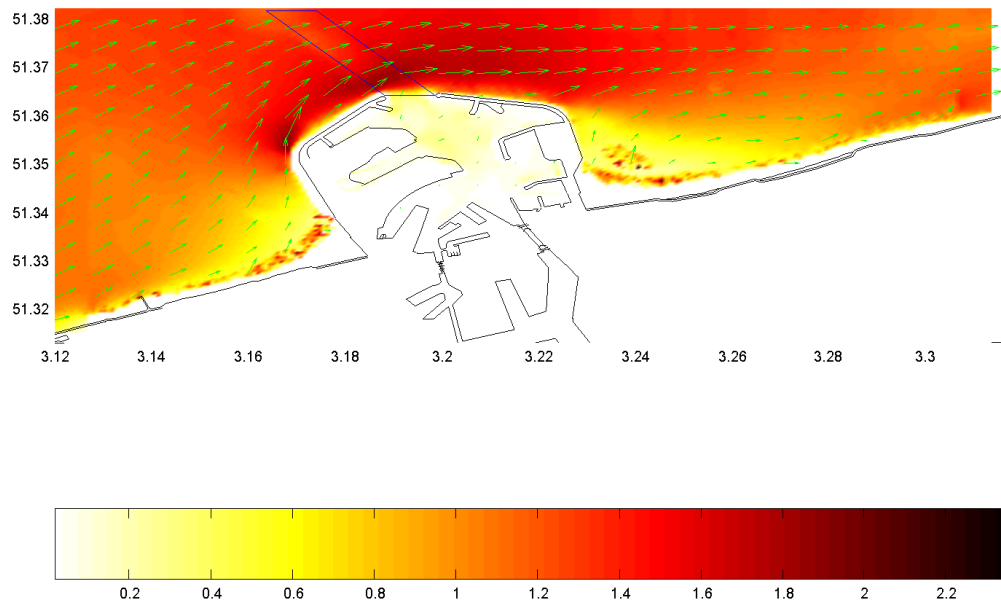
Figuur 6.13: Een sommatie van de absolute stromingsgroottes om het half uur over een periode van 16 dagen.



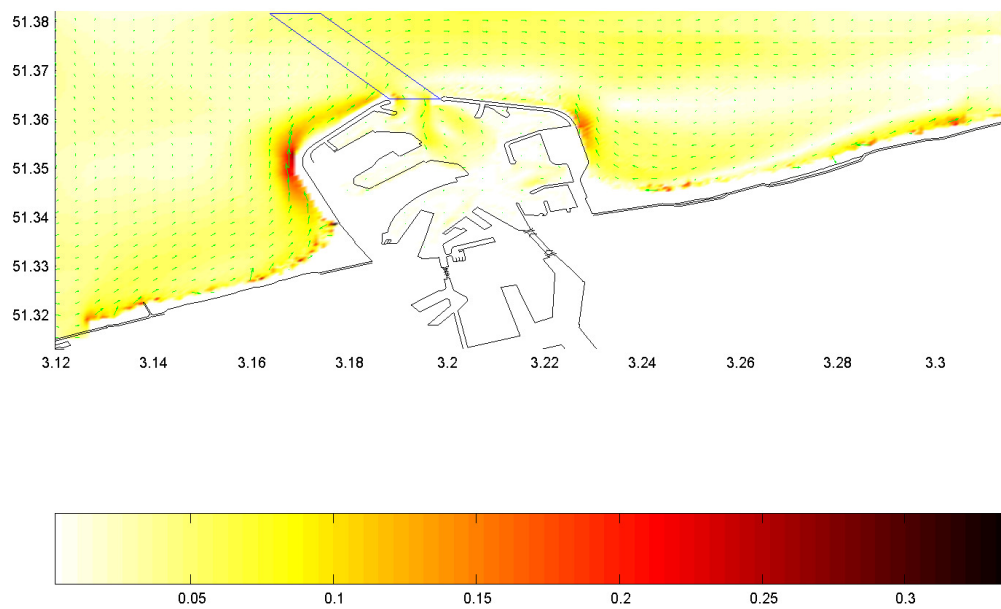
Figuur 6.14: Weergave van de maximale opbrengst uit de stroming die optreedt in een bepaalde zone over een periode van 16 dagen bij een cut-in snelheid van 0.7 m/s.



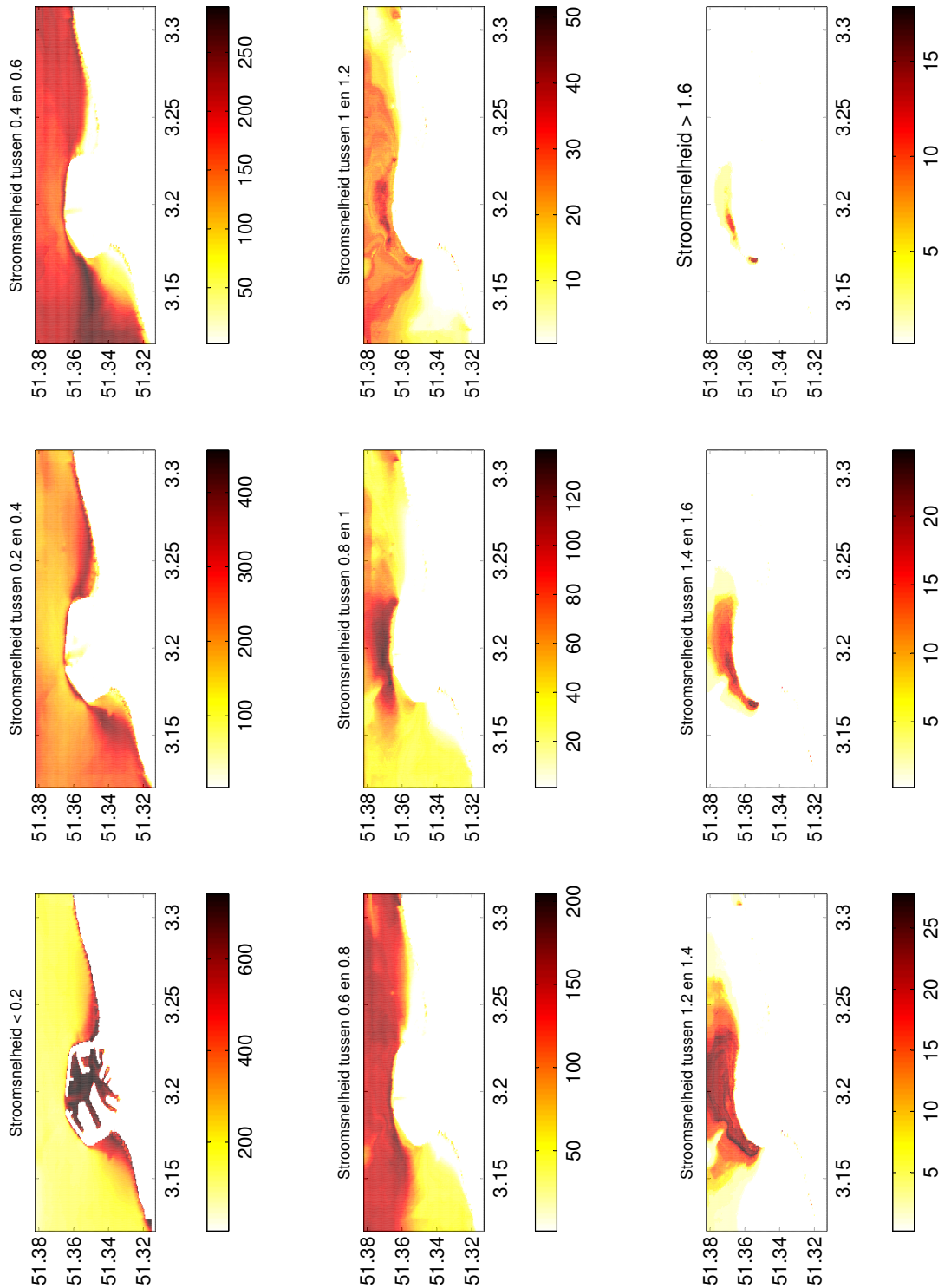
Figuur 6.15: Weergave van de maximale opbrengst uit de stroming die optreedt in een bepaalde zone over een periode van 16 dagen bij een cut-in snelheid van 0.4 m/s.



Figuur 6.16: Weergave van de maximale getijdenstroming (in m/s) die optreedt in een bepaalde zone over een periode van 16 dagen.



Figuur 6.17: Weergave van de gemiddelde stromingsgrootte (vectoriële sommatie) die optreedt over een periode van 16 dagen.



Figuur 6.18: Voorkomingsfrequentie van de stroomsnelheid op een totaal van 768 resultaten (16 dagen). De stroomsnelheid is verdeeld in klassen met breedte 0.2 m/s.

6.4 Plaatsen en zones met toekomst

Er moet een onderscheid gemaakt worden in het plaatsen van 1 TEC of meerdere TECs. Aan de westelijke strekdam is duidelijk te zien dat 2 zones met betrekkelijk grote opbrengst voorkomen. Eén ervan is echter in de erosieput aan de bocht van de westelijke dam waardoor die plaats vervalst. De aanwezigheid van een mobiele erosieput maakt de plaatsing onmogelijk. De andere plaats heeft coördinaten (51.3675 ; 3.1801) en ligt naast de vaargeul. Ginder voor de scheepvaart valt er echter niet te verwachten. Aangezien op deze plaats de oppervlakte van het gebied (150 bij 150 meter) zeer beperkt is, kan daar geen park geplaatst worden.

Indien men grotere zones wenst om meerdere TECs te plaatsen, is de plaatsing aan de oostelijke dam meer aangeraden. Uit figuren 6.13, 6.14 en 6.15 blijkt dat een vrij grote zone (1200 bij 400 meter) met betrekkelijk hoge opbrengst aanwezig is. Het gebied wordt voorgesteld door het punt met coördinaten (51.365 ; 3.2175). Dit is in bijlage E meegegeven.

6.4.1 Het punt (51.3675 ; 3.1801)

Het punt (51.3675 ; 3.1801) is gelegen aan de westelijke dam (Zie figuur 8.4). Om enigszins een juister beeld te hebben over een grotere zone, wordt de zone (51.367:51.368 ; 3.1794:3.1809) beschouwd. De zone beslaat een oppervlakte van 150 bij 150 meter. De stromingsvectoren worden hierover uitgemiddeld.

Stromingsroos

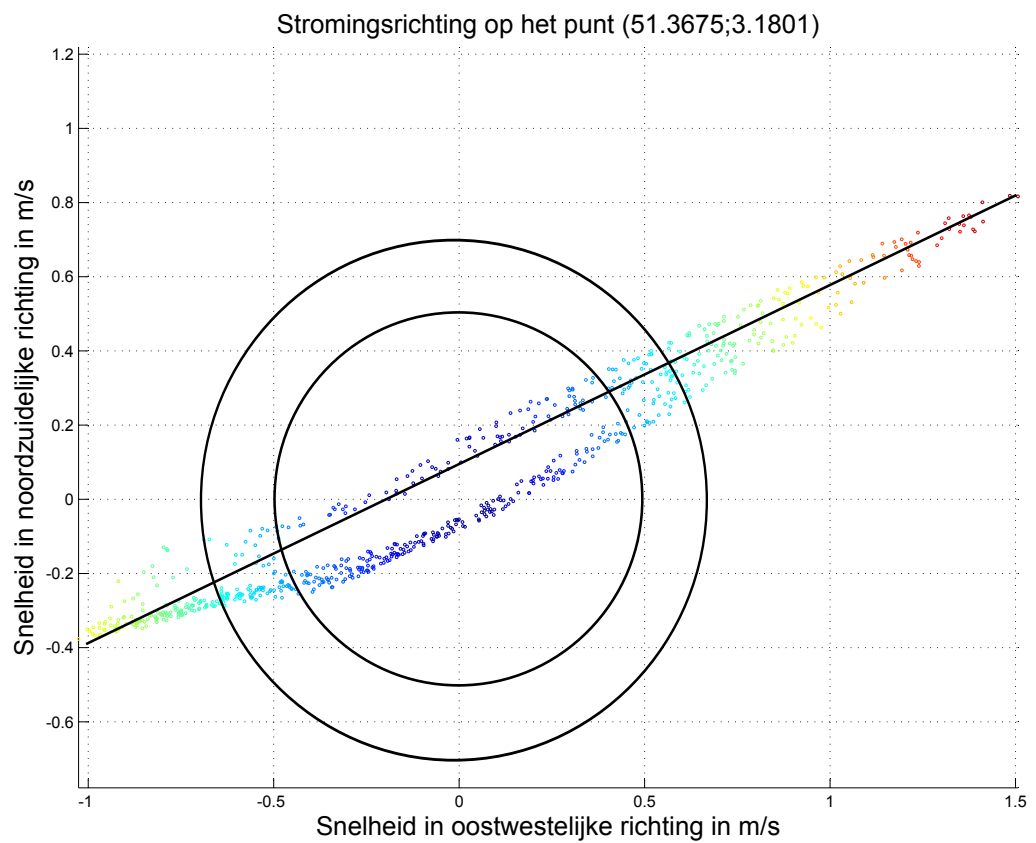
Het stromingsbeeld ziet eruit als in figuur 6.19. Elk punt stelt hierbij het eindpunt voor van een stromingsvector met beginpunt de oorsprong. De stromingsvector is een gemiddelde over de diepte. Het valt op in figuur 6.19 dat de grootste stromingen optreden in een bepaalde richting. Benaderend zou men de puntenwolk kunnen voorstellen door een rechte met richting 64 graden ten opzichte van de verticale. Dit is de rechte in de figuur. Dit is in oost noordoostelijke richting. Indien alle punten kleiner dan de cut-in snelheid verwijderd worden, dan ziet men in dat deze richting van 64 graden nog sterker benaderd wordt. Indien de cut-in snelheid 0.7 m/s bedraagt, dan kan men alle punten binnen de grote cirkel verwijderen. Bij 0.5 m/s als cut-in snelheid wordt de kleinste cirkel beschouwd. De maximale uitgemiddelde snelheid bedraagt ongeveer 1.7 m/s.

Dwarsprofiel

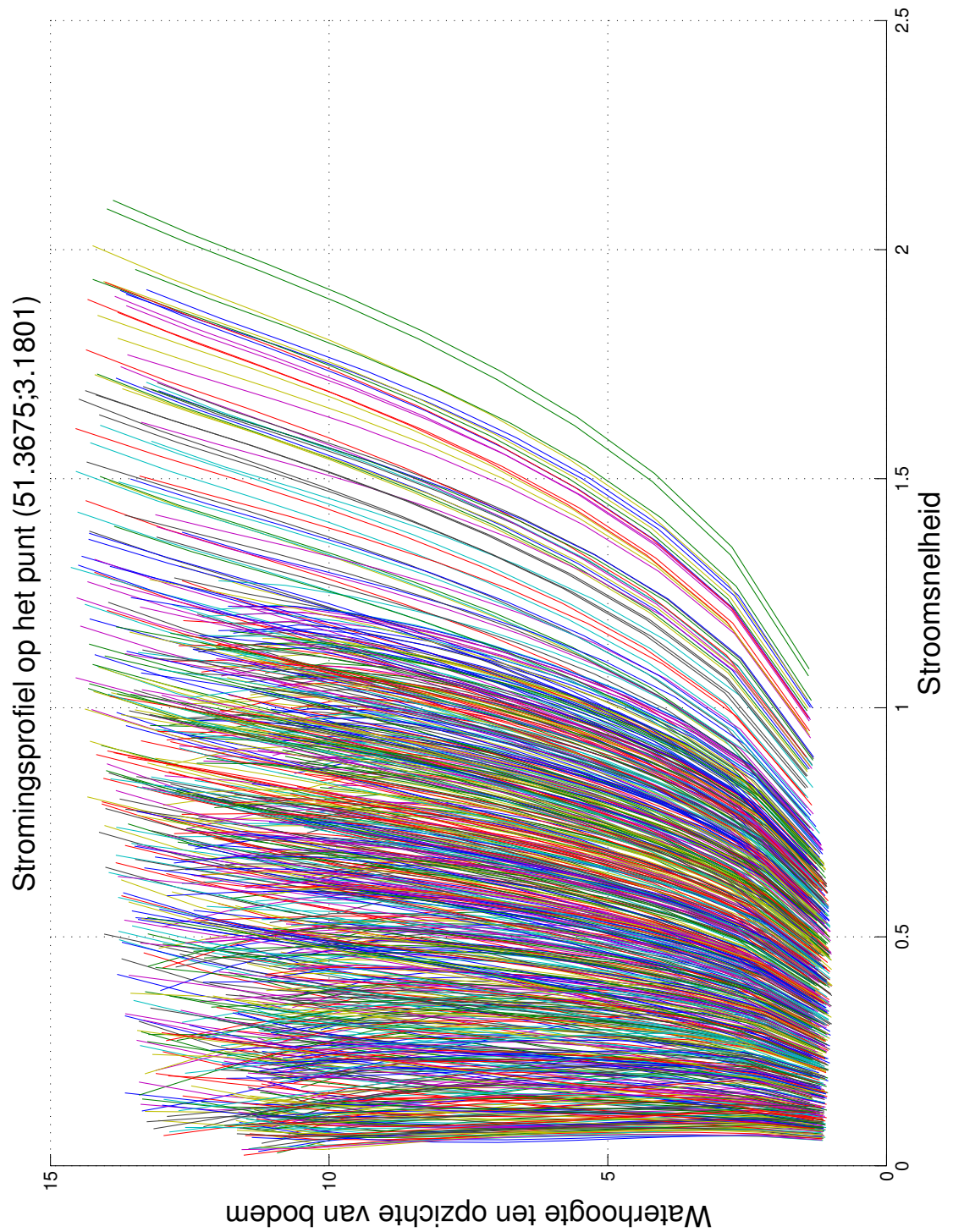
Het dwarsprofiel van de stroming wordt weergegeven in figuur 6.20. Indien men het gemiddelde van elk kromme neemt, dan krijgt men figuur 6.19. De grootste stroming treedt op net voor hoog water. Het is duidelijk dat het merendeel van de krommen zich bevindt onder de 1 m/s stroomsnelheid.

Voorkomensfrequentie

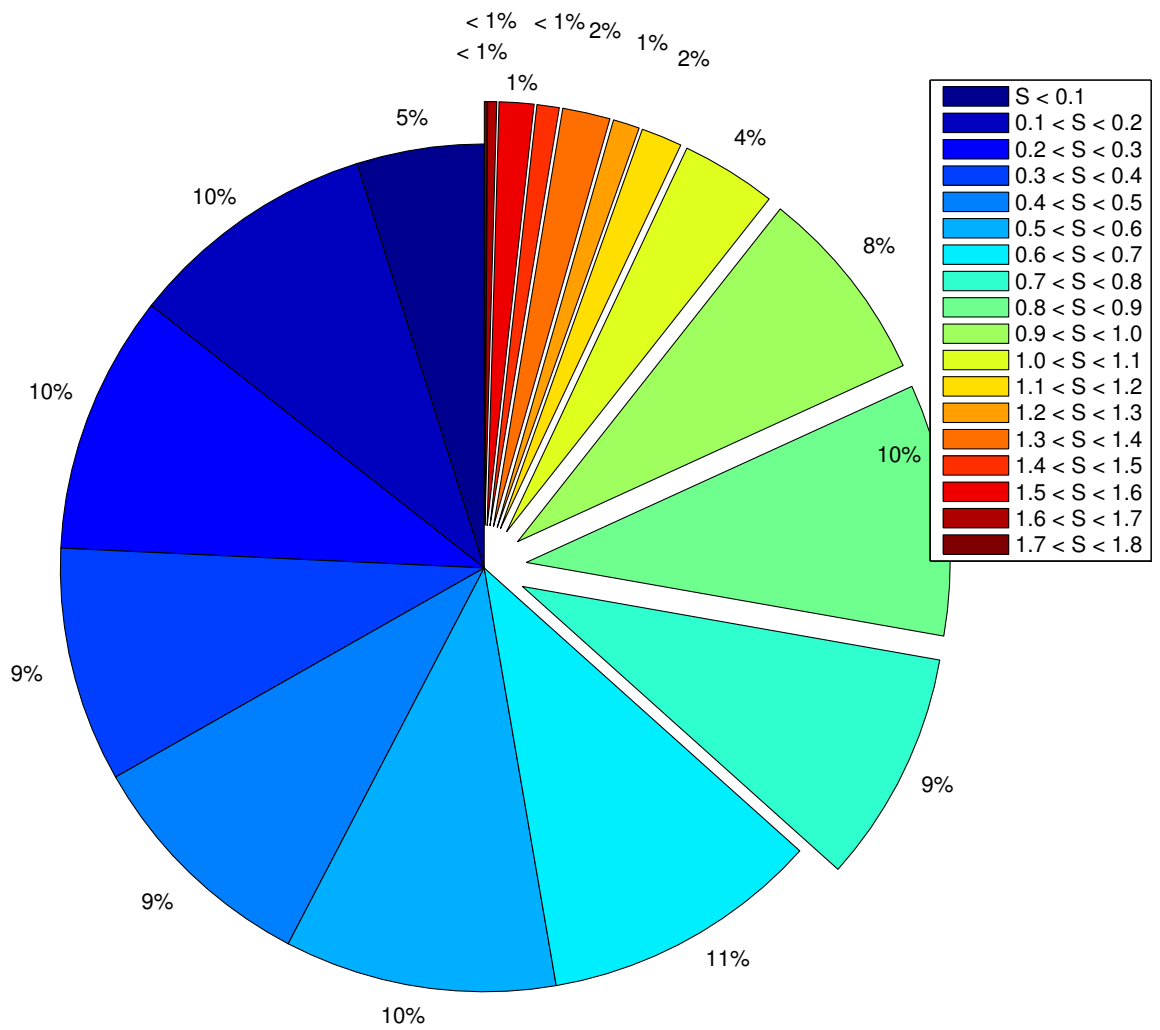
In figuur 6.21 is de voorkomensfrequentie gegeven van de stroming. Indien de cut-in snelheid 0.7 m/s bedraagt, dan is de turbine ongeveer 35 procent van tijd werkzaam.



Figuur 6.19: Stromingsbeeld over 16 dagen bekeken op het punt met coördinaat (51.3675 ; 3.1801) met bijhorende richting en grootte. De grootte van elke vector is berekend als een gemiddelde over de diepte.



Figuur 6.20: Het dwarsprofiel van de snelheid van de getijdenstroming over een periode van 16 dagen, berekend om het half uur. Het dwarsprofiel is een plaatselijke opname in het punt met coördinaten (51.3675 ; 3.1801).



Figuur 6.21: Voorkomensfrequentie van stroomsnelheden S (uitgemiddeld over de volledige diepte) in het punt met coördinaten (51.3675 ; 3.1801)).

Hoofdstuk 7

Funderingen en draagsystemen

In dit hoofdstuk worden enkele funderingstypes besproken. Enkele types zijn op het Belgisch Continentaal Plat beter bruikbaar dan anderen.

7.1 Gravitaire fundering

Een gravitaire fundering (Eng.: Gravity Base Foundation) is een fundering die men op de zeebodem plaatst en die op zich zelf voldoende gewicht heeft om stabiel te zijn. Er moet voldaan zijn aan de kantelevenwicht, het horizontale evenwicht (geen glijding) en het verticale evenwicht (draagkracht grond). Ze zijn gemakkelijk te installeren, aangezien er geen componenten in de bodem zitten, doch moet men er zich van bewust zijn dat rond de voet van de gravitaire fundering bodemerrosie kan optreden. Om enig gewicht te besparen bij transport, kan men gebruik maken van afzinkbare caissons, hoewel zal blijken dat gravitaire funderingen voor TECs niet overdreven groot zijn.

Verdere reductie van het gewicht van de fundering kan gebeuren door vleugels (Eng.: Hydrofoils) aan te brengen. De vleugels geven een extra kracht omlaag bij plaatsing in stroming. Zij kunnen worden in vraag gesteld wegens de hogere kostprijs en een twijfelachtige verbinding tussen vleugel en fundering. De vleugels, en dus de extra neerwaartse kracht, zijn enkel nuttig in een stromend medium. Dit hoeft echter geen probleem te zijn omdat de krachten werkende op de energieconvector bij geen stroming ook minder zullen zijn. Om de turbines te onderhouden bestaan er systemen om de turbines van de fundering los te koppelen. Men moet hierbij zeker oog hebben voor de bekabeling.

7.1.1 Plaatsing

De GBF wordt op de zeebodem geplaatst. Zonder bijkomende verankeringen moet de gravitaire fundering in staat zijn om krachten op te nemen en over te dragen naar de grond. Vooraf wordt het losse slib gebaggerd zodat er een funderingsput ontstaat. Men tracht hiermee een stabielere zeebodem te bekomen. De plaatsing van een GBF gebeurt met een drijvende kraan. De kraan moet in staat zijn om het gewicht van de fundering te dragen. Indien de drijvende kranen niet beschikken over voldoende capaciteit, kan de GBF gebouwd worden rekening houdend met dat feit. De GBF voor de windmolens op de Thorntonbank [Mengé en Gunst, 2008, Peire et al., 2008] werden ontworpen met een eigengewicht van 3000 ton. Dit is ook de maximale capaciteit van de kraan. Eénmaal ter plaatse kan de kraan de GBF laten zakken op de goede positie. Indien er een vlakke bodem is gebaggerd, gaat deze klus vrij snel. Nadien moet de put terug worden opgevuld met materiaal die erosiebestendig is. Hiervoor kan men storttuigen laten aanbrengen. De voet moet voldoende beschermd zijn tegen eroderende krachten. Een groot voordeel van de GBF is dat er geen of weinig werk is ter plaatse. Tenminste als de GBF volledig in prefab werd gebouwd. De GBFs op het windmolenpark van de Thorntonbank [C-Power, 2009] moeten ter plaatse nog gevuld worden met

ballast. Bij mariene convertoren kan dit enigszins anders gebeuren. Het eigengewicht van de convertor mag veel kleiner en compacter zijn om voldoende stabiliteit te bekomen.

Prefabricatie heeft zijn voordelen. Er kan gemakkelijker op het droge gewerkt worden en men is minder afhankelijk van het weer. Bovendien heeft men maar voor een korte periode de dure schepen nodig. Het transport heen kan gemakkelijk op 1 dag gebeuren indien het weer meezit. Het baggeren en de erosiebescherming neemt natuurlijk meer tijd in beslag. Maar dit is nodig voor elk offshore project. In tabel 7.1 zijn de verschillende stappen in de ontwikkeling van een GBF gegeven. Hierbij horen

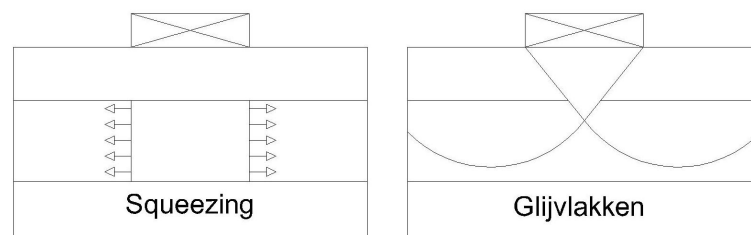
	Beschrijving	Benodigdheden
Grondonderzoek	Geofysisch onderzoek Geotechnisch onderzoek	Schip met sonar, multibeam,... Werkplatform voor sondering
Ontwerp	Ontwerp van de GBF; eventuele uitbesteding	
Prefabricatie	Prefabricatie van de GBF op een terrein aan wal	Bouwterrein
Fase 1 in zee	Baggeren van slib en uitbaggeren funderingsput	Sleehopperzuiger
Transport GBF	Plaatsen van een filterlaag	Storttuig
	Transporteren naar de definitieve plaats; de drijvende kraan bezit voldoende hefcapaciteit	Drijvende kraan
Fase 2 in zee	Erosiebescherming aanbrengen	Storttuig

Tabel 7.1: Onmisbare schakels voor de GBF

essentiële benodigdheden. Indien dit niet voor handen is, dan kan het project niet worden uitgevoerd.

7.1.2 Berekening

De fundering bestaat uit beton, al dan niet gewapend. Om gelijkmatige drukken in de grond op te wekken, dient de fundering voldoende stijf te zijn. De fundering kan bezwijken volgens verschillende wijzen. Ofwel kan de fundering zelf het begeven. Ofwel is er een geotechnisch falen. Het bezwijken van gravitaire funderingen op geotechnische wijze bestaat uit 2 fenomenen, namelijk squeezing en bezwijken door overschrijding van het draagvermogen. Squeezing treedt op bij onderliggende slappe



Figuur 7.1: Bezwijken door squeezing en glijvlakken

lagen. De slappe laag wordt weggeperst en er ontstaat een 'mudwave'. Squeezing treedt op indien de belasting vier maal de ongedraineerde schuifspanning overschrijdt. De ongedraineerde schuifspanning kan bepaald worden vanuit een CPT test [Van Impe, 2008b].

$$s_u = \frac{q_c - \sigma_v}{N_k} \quad (7.1)$$

Hierbij is q_c de conusweerstand uit de CPT test. N_k is een factor die tussen de 11 en de 19 ligt [Van Impe, 2008b]. Ze volgt uit proeven. Algemeen kan men stellen dat:

$$N_k = 15 \pm 4$$

De fout is dus ongeveer 30 procent. Voor sonderingen op land hebben ondraagkrachtige gronden al vlog 1 MPa als conusweerstand. De ongedraineerde schuifspanning s_u bedraagt dan al vlog 60 kPa en neemt toe met de diepte. In offshore condities kan het anders zijn en zal geval per geval moeten bekeken worden.

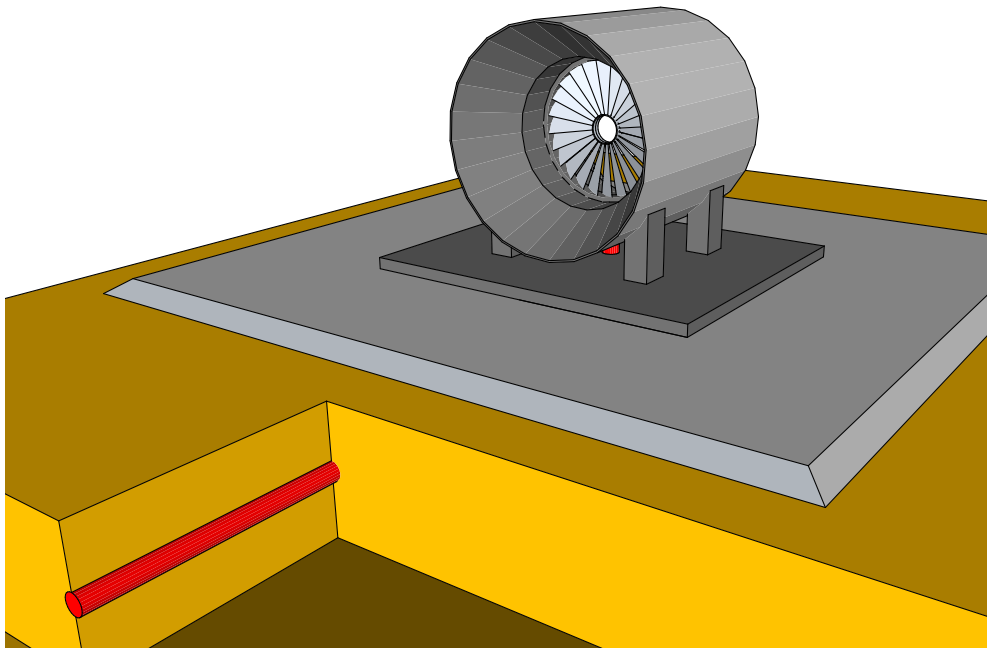
Afhankelijk van het soort glijdvlak kan er een draagvermogen bepaald worden. De maximale spanning die kan worden aangebracht, wordt gegeven door 7.2.

$$p_u = 5.14 \cdot B \cdot s_u \quad (7.2)$$

Waarbij B de breedte is van de fundering. Als de breedte B van de fundering groter wordt dan 80 centimeter, dan blijkt dat bezwijken door squeezing meer bepalend wordt dan bezwijken door glijdvlakken.

7.1.3 Schets

In figuur 7.2 wordt een voorstelling gegeven van een GBF. In hoofdstuk 9 zal deze configuratie ook berekend worden.



Figuur 7.2: Schematische voorstelling van een getijden energie convertor gefundeerd op een gravitaire fundering.

7.2 Monopaal

Een monopaal (Eng.: Monopile) bestaat in verschillende vormen en maten. Het bestaat uit materialen zoals beton, gewapend beton of staal. De monopalen kunnen ingehaid (Eng.: driven) of ingeschroefd (Eng.: Screw piles) of ingeduwd (Eng.: Jacked piles) worden. De fundering wordt gekenmerkt door

een steek. Hiervoor is een uitgebreid geotechnisch onderzoek vereist. Er moet rekening gehouden worden met extra krachten vanwege de golven en de stroming. Monopalen die niet doorlopen tot het waterpeil zijn minder belast.

7.2.1 Design en plaatsing

Monopalen zijn relatief gemakkelijk te installeren met hefplatformen wanneer de geotechnische eigenschappen het toelaten. Daarvoor zal een heitoestel nodig zijn die de kleef en de puntweerstand kan overwinnen. Berekeningsmethodes voor golfkrachten op palen zijn te vinden in [De Rouck, 2008a]. Speciale aandacht is vereist voor de erosiebescherming. Er ontstaat zowel erosie door stroming als erosie veroorzaakt door golven. Een berekening is terug te vinden in [De Vos, 2008].

Er moet gelet worden op de slanke constructie. Het is mogelijk dat door wervelafscheiding wervels zouden ontstaan waardoor de paal in een soort resonantiegebied terecht komt. Aandacht is vereist voor de bescherming tegen corrosie. De buispalen worden meestal gemaakt uit staal. Vaak is er geen actieve corrosiebescherming voorzien, maar gaat men rekenen met een overmaat aan dikte die in de loop van de jaren corrodeert. Tabel 7.2 geeft de noodzakelijke stappen weer in de ontwikkeling van

	Beschrijving	Benodigdheden
Grondonderzoek	Geofysisch onderzoek	Schip met sonar, multibeam, ...
	Geotechnisch onderzoek	Werkplatform voor sondering
Ontwerp	Ontwerp van de monopaal; eventuele uitbesteding	
	Aankoop van monopalen	Leverancier
Transport	Transport van de monopaal en TEC	Transportschip
Fase in zee	Monopaal inheien	Werkplatform en heimachine
	Erosiebescherming aanbrengen	Storttuig

Tabel 7.2: Onmisbare schakels voor de monopaal fundering

een monopaal fundering.

7.2.2 Berekening

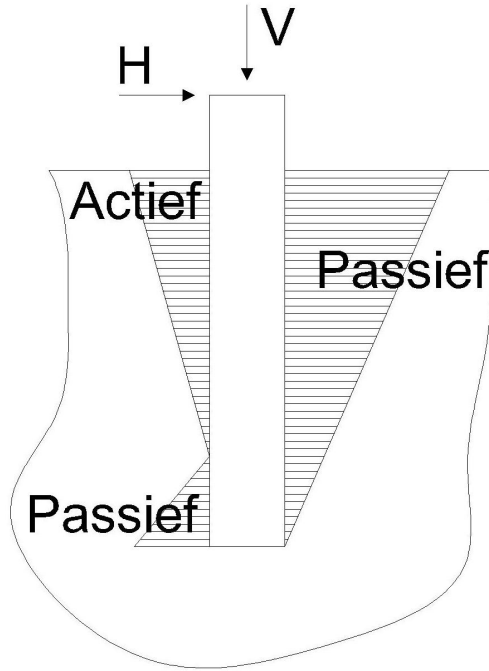
Sterkte

Er zijn verschillende krachten werkzaam op de monopalen. In hoofdstuk 8 worden monopalen detaillistisch beschreven. De krachten worden overgedragen naar de bodem en verspreiden zich in de grond zoals op figuur 7.3. Wegens de verandering in stromingszin worden de krachten cyclisch. De horizontale kracht zal een maximum kennen bij maximale stroming. Door die kracht wordt de paal scheef geduwd. Indien de horizontale zettingen groot genoeg zijn treedt er een passieve gronddruk op zoals weergegeven in figuur 7.4. Aan de actief zijde kan het zijn dat er een opening ontstaat. Er kan fijn slib afgezet worden in die opening waardoor er vermindering is van sterkte aan de passieve zijde indien de stromingszin omkeert.

Trillingen

Wanneer er krachten optreden met een cyclisch karakter, dan kan het zijn dat de statische krachten zwaar onderschat worden. Uit theoretische afleiding blijkt dat ze maximaal 2 keer zo groot kunnen worden. Een voorbeeld van een dynamische kracht is de wervelexcitatie die ontstaat bij het plaatsen van een constructie in een stroming. Er kan een oscillerende kracht optreden [Luccofier, 2008].

$$F_T = \frac{v^2}{2} \cdot \rho d \cdot L \cdot C_k \cdot \sin \omega t \quad (7.3)$$



Figuur 7.3: Krachtoverdracht monopaal - grond

Met d de diameter en L de lengte van de cilinder. C_k is de von Karman coëfficiënt en v de stroomsnelheid. De pulsatie ω kan worden geschreven als $2\pi f$.

De amplitude van formule 7.3 wordt pas belangrijk als de stromingsgeïnduceerde trillingen in de buurt komen te liggen van de eigenfrequentie van de structuur. Wanneer dit het geval is noemt men de stromingsnelheid kritiek en bedraagt de grootte

$$v_k = \frac{\omega_n \cdot d}{2\pi \cdot 0,2} = \frac{f_n \cdot d}{0,2} \quad (7.4)$$

Hierbij is 0.2 het getal van Strouhal. Dit is een functie van het getal van Reynolds, maar is ongeveer constant in deze situatie. Een berekening leert dat de stromingsgeïnduceerde trillingen nooit te vreezen zijn in getijdenstromingen. Wanneer men een pijler beschouwt in stromend water kan men stellen dat zij eenzijdig is ingeklemd. Men krijgt bijvoorbeeld een verplaatsingsvorm:

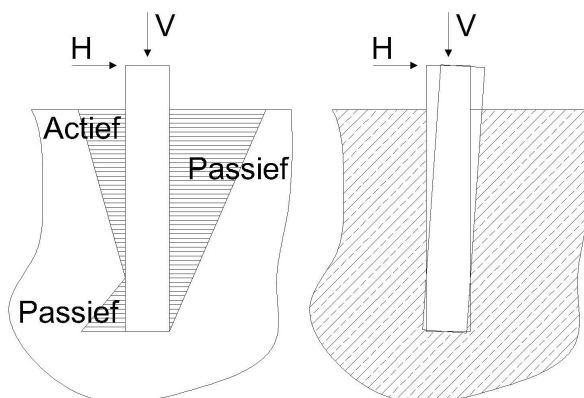
$$\psi(x) = \frac{1}{2} \left[3 \left(\frac{x}{l} \right)^2 - \left(\frac{x}{l} \right)^3 \right]$$

Uit de energetische wetten volgt de formule:

$$\frac{1}{2} \rho A l \frac{33}{140} \omega^2 = \frac{1}{2} \frac{EI}{l^3}$$

$$\omega^2 = \frac{140EI}{33\rho A l^4}$$

Hieruit kan de eigenfrequentie bepaald worden. Onderstaande tabel heeft enkele waarden weer. Er wordt gesteld dat de elasticiteitsmodulus van staal 210000 MPa is. De massadichtheid van staal is 7850 kg/m^3 . De dikte van de stalen wand is beschouwd als 1/100 van de diameter. Uit de tabel blijkt dat wervelexcitaties geen rol van betekenis zullen hebben. De stroomsnelheden zullen nooit zo hoog worden. Bovenstaande werkwijze gebeurde in de veronderstelling dat er enkel een monopaal aanwezig is. Bij de werkelijke berekening zal de turbine er moeten bijgeteld worden. Het toevoegen van die



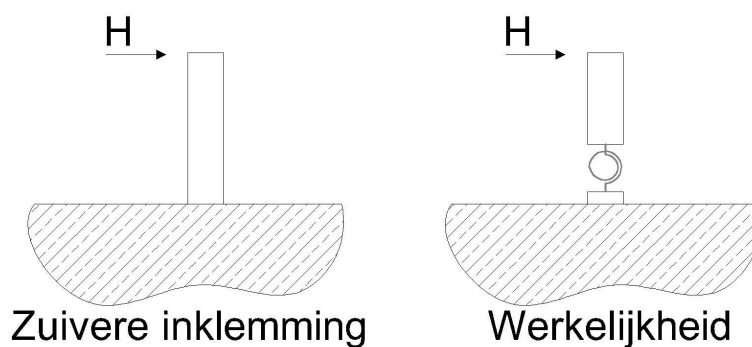
Figuur 7.4: Actieve en passieve gronddruk bij monopalen

	Diepte [m]	Diameter [m]	Frequentie [Hz]	Periode [s]	v_k [m/s]
1000x10	12	1	4.12	0.24	18.7
1000x10	14	1	3.03	0.33	13.8
2000x20	12	2	8.24	0.12	74.9
2000x20	14	2	6.06	0.17	55.1
3000x30	12	3	12.36	0.08	168
3000x30	14	3	9.08	0.11	124

Tabel 7.3: Configuraties van pijlers in stroming

massa zal voor een verlaging zorgen in de eigenfrequentie. Hierdoor vermindert volgens formule 7.4 de kritische stroomsnelheid. Bovenstaande rekenwijze is enkel van toepassing op statische structuren.

In praktijk is een inklemming niet te verwezenlijken. Voor exacte berekeningen moet men een rotatieveer beschouwen zoals in figuur 7.5. Indien men hierop dieper wenst in te gaan, dan is [De Vos, 2008] aangewezen literatuur. De grootte van de veerkracht zal afhankelijk zijn van het type grond. Op

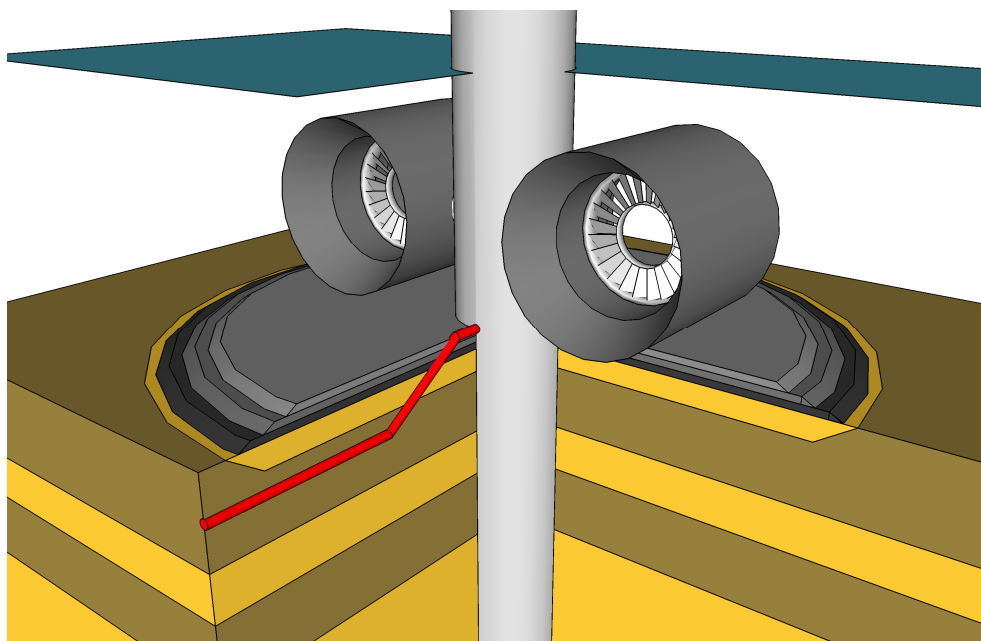


Figuur 7.5: Inklemming van een paal in de grond

figuur 7.3 was al duidelijk te zien dat de veerkracht van de grond verloren kan gaan door erosie. Zeker indien zich slib afzet in de openingen langs de paalschacht.

7.2.3 Schets

In figuur 7.6 wordt een voorstelling gegeven van een monopaal met 2 TECs. In hoofdstuk 8 zal deze configuratie ook berekend worden.



Figuur 7.6: Schets van een monopaal met 2 convertoren in een straalbuis.

7.3 Driepoot fundering

De driepoot (Eng.: Tripod) fundering bestaat uit een draagstructuur die in de bodem van de zee wordt verankerd door drie of vier palen. Die palen zijn kleiner dan die van de monopaal. De krachten van de turbine worden via de staalstructuur verdeeld over een groter oppervlak dan bij een monopaal en vervolgens overgebracht op de verschillende kleinere palen aan de basis van de structuur. De voeten kunnen worden vernageld of worden voorzien van zuigvoeten. De verticaliteit wordt aan de voet van de structuur gecorrigeerd. De turbine wordt vervolgens direct op die structuur verankerd zonder tussenstuk. Dit funderingstype wordt enkel gehanteerd daar waar het technisch onmogelijk is om monopalen te gebruiken.

7.3.1 Plaatsing

Het voordeel van drievoet funderingen is de grotere basis. Daardoor kunnen er beter momenten worden opgenomen met kleinere diameters voor de palen. Er moet op gelet worden dat er zo weinig mogelijk verlies is aan ruimte. Op de locaties waar er energieconvertoren kunnen worden geplaatst in de Noordzee, is de diepte vrij beperkt. Het toepassen van dergelijke fundering voor getijden energie convertoren op het BCP is dus beperkt. De extra voeten zorgen voor een groot verlies aan plaats voor de turbine. Het is net de bedoeling van een drievoet om een bredere basis te creëren. De drievoet lijkt dan ook eerder thuis te horen bij offshore windmolens. Deze fundering gedraagt zich als een monopaal fundering (golfkrachten, stromingskrachten,...)

Tabel 7.4 geeft de essentiële benodigdheden weer om het project met een drievoet fundering tot een goed einde te brengen. Merk op dat er ook funderingen bestaan met meer dan 3 poten indien de vernageling onvoldoende blijkt met een drievoet.

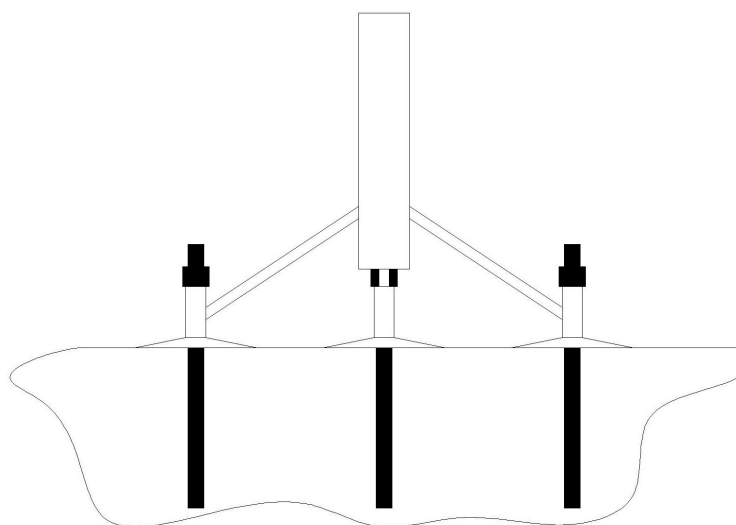
	Beschrijving	Benodigdheden
Grondonderzoek	Geofysisch onderzoek Geotechnisch onderzoek	Schip met sonar, multibeam, ... Werkplatform voor sondering
Ontwerp	Ontwerp van de drievoot; eventuele uitbesteding	
Prefabricatie	Aankoop van buispalen Lassen van de verbindingen op het droge	Leverancier Terrein en / of loods
Fase 1 in zee	Baggeren van een funderingsput Erosiebescherming aanbrengen	Sleephopperzuiger Storttuig
Transport	Transport van de drievoot en TEC Transport van de vernageling	Drijvende kraan Transportschip
Fase 2 in zee	Vernageling inbrengen; intussen blijft de kraan ter plaatse Erosiebescherming aanbrengen	Werkplatform en vernagelingsmachine Storttuig

Tabel 7.4: Onmisbare schakels voor de drievoot fundering

7.3.2 Berekening

Sterkte

Een driepoot wordt op eenzelfde wijze berekend als een monopaal. Met dat verschil dat er bij driepoten schaduweffecten kunnen optreden. Het groepseffect kan in rekening gebracht worden. Schuine delen van de driepoot zijn eenvoudig berekenbaar.



Figuur 7.7: Een driepoot draagstructuur met vernagelde poten

Draagvermogen

Men kan de driepoot fundering voorzien van verbrede poten. Hierdoor wordt de draagkracht groter. Er moeten nagels voorzien zijn om de fundering stabiel te houden.

7.4 Vlottende fundering

Vlottende funderingen (Eng.: Floating Foundation) zijn funderingen die hun stabiliteit halen uit het oprijfvermogen. De vlotter is bevestigd met ankers. De verticale reacties van een vlottende fundering worden volledig opgenomen door de vlotter. Horizontale reacties worden opgenomen door de verankeringen. Er bestaan in hoofdzaak 3 groepen:

- Vlotter met flexibele verankering: de vlotter kent een grote bewegingsvrijheid en is eventueel in staat om zich zelf te gaan richten naargelang de stromingsrichting.
- Vlotter met stijve verankering: de vlotter wordt op zijn plaats gehouden. Er is slechts zeer beperkte verplaatsing van de vlotter.
- Drijvende platformen: meerdere platformen worden aan elkaar gekoppeld door scharnieren. Elk platform volgt de beweging van het waterpeil. De turbines hangen onder de platformen.

De verankeringen worden gerealiseerd door gravitaire of ingebedde ankers. Het verankeringstype wordt bepaald door het type bodem. Er moet vooral gelet worden op de verankering van kabels. Zowel de verankeringen zelf als de elektrische kabels zijn onderhevig aan wisselende krachten. Zij mogen niet losgerukt worden en toch moeten zij voldoende speling krijgen. Het plaatsen van meerdere platformen, met bekabeling lopende over verschillende delen, kan zorgen voor 1 grotere kabel in plaats van meerdere dunnere kabels.

7.4.1 Design en plaatsing

Een vlottende fundering moet gedurende zijn levensduur blijven drijven. Het spreekt vanzelf dat de vlotter moet in staat zijn om eigengewicht en de TEC te kunnen dragen. De wet van Archimedes is zeer eenvoudig toepasbaar. De verankering is voorzien in de bodem. In sommige gevallen kan een anker vast gemaakt worden aan een andere constructie. Het zou als een voordeel kunnen gezien worden, maar die andere constructie moet wel berekend zijn op de ankerkrachten. Indien de ankers voorzien zijn van kleinere gravitaire funderingen, dan gedraagt dit anker zich alsof het een GBF is. Dezelfde eisen zijn hier vereist, alhoewel in een veel beperktere mate. Indien de ankers worden vernageld, dan zijn de voorwaarden en eisen nodig zoals bij de drievoet. Tabel 7.5 toont het ontwerpproces

	Beschrijving	Benodigheden
Grondonderzoek	Geofysisch onderzoek Geotechnisch onderzoek	Schip met sonar, multibeam, ... Werkplatform voor sondering
Ontwerp	Ontwerp van de vlotter; eventuele uitbesteding	
Prefabricatie	Lassen / maken van de vlotter op het droge	Terrein en / of loods
Fase 1 in zee	Baggeren van een funderingsput Filterlaag aanbrengen	Sleehopperzuiger Storttuig
Transport	Transport van de vlotter	Sleepboot
Fase 2 in zee	Transport van de gravitaire voeten	Drijvende kraan
	Koppeling van TEC aan vlotter	Vlotter als werkplatform
	Erosiebescherming aanbrengen rond ankervoeten	Storttuig

Tabel 7.5: Onmisbare schakels voor de vlottende fundering (gravitaire ankers)

van een vlottende fundering met gravitaire ankers en zijn belangrijkste schakels. Tabel 7.6 toont een vlottende fundering met vernageling van de ankers. Merk dat bij transport de EC niet verbonden is met de vlotter. Ondiepe wateren en / of obstakels zouden de turbine beschadigen bij het varen

	Beschrijving	Benodigdheden
Grondonderzoek	Geofysisch onderzoek	Schip met sonar, multibeam, ...
	Geotechnisch onderzoek	Werkplatform voor sondering
Ontwerp	Ontwerp van de vlotter; eventuele uitbesteding	
Prefabricatie	Lassen / maken van de vlotter op het droge	Terrein en / of loods
Transport	Transport van de vlotter	Sleepboot
	Transport van de nagels	Transportschip
	Transport TEC	Drijvende kraan
Fase in zee	Koppeling van TEC aan vlotter	Vlotter als werkplatform
	Vernagelen van de ankers	Werkplatform en vernagelingsmachine
	Erosiebescherming aanbrengen rond ankervoeten	Storttuig

Tabel 7.6: Onmisbare schakels voor de vlottende fundering (vernagelde ankers)

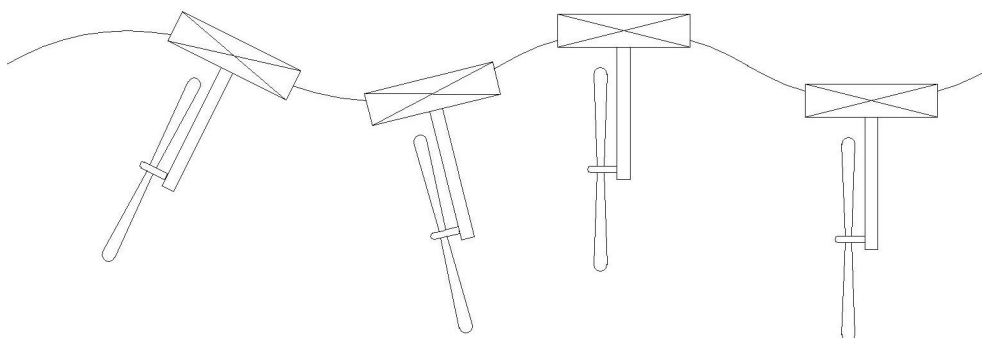
naar de definitieve plaats. Merk op dat de TEC die vast hangt aan de vlotter dezelfde beweging zal overnemen als de beweging van de vlotter. Het is denkbeeldig dat bij zware schommeling (bij flexibele ankers) van het wateroppervlak de TEC cyclisch erg grote krachten zal ondergaan.

7.4.2 Berekening

Een lichaam ondergedompeld in een fluïdum, ondervindt vanwege dat fluïdum een opwaartse kracht. De verticale reactie van het vlot wordt opgenomen door het vlottende vermogen. Het volume van het vlot wordt berekend met de formule 7.5.

$$V_{vlot} = \frac{W}{\rho g} \quad (7.5)$$

De cyclische beweging van de golven zorgt voor een bijkomende kracht op de schoepen van de turbine. In figuur 7.8 staat dit geschetst. Afhankelijk van de golflengte en de breedte van de vlotter, gaat de turbine slingeren. Een golf met periode T zal ervoor zorgen dat de turbine één slingerbeweging maakt



Figuur 7.8: Beweging van een vlotter in golven.

op T seconden. De grootte van de slingerbeweging is afhankelijk van de golfsteilheid. De steilheid bedraagt

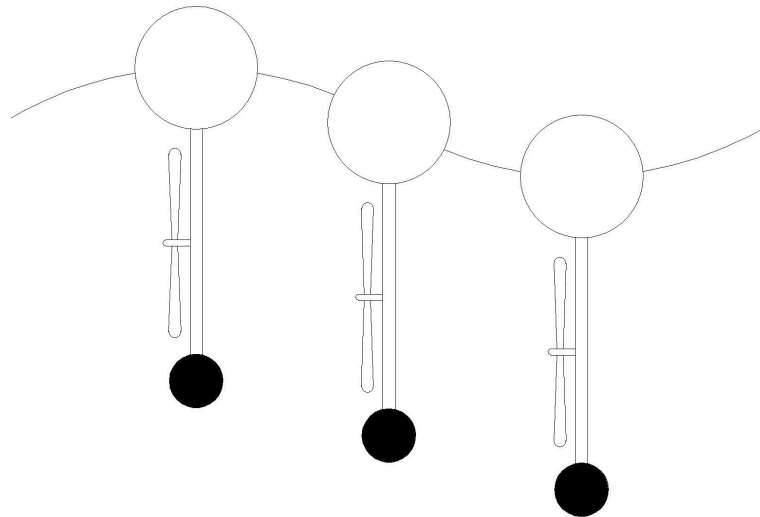
$$s = \frac{H}{L}$$

Stel dat de naaf van de turbine M meter onder het ponton hangt, dan is de horizontale verplaatsing van de naaf

$$\Delta = 2Ms$$

De golfsteilheid kan oplopen tot 1 op 7. Dit betekent, voor een turbine met naafhoogte 10 meter onder het ponton, een horizontale verplaatsing van 2.86 meter. De schoepen kennen nog een veelvoud van deze verplaatsing. In praktijk zal de horizontale beweging niet zo groot zijn. De traagheid van de turbine in het zeewater zorgt voor een buffering. Maar de krachten op de vleugels kunnen onaanvaardbaar hoog worden.

De grootte van het ponton is kenmerkend voor de beweging in de golven. Grote pontons zullen geen last hebben van kleine golfengtes. Echter, het lijkt niet economisch om pontons te dimensioneren op golfengtes. Grotere golfengtes hebben vlug de grootteorde van 100 meter en meer. Een andere oplossing kan gevonden worden door een bolvormig ponton te gebruiken, zoals figuur 7.9. Omdat alle mogelijke carene posities dezelfde zijn, is er geen slingerbeweging.



Figuur 7.9: Bolvormige vlotter in de golven.

7.5 Krachten op statische structuren

Men moet zich bewust zijn van krachten die kunnen optreden op statische structuren. Net zoals de monopaal, kan elk object in een stromingsveld hinder ondervinden van trillingen. Het aanstromen van een massa zorgt voor krachten op een structuur.

7.5.1 Archimedes kracht

Een lichaam ondergedompeld in een fluïdum, ondervindt vanwege dat fluïdum een opwaartse kracht. De kracht wordt begroot met volgende formule.

$$F = gV(\rho - \rho_w) \quad (7.6)$$

Het resulterende gewicht is in feite het gewicht van de constructie op het droge verminderd met de opwaartse stuwkracht van het water. In het geval van een offshore constructie bedraagt deze 1025 kg/m^3 .

7.5.2 Statische drukken

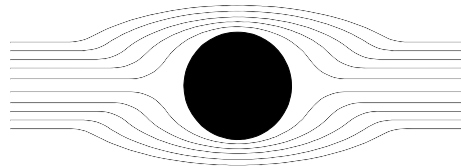
Op elk onderdeel in een fluïda werkt er een bepaalde druk. Boven water is de druk gelijk aan de atmosferische druk. Onder water wordt de statische druk bepaald als:

$$p = \rho gh \quad (7.7)$$

Hoewel deze drukken zeer hoog kunnen oplopen, zijn zij van geen belang bij volledig ondergedompelde toestellen. Echter wel wanneer er luchtkamers zouden aanwezig zijn in de toestellen.

7.5.3 Stromingsdrukken

De dynamische krachten op de structuren zijn moeilijker te bepalen. Het bepalen van het merendeel van de krachten gebeurt aan de hand van empirische formules en/of modelproeven. Golfkrachten op cilinders bijvoorbeeld zullen aan de hand van formules van Morison bepaald worden. Het is duidelijk dat zuiver theoretische bepalingen niet meer zullen voldoen. Voor een monopaal bijvoorbeeld, in een ideale stroming zou men een stroming krijgen als in figuur 7.10. Wanneer men zuiver theoretisch gaat



Figuur 7.10: Cilindrisch profiel in een niet-viskeuze stroming

berekenen met een niet viskeuze vloeistof, dan is de stelling van d'Alembert geldig. Deze zegt dat er geen lift- of sleepkracht werkende is op de cilinder. Men bekomt, bij verwaarlozing van de wrijving:

$$\vec{F} = - \oint p d\vec{S}$$

Wegens de symmetrie van het profiel is er nooit een lift- of sleepkracht aanwezig. Let wel, in de praktijk is elk fluïda viskeus waardoor er ook wrijvingskrachten en dergelijke zullen optreden langs het profiel. Bij viskeuze vloeistoffen is het enigszins anders. Er ontstaat langs het object een grenslaag. In de grenslaag heersen er schuifkrachten. De schuifkrachten worden opgewekt door de snelheidsgradiënt.

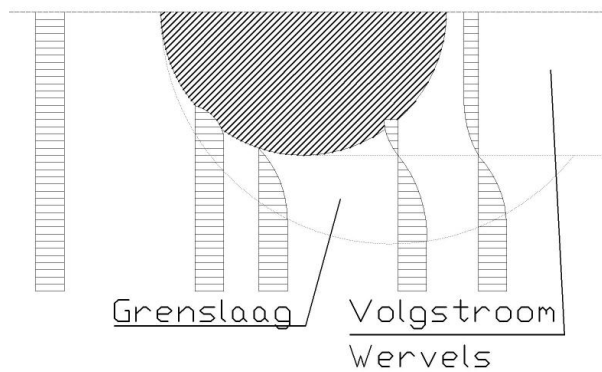
$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Het is zo dat de snelheid in de grenslaag wordt opgebouwd van 0 tot de werkelijke stroomsnelheid. Achter het object ontstaat de volgstroom. In het spoor heerst een veel lagere snelheid dan de normale stroomsnelheid. Het kan zelfs zijn dat zij negatief wordt. In het praktische geval treden wervels op. Voor een funderingen kunnen wervels zeer negatieve invloed hebben. Omwille van de verhoogde stroomsnelheid zal de bodem eroderen. Het precies berekenen van de schuifkrachten kan softwarematig verder onderzocht worden. Beter nog is het gebruik van modelproeven.

Stel dat er toch een benadering van de kracht wil gevonden worden, dan kan men gebruik maken van de wet van impulsbehoud.

$$F = m \frac{\Delta v}{\Delta t} = \rho \frac{V}{\Delta t} \Delta v = v^2 A \rho$$

Hierbij is A de oppervlakte loodrecht op de stromingsrichting. Let wel, dit is een zeer conservatieve waarde maar zal dus veilig zijn.



Figuur 7.11: Cilindrisch profiel in een viskeuze stroming

7.6 Besluit

In de Noordzee en meer bepaald te Zeebrugge kunnen slechts enkele van bovenstaande funderingstypes gebruikt worden. In de omgeving van de vaargeul lijkt het onlogisch om vlottende funderingen aan te leggen. Niet alleen is er het gevaar van losslaan van de fundering maar ook het uitzicht kan hierdoor belemmerd worden. Ook driepoot funderingen lijken niet vanzelfsprekend. De waterdiepte te Zeebrugge is te beperkt om een driepoot te plaatsen.

Enkel monopalen en gravitaire funderingen zijn dus interessant. Een uiteindelijk keuze van het type zal afhangen van het aanwezige materieel en de kostprijs van elk type.

Naast de sterkte van elk funderingstype, moet ook gekeken worden hoe de nabije omgeving wijzigt in de aanwezigheid van een fundering en TEC. De verhoogde snelheden rond de fundering vraagt voor speciale voorzorgsmaatregelen tegen de erosie.

Hoofdstuk 8

Berekening van een monopaal

In dit hoofdstuk wordt de monopaal berekend op sterkte en wordt de paal geotechnisch bekeken. Met behulp van software kunnen momenten-, dwarskrachten- en normaalkrachtenlijnen opgesteld worden. De belasting van de monopaal zal bepalend zijn voor de afmetingen. In de praktijk gaan monopalen het leeuwendeel vormen voor funderingen in offshore milieu met waterdiepte kleiner dan 25 meter [Achmus et al., 2007].

Er wordt ervan uit gegaan dat een monopaal een zuivere holle buis is. Voor het reduceren van de kosten kan men extra verstijvingen voorzien aan de monopaal. Op die manier wordt het geheel stijver en kunnen kleinere monopalen gekozen worden.

8.1 Materiaal

De monopaal bestaat uit een buis van staal. De afmetingen zijn hoofdzakelijk afkomstig van de sterkteberekening. De wanddikte bedraagt één honderdste van de diameter. Daarnaast zal de dikte ook deels afhangen van de heikrachten. Aangezien bij staal corrosie te vrezen is, moeten speciale voorzieningen genomen worden.

Naast een speciale verflaag, is er ook nog een overdimensionering voorzien. Het verlies aan wanddikte veroorzaakt door corrosie wordt dus in rekening gebracht. Volgens [De Rouck, 2008a] bedraagt de corrosiesnelheid in de Noordzee gemiddeld 0.12 mm per jaar. In warmere streken kan het gemiddelde oplopen tot 0.14 mm per jaar. De ISO normen [Living Steel, 2009] spreken over een corrosie van 0.06 tot 0.17 mm per jaar voor een maritiem milieu. Indien men de waarde 0.14 mm per jaar aanhoudt, dan is voor een levensduur van 25 jaar in de Noordzee, het verlies aan wanddikte gemiddeld 3.5 mm. Indien het zeewater ook binnenin de buis kan, moet een overdikte van 7 mm zeker voor handen zijn. Structuren die continu worden blootgesteld aan zeewater kunnen ook voorzien worden van coatings. Deze zorgen voor een sterke beperking van de corrosie. Bovendien zullen zij aangroei verminderen. Het nadeel is dat zij duur zijn en gevaar lopen op beschadiging bij het heien.

Meestal wordt voor stalen buizen een gewoon zacht staal gebruikt (staalsoort S355), doch bij zwaar heiwerk is het aan te bevelen een hoogwaardigere staalsoort [Van Impe, 2008a] te gebruiken. Een staalsoort S355 heeft een vloeigrens van 355 MPa. Dit wordt echter gereduceerd met 1.15 zodat de toelaatbare vloeigrens ongeveer 308 MPa bedraagt.

In tabel 8.1 staan bruikbare types vermeld. De benaming bevat de paaldiameter en de wanddikte. De wanddikte van de paal bedraagt één honderdste van de diameter. De elasticiteitsmodulus bedraagt 210000 MPa. De waarde $M_{s,d}$ is het maximale moment die mogelijk is zonder overschrijden van de toelaatbare spanning.

Benaming	Diameter [mm]	EI [kNm ²]	W [cm ³]	$M_{s,d}$ [kNm]	Gewicht [kN/m]
2000x20	2000	12804100	70583	18822	9.59
2100x21	2100	15563464	70583	21789	10.58
2200x22	2200	18746483	81154	25052	11.61
2300x23	2300	22394451	92731	28626	12.69

Tabel 8.1: Verschillende types van monopalen, met bijhorende eigenschappen. De staalkwaliteit is S355. (Verdere karakteristieken zijn te vinden in bijlage D)

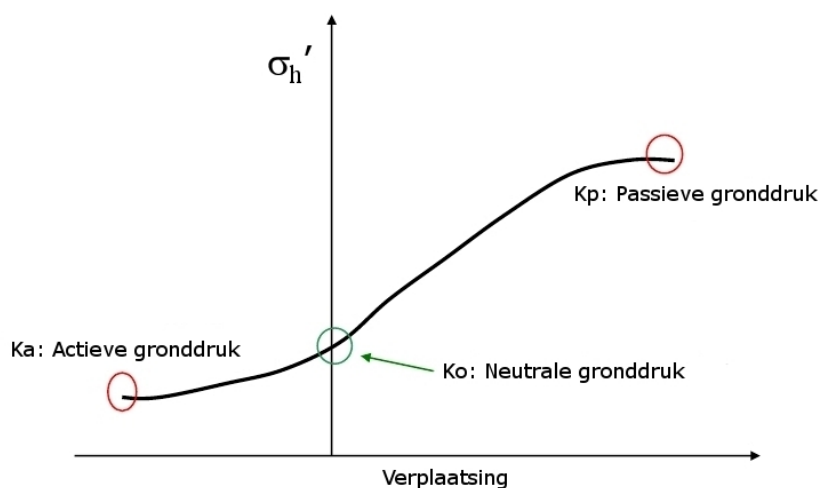
8.2 Grondkarakteristieken

8.2.1 Verenmodel versus Passief / Actief model

In deze thesis wordt de horizontale gronddruk berekend aan de hand van een verenmodel. Het gebruikte verenmodel wordt opgesteld met behulp van p - y curves volgens de API regelgeving [American Petroleum Institute, 1984]. Het gebruik van een verenmodel benadert sterker de werkelijkheid dan de theorie van passieve en actieve gronddruk.

Passief / Actief model

Passieve en actieve gronddruk treedt pas op na een voldoende grote zetting. Door de berekening uit te



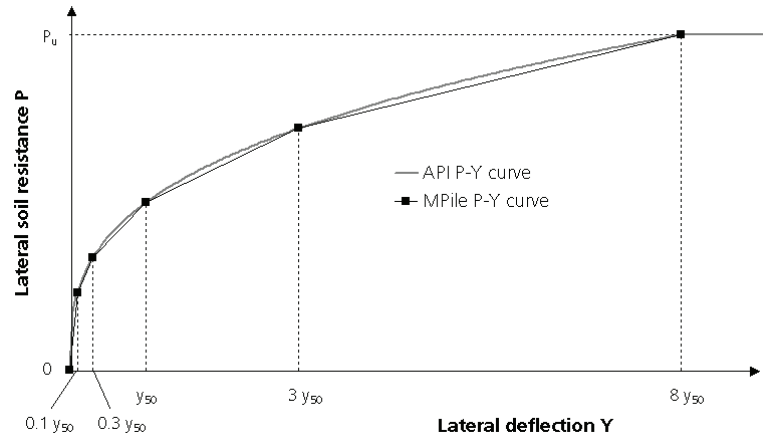
Figuur 8.1: Horizontale gronddruk in functie van de verplaatsing.

voeren met passieve en actieve druk gaat men ervan uit dat in het model de verplaatsing gekend zijn. Indien een figuur als figuur 7.4 verondersteld wordt, dan gaat men slechts rekening houden met ofwel passieve ofwel actieve gronddruk. Tusseliggende waarden zoals figuur 8.1 aanduidt, zijn hiermee niet mogelijk.

Indien men de paal beschouwd als een isostatische structuur met daarop de passieve en actieve gronddruk als belasting, is dit slechts een benadering van de werkelijkheid. In realiteit zal de paal in een soort verende bedding geplaatst worden, waarbij de horizontale gronddruk niet meer als belasting beschouwd wordt, maar wel dient als karakteristieken van het verensysteem.

Verenmodel

Het principe van het verenmodel is relatief eenvoudig. Aan de hand van grondkarakteristieken kan een spanningsrekdiagram opgesteld worden. Dit kan door bijvoorbeeld de regelgeving van API [American Petroleum Institute, 1984] of Van Impe [Van Impe en Reese, 2000] te volgen. In beide gevallen zijn de regels voor elk type grond verschillend.



Figuur 8.2: Horizontale gronddruk in functie van de verplaatsing volgens het API model.

Men zou kunnen vermoeden dat het punt in de oorsprong van figuur 8.2 zou moeten overeenkomen met K_0 in figuur 8.1. En dus dat de $p - y$ curve niet door de oorsprong mag gaan. Maar men moet zich bewust zijn dat het punt K_0 in figuur 8.1 afhankelijk van de richting van de infinitesimale zetting zich ofwel zal gedragen als belasting ofwel als weerstand biedend massief. Het punt K_0 is dus een speciaal punt. De richting van de horizontale gronddruk zal hier wijzigen. Figuur 8.2 is duidelijker. Indien geen belasting staat, kan er ook geen zetting zijn.

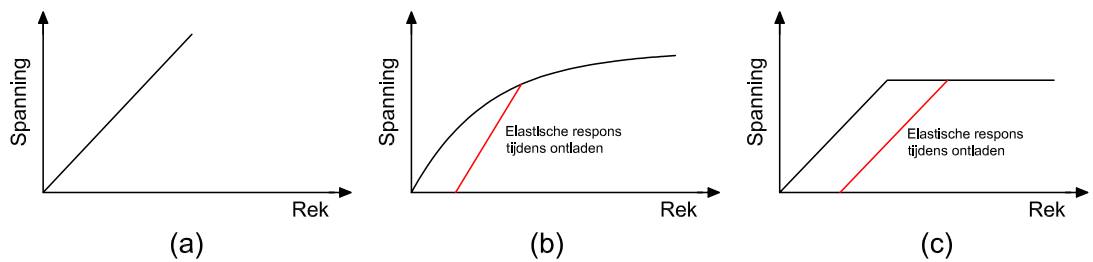
Door een flexibele paal (een paal met een stijfheid) te beschouwen in een verensysteem, benadert dit veel meer de werkelijkheid. De structuur wordt niet meer isostatisch beschouwd, maar maakt gebruik van een verende bedding.

8.2.2 Modelling van de grond

Grondkarakteristieken zijn zeer belangrijk in de berekening. Ze zullen mede bepalend zijn voor de inheidiepte van de monopaal. Op de Thorntonbank zijn waarden geldig als in tabel G.1. Let erop dat men zich in offshore condities bevindt. Golven en getijden kunnen een grote invloed uitoefenen op de waterspanning. In tabel G.1 valt op te merken dat de coëfficiënt van Poisson ν in enkele gevallen 0.5 wordt. Per definitie is 0.5 een onmogelijke waarde. Spanningen zouden hiermee kunnen oplopen tot oneindig, wat fysisch niet kan.

Anisotrop

De meeste gronden zijn anisotropisch. Anisotropische materialen hebben verschillende parameters in verschillende richtingen. In wat volgt, wordt ervan uit gegaan dat grond een isotropisch materiaal is bij gebrek aan laboratorium proeven. Hiervoor zijn er slechts één enkel stel parameters noodzakelijk. Die gelden dan in elke richting. Indien men wenst anisotrope modellen te gebruiken, dan zijn metingen noodzakelijk.



Figuur 8.3: Verschillende modellen voor het spanningsrekdiagram: (a) lineair elastisch model, (b) niet-lineair elastisch model en (c) geïdealiseerd elastoplastisch model.

Elastisch model

In figuur 8.3(a) is het elastische model weergegeven. De rechte bestaat uit een helling gekarakteriseerd door de E modulus. Een elastisch model is toegelaten bij kleine verplaatsingen. Indien de rek de vloeigrens niet overstijgt, zal het elastische model dezelfde waarden geven als het geïdealiseerde elastoplastische model. De volledige berekening gebeurt aan de hand van 2 grootheden: de E modulus en de coëfficiënt van Poisson. Let op het feit dat de maximale coëfficiënt van Poisson kleiner dan 0.5 moet zijn.

Het niet-lineaire elastische systeem uit figuur 8.3(b) benadert meer de werkelijkheid bij grotere vervormingen. Het valt echter op dat voor dit model een volledig verloop van het spanningsrekdiagram moet gekend zijn. Dit kan alleen volgen uit metingen en in-situ proeven.

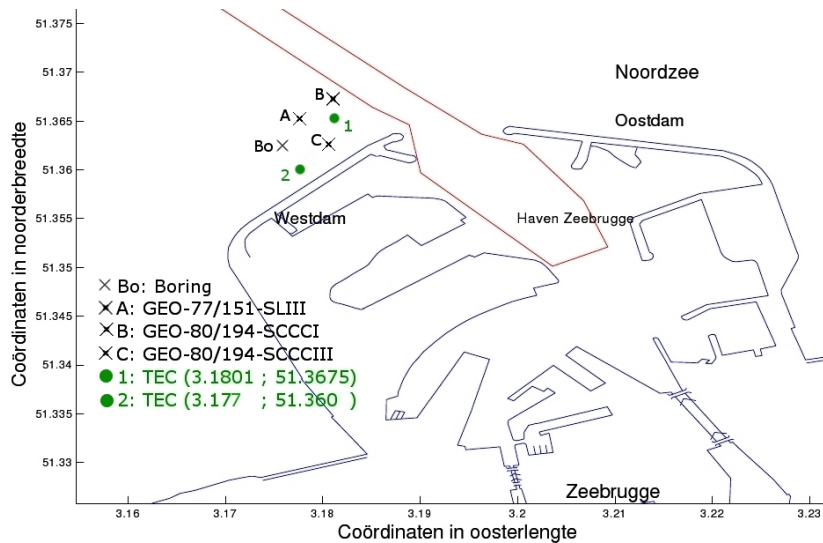
Elastoplastisch model

Gronden gedragen zich elastoplastisch bij grotere zettingen. Grond reageert elastisch op een bepaalde spanning totdat de vloeigrens is bereikt. Vanaf dan gedraagt de grond zich plastisch. Aangezien bij de monopaal de zettingen vrij hoog kunnen oplopen, wordt een elastoplastisch model gebruikt. Het elastoplastisch model wordt geïdealiseerd als in figuur 8.3(c). Voor zowel klei als zand is maar één stel parameters noodzakelijk.

p - y model

Hoewel Geoslope een algemeen gebruikt softwarepakket is, is de juistheid van de uitkomsten niet altijd exact. Zoals bij alle zaken in de grondmechanica moeten aannames gedaan worden. Een exactere modellering is te vinden bij [Van Impe en Reese, 2000]. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen slappe en stijve klei, al dan niet met vrij water, zand, $c-\Phi$ gronden en rotsgronden. Elke grondsoort heeft een kenmerkend verloop. Stijve kleien in een offshore milieu bijvoorbeeld, worden gekenmerkt door een grote piekspanning. Bij het overschrijden hiervan, daalt de spanning drastisch. Dit in tegenstelling tot de meeste zanden die geen verval kennen in het spanningsrekdiagram.

Het optreden van cyclische belasting in offshore condities brengt nog andere moeilijkheden met zich mee. Cyclische lasten veroorzaken een vermoeiingsproces en werken zo een degradatie van de grond in de hand. De modellen van [Van Impe en Reese, 2000] worden dan ook onderverdeeld in statische en cyclische lasten.



Figuur 8.4: Sondelingen en boring in omgeving van de TECs volgens [DOV, 2008].

API en API cyclisch

Het softwareprogramma MPile werkt met het zogenaamde API model. Het is een model gebaseerd op p - y modellen die geaccepteerd zijn door het API (American Petroleum Institute). Formulering van de modellen staat uitgewerkt in [Geodelft, 2006b]. Voor klei en zand bestaan een verschillende formuleringen zoals bij de p - y modellen. Cyclische lasten worden niet in rekening gebracht bij het kleimodel. Voor het zandmodel wordt een factor 0.9 toegepast om vermoeiing in rekening te brengen.

8.2.3 Sondelingen en grondkarakteristieken

In de buurt van de toekomstige plaats van de TEC bevinden zich 4 punten waarbij er vroeger al sondelingen gedaan werden. De 4 meetpunten bevinden zich maximaal 300 meter van de plaats van de TEC. Het betreft de sondelingen 'GEO-80/194-SCCCI', 'GEO-80/194-SCCCI', 'GEO-80/194-SCCIII' en 'GEO-77/151-SLIII' die terug te vinden zijn in de Databank Ondergrond Vlaanderen [DOV, 2008] en in bijlage G. Drie van de 4 zijn betrekkelijk gelijklopend. Eén daarentegen is niet gelijklopend. Het is een sondering die zich dicht tegen de vaargeul bevindt. Misschien is de sondering zelfs genomen in de vaargeul, alhoewel dit niet blijkt uit de plaatslocatie. Verder wordt deze sondering 'GEO-80/194-SCCCI' dus buiten beschouwing gelaten. Figuur 8.4 geeft de plaatsbepaling weer.

Sondering 'GEO-80/194-SCCCI', 'GEO-80/194-SCCCI' en 'GEO-77/151-SLIII'

In tabellen 8.2, 8.3 en 8.4 worden de verschillende grondlagen gegeven die volgen uit de sondelingen. Het betreft een discontinu mechanische sondering met een M4 conus. De sondering is uitgevoerd vanaf een hefeiland met een 200 kN sondeerapparaat.

Sondering voor de TEC

Uit deze drie sondelingen kunnen volgende zaken besloten worden. Er is bovenste laag aanwezig van ongeveer 5 meter ten opzicht van de aanvang van de sondering. De laag kan bestaan uit een los gepakte zandlaag met aanwezigheid van sliblenzen. Het zou ook een kleiige laag kunnen zijn. Maar in feite zal die bovenste laag niet veel rol spelen. Bij het aanbrengen van de erosiebescherming kan dit verwijderd worden.

Peil [m] TAW	q_c [MPa]	Grondsoort	γ_{sat} [kN/m ³]
-11.00 tot -14.20	0.5	Zachte klei	17
-14.20 tot -16.00	15	Middelmatig gepakt zand	20
-16.00 tot -18.80	5	Kleiig zand	20
-18.80 tot -25.00	10	Middelmatig gepakt zand	20
-25.00 tot -37.60	4	Klei	18.5

Tabel 8.2: Interpretatie van sondering 1: GEO-80/194-SCCCI. Zie figuur G.2.

Peil [m] TAW	q_c [MPa]	Grondsoort	γ_{sat} [kN/m ³]
-10.00 tot -13.20	0.5	Zachte klei	17
-13.20 tot -17.00	15	Middelmatig gepakt zand	20
-17.00 tot -18.80	5	Kleiig zand	20
-18.80 tot -29.00	10	Middelmatig gepakt zand	20
-29.00 tot -38.00	4	klei	18.5

Tabel 8.3: Interpretatie van sondering 2: GEO-80/194-SCCCIII. Zie figuur G.3.

Eénmaal dieper in de grond, is het grondmassief vrij sterk. Er is geen aanwezigheid van sliblagen. De verticale zetting zal dus beperkt zijn. De minimale conusweerstand bedraagt 4 MPa, met hier en daar een zeldzame onderschrijding veroorzaakt door een zeer dunne klei- en/of slibflens (dikte ≤ 20 centimeter).

Het spreekt vanzelf dat voor de plaatsing van een TEC een sondering ter plaatse zal moeten gebeuren. Om toch te kunnen verder rekenen, zonder sondeerdiagram, wordt een veilige keuze gemaakt van een eigen sondering. Het MSL bevindt zich 12 meter boven de bodem. In TAW wordt dit voor Zeebrugge dan -9.75 meter. Het referentievlak GLLWS ligt op -0.188 meter TAW of op 9.56 meter boven de bodem. In tabel 8.5 wordt een schatting gemaakt van de hoek van inwendige wrijving, het soortelijke gewicht en de ongedraineerde cohesie. De schattingen gebeuren aan de hand van resultaten van metingen op de Thorntonbank volgens [Mengé en Gunst, 2008]. Dit is te vinden in bijlage G.1.

Extra data

Bovenstaande gegevens zijn onvoldoende om een berekening uit te voeren. Indien het API zand model gebruikt wordt, moeten nog data gekend zijn voor K_0 , de zetting bij maximale mantelwrijving en de wrijvingshoek tussen buispaal en grond.

K_0 is de neutrale gronddruk coëfficiënt en wordt volgens [Jaky, 1948], in geval van normaal geconsolideerde grond, berekend als

$$K_0 = 1 - \sin\phi$$

Bij zandige gronden met een hoek van inwendige wrijving van 30 graden, bedraagt K_0 ongeveer 0.5.

De zetting bij maximale mantelwrijving wordt geschat aan de hand van API voorschriften. Het getal geeft de zetting weer die de paal minstens moet ondergaan om op volle mantelwrijving te kunnen werken. Voor zand wordt een standaard waarde van 0.00254 meter (1 inch) aangenomen. Voor kleigronden wordt het een formule in functie van de paaldiameter. Volgens API wordt dit op één honderdste van de paaldiameter geschat. De API voorschriften gaan ervan uit dat de monopaal ingedreven werd. Indien men gebruik zou maken van inlansen van de monopaal, dat moet hier aandacht aan besteed worden. De gewoelde grond zal beduidend meer zetting vooraleer de maximale mantelwrijving optreedt. De uitvoeringswijze zal hier een bijzondere rol in spelen.

Peil [m] TAW	q_c [MPa]	Grondsoort	γ_{sat} [kN/m ³]
-11.00 tot -14.20	0.5	Zachte klei	17
-14.20 tot -33.00	10	Middelmatig gepakt zand	20
-33.00 tot -37.00	4	Klei	18.5

Tabel 8.4: Interpretatie van sondering 3: GEO-77/151-SLIII. Zie figuur G.4.

Peil [m] TAW	q_c [MPa]	Grondsoort	γ_{sat} [kN/m ³]	c_u [kPa]	ϕ' [°]
-9.75 tot -14.00	0.5	Zachte klei (Slib)	16	20	20
-14.00 tot -16.00	8	Middelmatig gepakt, fijn zand	20	-	30
-16.00 tot -19.00	4	Klei	18.5	120	20
-19.00 tot -25.00	8	Middelmatig gepakt, fijn zand	20	-	30
-25.00 tot -38.00	4	Stijve klei	19	250	18
-38.00 en dieper	20	Dicht zand	20	-	35

Tabel 8.5: Fictieve sondering ter hoogte van de TEC, op basis van sonderingen en boringen [DOV, 2008].

De wrijving tussen de buispaal en de grond wordt geschat op 2/3 van de hoek van inwendige wrijving. Uit ervaringen blijkt dat dit de praktijk benaderd.

Voor de API klei modellen zijn nog andere data noodzakelijk. Zo moet er een empirische constante J , ongedraineerde schuifspanning en rek bij 0.5 keer faallast gekend zijn. De empirische constante J bedraagt tussen de 0.25 en 0.50. Een conservatieve benadering is de ondergrens. Het getal heeft betrekking tot de maximale weerstand van een grondlaag. Hoe kleiner J zal zijn, hoe kleiner de maximale weerstand geschat wordt. Meer informatie hieromtrent is te vinden in [Geodelft, 2006b].

De ongedraineerde schuifspanning in klei wordt bekomen door de formule [Van Impe, 2008b]

$$c_u = \frac{q_c}{N_c}$$

Hierbij is q_c de conusweerstand en N_c is een waarde tussen 10 en 30. Omdat deze waarden nog niet echt bepalend zijn, wordt er een verband getrokken tussen boringen en sonderingen op de Thornton-bank. Men ziet bepaalde zelfde grondlagen terugkomen. Hierbij werd de ongedraineerde schuifsterkte overgenomen.

De rek bij 0.5 keer de faallast is afhankelijk van c_u . Indien de waarden van API gevolgd worden, dan bekomt men tabel 8.6. De rek bij 0.5 keer de faallast is van bijzonder belang om de p - y curves op

c_u [kPa]	ε_{50} [-]
5 tot 25	0.020
26 tot 50	0.010
51 tot 100	0.007
101 tot 200	0.005
201 tot 400	0.004

Tabel 8.6: De rek horende bij 50 procent van de faallast volgens API [American Petroleum Institute, 1984].

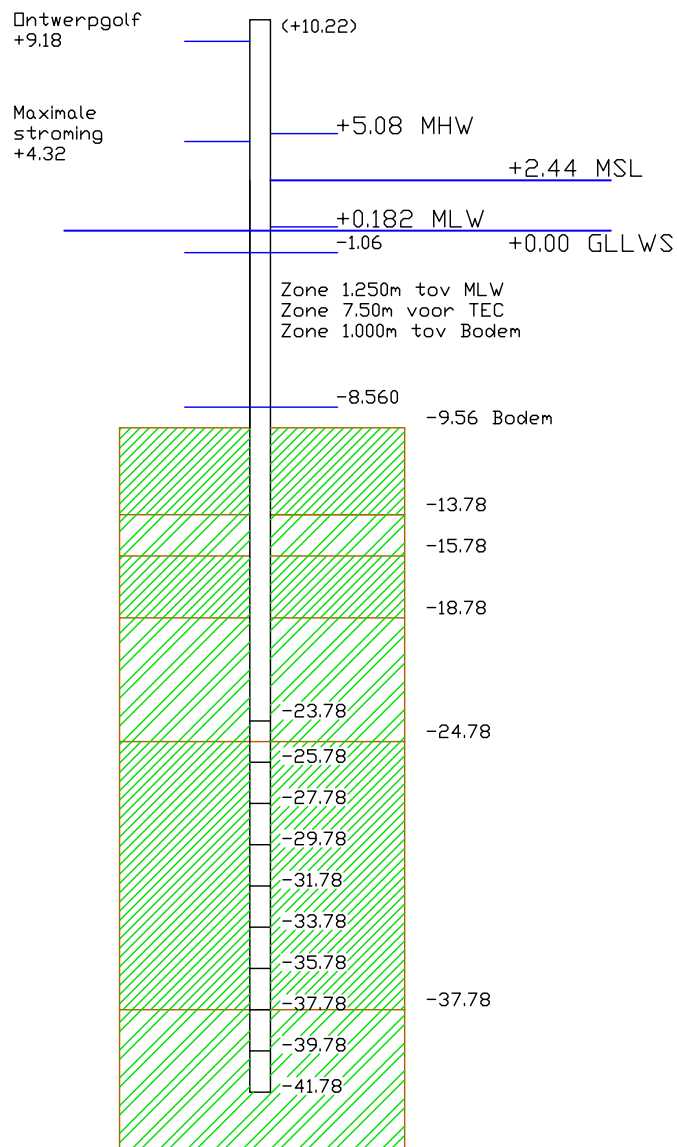
te stellen.

8.2.4 Waterniveau

De waterdieptes zijn redelijk verschillend van plaats tot plaats. In de omgeving van Zeebrugge kan men stellen dat de bodem ongeveer 12 meter is ten opzichte van MSL. Uit de analytische modellen haalt men dat het hoogste hoog en het laagste laag water zich op respectievelijk +2.645 en -2.258 bevindt ten opzichte van MSL. Het lijkt me evident om de turbine onder water te houden. Drijvende objecten kunnen zo niet geraakt worden. Een veiligheidsmarge van 1.25 meter wordt in rekening gebracht onder het laagste water. Dit betekent dat golven met golfhoogte 2.5 meter (lineaire golftheorie) mogen optreden in laagste laag water opdat de turbinebladen niet boven water uit zouden steken. Dit geldt voor meer dan 99 procent van de golven. Eveneens is tot de bodem een bepaalde marge gehouden. Er mag absoluut geen bodemcontact zijn. De onderste zone is ook niet nuttig. De hoeveelheid sediment kan de turbinebladen zwaarder belasten dan nodig. Bovendien is de snelheid aan de bodem kleiner en kan er dus minder energie geëxtraheerd worden. Er wordt een keuze gemaakt om een minimale afstand tussen bodem en de bladtip te houden van 1 meter.

Ook moet er rekening gehouden worden met de aanwezigheid van een erosielaag. De erosielaag wordt wel deels in de bodem geplaatst, maar de bovenkant van de toplaag ligt op een hoger niveau dan de bodem.

Met bovenstaande factoren en veiligheidsfactoren, kan er in Zeebrugge een TEC geplaatst worden van maximaal 7.492 meter diameter bij een diepte (van de top van de erosielaag tot MSL) van 12 meter. Alle peilen zijn weergegeven in figuur 8.5.



Figuur 8.5: Peilen bij een monopaal te Zeebrugge. Het referentievlak is GLLWS.

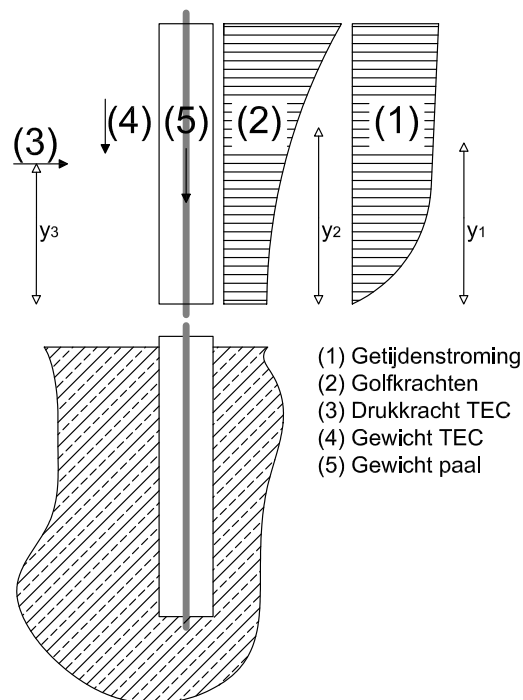
8.3 Belasting

De monopaal wordt belast door verschillende krachten. De belastingen zijn van verschillende aard. Naast permanente krachten zijn er ook nog de variabele, stochastische krachten. Deze laatste zijn krachten die kunnen optreden met een bepaalde voorkomingsfrequentie. Dit is bijvoorbeeld geldig voor golfkrachten. Golven worden als stochastische belasting beschouwd. Samen met de getijdenstroming, zullen golfkrachten de grootste belasting vormen.

Aangezien de fundering in alle gevallen moet kunnen stand houden, is het voldoende om de grootste én logische belasting te beschouwen. De volgende krachten zijn werkzaam op de structuur en worden weergegeven in figuur 8.6.

- Krachten op de paal door golven
- Krachten op de paal door stroming
- Krachten op de TEC door golven
- Krachten op de TEC door stroming
- Eigengewicht van TEC en paal

De monopaal wordt berekend in bezwijkgrenstoestand. Dit wil zeggen dat variabele lasten vermenigvuldigd worden met 0 of 1.5 afhankelijk van de gunstige of ongunstige invloed. Voor de vaste lasten wordt dit 1 of 1.35. Golfkrachten daarentegen worden, conform met de Shore Protection Manual [SPM, 1984], vermenigvuldigd met 2.5 voor brekende of 2 voor niet brekende golven.



Figuur 8.6: Krachten werkzaam op de monopaal. De krachten grijpen aan op een afstand van y_1 , y_2 of y_3 van de bodem.

8.3.1 Golven en stroming

Om optredende golfkrachten op cilindervormige palen te berekenen in offshore omstandigheden, zouden ongelijkmatige golven moeten verondersteld worden. In vele gevallen stelt men het voldoende dat één ontwerp golf optreedt, zodat de formules van Morison geldig zijn.

$$f = C_M \cdot \rho \cdot \frac{\pi D^2}{4} \frac{du}{dt} + C_D \cdot \rho \cdot \frac{D}{2} u |u| \quad (8.1)$$

Hierbij bedraagt C_M 1.5 en C_D 1. De belasting wordt gevonden aan de hand van de formules van Morison (Zie ook [De Rouck, 2008a]). Dit is gebaseerd op de lineaire golftheorie. Hoewel de lineaire theorie niet 100 procent nauwkeurig is, kan voor hier toch worden op gesteund. Het zal van een eerder conservatieve grote zijn. Hierbij wordt de grootste kracht beschouwd. Dit wil zeggen, de grootste golf en de sterkste stroming in één zelfde richting zijn op elkaar gesuperponeerd. De stroming in de oost-westelijke richting kan zo samen met de golven komende uit de het oosten en het westen gesuperponeerd worden.

Hoewel de belasting van golven en stroming een cyclische belasting is, mag een statische equivalent genomen worden [Achmus et al., 2007] ter bepaling van de monopaal. De bepaling van de stroming en de golven wordt uiteen gezet in hoofdstuk 6.

De ontwerp golf, zoals berekend in hoofdstuk 6.2.7, bedraagt 10 meter (H_{max}) of 9 meter ($H_{1\%}$) met een golfperiode van 8 seconden.

Volgens de Shore Protection Manual [SPM, 1984] moet een veiligheidsfactor ingebracht worden voor de golfkrachten. Aan de hand van Miche [CEM, 2006] wordt formule 8.2 berekend. De ontwerp golf is brekend en er wordt 2.5 aangenomen als veiligheidsfactor.

$$\frac{H_d}{L_d} = 0.142 \cdot \tanh(kd) \quad (8.2)$$

In tabel 8.7 zijn de krachten berekend (formule 8.1) die werken op een paal van een bepaalde diameter. De stromingskracht wordt bekomen door de maximale stroming te beschouwen (Zie hoofdstuk 6).

Monopaal	Stroming [kN]	Golf H_{max} [kN]	ULS *	Afstand ** [m]	Golf $H_{1\%}$ [kN]	ULS *	Afstand ** [m]
1700x17	43.7	-	-	-	201	568	9.84
1800x18	46.1	-	-	-	217	611	9.84
1900x19	48.5	284	784	10.10	233	656	9.83
2000x20	50.9	304	837	10.09	250	702	9.82
2100x21	53.3	324	890	9.98	-	-	-
2200x22	55.7	346	945	9.97	-	-	-
2300x23	58.1	368	1006	9.96	-	-	-

(*) Kracht in uiterste grenstoestand (golf 2.5, stroming 1.5)

(**) Ten opzichte van de bodem.

Tabel 8.7: Grootte van stromings- en golfkrachten op een monopaal.

8.3.2 Krachten op de TEC

Geen straalbuis - Propeller type

Als turbine wordt een propeller type gekozen met 2 vleugels. Voor de veiligheid wordt een extra veiligheid ingebouwd. De vrij draaiende vleugels mogen in geen geval de bodem raken. Daarom wordt de diameter van de turbine 7 meter gekozen. De krachten op de turbines worden begroot met behulp

van hoofdstuk 4 en wordt in bijlage A uitgerekend. Een samenvatting is te vinden in tabel 8.8. De krachten zijn geldig indien geen straalbuis aanwezig is. Er wordt een extra drukkracht in rekening gebracht voor de naaf en de verbindingstukken van 45 kN. Uit modelproeven zal moeten blijken hoe groot zij effectief zijn. Indien één TEC wordt geplaatst op een monopaal, dan zal er een torsie zijn

	Diameter [m]	Kracht [kN]	Kracht in ULS [kN]	Torsie [kNm]	Aangrijppunt [m boven bodem]
1 TEC	7	10.3 + 45 *	82.95	19.3	5
2 TECs	7	20.6 + 90 *	165.9	0	5

(*) Eerste getal is de kracht op de vleugels, tweede getal op de draagstructuur.

Tabel 8.8: Stromingskrachten op een TEC met propeller type en 2 vleugels (geen straalbuis aanwezig).

op de paal. Wanneer er langs beide kanten van de paal een TEC wordt gehangen, dan kan de torsie langs beide kanten tegengesteld werken zodat er geen kracht overgedragen wordt naar de fundering.

Deze configuratie staat berekend in bijlage F.

Straalbuis aanwezig - openhydro turbine

Omdat een straalbuis een gunstige invloed heeft, wordt gekeken hoe groot de krachten zijn. Omdat de turbine beschermt zit in een buis, is het geoorloofd om kleinere veiligheden te beschouwen wat betreft afstand tot de bodem en tot het waterpeil. Daarom kan er een grotere diameter (7.5 meter) voorzien worden. Wanneer er een straalbuis geplaatst wordt, dan krijgt men krachten als in tabel 8.9. Deze zijn berekend in bijlage B. Door de aanwezigheid van een straalbuis, treedt er een extra kracht op van

	Diameter [m]	Kracht [kN]	Kracht in ULS [kN]	Torsie [kNm]	Aangrijppunt [m boven bodem]
1 TEC	7.5	48	72	65	4.75
2 TECs	7.5	96	144	0	4.75
Vernauwing	7.5	45	67.5	-	4.75

Tabel 8.9: Stromingskrachten op een TEC (openhydro met straalbuis).

45 kN veroorzaakt door de vernauwing van de buis.

De aanwezigheid van de straalbuis zorgt nog voor andere krachten. Indien de golven aanvallen van opzij, dan vindt men de golfkrachten 4 en 5 in tabel 8.10. Naast de getijdenstroming is er ook een

Nummer	Type druk	Werking	Grootte*	Grootte **
			[kN]	[kN]
4a	Horizontaal	Op buis	320	262
4b	Horizontaal	Op 2 buizen	497	407
5a	Verticaal	Op buis	98	83
5b	Verticaal	Op 2 buizen	136	115
6a	Horizontaal	In buis	225	182
6b	Horizontaal	In 2 buizen	450	365

(*) ontwerpgolf H_{max} 10 meter

(**) ontwerpgolf $H_{1\%}$ 9 meter

Tabel 8.10: Golfkrachten (karakteristieke waarden) van een ontwerpgolf van 10 meter op een TEC (met straalbuis).

bepaalde stroming die doorheen de TECs gaat die opgewekt werd door de golven. Deze drukkracht is sterk cyclisch. Er kan vanuit gegaan worden dat de traagheid van de TECs zodanig is, dat gedurende een periode van 8 seconden (ontwerp golf) geen reactie mogelijk is op deze kracht. Hierdoor is het alsof het water tegen een wand stroomt.

De ontwerp golf brengt een bepaald snelheidsprofiel met zich mee. Indien er wordt uitgemiddeld over de hoogte van de TEC, dan krijgt men een gemiddelde horizontale snelheid van 3.218 m/s voor een ontwerp golf van 10 meter en 2.896 m/s voor een ontwerp golf van 9 meter. Indien men een conservatieve benadering aanneemt, dan zou men kunnen stellen dat de aangepaste wet van impuls van toepassing is (formules hoofdstuk 5.4.2). Voor een turbine in een straalbuis (diameter 7.5 meter) met in het midden een opening van 1.5 meter, worden de krachten gevonden zoals in tabel 8.10. In ULS worden de golfkrachten werkende op de TECs vermenigvuldigd met 1.5.

8.3.3 Eigengewicht

Het gewicht van een TEC met diameter 7 meter, wordt geschat op 125 kN per turbine. Indien de TECs een diameter 7.5 meter hebben dan is hun eigengewicht, inclusief de straalbuis, 135 kN. Het eigengewicht van de monopaal is terug te vinden in tabel 8.1. In ULS wordt het eigengewicht vermenigvuldigd met 1.35 of 1.

8.3.4 Windkrachten

Volgens [De Wolf et al., 1994] bedraagt de dynamische windkracht op de palen 10 meter boven het maatgevend laag water 0.9 kN/m^2 in de omgeving van Zeebrugge. Het is duidelijk dat de windkracht van een veel kleinere grootteorde is dan golf- en stromingskrachten en worden daarom ook verwaarloosd.

8.4 Criteria

8.4.1 Draagvermogen

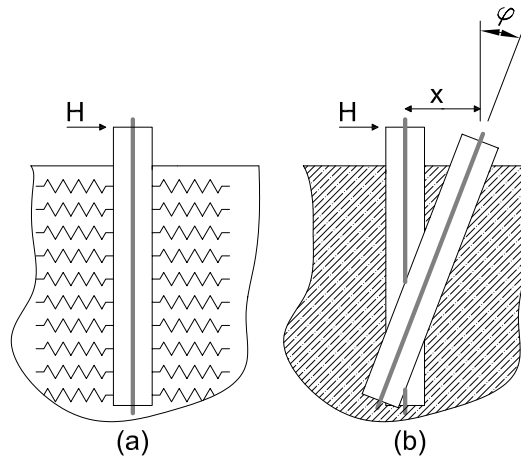
Het draagvermogen van de monopaal mag niet overschreden worden. Dit voor zowel de paal als voor de grond. Omdat de getijdenconvertoren en de monopaal niet danig zwaar zijn, zal het verticale draagvermogen nooit bepalend zijn.

8.4.2 Verticale vervormingen - zettingen

Hoewel in de normale bouwkunde zettingen van groot belang zijn, is de verticale verplaatsing van een enkelvoudige monopaal van geen tel. Differentiële zettingen zijn niet te vrezen en totale zettingen mogen vrij groot zijn. Het enige criteria dat van toepassing is, is dat de vleugels de bodem niet mogen raken. Aangezien in offshore milieu de bodem vrij beweeglijk is, is de afstand bodem - vleugels al ruim gekozen. Bovendien zijn zettingen niet zozeer te vrezen wegens de lage verticale belasting. Enige voorzorg dient getroffen te worden bij de verbinding van kabel naar fundering.

8.4.3 Horizontale vervormingen

Onder de horizontale belasting gaat de monopaal zich vervormen. Figuur 8.7(a) toont aan dat de paal zich in de grond gedraagt als een verensysteem. Daardoor treden er horizontale zettingen op zoals te zien is in figuur 8.7(b). De verplaatsing zorgt voor een hoekrotatie in de paal. Deze hoekrotatie moet wel gecontroleerd worden. Indien de verdraaiing van de paalkop te hoog zou oplopen, dan ondervindt de turbine last van de stroming die niet meer loodrecht aanstroomt. Daardoor zouden de vleugels aan grotere cyclische krachten worden blootgesteld. Eveneens is er een verminderd vermogen vast te stellen.



Figuur 8.7: Onder laterale belasting gedraagt grond zich als een (a) verensysteem en veroorzaakt (b) horizontale zettingen.

Volgens [Achmus et al., 2008] mogen monopalen een maximale permanente hoekrotatie van 0.5 graden hebben aan de paalkop. Dit is echter voor funderingen van een windmolen. Het is logisch dat de maximale hoekrotatie voor een TEC hoger mag zijn (wegens veel beperktere hoogte). Hiervoor bestaat er geen literatuur en dus wordt een maximale hoekrotatie van 1 graad aangenomen. Men moet zich bewust zijn van het feit dat cyclische belasting vermoeiing in de hand werkt. Daarom zal naarmate het aantal cycli toeneemt, de vervorming en de hoekrotatie aan de paalkop toenemen [Achmus et al., 2008].

8.4.4 Inheien

Het inheien van een buispaal is redelijk eenvoudig. Omwille van de opening kan er grond in de buis terecht komen. Dit vormt een prop. Volgens [Van Impe, 2008a] kan de grondprop tot een maximale hoogte schuiven van

$$H \geq \frac{d_g D}{\tau 4}$$

Zodra de prop zich in evenwichtstoestand bevindt, wordt de paal een verdringingspaal met de diameter van de buispaal. Verdringingspalen met een dergelijke diameter kennen een bijzonder grote puntweerstand. Het zou dus kunnen dat de paal niet meer in te drijven is. Anderzijds, kan men de prop in de buispaal weglansen. Het doorbreken van de prop betekent wel een sterke daling in de puntweerstand. Voor de fundering van de TECs hoeft dit geen probleem te zijn. De verticale belasting van de paal is laag. Daarom is er geen nood aan een grote puntweerstand.

8.4.5 Spanningen

De spanningen in de buispaal mogen niet hoger oplopen dan de maximaal toelaatbare spanning. In tabel 8.1 is gegeven wat het maximale ontwerpmoment (afhankelijk van de staalkwaliteit) mag zijn bij elke buispaal. Aan de hand van de momentenlijn kan berekend worden of de spanning voldoet. Het eigengewicht van de paal en toestellen zorgt voor een extra drukspanning. Dit zal echter van een veel kleinere grootteorde zijn dan de buigspanningen.

8.5 Software

De monopalen worden berekend op basis van volgende programma's. De verschillen tussen de programma's zijn niet significant. Beide geven ongeveer dezelfde resultaten.

8.5.1 Sigma/W

Het programma Sigma/W (Versie office 5) van Geoslope [Geoslope, 2006] is een eindig elementen pakket (Eng.: FEM) die in staat is vervormingen en spanningen te bepalen. De software is niet in staat om paalstructuren boven de grond te plaatsen. Er moet dus een oplossing gevonden worden om alle krachten te kunnen meerekenen. De verticale en horizontale componenten zijn gemakkelijk berekenbaar. Het moment kan omgevormd worden tot een koppel van verticale krachten met een gekende hefboomsarm.

8.5.2 MPile

Het programma MPile (Versie 4.1) [Geodelft, 2006a] is in staat om momentenlijnen van buispalen te berekenen. Hierbij wordt het 'Cap' model gebruikt. De interactie tussen grond en buispaal wordt elastoplastisch beschouwd. De interactie kan visueel voorgesteld worden als figuur 8.7. Het is mogelijk om de p - y curves van de verschillende grondlagen op te vragen.

8.6 Resultaten

In de resultaten is gerekend met een ontwerpgolf van 10 meter (H_{max}) en een golfperiode van 8 seconden.

8.6.1 Monopaal met 2 TECs in een straalbuis

Er wordt een monopaal met 2 TECs berekend als in figuur 7.6. De ontwerpgolf komt uit het oost noordoosten. Dit blijkt de grootste krachten op te wekken. De volledige golfkracht op de paal wordt in rekening gebracht, evenals de kracht 6b als in tabel 8.10.

Bij een golfaanval uit het noord noordwesten worden er golfkrachten 4b en 5b op de TEC opgewekt. Op de monopaal is er echter geen volledige golfkracht aanwezig, omdat die in de schaduw ligt van de straalbuizen.

Krachten

De krachten op een monopaal 2200x22 met 2 TECs worden weergegeven in tabel 8.11. Uit tabel 8.12

Verticaal	991 kN
Horizontaal	1835 kN
Moment (ter hoogte van 'naaf')	4948 kNm

Tabel 8.11: Krachten (in ULS) op een monopaal 2200x22, lengte 40 meter.

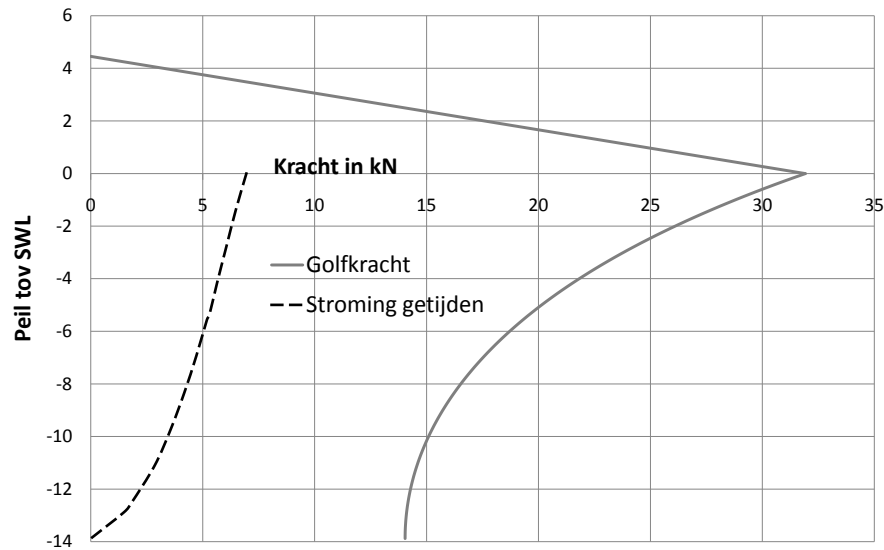
blijkt dat de golfkracht veruit het grootste aandeel in de horizontale kracht inneemt. In figuur 8.8 worden de golfkracht en de stromingskracht op de monopaal getekend. De grootste kracht treedt op 0.6 seconden voor de golftop.

Resultaten

Met behulp van software (MPile en Sigma/W) wordt tabel 8.13 bekomen. Voor een monopaal 2100x21, 2200x22 en 2300x23 bedraagt $M_{S,d}$ volgens tabel 8.1 respectievelijk 21789 kNm, 25052 kNm en 28626 kNm. Monopalen van 2100x21 zijn dus onstabiel vanwege het overschrijden van de maximaal toelaatbare spanning.

	Kracht [kN]	Aandeel [%]
Golven paal	864	47
Stroming paal	84	4.6
Golven TEC	675	36.8
Stroming TEC	212	11.6
	1835	100

Tabel 8.12: De grootte van elke kracht op een monopaal 2200x22 en het aandeel ervan in de totale horizontale kracht.



Figuur 8.8: Golf- en stromingskrachten op een monopaal 2200x22. De grootste kracht treedt 0.6 seconde voor de golftop op. Op dat moment bedraagt de golftop 4.45 meter boven SWL.

Een ander criteria is de maximaal toelaatbare hoekrotatie van de monopaal. Indien de hoekrotatie meer dan 1 graad bedraagt (meer dan 17.45 mm/m) wordt de configuratie niet stabiel bevonden. Bijgevolg kan men zeggen dat ook de monopaal 2200x22 met lengte 36 en 38 meter onstabiel is.

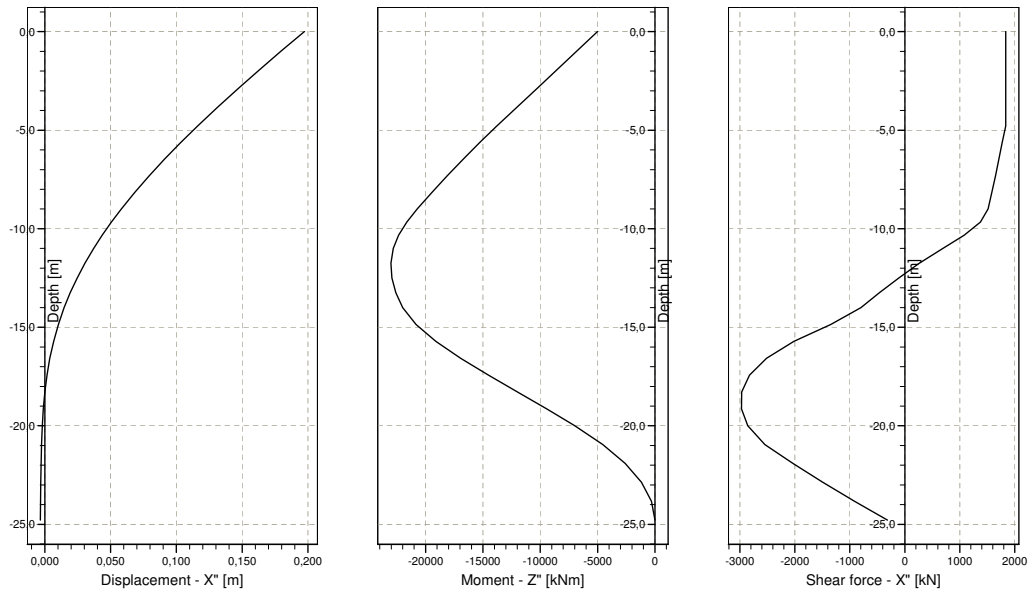
In geval de monopaal 2200x22 op een diepte steekt van -29.78 of meer, valt het op dat de horizontale zettingen maximaal 11 centimeter (op bodem niveau) bedragen en dit in extremale belasting. Door grotere paal diameters te kiezen wordt de horizontale zetting verkleint.

De keuze gaat uit naar een monopaal van 2200x22 met een steek van 40 meter. De rotatie van de monopaal bedraagt ongeveer 0.97 graden. Dit valt binnen de voorgestelde eisen.

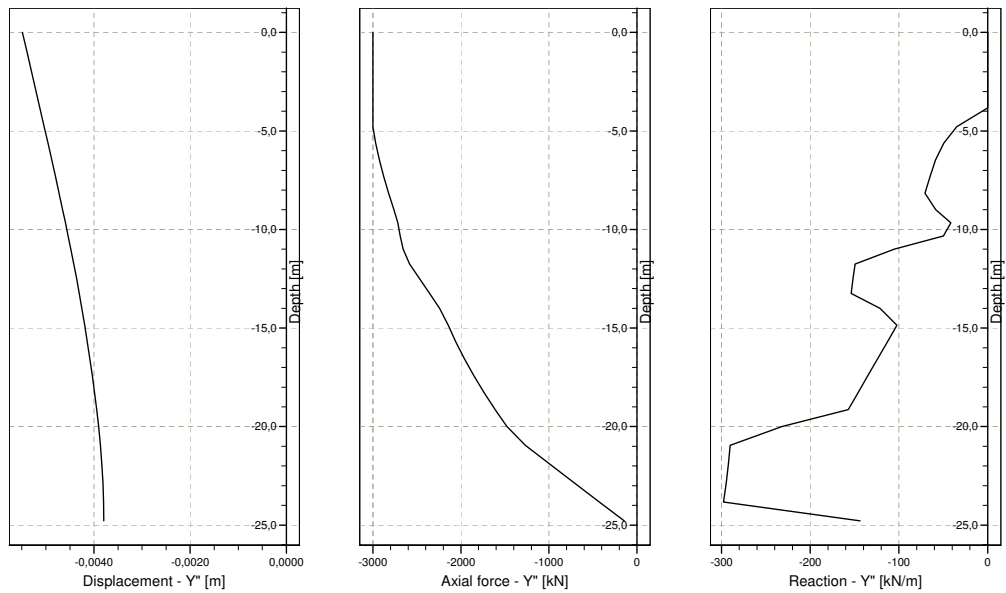
Momenten en verplaatsingen

Voor een monopaal 2200x22 met lengte 40 meter (peil -29.78 meter TAW) wordt er een horizontale verplaatsing, momentenlijn en dwarskrachtenlijn gevonden als in figuur 8.9.

De verticale verplaatsing, normaalkracht en de reactiekracht op de grond wordt weergegeven in figuur 8.10 voor een monopaal 2200x22 met lengte 40 meter.



Figuur 8.9: Horizontale verplaatsing, momentenlijn en dwarskrachtenlijn van een monopaal 2200x22 met lengte 40 meter.



Figuur 8.10: Verticale verplaatsing, normaalkracht en de reactiekracht op de grond bij een monopaal 2200x22 met lengte 40 meter.

Monopaal	Peil aan top [m GLLWS]	Lengte [m]	Gewicht* [kN]	M [kNm]	δ_{top} [mm]	δ_{grond} [mm]	Rot.top [mm/m]	Stabiel
2100x21	tot -29.78	40	936	22440	224	127	19.4	nee
	tot -31.78	42	964	22460	222	124	19.6	nee
2200x22	tot -25.78	36	929	22850	250	150	20.0	nee
	tot -27.78	38	960	22920	228	134	18.8	nee
	tot -29.78	40	991	23010	197	112	17.0	ja
	tot -31.78	42	1023	23065	194	111	16.6	ja
	tot -33.78	44	1054	23065	194	110	16.8	ja
	tot -35.78	46	1085	23000	194	110	16.8	ja
2300x23	tot -29.78	40	1050	24370	182	105	15.4	ja
	tot -31.78	42	1084	24360	177	103	14.8	ja

(*) Gewicht in ULS inclusief monopaal en 2 TECs.

Tabel 8.13: Resultaten van berekeningen van een monopaal te Zeebrugge.

Verticaal draagvermogen

Uit figuur 8.10 blijkt dat zonder puntdraagvermogen de monopaal stabiel is. Dit is louter te wijten aan de schuifspanningen die optreden langs de mantel van de monopaal. Indien ook de puntweerstand wordt berekend, dan zal het verticale evenwicht zeker voldoen. De puntweerstand wordt berekend aan de hand van een rekenblad [Van Impe, 2008a]. Indien de paal aangrijpt op een diepte van -29.78 meter TAW, kan op een nuttig (veiligheidsfactor 2) draagvermogen gerekend worden van 301 kN. Dit volgt uit tabel 8.14.

Ω_b	0.1505 m^2
$q_{r,vanimpe}$	4 MPa
Q_r	602 kN
$Q_{r,n}$	301 kN

Tabel 8.14: Berekening van de (minimale) puntweerstand van een monopaal 2200x22 op een diepte van -29.78 meter TAW.

Deze puntweerstand is de minimum puntweerstand die zal optreden. Enkel de manteloppervlakte is beschouwd.

$$\Omega_b = \frac{\pi 2.2^2}{4} - \frac{\pi 2.156^2}{4}$$

Indien er zich een prop vormt in de monopaal, kan het draagvermogen aan de punt zeer sterk oplopen. Dit betekent een positieve invloed op het totale verticale draagvermogen. Het is duidelijk dat de puntweerstand afhankelijk zal zijn van de uitvoeringswijze (bijvoorbeeld lanssen). Maar in geen geval hoeft men het overschrijden van het verticale draagvermogen te vrezen. De verticale zetting loopt op tot ongeveer 4 millimeter, wat zeker te aanvaarden is.

8.7 Bodembescherming

Het plaatsen van een monopaal in een stroming heeft invloed op de stroming. Door plaatselijke hogere schuifspanningen treedt er erosie van de bodem op. Volgens recente studies kan de erosiediepte bij het ontbreken van een gepaste erosiebescherming, oplopen tot ongeveer 2 keer de diameter [De Vos, 2008] van de monopaal. De stroming ontstaat door getijdenstroming en golven.

In wat volgt wordt de erosiebescherming berekend met software [De Vos, 2008] volgens een statisch stabiele toestand. Er wordt met andere woorden geen rekening gehouden met verplaatsing van de elementen van de erosielaag. Zowel de input gegevens als de output van het programma worden gegeven in tabel 8.15. Uit de dataset C volgt dat de gemiddelde golfhoogte 0.744 meter bedraagt.

Parameter	Waarde
Waterdiepte	12 m
Uitgemiddelde stroomsnelheid	1.56 m/s
Jonswap spectrum	$\gamma = 3.3$
H_{m0}	1.19 m
T_p	4 s
Diameter monopaal	2.2 m
Vereiste $D_{67.5}$	0.2199 m
$D_{67.5}$ 90% bovenlimiet	0.2603 m
$D_{67.5}$ 90% onderlimiet	0.1795 m
Vereiste D_{50}	0.1469 m

Tabel 8.15: Input en output in het programma 'Scour Protection Design' van [De Vos, 2008].

Indien de dataset zich gedraagt als een Rayleigh distributie, dan kan bij benadering gesteld worden dat de significante golfhoogte H_s gelijk is aan 1.19 meter. Volgens de Rayleigh distributie geldt er immers $H_m = 0.626H_s$. Hierdoor wordt ook H_{m0} bij benadering 1.19 meter. De bijhorende periode wordt geschat op 4 seconden, volgens figuur 6.12.

Met de nominale diameter D_{n50} kan een overeenkomstige gewichtsklasse van stenen gevonden worden.

$$W_{50} = \rho g D_{n50}^3$$

Er wordt een gewicht gevonden van 82.4 kN. Dit komt overeen met het gewicht van een steen waarbij 50 procent van de andere stenen kleiner is. Om een praktische gewichtsverdeling van de erosielaag te beschouwen, kan men de [SPM, 1984] gebruiken.

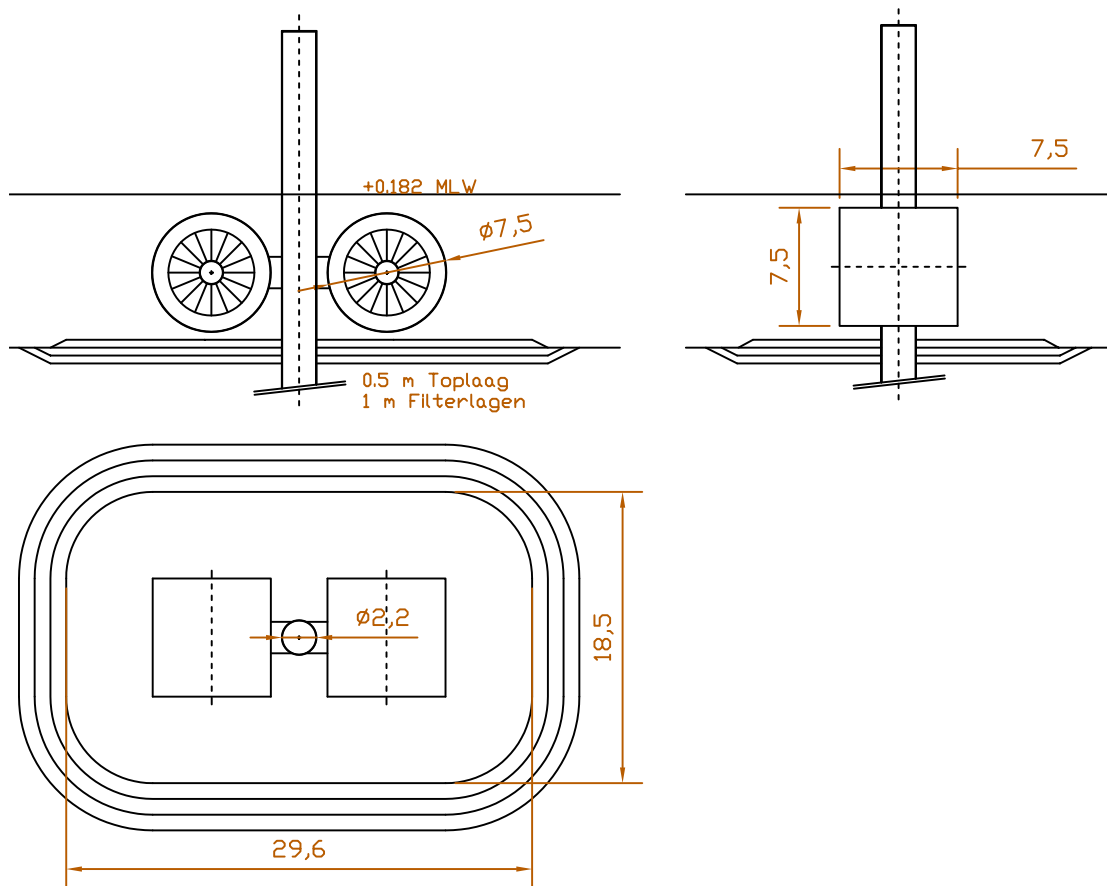
$$0.125W_{50} < W < 4W_{50}$$

Er wordt een toplaag gevonden van 10.3 kN - 330 kN. Dit komt overeen met een gewicht van 1 kg - 34 kg. Als toplaag kan de steenklasse 2-80 kg [De Rouck, 2008b] gebruikt worden. Er moeten eveneens filterlagen aangebracht worden. Deze zijn berekend en worden weergegeven in tabel 8.16. Er wordt

Filterlaag	Kaliber	Dikte
Toplaag	Steenklasse 2-80 kg (*)	0.5 m
Filterlaag 1	Steenslag 8/22 (*)	0.5 m
Filterlaag 2	Zeegrind 0.25 / 7 mm (**)	0.5 m
Bodem	$D_{50} = 200 \mu m$	-
(*) Verdelingscurves volgens [De Rouck, 2008b]		
(**) Verdelingscurve volgens [CIRIA/CUR, 1991]		

Tabel 8.16: Filter- en toplagen rond de monopaal.

vanuit gegaan dat een storter met dergelijke nauwkeurigheid kan werken. Volgens [Van Oord, 2002] kan er bij de 2 filterlagen zelfs een dikte van 30 centimeter worden aangenomen. De erosielen moeten uitgestrekt worden rond de monopaal. De diameter van de erosiebescherming kan veiligheidshalve geschat worden op 5 keer de paaldiameter [May et al., 2002].



Figuur 8.11: Geometrie van de erosielagen rond de monopaal.

Dit is echter het geval indien er een alleenstaande monopaal is. In het geval met 2 TECs opgehangen, zal de erosiebescherming waarschijnlijk uitgestrekter moeten zijn. Hierover bestaat er helemaal geen literatuur. Er wordt aangenomen dat 5 keer de paaldiameter (11 meter) behouden blijft, maar dit wordt uitgezet langsheen de monopaal en TECs. Een schets is weergegeven in figuur 8.11. In dit geval bedraagt het totale volume van de erosielagen 1050 kubieke meter. Dit komt overeen met totale gewicht van ongeveer 2800 ton.

8.8 Kosten

De kosten van een monopaal worden begroot op 1 euro per kilogram staal. Dit gebeurde op basis van een schatting met datum mei 2002 volgens [DOWEC, 2002]. Een monopaal 2200x22 zou hiermee geraamd worden op 1200 euro per meter. Voor een monopaal met lengte 40 meter is de totaalprijs 48000 euro.

Het aanleggen van de erosiebescherming wordt geraamd op 310000 euro. In de aanlegkost zit zowel de plaatsingskost van de erosielagen (150000 euro) en de transportkosten van de werktuigen (160000 euro). De prijzen zijn gebaseerd op een studie van [DOWEC, 2002] waarvan [Van Oord, 2002] de prijs gaf in het mei 2002. De prijzen zijn op heden niet meer relevant, maar kunnen een eerste benadering geven van de kostprijs.

8.9 Besluit

Het blijkt dat er minimaal een monopaal 2200x22 noodzakelijk is om stabiliteit te garanderen. Dit is bij een monopaal met 2 TECs in een straalbuis zoals weergegeven in figuur 7.6. Doordat de golven brekend zijn, is het aandeel van de golfkracht in de totale kracht zeer bepalend. Door over te gaan naar een ontwerpgolf van 9 meter (bij $H_{1\%}$) wordt de monopaal 2000x20.

Indien de veiligheidscoëfficiënten veranderen, varieert ook de minimaal noodzakelijke monopaal. Dit is weergegeven in tabel 8.17 en is geverifieerd aan de hand van MPile en Sigma/W.

Golfkracht paal*	2.5	2	2.5	2
Andere krachten**	1.5	1.5	1	1
$H_{1\%}$	2000x20	1900x19	1800x18	1700x17
H_{max}	2200x22	2100x21	2000x20	1900x19

(*) Golfkracht op de monopaal.

(**) Golfkracht en stroming op de TEC, stroming op de paal.

Tabel 8.17: Minimale monopaal afmetingen bij variërende veiligheidscoëfficiënten voor de optredende krachten. Dit is bij een configuratie: 2 TECs in een straalbuis diameter 7.5 meter en paallengte tot -29.78 meter TAW.

In alle gevallen lijkt een monopaal een grote investering. De geometrie van de monopalen is sterk afhankelijk van de beschouwde veiligheidscoëfficiënten. In tabel 8.17 is het verschil tussen de grootste en de kleinste monopaal 0.5 meter. Aangezien de kostprijs recht evenredig is met het aantal kilo's staal, is er tussen beide monopalen een verschil van 45 procent.

Te grote staalspanning of te grote hoekrotatie vormen de criteria. In het definitieve ontwerp is het geen slecht idee om verstijvingen te voorzien. Hierdoor zullen kleinere diameters van buizen mogen gebruikt worden.

De monopaal 2200x22 moet bestand zijn tegen het maritiem klimaat. Er is een speciale verflaag voorzien ofwel is er een overdikte van 7 millimeter. De wand wordt dan 29 millimeter.

Hoofdstuk 9

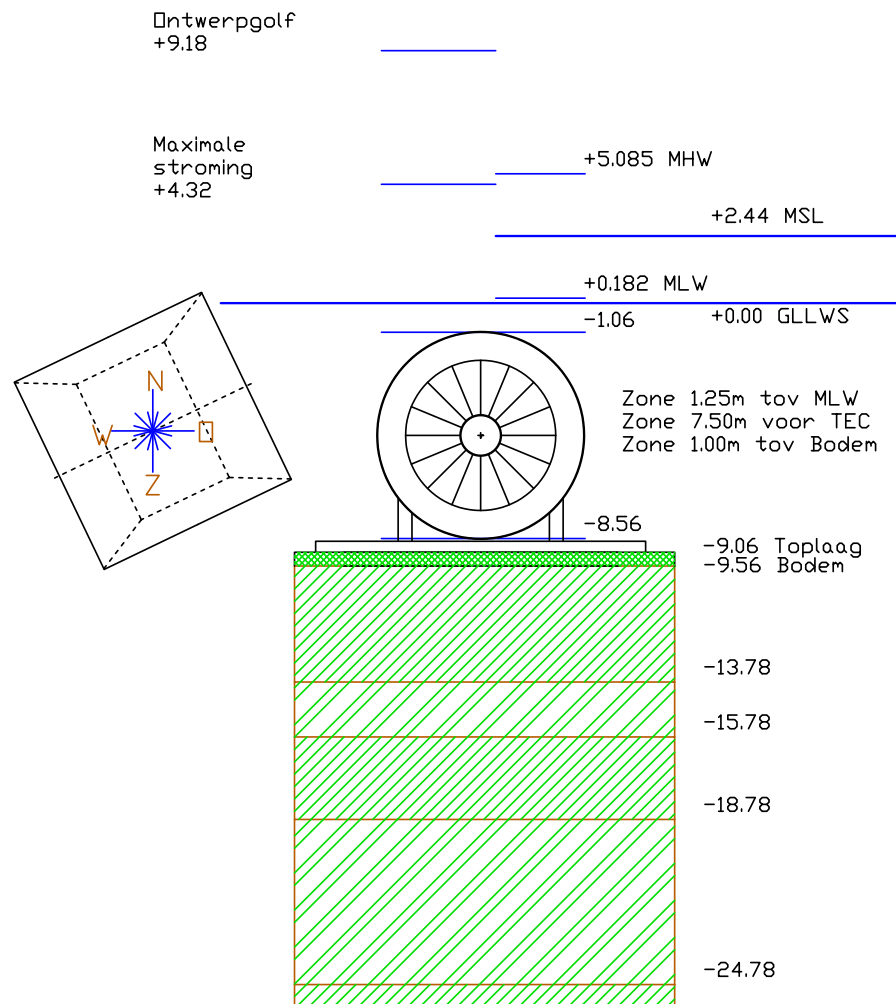
Gravitaire fundering

Een gravitaire fundering is een fundering met voldoende eigengewicht om de getijdenconvector stabiel te houden. Omdat de gravitaire fundering op de bodem geplaatst wordt, zijn er veel minder golfkrachten aanwezig. Dit kan leiden tot een sterke reductie van de fundering.

9.1 Turbine en straalbuis

Er wordt vanuit gegaan dat 3 meter per seconde de maximaal toelaatbare stroming is doorheen de straalbuis. Op figuur 6.20 is het maximale stromingsprofiel te zien. De TEC wordt geplaatst over een diepte van -1.06 tot -8.56 meter. De TEC heeft een diameter van 7.5 meter. De maximale stroming uitgemiddeld over de diepte van de TEC bedraagt 1.59 meter per seconde. Rekening houdend met de maximaal toelaatbare stroomsnelheid door de straalbuis, is de inwendige diameter minimaal 5.46 meter.

Er wordt een openhydro type turbine gekozen met een opening van 1.5 meter. Er zijn 16 schoepen aanwezig. Figuur 9.1 heeft een schets weer van de gravitaire fundering. De gravitaire fundering bevindt zich op het punt met coördinaten (51.3675 ; 3.1801) en is geïntendeerd met een hoek van 64.4 graden ten opzichte van het noorden.



Figuur 9.1: Een gravitaire fundering en de oriëntatie ervan op plaats (51.3675 ; 3.1801) aan de westelijke dam te Zeebrugge. De peilen zijn ten opzichte van GLLWS.

9.2 Krachten

9.2.1 Stromingskrachten

De stroming zorgt voor een kracht op de TEC. Aangezien op de plaats met coördinaten (51.3675 ; 3.1801) hoofdzakelijk stroming optreedt volgens de as van de buis, wordt de snelheid loodrecht op de as verwaarloosd. De verhoogde snelheid in de straalbuis heeft een gemiddelde stroomsnelheid van 3 meter per seconde. Men krijgt een druk van 48 kN en een torsiemoment van 65 kNm.

Door de stroming ontstaat er een extra kracht op de vernauwing zelf. Ze wordt geschat met behulp van de formule van impulsbehoud vermenigvuldigd met een factor 0.5. De oppervlakte waarop de kracht werkzaam is, heeft een grootte van 20.76 vierkante meter. Met een gemiddelde snelheid van 2.06 meter per seconde aanstromend op het oppervlak, is er een kracht van 45 kN.

Om over te gaan van karakteristieke waarden naar rekenwaarden, wordt een veiligheidsfactor van 1.5 ingebracht voor ULS.

9.2.2 Golfkrachten

Er wordt vanuit gegaan dat de ontwerp golven vanuit zuidwestelijke tot oostelijke richting kunnen aanvallen. Dit wil zeggen dat de kruinen zowel loodrecht als evenwijdig kunnen staan op de as van de straalbuis. Indien de ontwerp golf aanvalt met kruinen evenwijdig met de as van de buis, kunnen de krachten op de buis oplopen tot 319.5 kN voor de horizontale kracht en 97.8 kN voor de verticale kracht.

Over de diepte van de TEC is er een gemiddelde stroming aanwezig van 3.22 meter per seconde. De oppervlakte waarover de kracht van de golven berekend wordt, bedraagt 42.4 vierkante meter. Bij een golfhoogte van 10 meter (snelheid over de TEC is 3.22 m/s) wordt de kracht 225.4 kN. Bij een golfhoogte van 9 meter (snelheid over de TEC is 2.90 m/s) bedraagt de kracht nog slechts 182.8 kN.

Om over te gaan van karakteristieke waarden naar rekenwaarden, wordt een veiligheidsfactor van 2.5 ingebracht om rekening te houden met brekende golven. Dit is conform met de Shore Protection Manual [SPM, 1984].

9.2.3 Eigengewicht

Een TEC met straalbuis diameter 7.5 meter wordt geschat op 135 kN. Het eigengewicht van de funderingsplaat zal volgen vanuit een stabiliteitsberekening. Er moet op gelet worden dat de funderingsplaat zich in water bevindt en dat er dus Archimedes krachten zullen op werken.

9.2.4 Krachtencombinaties

De TEC moet in alle omstandigheden stabiel zijn. Indien de stroming maximaal is, dan treedt zij op onder een hoek van 64.4 graden ten opzichte van het noorden. In noord noordoostelijke richting kan ook de ontwerp golf optreden. In dat geval treedt de maximale stroming veroorzaakt door getijden en

Nummer	Type	Werking op	Grootte
1	Druk	Turbine	48 kN
2	Torsie	Turbine	65 kNm
3	Druk	Vernauwing	45 kN

Tabel 9.1: Stromingskrachten (karakteristieke waarden) werkend op de TEC en de gravitaire fundering.

Nummer	Type	Werking op	Grootte* [kN]	Grootte** [kN]
4	Horizontaal druk	Op buis	319.5	262.6
5	Verticaal druk	Op buis	97.8	82.6
6	Horizontaal druk	In buis	225.4	182.8

(*) Golfhoogte H_{max} 10 m
(**) Golfhoogte $H_{1\%}$ 9 m

Tabel 9.2: Golfkrachten (karakteristieke waarden) bij een 10 meter golf werkend op de TEC en de gravitaire fundering.

Nummer	Grootte* [kN]	Grootte** [kN]	Hefboom*** [m]
1	72	72	3.75 m
3	68	68	3.75 m
6	564	457	3.75 m

(*) Golfhoogte H_{max} 10 m
(**) Golfhoogte $H_{1\%}$ 9 m
(***) Ten opzichte van onderkant TEC

Tabel 9.3: Golfkrachten (karakteristieke waarden) werkend op de TEC en de gravitaire fundering.

golven op in dezelfde richting. De krachten 1, 3 en 6 van tabel 9.4 treden samen op. De fundering moet in staat zijn om krachten op te vangen.

In een andere omstandigheid gaat de stroming maximaal zijn (terug met dezelfde hoek) en zal de ontwerp golf aanvallen op de zijwand van de buis. In dat geval zijn de krachten 2, 4 en 5 werkzaam.

Nummer	Grootte* [kNm]	Grootte** [kNm]	Hefboom*** [m]
2	98 kNm	98 kNm	-
4	800 kN	657 kN	3.75 m
5	245 kN	207 kN	-

(*) Golfhoogte H_{max} 10 m
(**) Golfhoogte $H_{1\%}$ 9 m
(***) Ten opzichte van onderkant TEC

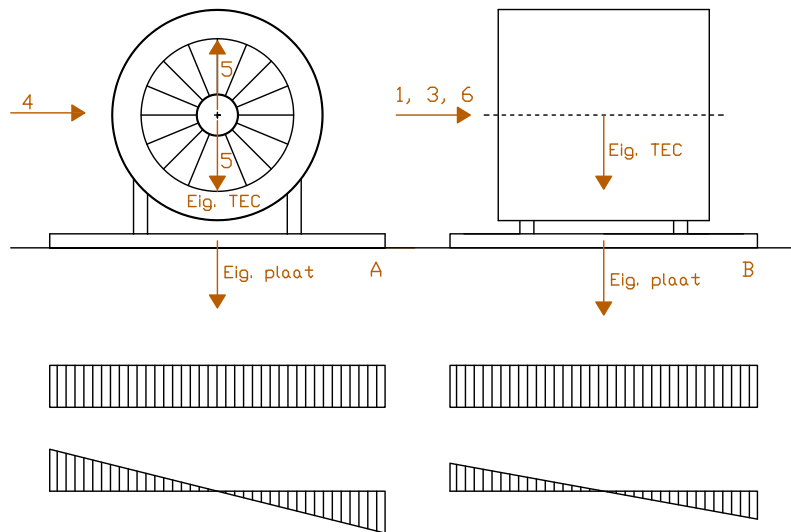
Tabel 9.4: Golfkrachten (karakteristieke waarden) werkend op de TEC en de gravitaire fundering.

9.3 Bepaling van de gravitaire fundering

Indien de ontwerp golf H_{max} 10 meter bedraagt, dan wordt keuze gemaakt voor een fundering van 11 bij 12 meter met een dikte van 0.4 meter. Dit betekent dat de funderingsplaat een volume heeft van 52.8 kubieke meter. Hiermee komt een gewicht overeen van 1320 kN of 789 kN bij onderdompeling in zeewater.

9.3.1 Draagvermogen van de grond

Het draagvermogen van de bovenste grondlaag heeft een conusweerstand van 0.5 MPa. Bij het plaatsen van een funderingszool, mag men niet boven een bepaalde toelaatbare spanning gaan. Voor de toelaatbare spanning wordt 250 kPa aangenomen. Naast het draagvermogen moet er gecontroleerd



Figuur 9.2: Een gravitaire fundering met krachten levert spanningen op de bodem.

worden over er geen 'squeezing' optreedt. De bovenste grondlaag heeft een ongedraineerde schuifspanning van 20 kPa. De spanning bij squeezing bedraagt dus 80 kPa. Als toelaatbare spanning wordt een veiligheid van 2 ingebouwd en krijgt men 40 kPa. Het is duidelijk dat de eis tegen 'squeezing' het meest bepalend is.

Het eigengewicht van de TEC, de funderingszool en de neerwaartse verticale kracht levert een spanning van 11.30 kPa. Omwille van het moment door golfslag op de wand van de buis ontstaat er een bijkomende spanning van maximaal 14.44 kPa. In het punt A is er dus een spanning aanwezig van 25.74 kPa. Indien er een maximale stroming plaats vindt, wordt er in het punt B een bijkomende spanning van 2.46 kPa.

In de meest ongunstige omstandigheid, golven vallen aan op de buiswand en maximale stroming door de buis, ontstaat er onder een stijve funderingsplaat een maximale spanning van 28.20 kPa. Dit ligt binnen de toelaatbare spanning.

De gronddruk wordt bekomen bij rechtstreeks plaatsen op de zeebodem. Het plaatsen van een erosie-laag bestaande uit grind, heeft enkel positieve invloed op de weerstand tegen squeezing.

9.3.2 Kanteleevenwicht

Het belastende moment rond het punt A (de fundering heeft een breedte van 12 meter) heeft een grootte van 5280 kNm. Het weerstandbiedende moment is groter en bedraagt 5545 kNm. De volledige gravitaire fundering blijft dus in evenwicht.

In figuur 9.2 bedraagt het belastende moment rond het punt B 3270 kNm (de fundering heeft in dat aanzicht 11 meter breedte). Het weerstandbiedende moment is groter en bedraagt 5083 kNm. De volledige gravitaire fundering blijft dus in evenwicht.

9.3.3 Glijdingsevenwicht

De gravitaire fundering moet stabiel zijn tegen glijden. Er wordt een eenvoudige formule opgesteld om het glijdingsevenwicht te controleren.

$$F_{aanvallend} \leq \sum V \cdot \tan\phi + c \cdot A \quad (9.1)$$

Hierbij is V de sommatie van alle verticale krachten, ϕ de wrijvingshoek tussen de plaat en de bodem, c de cohesie en A het oppervlak van de plaat. Men weet dat er een erosielaag zal aanwezig zijn. De erosielaag is een grindlaag die een bepaalde haakweerstand bezit. Hierdoor wordt aangenomen dat c gelijk is aan 4 kPa. Aangezien de plaat ruw is (zij kan kunstmatig ruw gemaakt worden) wordt aangenomen dat de wrijvingshoek gelijk is aan de hoek van inwendige wrijving, namelijk 30 graden.

Het is duidelijk dat de meeste krachten optreden indien de golfaanval gebeurt op de straalbuis. De golven komen hierbij uit noord noordwestelijk richting. De som van de verticale krachten bedraagt 679 kN (eigen gewicht TEC en plaat vermindert met opwaartse kracht). Toepassing van formule 9.1 zegt dat de weerstandsbiedende krachten een grootte aannemen van 920 kN. Dit is groter dan de aanvallende kracht van 800 kN. Veiligheidsfactoren worden buiten beschouwing gelaten. Dit omdat de destabiliserende krachten (golfkrachten) reeds vermenigvuldigd werden met 2.5 en de stabiliserende krachten (eigen gewicht TEC en plaat) met factor 1. Een extra veiligheidsfactor inbouwen zou leiden tot een te conservatieve oplossing.

9.3.4 Geometrie bij een ontwerpgolf van 9 meter

Voor een ontwerpgolf van 9 meter blijkt een gravitaire fundering van 10 op 11 meter (en dikte 0.40 meter) voldoende te zijn.

9.4 Erosiebescherming

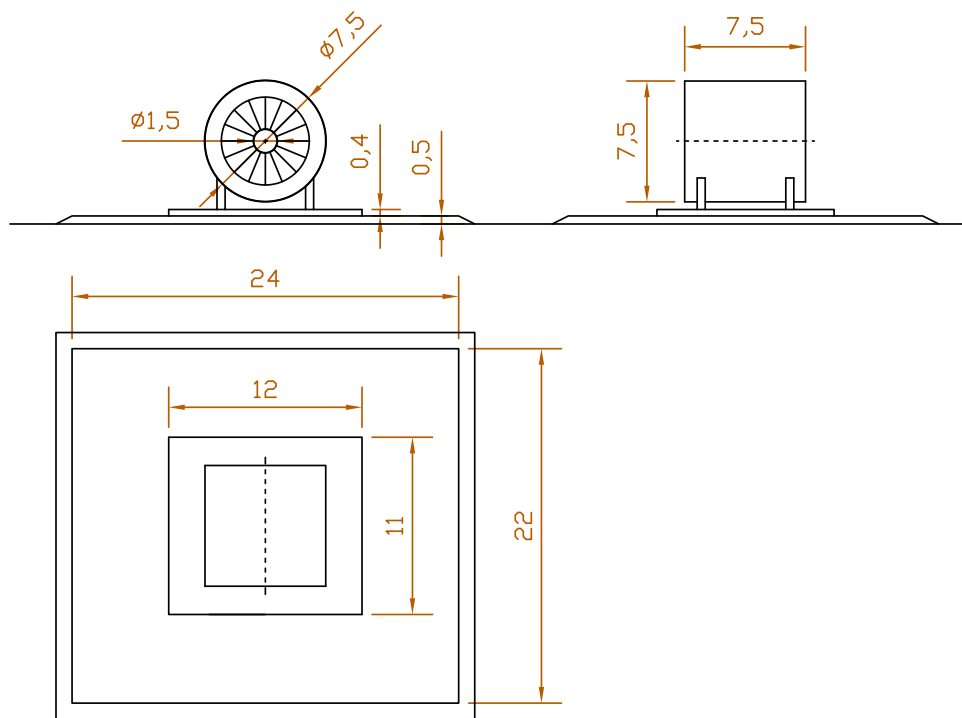
Omdat de plaat een beperkte dikte heeft, zal de wijziging van het stromingspatroon rond de GBF vrij beperkt zijn. Er zullen enkele kleinere wervels ontstaan aan de randen van de plaat. Daarom wordt er geopteerd om een erosielaag in grind te leggen onder de plaat. Hierdoor is het ook mogelijk om een egaal beeld te krijgen voor de waterspanning. Het grind heeft een laagdikte van 0.5 meter en een grootte van 22 op 24 meter. Dit komt overeen met een verdubbeling van de plaatafmetingen. Uiteraard wordt de TEC op GBF in het midden geplaatst. Figuur 9.3 geeft dit duidelijk weer.

Het volume voor de erosielaag bedraagt ongeveer 300 kubieke meter en het gewicht ongeveer 800 ton. Als top laag lijkt zeegrind geschikt. Indien men kalibers van 0.25mm tot 7 mm gebruikt, dan moet er geen extra filterlaag voorzien worden. Tabel 9.5 vermeldt de gebruikte lagen.

Filterlaag	Kaliber	Dikte
Toplaag	Zeegrind 0.25 / 7 mm (*)	0.5 m
Bodem	$D_{50} = 200 \mu m$	-

(*) Verdelingscurve volgens [CIRIA/CUR, 1991]

Tabel 9.5: Erosielaag rond de gravitaire fundering.



Figuur 9.3: Geometrie van een TEC (gravitaire fundering) en de erosielaag.

9.5 Kosten en aandachtspunten

Indien er eenzelfde kostprijs wordt aangehouden voor de erosiebescherming, dan wordt de totale kostprijs voor 800 ton erosiebescherming ongeveer 205000 euro. Dit is inclusief transportkosten (160000 euro) en aanlegkosten (45000 euro). De prijzen zijn gebaseerd op een studie van [DOWEC, 2002] waarvan [Van Oord, 2002] de prijs gaf in het mei 2002. De prijzen zijn waarschijnlijk op heden niet meer relevant, maar kunnen een eerste benadering geven van de kostprijs.

Het schatten van de kost van een gravitaire fundering is moeilijker. Dit zal in grote mate afhangen van wapening in de plaat en dergelijke meer. Als eerste schatting wordt 150 euro per kubieke meter beton (en wapeningsstaal) aangenomen. Dan bedraagt de prijs ongeveer 8000 euro.

Hoewel de plaatsing van een TEC met gravitaire fundering vrij makkelijk is, moet er toch rekening gehouden worden met bijkomende zaken. De verbinding tussen de kabel en de TEC moet goed bestudeerd worden. Niet alleen moet er oog zijn bij de plaatsing zelf, maar ook bij het onderhoud. Bij het lichten van de turbine komt de kabel verbonden met de TEC mee. Er moet dus een manier gevonden worden om de kabel los te koppelen.

9.6 Besluit

Op het eerste zicht lijkt een gravitaire fundering relatief goedkoop en gemakkelijk berekenbaar. De getijden energie convertor en de gravitaire fundering kan volledig geprefabriceerd worden op het land waarna ze wordt getransporteerd en afgezonken tot op de bodem. Hiervoor zal er een heftuig moeten voorzien zijn die 1500 kN kan takelen. Aangezien de funderingsplaat beperkte afmetingen bezit, zal de invloed van de plaat op de stroming beperkt zijn. Dit heeft als voordeel dat de erosielaag kleiner kan gedimensioneerd worden. Speciale aandacht is vereist aan de aandachtspunten.

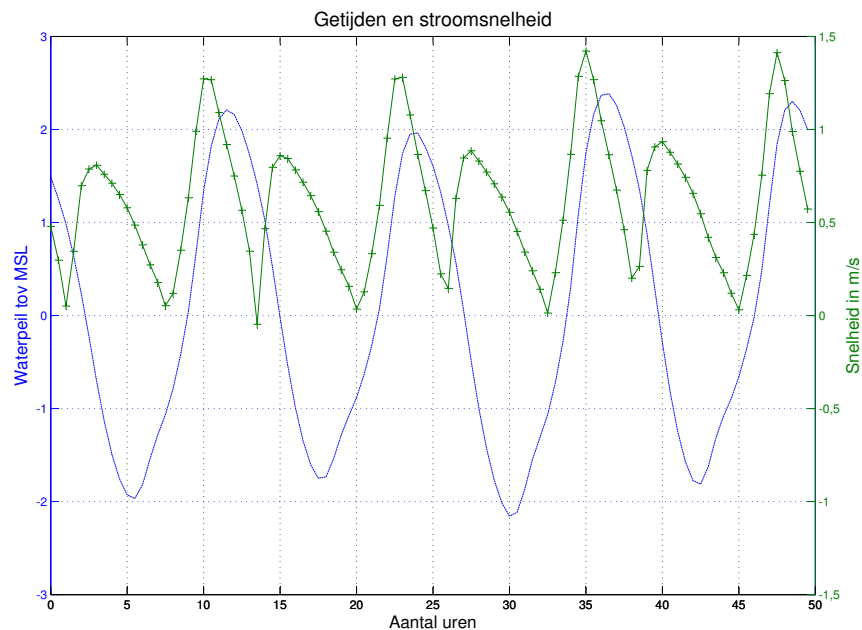
Hoofdstuk 10

Energie opbrengst

Energie opbrengst is de belangrijkste parameter. Een getijden energie convertor is ontworpen om zoveel mogelijk energie op te brengen. Hoe meer energie er onttrokken wordt, hoe economischer de getijden energie convertor zal zijn. In dit hoofdstuk wordt geschetst wat de theoretische en de praktische opbrengst van een getijden energie convertor kan zijn.

10.1 Stroomsnelheid en getijden

De grootte van de stroming varieert samen met de getijden. In figuur 10.1 wordt de stroomsnelheid en het waterpeil weergegeven in functie van de tijd. De stroomsnelheid is een gemiddelde over een diepte van -8.56 tot -1.06 meter GLLWS. Op deze diepte wordt er een TEC geplaatst met diameter 7.5 meter. Per tijdcyclus keert de stroomsnelheid 2 keer om. Er valt af te leiden dat de hoogste watersnelheid optreedt op ongeveer 1.5 uur voor hoogwater. Net voor laagwater (1.5 à 2 uur) treedt er een tweede pieksnelheid op.



Figuur 10.1: Het waterpeil en de stroomsnelheid (uitgemiddeld over een diepte van -8.56 tot -1.06 meter GLLWS) in functie van de tijd.

10.2 Opbrengst bij een TEC

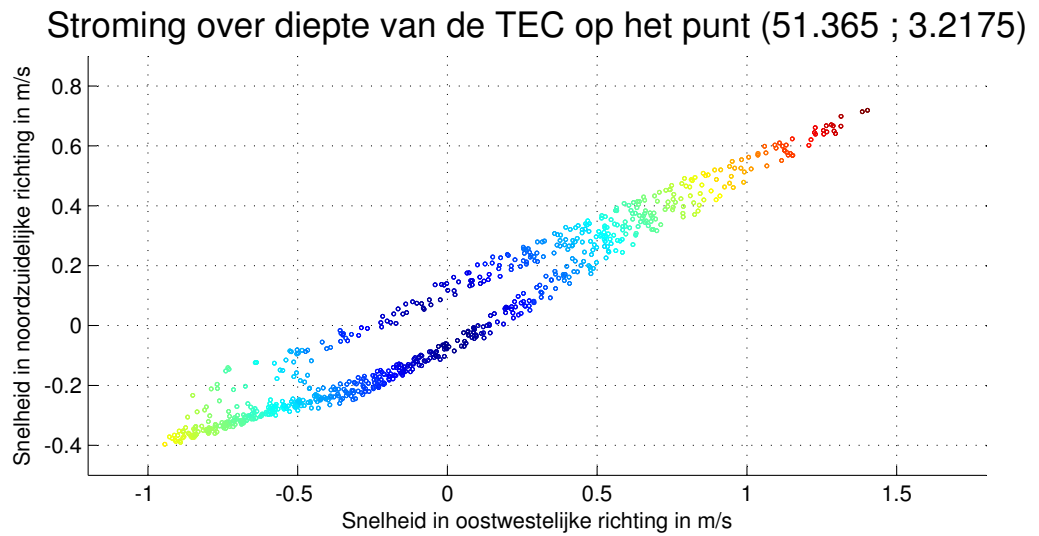
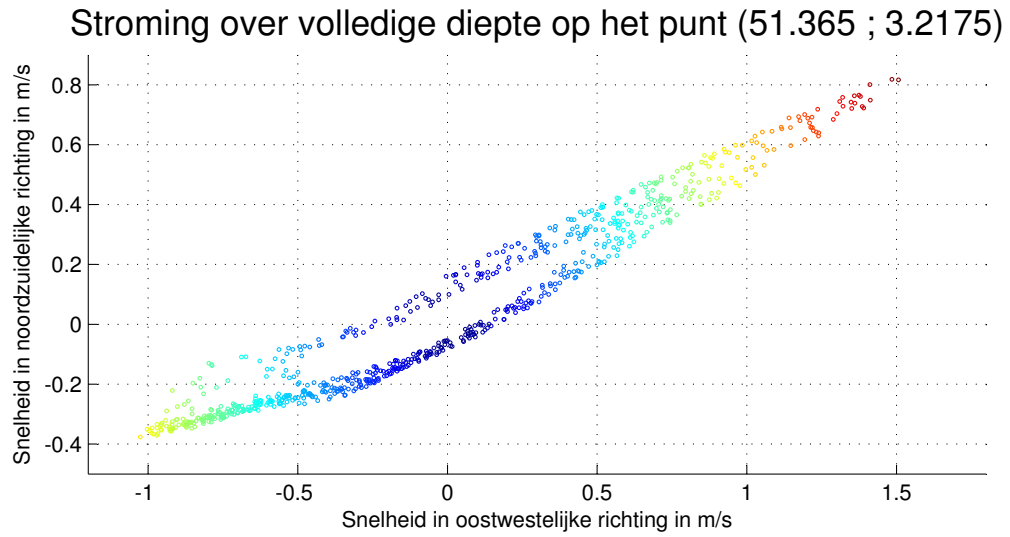
De gemiddelde stroming over de volledige diepte wordt weergegeven in bovenste deel van figuur 10.2. Het onderste deel van figuur 10.2 geeft een gemiddelde stroming weer over een diepte van -8.56 tot -1.06 meter. Op deze diepte wordt de TEC met diameter 7.5 meter geplaatst. Logischerwijs worden er kleinere stromingssnelheden gevonden, omdat de TEC dichter tegen de bodem geplaatst wordt. De figuren zijn geldig indien de TEC geplaatst wordt op het punt met coördinaten (51.3675 ; 3.1801).

Figuur 10.2 kan hertekend worden. Om het half uur wordt een stroming berekend die zich voordoet in een bepaalde richting. In het bovenste gedeelte van figuur 10.3 wordt de absolute stromingssnelheid uitgezet. Dit is hetzelfde als de grootte van elke stromingsvector. In de tweede figuur wordt de stromingsrichting uitgezet ten opzichte van de as van de straalbuis. De richting van de as van de straalbuis wordt zo genomen dat er een maximaal rendement is. Op het punt met coördinaten (51.3675 ; 3.1801) is de richting 26 graden ten opzichte van het oosten. Dit bleek ook al uit figuur 6.19. Indien de stroming evenwijdig loopt met de as, dan bedraagt de hoek nul graden en wordt de volledige bijdrage van de stroming in rekening gebracht. Door rekening te houden met de hoek, gaat de stroming slechts deels door de buis. Het gedeelte dat door de buis stroomt, wordt eveneens weergegeven in bovenste figuur.

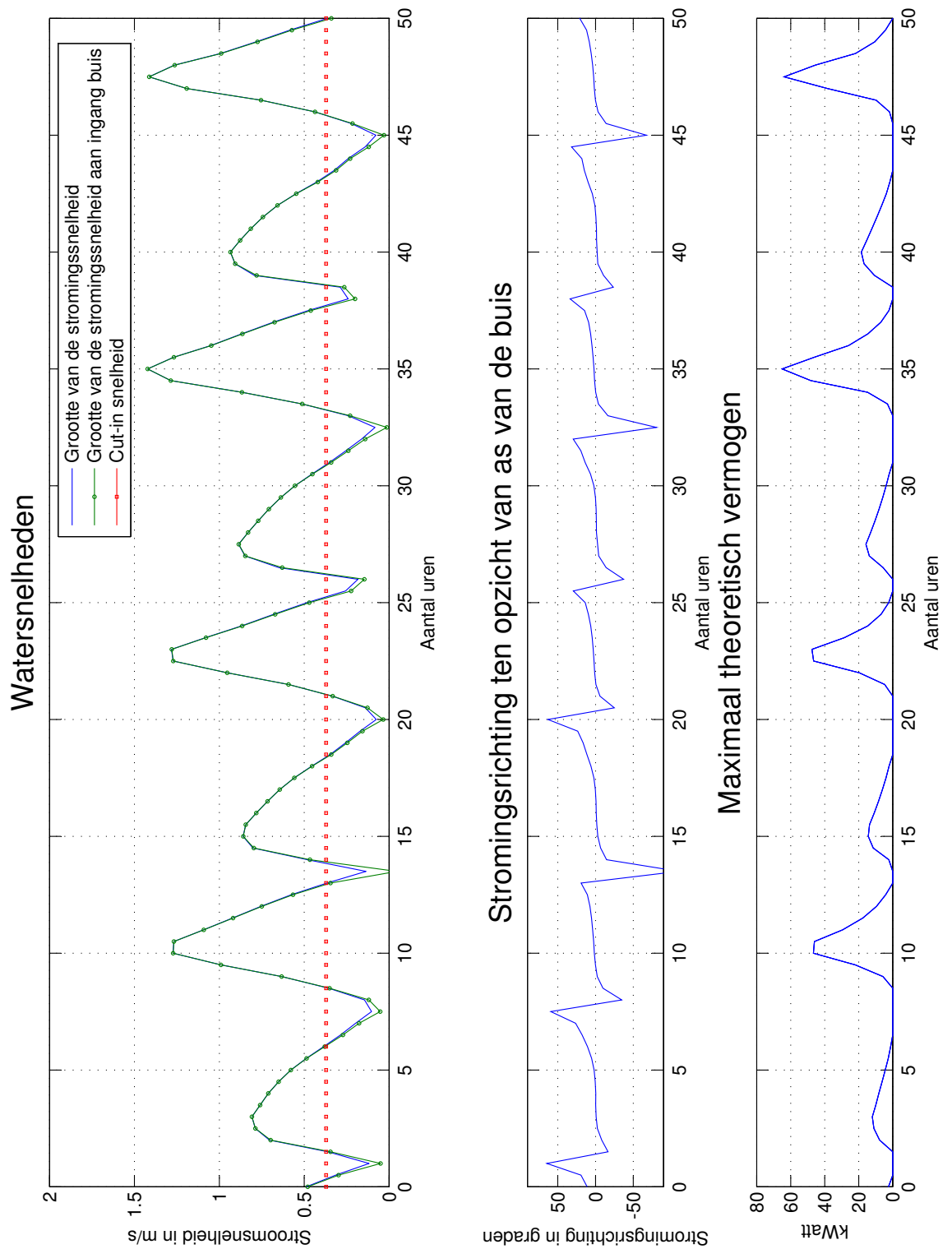
Door gebruik te maken van een straalbuis, kan de werkingstijd verlengd worden. Indien de cut-in snelheid van een turbine 0.7 m/s bedraagt, dan kan men berekenen bij welke stroming en bij welke straalbuis er vermogen zal opgewekt worden. Indien de straalbuis met diameter 7.5 meter reduceert tot 5.46 meter, dan is de cut-in snelheid van de stroming 0.37 m/s. Bij het overtreffen van die stroomsnelheid aan de ingang van de straalbuis, zal de turbine beginnen vermogen opwekken. Het vermogen wordt bepaald aan de hand van de stroomsnelheid aan de ingang van de buis en is een zuiver theoretisch vermogen. In hoofdstuk 5 staat vermeld waarom de stroomsnelheid aan de ingang genomen wordt. In praktijk zal de turbine nooit een rendement van 100 procent halen. Bovendien is er door de aanwezigheid van een straalbuis nog een extra wrijvingsterm waardoor het vermogen nog daalt.

Over een periode van 16 dagen kan een theoretische opbrengst gevonden worden in figuur 10.4. Er is duidelijk te zien dat de opbrengst tijdens springtij beduidend groter is dan tijdens doortij. Dit was reeds duidelijk daar de stromingssnelheid lager ligt bij doortij dan bij springtij.

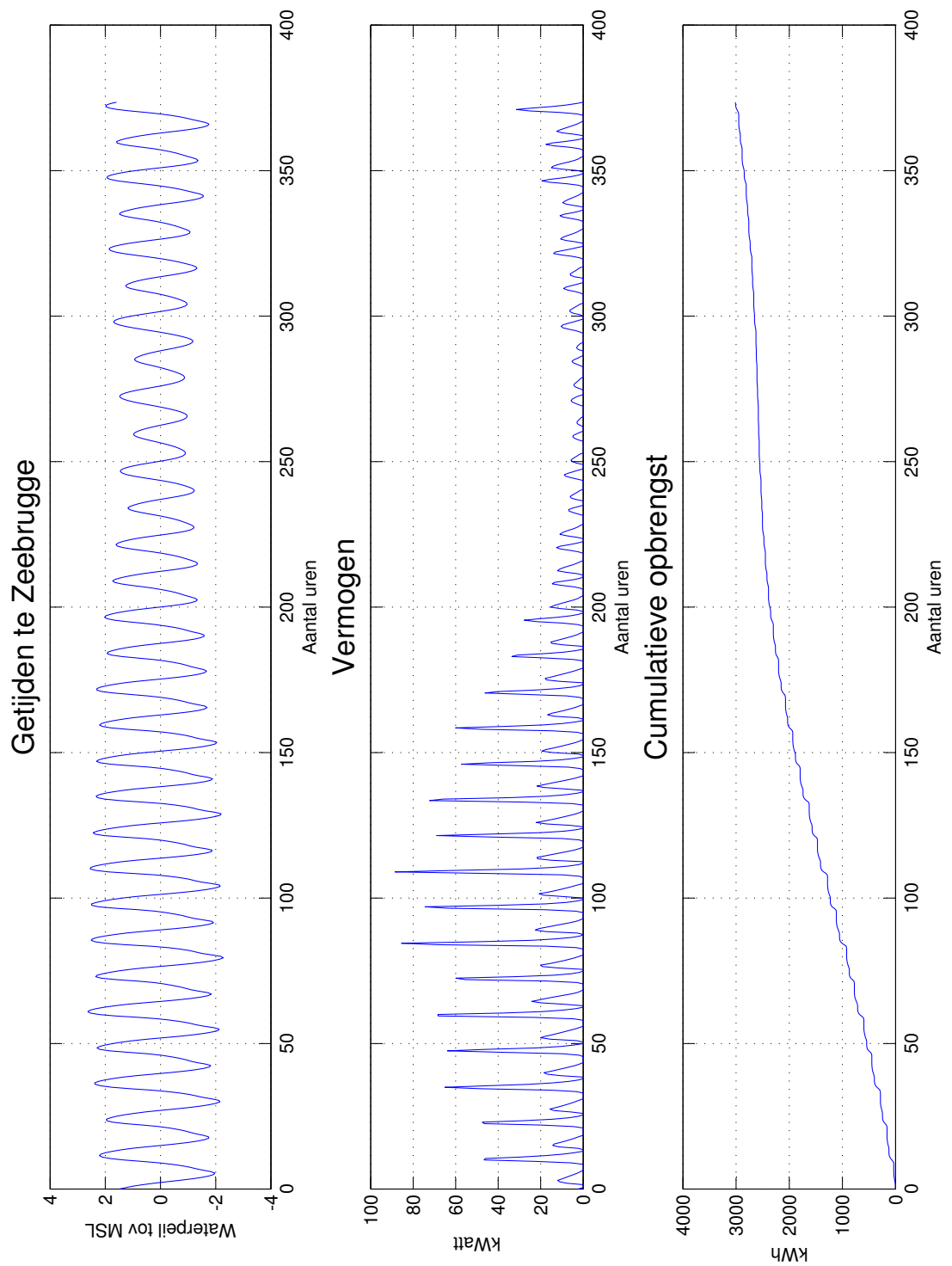
De opbrengst van een TEC kan gevonden worden in figuur 10.4. Let wel dat dit een theoretisch maximale opbrengst is. Een maancyclus wordt geschat op 29.53 dagen [Troch en Verhoeven, 2006]. Aangezien een maancyclus 708 uren bevat, bedraagt een halve cyclus 354 uren. In deze halve cyclus is er 1 keer doortij en 1 keer springtij opgetreden. Volgens figuur 10.4 bedraagt de opbrengst voor een halve cyclus 2.89 MWh. Een volledige cyclus brengt ongeveer 5.78 MWh op. Per jaar kan een TEC maximaal (bij rendement 100 procent) 71.44 MWh produceren.



Figuur 10.2: Gemiddelde stroming over de volledige diepte en over de diepte van de TEC. Elk punt stelt een eindpunt voor van een stromingsvector. Dit over een periode van 16 dagen.



Figuur 10.3: Theoretische opbrengst van een TEC met straalbuis uitgaande van het stromingsbeeld van figuur 10.2. De TEC is georiënteerd met een hoek van 64 graden ten opzichte van het noorden (ongeveer oost noordoostelijke richting).



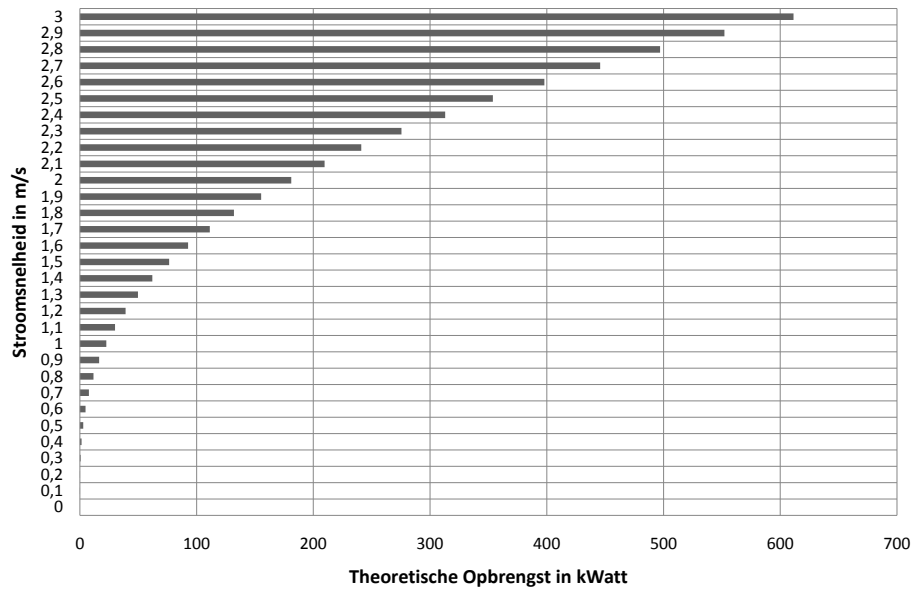
Figuur 10.4: Getijden, theoretisch vermogen en de cumulatieve (theoretische) opbrengst te Zeebrugge over een periode van 16 dagen (384 uur).

10.3 Schatting van rendementen

Het berekenen van de rendementen aan de hand van theoretische veronderstellingen is moeilijk. In praktijk zullen rendementen berekend worden aan de hand van meetresultaten. Het theoretische vermogen wordt berekend met formule 10.1.

$$P = 0.5\rho \cdot A \cdot v_1^3 \tag{10.1}$$

Het vermogen van de stroming volgens formule 10.1 is weergegeven in figuur 10.5. Hoewel absolute



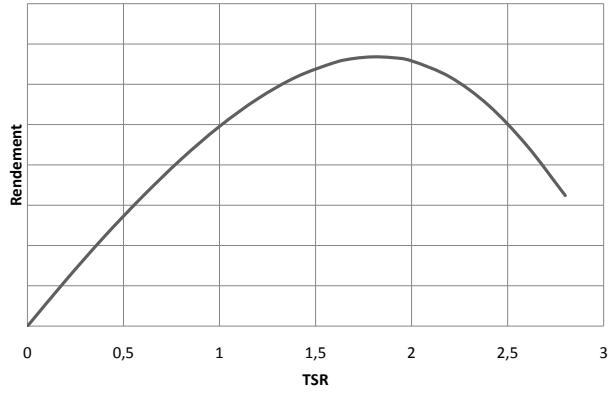
Figuur 10.5: Het theoretische vermogen in functie van de stroomsnelheid.

rendementen moeilijker bepaalbaar zijn, kan er wel een verloop bekomen worden. Het verloop is immers meestal een typische curve.

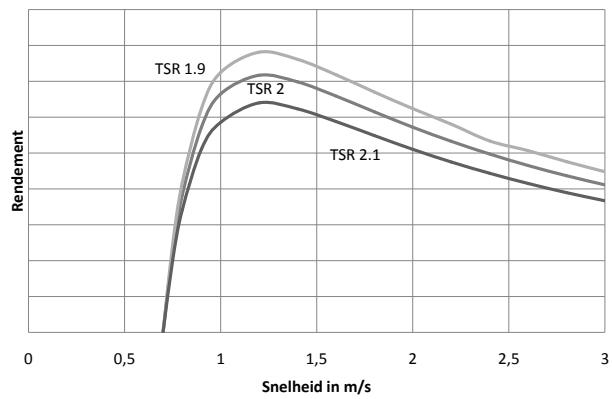
Aan de hand van de formules uit hoofdstuk 3 wordt figuur 10.6 opgesteld. Dit is een logisch verloop. De vermogenscoëfficiënt (rendement) heeft altijd dergelijke typische functie. Bij een TSR van 0 kan er geen vermogen geproduceerd worden omdat de turbine stil staat. De rendementscurve wordt opnieuw nul bij grotere TSR. Dit is als de turbine in vrijloop is. Het is duidelijk dat bij een TSR van 1.9 (in dit geval) een hoogste rendement wordt bekomen. Dit komt ongeveer overeen met waarden bekomen uit [Schönborn en Chantzidakis, 2007] (TSR 2 à 2.5).

Indien een turbine met constante TSR wordt verondersteld in alle omstandigheden van de stroming, dan kan hieruit figuur 10.7 worden bekomen. Bij een bepaalde stroomsnelheid en een TSR, kan er een rendement bepaald worden. Het is logisch dat bij een TSR van 1.9 een hoger rendement wordt gevonden. Dit bleek immers uit figuur 10.6.

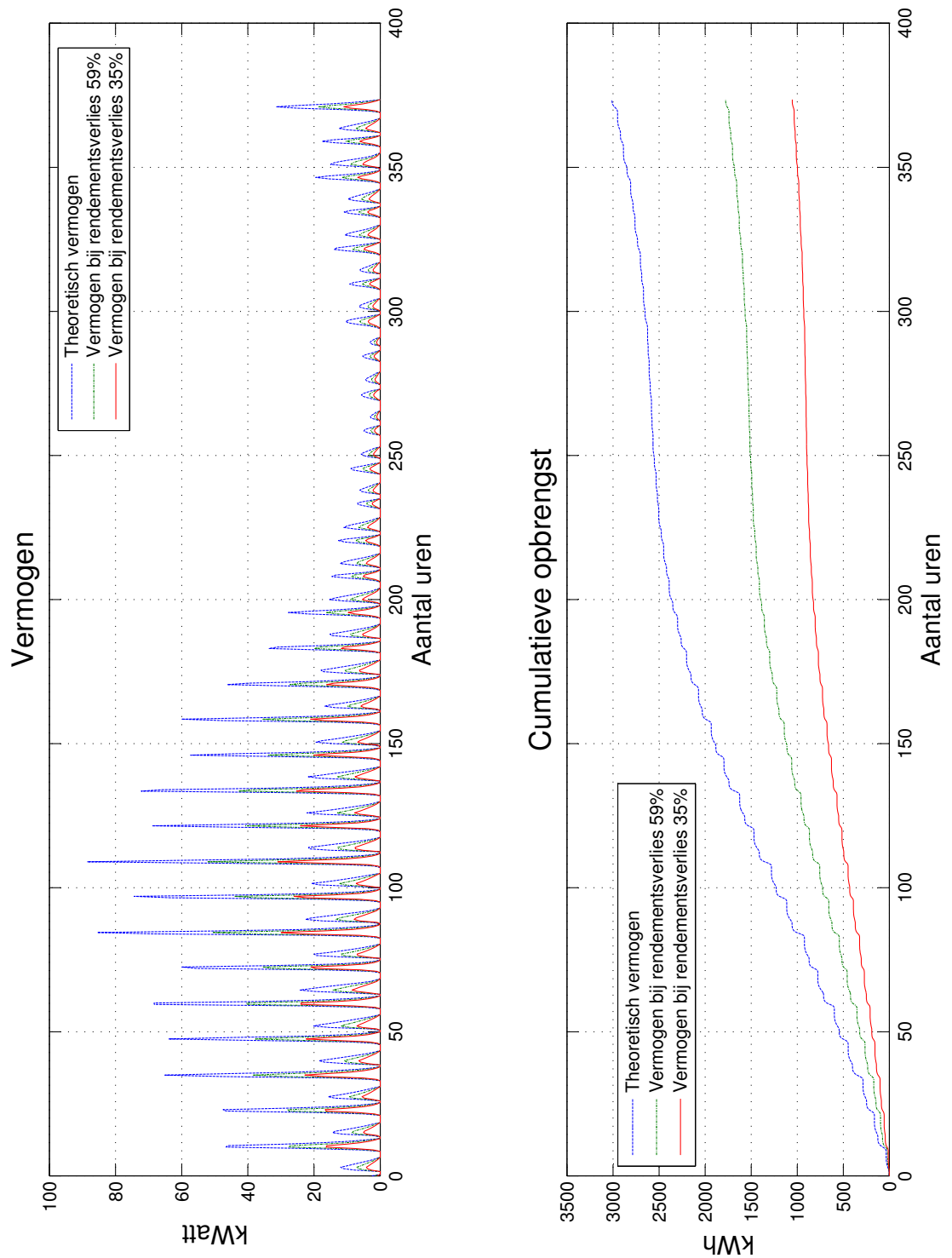
Een praktisch voorbeeld kan zijn indien de TEC een gemiddeld rendement heeft van 35 procent. De Betz limiet legt bij open turbines een maximaal vermogen op van 59 procent. Beide rendementen (35 en 59 procent) zijn weergegeven in figuur 10.8.



Figuur 10.6: Typische vorm voor een grafiek waarbij het rendement (Vermogenscoëfficiënt) uitgezet wordt in functie van TSR. Een optimale TSR bedraagt ongeveer 1.9.



Figuur 10.7: Typische curves voor grafieken waarbij het rendement in functie van de stroomsnelheid en een bepaalde TSR worden uitgezet.



Figuur 10.8: Theoretische opbrengst en de opbrengst van een TEC met 35 en 59 procent rendement.

10.4 Invloed van de golven

Tot op heden zijn hier omtrent weinig gegevens beschikbaar. Eén van de werken over de interactie tussen golven en getijdenstroming [Guinot, 2008, Guinot, 2009] vermeldt dat de stroming veroorzaakt door golven een onzekere stroming kan creëren die vrij schadelijk kan zijn voor de turbine en de structuur. Het besluit is dat oscillerende waterdrukken veroorzaakt door turbulenties, een kritische parameter zullen zijn voor de TECs.

Er kan een korte stochastische berekening worden gebruikt voor het berekenen van de stroming doorheen de buis van de TEC. Tabel 10.1 is geldig indien de buis met zijn as in oost noordoostelijke richting gericht is. In de tabel wordt gerekend met de golven gemeten op de bol van Heist. In tabel 10.1 is er

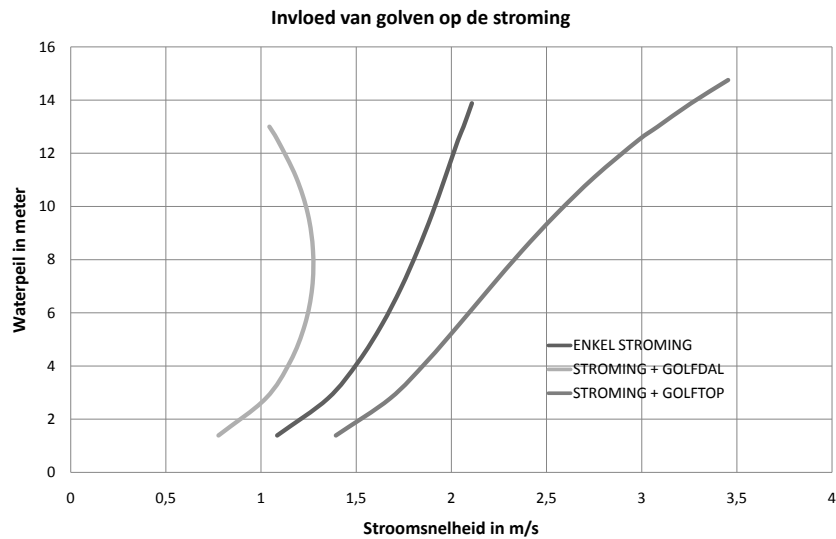
Snelheidsklasse (1) [m/s]	Snelheidsklasse (2) [m/s]	VF* [%]	VF** [%]
0.00 - 0.05	0.00 - 0.09	23.56	35.00
0.05 - 0.10	0.09 - 0.19	14.73	25.26
0.10 - 0.20	0.19 - 0.38	24.24	23.00
0.20 - 0.30	0.38 - 0.57	22.94	11.21
0.30 - 0.40	0.57 - 0.75	9.01	1.89
0.40 - 0.50	0.75 - 0.94	0.45	2.52
0.50 - 0.60	0.94 - 1.13	3.20	0.14
0.60 - 0.70	1.13 - 1.32	0.25	0.79
0.70 - 0.80	1.32 - 1.51	0.77	0.08
0.80 - 0.90	1.51 - 1.70	0.03	0.03
0.90 - 1.00	1.70 - 1.89	0.10	0.04
1.00+	1.89+	0.72	0.04

Tabel 10.1: De grootte en de voorkomingsfrequentie van een stroming (opgewekt door golven) doorheen de TEC. De snelheid is bekeken aan (1) de ingang. Door het venturi effect (factor 1.89) wordt de snelheid (2) inwendig groter. (*) is gebaseerd op de voorgaande tabel 6.3 en dus is de snelheid uitgemiddeld over de diepte. (**) is uitgemiddeld over de diepte van de TEC.

te merken dat gedurende ongeveer 99 procent van de tijd een snelheid optreedt in de straalbuis van kleiner dan 1 m/s.

Het nut van een dergelijke berekening wordt weergegeven in figuur 10.9. In de figuur werd een golf verondersteld van 1.75 meter. Indien de periode 5 seconden bedraagt, dan wordt er om de 5 seconden een nieuwe cyclus gegeven. Door deze cyclische last zijn de krachten op de vleugels waarschijnlijk groter dan verwacht. Het is ook mogelijk dat de energie productie hieronder te lijden heeft. Maar tot op heden is het onduidelijk welke invloed de snelheden in de straalbuis heeft op de energieproductie.

Hierbij werd de Stokes drift over het hoofd gezien. De niet-lineariteiten van de golven zullen ervoor zorgen dat er een zekere flux door de turbine stroomt. Op een eerste zicht lijkt dit fenomeen te verwaarlozen. Maar naar de kusten toe, nemen niet-lineariteiten toe en zou de invloed van de drift op de turbines wel eens vrij groot kunnen zijn. Ook hier bestaat er nauwelijks of geen literatuur over.



Figuur 10.9: Invloed van een golf (hoogte 1.75 meter) op de stroming. De stroming wordt maximaal 2.108 m/s op een waterpeil van 13.88 meter. De golf is berekend met behulp van tweede orde theorie.

10.5 Besluit

De energie opbrengst van een TEC is zeer beperkt in vergelijking met bijvoorbeeld windmolens. Op de Thorntonbank staan windmolens van 5 MW die per jaar naar schatting 16.5 GWh zullen leveren. Voor een TEC geplaatst te Zeebrugge en met een algemeen rendement van 35 procent (59 procent), zou er een opbrengst zijn van 25 MWh (42 MWh). Theoretisch kan de opbrengst per TEC maximaal 71.5 MWh bedragen.

Het is mogelijk dat naar de toekomst toe de rendementen zullen stijgen. Er zullen betere rendementscurve gehaald worden. Volgens de Betz limiet kan men met open turbines niet hoger gaan dan 59 procent rendement. Met gesloten types is het theoretisch mogelijk om 100 procent rendement te halen. Maar het is uitgesloten dat men met een toestel boven de theoretische grens zal komen. De grens beperkt zich voor de stroming te Zeebrugge tot 71.5 MWh bij een TEC met diameter 7.5 meter.

Het verlagen van de cut-in snelheid van turbines heeft weinig invloed. Er is een kleine stijging waarneembaar het totale vermogen. Indien voor de cut-in snelheid van de turbines 0.5 m/s wordt genomen, dan is de jaarlijkse opbrengst 71.94 MWh. Dat de stijging zo beperkt is, bleek al uit figuur 10.5.

De turbine van het propellertype had een diameter van 7 meter. Rekening houdend met de Betz limiet is de theoretische opbrengst hier slechts 36.75 MWh.

Hoofdstuk 11

Slotsom en discussie

In dit finale hoofdstuk wordt de slotsom gegeven van het ontwerp van een getijden energie convertor op het Belgisch Continentaal Plat. De opeenvolging van de verschillende hoofdstukken bracht de lezer over van de exploratie van natuurlijke rijkdommen, naar een bespreking van verschillende toestellen en funderingstypes, waarna er een technische uitwerking gebeurde, om zo te leiden tot een economische conclusie en in het algemeen een discussie over getijdenenergie.

Het toetsen van de beste plaatsen op het Belgisch Continentaal Plat levert al snel één enkele oplossing. Dit is in de omgeving van Zeebrugge. Hier worden de grootste stromingen gevonden, tot pieksnelheden van 2.108 m/s bij springtij voor het punt met coördinaten (51.3675 ; 3.1801). Het theoretische vermogen van de stroming is er dus het hoogst. Een andere mogelijkheid is bijvoorbeeld het plaatsen van een TEC in de omgeving van de funderingen van windmolens op de Thorntonbank. Omwille van de funderingen van de windmolens wordt de stroomsnelheid plaatselijk verhoogd. De stromingsrichting daarentegen wijzigt nauwelijks. De richting van de stroming blijft variëren over alle windrichtingen. Dit in tegenstelling tot de stroming dicht bij de kust, zoals in Zeebrugge. Daar werken de richtingen hoofdzakelijk evenwijdig met de dammen of kuststroken.

Het voordeel van een sterk richtingsgeoriënteerde stroming is dat er geen mechanismen moeten aanwezig zijn om de vleugels optimaal aan te spreken. Indien er geen afgetekende hoofdrichting is, is het bijna noodzakelijk om gier mechanismen te gaan voorzien. Dit zou onder invloed van het agressieve milieu te grote risico's met zich meebrengen. Gelukkig is de stroming te Zeebrugge sterk georiënteerd.

Uit alle berekeningen blijkt dat ook te Zeebrugge er slechts in een beperkt tijds kader energie kan onttrokken worden. In het punt met coördinaten (51.3675 ; 3.1801) is er gedurende 35 procent van de tijd een stroming waar te nemen van meer dan 0.7 m/s. Dit is de cut-in snelheid. Indien er op die plaats gebruik wordt gemaakt van een straalbuis, kan de werkingstijd verlengd worden. Bij een diametervermindering van 7.5 naar 5.46 meter kan er gedurende 66.3 procent van de tijd energie onttrokken worden. Dit is een stijging van 89 procent van de werkingstijd.

De straalbuis is een toestel om het aantal productie uren te laten stijgen. Het vermogen per tijds-eenheid zal echter niet toenemen, maar integendeel afnemen door invloeden van wrijving en verliezen. Het is dus onmogelijk om met een straalbuis een hoger vermogen te halen. Omwille van de verruiming van het tijds kader, zal er echter na een bepaalde tijd meer energie kunnen ontwikkeld worden. Indien er een hogere productie mogelijk is, moet deze ook gegrepen worden.

Het plaatsen van een straalbuis in de omgeving van Zeebrugge heeft nog meer voordelen. De stroming treedt hoofdzakelijk op in oost noordoostelijke richting. De buis gaat enkel stroming capteren uit die richtingen. Dit is positief, want ook de golven zorgen voor een sterk variërende stroming. Het nadeel van golven is dat zij in ongeveer elke richting kunnen optreden. Men ziet dat de grootste golven vanuit de noord westelijke richting komen. Dit is de richting waarbij de golven op de buis slaan. Enerzijds

is dit voordelig omdat zo de turbine perfect beschermd is. Anderzijds levert dit extra krachten op de fundering. Golven die wel uit oost noordoostelijk richting aanvallen kunnen krachten opwekken op de turbine die schadelijk kunnen zijn. In bijna 99 procent van de tijd blijft de golfstroming door de buis beperkt tot maximaal 1.0 m/s. Bij het van ontwerpgolven, zal de stroming door de golf veel groter zijn. Dat grote golven met een zeer kleine voorkomingsfrequentie de energieproductie verminderen is geen ramp. Maar ook na het optreden, moet de turbine terug normaal haar werk kunnen doen.

Er kunnen verschillende types turbines gebruikt worden. Enerzijds is er het propeller type met 2 vleugels en een pitch controller mechanisme. De krachten op de vleugels zijn vrij beperkt. Een monopaal met afmetingen 1800x18 is stabiel bevonden. Door over te schakelen naar het openhydro type, kan de energieopbrengst opgevoerd worden. Theoretisch is er per TEC 71.5 MWh mogelijk. Bij een propeller type bedraagt dit slechts 36.75 MWh. De krachten worden echter groter. Een openhydro type moet ondersteund worden door een monopaal 2200x22 om stabiel te blijven.

Naast de krachten op de turbine, zijn er ook golf- en stromingskrachten op de funderingen en de draagstructuren. In de totale kracht op de palen neemt de golfkracht een groot aandeel in. Enerzijds zorgen de veiligheidsfactoren op de golfkracht ervoor dat dergelijke grote krachten gevonden worden. Anderzijds is er de onzekerheid van de ontwerpgolf. Indien er een kleinere ontwerpgolf gekozen wordt, dan dalen de krachten vrij sterk.

Om de golfkrachten te beperken, zou men de palen kunnen inkorten. Hierdoor zou er minder golf- en stromingskrachten op de paal aangrijpen, met gevolg dat de afmetingen kleiner kunnen zijn. Maar hierdoor vervalt het voordeel van een monopaal volledig. Een monopaal doet immers dienst als platform om de TECs gemakkelijk te kunnen onderhouden. Indien de paalkop zich onder water bevindt, is dit volledige voordeel teniet gedaan. Hierdoor zou men even goed kunnen overstappen op gravitaire funderingen.

De gravitaire fundering ondergaat veel minder golf- en stromingskrachten. De afmetingen van een gravitaire fundering zijn vrij beperkt. Hoewel hier slechts één convertor wordt geplaatst op een gravitaire fundering, lijkt de investeringskost veel minder dan bij een monopaal met 2 convertoren. Het moge wel duidelijk zijn dat wat onderhoud betreft, de gravitaire fundering veel moeilijker toegankelijk is. Een vraag naar de toekomst toe is in welke mate men onderhoud moet voorzien. Indien er slechts een onderhoud plaats vindt om de 5 jaar, is het beter om minder te investeren om onderhoud gemakkelijker te maken. Indien er echter vaak onderhoud moet gebeuren, dan lijkt een gravitaire fundering niet echt interessant. Bij een gravitaire fundering wordt er bij onderhoud bijna geëist dat de volledige fundering en TEC gelicht worden.

Andere funderingstypes lijken niet interessant. In de omgeving van Zeebrugge is ofwel het water te ondiep om grotere structuren als driepoten neer te planten ofwel is er de aanwezigheid van de vaargeul die extra maatregelen en veiligheden met zich meebrengt. Daarom wordt er ook niet geopteerd om drijvende funderingen aan te leggen, hoewel drijvende funderingen in sommige opzichten interessant lijken. Met een vlottende fundering is er geen risico om met de vleugels boven water te komen. Aanraking van de bodem is des te gevaarlijker. Maar wegens het feit dat een TEC meer naar het waterpeil toe wordt geplaatst, kunnen daar grotere snelheden gecapteerd worden. Anderzijds is er ter hoogte van het waterpeil een sterkere invloed merkbaar van de golven. Deze hoog frequente belasting, samen met het heen en weer schommelen van de fundering, kunnen zorgen voor extremale belastingen die niet meer economisch te verantwoorden zijn. Om het schommelen te milderen, is er een voorstel gedaan om de vlottende fundering als een bolvormig lichaam te beschouwen.

Het hoofddoel van een getijdenenergie convertor is om zoveel en zo goedkoop mogelijk energie te produceren. Qua hoeveelheid is de energie die men kan onttrekken beperkt. Theoretisch is het mogelijk om maximaal 71.5 MWh per convertor van het openhydro type van 7.5 meter diameter te onttrekken. In praktische gevallen kan men er echter niet vanuit dat het rendement kleiner is dan 100

procent. Indien men daarbij nog eens rekening houdt met andere factoren die bijvoorbeeld verpakt zitten in de significant impact factor, dan is er van het theoretische vermogen slechts weinig over.

Hoewel Zeebrugge met veruit de grootste stroomsnelheden te maken heeft, is de ontginning van getijdenenergie aldaar beperkt. Grote turbines zouden meer vermogen kunnen produceren, maar technologisch zit men beperkt tot convertoren van ongeveer 7.5 meter diameter. Het gebruik van grotere turbines zou leiden tot een groter risico door onder andere aanraking van de bodem of luchtslag in de turbines. Concreet wil dit zeggen dat in geen enkele omstandigheid een groter vermogen kan behaald worden dan aangegeven in deze tekst.

Zelfs indien het theoretisch vermogen wordt behaald, dan nog kan men slechts 71.5 MWh per jaar onttrekken. Hoewel de vergelijking niet opgaat, wil ik toch een vergelijking aangaan met windmolens in een offshore windmolenpark. Naar schatting zou een 5MW turbine ongeveer 16.5 GWh per jaar (op de Thorntonbank) leveren aan groene energie. Dit is een factor 230 verschil...

Getijdenenergie heeft tot op heden een heel klein aandeel in de groene energieën. Enerzijds is dit omdat er nog te veel ongekende factoren spelen. Anderzijds is het ook waarschijnlijk omdat andere groene alternatieven (op dit ogenblik) goedkoper zijn, zoals zonne-energie of windenergie.

Na het schrijven van deze thesis, vermoed ik sterk dat in de nabije toekomst hierin weinig verandering zal komen, toch wat economische haalbaarheid betreft. In Zeebrugge en in het algemeen op het volledige BCP is de toekomst van getijdenenergie twijfelachtig. De stroomsnelheden zijn onvoldoende en/of de technische randvoorwaarden zijn te streng om voldoende economische garanties te krijgen.

Er kunnen echter ook positieve besluiten getrokken worden voor getijdenenergie in het algemeen. De evolutie naar groenere energie en de publieke opinie daaromtrent is zeker zo'n positief punt. De reputatie van groene stroom is zeer sterk. Getijdenenergie staat duidelijk nog in de ontwerpfase. Op langere termijn zullen de turbines beter en beter worden. Bovendien zal de investeringskost afnemen naarmate het leerproces vordert en de hoeveelheid getijdenenergie convertoren toeneemt. In dat opzicht van de leerfase kan het BCP wel nog zijn rol spelen. In een agressief maritiem milieu zijn te veel parameters ongekend. De meeste van die zaken zullen naar de toekomst zeker moeten getest worden aan de hand van modelproeven en prototypes. Zeebrugge zou hiervoor een optimale bestemming kunnen zijn.

Hoezeer men ook tracht om technische en economische oplossingen aan te bieden; men kan onmogelijk ingrijpen op het getij, de stroming en het vermogen van een stroming.

Bijlage A

Turbine met NACA0018 profielen

Er wordt een turbine berekend met 2 vleugels met de geometrie van een NACA0018 profiel. De turbine is van het propeller type. Het uitzicht van de TECs is als het prototype van Marine Current Turbines (Meer informatie over dit type turbine in [Lammertyn en Depraetere, 2008]). De input parameters worden gegeven in tabel A.1. Volgens de figuren A.1, A.2 en A.3 bedraagt de optimale aanvalshoek

Straal	3.5 m
Schoepen	2 stuks
v_0	2.108 m/s
TSR	2

Tabel A.1: Input voor de berekening (Zie rekenblad) van een vleugel.

ongeveer 8 graden. Dan is C_l ongeveer 0.972 en C_d ongeveer 0.0228. De lift- en de sleepcoëfficiënten van een NACA 0018 profiel met variabele stroming (variabele Reynoldsgetallen). Grafieken werden berekend met behulp van het programma Javafoil [Hepperle, 2006].

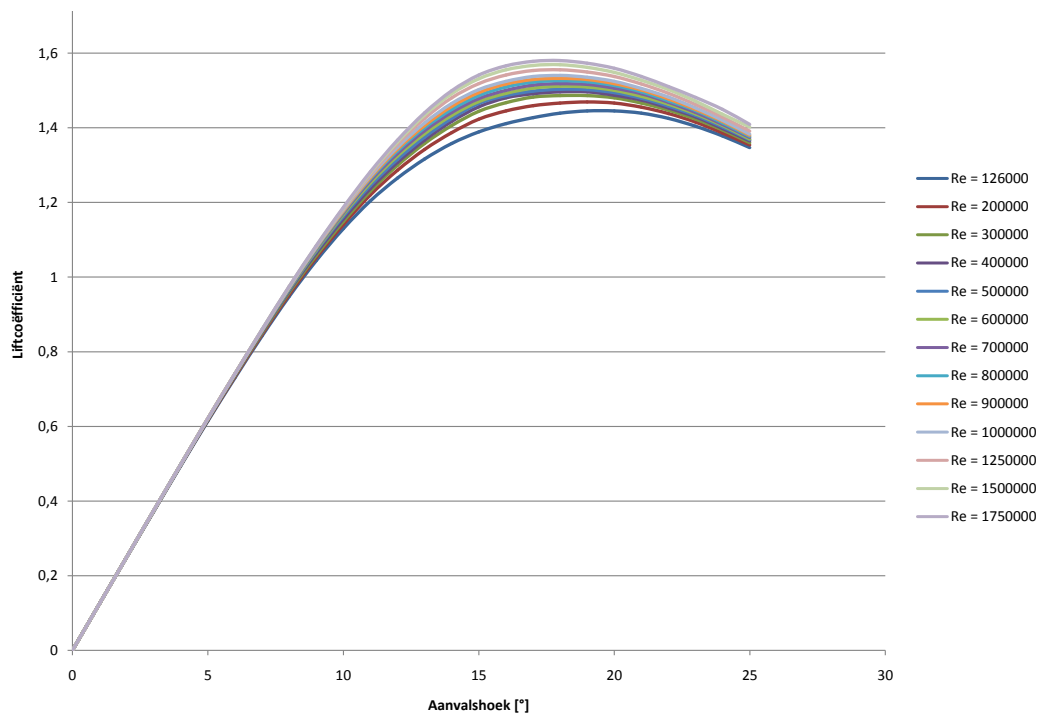
Indien verondersteld wordt dat de koorde van de vleugel over de volledige lengte 0.40 meter bedraagt, dan bekomt men resultaten als in tabel A.2. De formules van hoofdstuk 4 leiden tot een ideale

Druk	3.13 kN
Torsie	4.63 kNm
Vermogen	5.58 kWatt

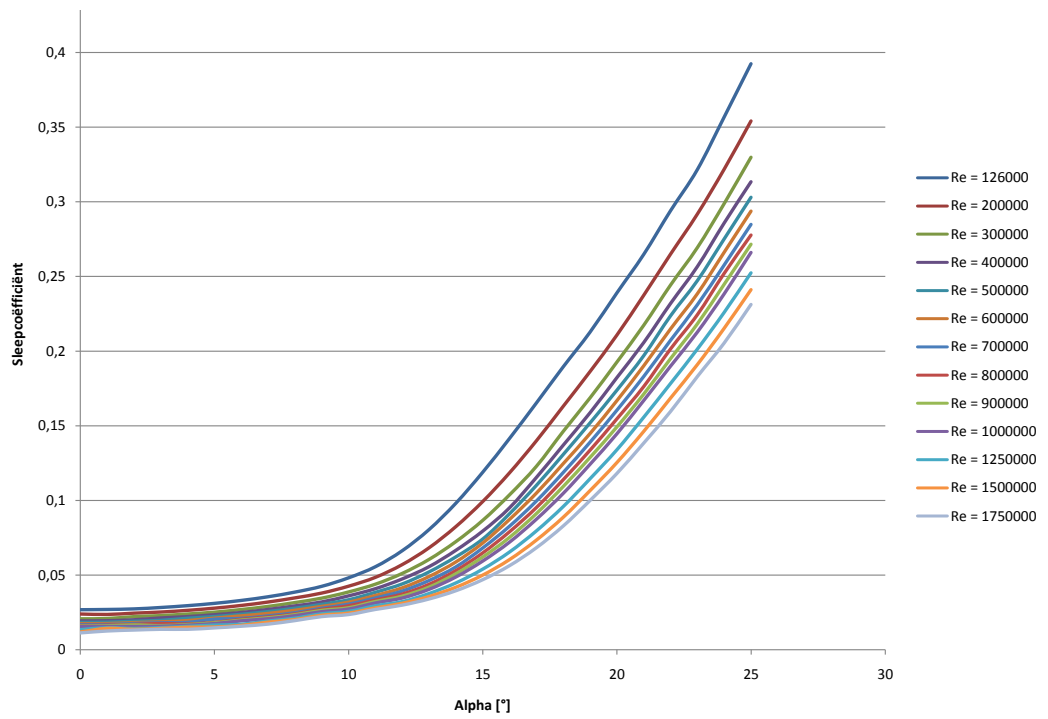
Tabel A.2: Output (Zie rekenblad) voor een vleugel.

twisthoek en aanvalshoek. Dit wordt weergegeven in figuur A.4. Let erop dat het eerste deel van de relatieve lengte ($0 \leq r/R \leq 0.15$) zuiver theoretisch is. In praktijk zal er zich over ongeveer die lengte de naaf van de turbine bevinden. Hoewel dit een zuiver theoretische benadering is, merkt men in praktijk dat deze voorspelling vrij correct zijn [Barltrop et al., 2005]. Doorheen de tijd vergroot de sleepcoëfficiënt door aangroei en andere aantasting.

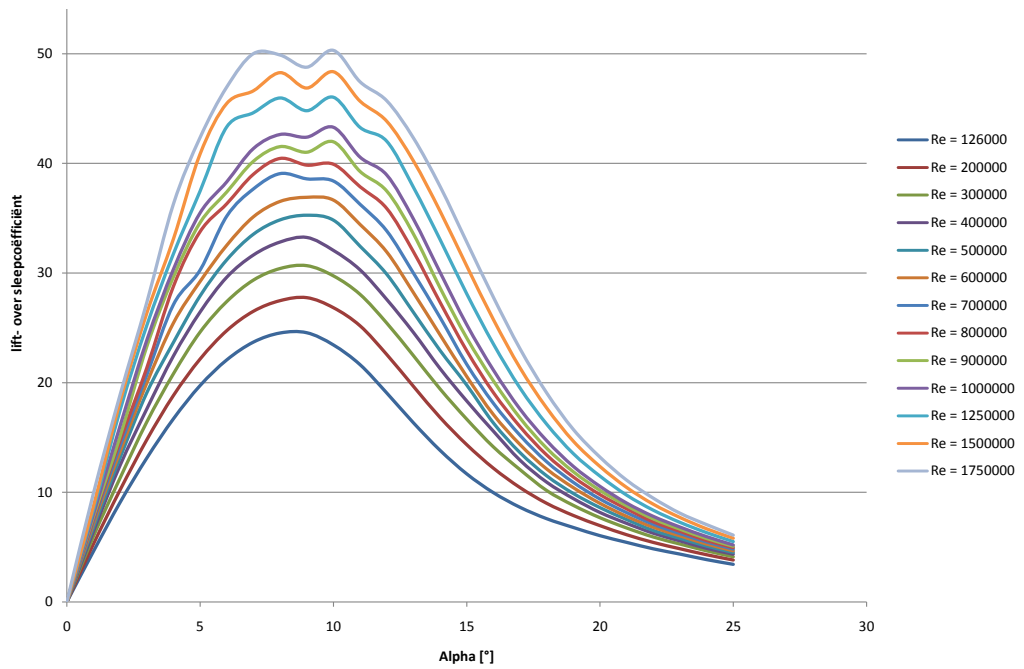
De maximale drukkracht kan zo hoog oplopen en er wordt aangenomen dat maximaal 10.3 kN kan optreden.



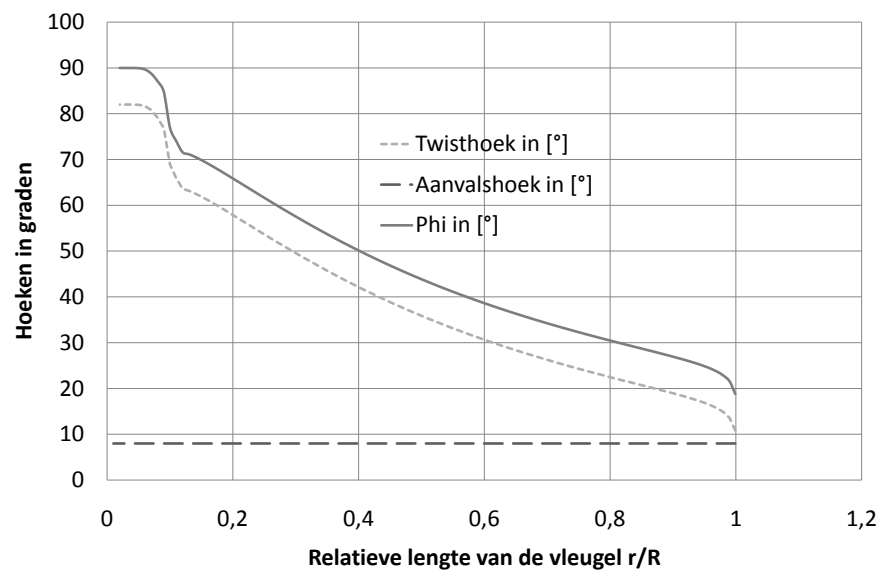
Figuur A.1: Liftcoëfficiënt van een NACA 0018 profiel



Figuur A.2: Sleepcoëfficiënt van een NACA 0018 profiel



Figuur A.3: Lift- over sleepcoëfficiënt van een NACA 0018 profiel



Figuur A.4: De twisthoek en de aanvalshoek van een vleugel met het NACA0018 profiel.

Bijlage B

Turbine van het openhydro type

Er wordt een turbine berekend van het openhydrotype (zie ook figuur 3.3) met parameters als in tabel B.1. Als vleugel types wordt er een vlakke plaat gebruikt. De optimale aanvalshoek van een vlakke

Straal	2.73 m
Opening	27.5 % = 0.75 m
Schoepen	16 stuks
v_0	3 m/s
TSR	2

Tabel B.1: Input voor de berekening (Zie rekenblad) van een vleugel.

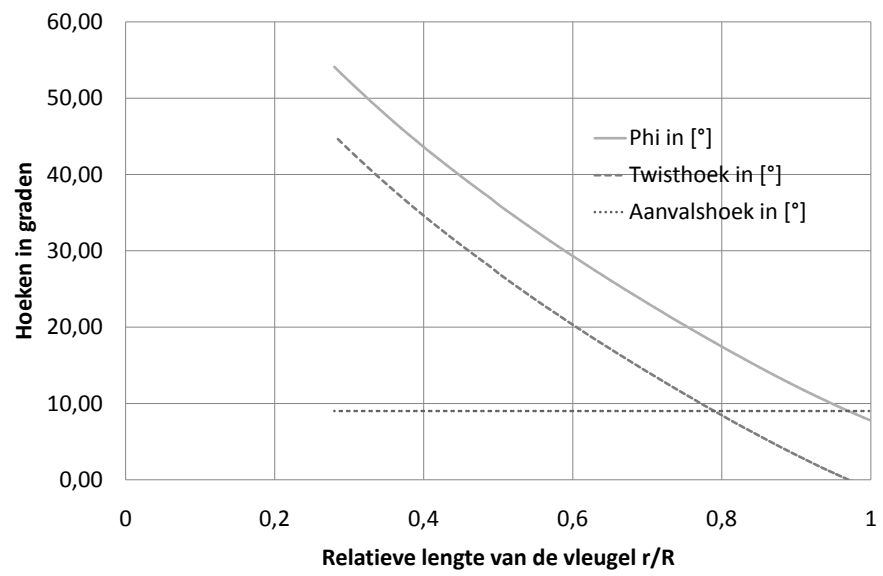
plaat bedraagt ongeveer 9 graden. Dan is C_l ongeveer 0.75 en C_d ongeveer 0.079 (zie tabel 4.9.2). De breedte van de vleugel varieert van 0.15 meter op de binnen cilinder naar 0.536 meter op de buitenste lager. De kracht op de 16 vleugels van de turbine wordt weergegeven in tabel B.2. Hoewel de platen

Druk	18.24 kN
Torsie	8.01 kNm
Vermogen	17.60 kWatt

Tabel B.2: Output (Zie rekenblad) voor een vleugel.

vlak zijn, kan er in de lengterichting toch een twist gegeven worden. Door de twist in de vleugels vergroot de energieproductie. In figuur B.1 is duidelijk te merken dat de twisthoek bijna een rechte beschrijft. Doorheen de tijd vergroot de sleepcoëfficiënt door aangroei en andere aantasting.

De maximale drukkracht kan zo tot maximaal 48 kN oplopen. Het torsiemoment bedraagt in de maximale gevallen 65 kNm.



Figuur B.1: De twisthoek en de aanvalshoek van een vleugel (vlakke dunne plaat).

Bijlage C

Voorkomensfrequenties golven Bol van Heist

In volgende tabellen zijn de gegevens opgenomen over metingen van golven op de Bol van Heist. In totaal zijn er 203080 golven gemeten over een periode van 1/1/1985 tot en met 31/12/2004. Dit is een tijdsduur van 20 jaar. De waterdiepte voor de Bol van Heist bedraagt 11.7 meter. De ligging van de Bol van Heist is op $51^{\circ}23'25''$ (51.3903) noorderbreedte en $3^{\circ}11'43''$ (3.1953) oosterlengte. Gegevens volgens [MUMM, 2008a].

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		1.62	4.69	1.46	0.28	0.06	0.01		8.12
0.25-0.50 m	0.16	8.72	15.70	5.36	1.24	0.16			31.34
0.50-1.00 m	0.03	5.88	23.07	7.86	1.33	0.22			38.39
1.00-1.50 m		0.19	6.43	6.94	0.97	0.06			14.59
1.50-2.00 m			0.74	2.92	1.31	0.08			5.05
2.00-2.50 m			0.03	0.66	0.86	0.32			1.87
2.50-3.00 m				0.05	0.28	0.18			0.51
3.00-3.50 m					0.02	0.02	0.01		0.05
Totaal	0.19	16.41	50.66	25.25	6.29	1.10	0.02		99.92

Tabel C.1: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor **ALLE** golven.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.06	0.13	0.09					0.28
0.25-0.50 m		0.39	0.47	0.14	0.03				1.03
0.50-1.00 m		0.21	0.93	0.31	0.06				1.51
1.00-1.50 m			0.22	0.25	0.05	0.01			0.53
1.50-2.00 m			0.02	0.13	0.07	0.01			0.23
2.00-2.50 m				0.02	0.06	0.01			0.09
2.50-3.00 m					0.01	0.01			0.02
3.00-3.50 m									
Totaal		0.66	1.77	0.94	0.28	0.04			3.69

Tabel C.2: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **noorden**.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.10	0.26	0.06	0.01				0.43
0.25-0.50 m	0.01	0.57	0.81	0.26	0.06				1.71
0.50-1.00 m		0.41	1.53	0.58	0.13	0.01			2.66
1.00-1.50 m			0.34	0.51	0.10	0.01			0.96
1.50-2.00 m			0.01	0.12	0.12	0.01			0.26
2.00-2.50 m				0.02	0.06	0.03			0.11
2.50-3.00 m					0.01	0.01			0.02
3.00-3.50 m									
Totaal	0.01	1.08	2.95	1.55	0.49	0.07			6.15

Tabel C.3: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **noordnoordoosten**.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.13	0.37	0.09	0.01				0.6
0.25-0.50 m		0.66	1.00	0.34	0.07	0.01			2.08
0.50-1.00 m		0.37	1.42	0.52	0.12	0.02			2.45
1.00-1.50 m		0.04	0.29	0.38	0.06				0.77
1.50-2.00 m			0.03	0.12	0.10	0.01			0.26
2.00-2.50 m				0.01	0.04	0.02			0.07
2.50-3.00 m									
3.00-3.50 m									
Totaal		1.20	3.11	1.46	0.40	0.06			6.23

Tabel C.4: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **noordoosten**.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.16	0.33	0.10	0.01	0.01			0.61
0.25-0.50 m	0.02	0.57	1.03	0.39	0.08	0.01			2.10
0.50-1.00 m	0.01	0.46	1.43	0.57	0.09	0.01			2.57
1.00-1.50 m		0.03	0.29	0.32	0.06				0.70
1.50-2.00 m			0.01	0.07	0.03				0.11
2.00-2.50 m					0.01				0.01
2.50-3.00 m									
3.00-3.50 m									
Totaal	0.03	1.22	3.09	1.45	0.28	0.03			6.10

Tabel C.5: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **oostnoordoosten**.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.15	0.35	0.11	0.02	0.01			0.64
0.25-0.50 m	0.03	0.54	0.092	0.38	0.09	0.01			1.97
0.50-1.00 m	0.01	0.42	0.83	0.33	0.09	0.01			1.69
1.00-1.50 m			0.14	0.12	0.03				0.29
1.50-2.00 m				0.01	0.01				0.02
2.00-2.50 m									
2.50-3.00 m									
Totaal	0.04	1.11	2.24	0.95	0.24	0.03			4.61

Tabel C.6: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **oosten**.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.15	0.47	0.14	0.04	0.01			0.81
0.25-0.50 m	0.02	0.52	0.98	0.47	0.12	0.02			2.13
0.50-1.00 m		0.12	0.37	0.22	0.07	0.01			0.79
1.00-1.50 m			0.01	0.03	0.01				0.05
1.50-2.00 m									
2.00-2.50 m									
Totaal	0.02	0.79	1.83	0.86	0.24	0.04			3.78

Tabel C.7: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **oostzuidoosten**.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.16	0.60	0.21	0.05	0.01	0.01		1.04
0.25-0.50 m	0.03	0.47	1.02	0.53	0.15	0.02			2.22
0.50-1.00 m		0.04	0.15	0.13	0.06	0.01			0.39
1.00-1.50 m				0.02	0.01				0.03
1.50-2.00 m				0.01					0.01
2.00-2.50 m									
2.50-3.00 m									
Totaal	0.03	0.67	1.77	0.90	0.27	0.04	0.01		3.69

Tabel C.8: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **zuidoosten**.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.20	0.60	0.18	0.04	0.01			1.03
0.25-0.50 m	0.03	0.96	1.33	0.54	0.12	0.02			3.00
0.50-1.00 m	0.01	0.30	0.34	0.15	0.06	0.02			0.88
1.00-1.50 m		0.02	0.02	0.02					0.06
1.50-2.00 m									
2.00-2.50 m									
Totaal	0.04	1.48	2.29	0.89	0.22	0.05			4.97

Tabel C.9: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **zuidzuidoosten**.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.16	0.49	0.14	0.04	0.01			0.84
0.25-0.50 m	0.01	1.19	2.25	0.61	0.12	0.02			4.20
0.50-1.00 m		0.87	2.28	0.48	0.09	0.03			3.72
1.00-1.50 m		0.02	0.25	0.08	0.01				0.36
1.50-2.00 m			0.01	0.01	0.01				0.03
2.00-2.50 m									
2.50-3.00 m									
Totaal	0.01	2.24	5.28	1.32	0.27	0.06			9.18

Tabel C.10: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **zuiden**.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.09	0.27	0.08	0.02				0.46
0.25-0.50 m	0.01	0.74	1.56	0.49	0.11	0.01			2.92
0.50-1.00 m		0.79	3.58	1.00	0.10	0.03			5.50
1.00-1.50 m		0.03	0.80	0.50	0.04	0.01			1.38
1.50-2.00 m			0.06	0.08	0.02				0.16
2.00-2.50 m									
2.50-3.00 m									
Totaal	0.01	1.65	6.27	2.15	0.29	0.05			10.42

Tabel C.11: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **zuidzuidwesten**.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.08	0.21	0.07	0.02				0.38
0.25-0.50 m		0.53	1.24	0.38	0.10	0.02			2.27
0.50-1.00 m		0.74	3.37	1.02	0.09	0.02			5.21
1.00-1.50 m		0.03	1.32	1.21	0.07	0.01			2.64
1.50-2.00 m			0.24	0.52	0.06				0.82
2.00-2.50 m			0.02	0.10	0.02				0.14
2.50-3.00 m				0.01					0.01
3.00-3.50 m									
Totaal		1.35	6.40	3.31	0.36	0.05			11.47

Tabel C.12: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **zuidwesten**.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.05	0.17	0.06	0.01				0.29
0.25-0.50 m		0.51	1.04	0.26	0.07	0.01			1.89
0.50-1.00 m		0.58	2.79	0.84	0.08	0.01			4.30
1.00-1.50 m		0.02	1.29	1.24	0.10				2.65
1.50-2.00 m			0.22	0.61	0.16				0.99
2.00-2.50 m			0.01	0.15	0.09	0.01			0.26
2.50-3.00 m				0.01	0.02				0.03
3.00-3.50 m									
Totaal		1.16	5.52	3.17	0.53	0.03			10.41

Tabel C.13: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **westzuidwesten**.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.05	0.17	0.04	0.01				0.27
0.25-0.50 m		0.44	0.76	0.19	0.04	0.01			1.44
0.50-1.00 m		0.23	1.54	0.51	0.06	0.01			2.35
1.00-1.50 m			0.54	0.69	0.10				1.33
1.50-2.00 m			0.07	0.43	0.16	0.01			0.67
2.00-2.50 m				0.10	0.13	0.05			0.28
2.50-3.00 m				0.01	0.04	0.02			0.07
3.00-3.50 m									
Totaal		0.72	3.08	1.97	0.54	0.10			6.41

Tabel C.14: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **westen**.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.03	0.10	0.03					0.16
0.25-0.50 m		0.27	0.49	0.15	0.02				0.93
0.50-1.00 m		0.14	1.03	0.45	0.07	0.01			1.70
1.00-1.50 m			0.40	0.68	0.12				1.20
1.50-2.00 m			0.04	0.35	0.23	0.02			0.64
2.00-2.50 m				0.09	0.16	0.08			0.33
2.50-3.00 m				0.02	0.07	0.05			0.14
3.00-3.50 m					0.01				0.01
3.50-4.00 m									
Totaal		0.44	2.06	1.77	0.68	0.16			5.11

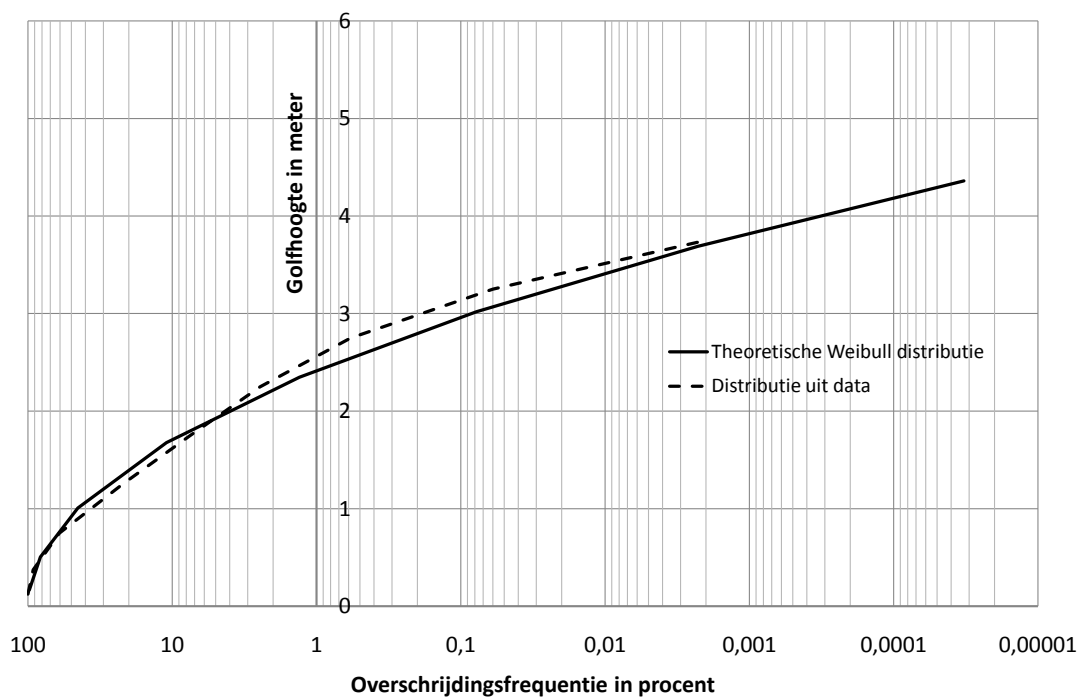
Tabel C.15: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **westnoordwesten**.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.03	0.08	0.03					0.14
0.25-0.50 m		0.19	0.42	0.12	0.03				0.76
0.50-1.00 m		0.13	0.79	0.39	0.07	0.01			1.39
1.00-1.50 m			0.28	0.52	0.11	0.01			0.92
1.50-2.00 m			0.02	0.26	0.22	0.01			0.51
2.00-2.50 m				0.10	0.20	0.07			0.37
2.50-3.00 m					0.10	0.05			0.15
3.00-3.50 m					0.01	0.01	0.01		0.03
Totaal		0.35	1.59	1.42	0.74	0.16	0.01		4.27

Tabel C.16: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **noordwesten**.

	0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	Totaal
0-0.25 m		0.02	0.09	0.03					0.14
0.25-0.50 m		0.17	0.38	0.11	0.03				0.69
0.50-1.00 m		0.10	0.69	0.36	0.09	0.01			1.25
1.00-1.50 m			0.24	0.37	0.10	0.01			0.72
1.50-2.00 m			0.01	0.20	0.12	0.01			0.34
2.00-2.50 m				0.07	0.09	0.05			0.21
2.50-3.00 m					0.03	0.04			0.07
3.00-3.50 m						0.01			0.01
Totaal		0.29	1.41	1.14	0.46	0.13			3.43

Tabel C.17: Voorkomensfrequenties in functie van de golfhoogte en periode (meetpunt Bol van Heist) voor golven komende uit het **noordnoordwesten**.



Figuur C.1: De overschrijdingsfrequentie van de golven op de Bol van Heist ten opzichte van een theoretische Weibull distributie.

Bijlage D

Karakteristieken van monopalen

Naam	Diameter m	I m ⁴	EI kNm ²	W cm ³	Ms,d kNm	A cm ²	Gewicht kg/m	Gewicht kN/m
1200x12	1,2	0,0079	1659411	13170	4066	448	352,02	3,45
1300x13	1,3	0,0109	2285612	16744	5169	526	413,14	4,05
1400x14	1,4	0,0146	3074264	20913	6456	610	479,14	4,70
1500x15	1,5	0,0193	4051297	25723	7940	700	550,03	5,40
1600x16	1,6	0,0250	5244559	31218	9637	796	625,82	6,14
1700x17	1,7	0,0318	6683820	37444	11559	899	706,49	6,93
1800x18	1,8	0,0400	8400770	44449	13721	1008	792,05	7,77
1900x19	1,9	0,0497	10429019	52276	16137	1123	882,50	8,66
2000x20	2	0,0610	12804100	60972	18822	1244	977,84	9,59
2100x21	2,1	0,0741	15563464	70583	21789	1372	1078,07	10,58
2200x22	2,2	0,0893	18746483	81154	25052	1505	1183,19	11,61
2300x23	2,3	0,1066	22394451	92731	28626	1645	1293,19	12,69
2400x24	2,4	0,1264	26550582	105359	32524	1791	1408,09	13,81
2500x25	2,5	0,1489	31260010	119086	36761	1944	1527,87	14,99
2600x26	2,6	0,1741	36569790	133955	41351	2102	1652,55	16,21
2700x27	2,7	0,2025	42528898	150014	46309	2267	1782,11	17,48
2800x28	2,8	0,2342	49188230	167307	51647	2438	1916,57	18,80
2900x29	2,9	0,2695	56600604	185880	57380	2616	2055,91	20,17
3000x30	3	0,3087	64820756	205780	63523	2799	2200,14	21,58

Figuur D.1: Karakteristieken van monopalen horende bij een staalsoort met vloeigrens van 355 MPa en E-modulus van 210000 MPa. De maximaal toelaatbare (veiligheid 1.15) spanning is 308 MPa.

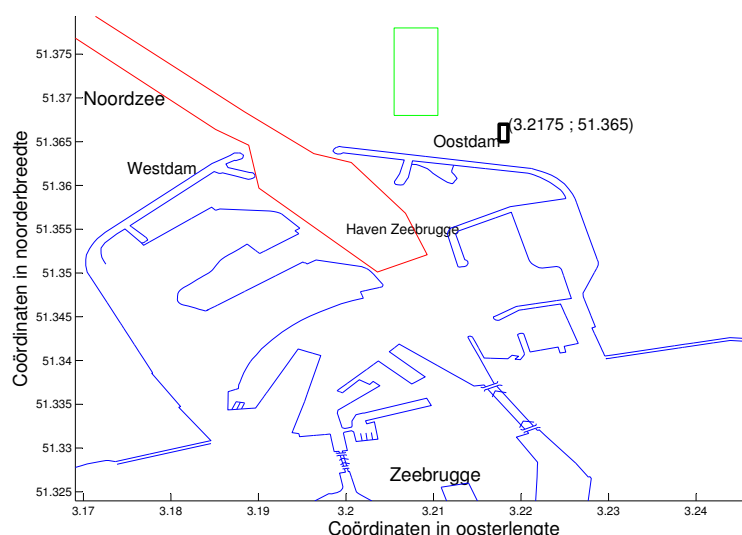
Bijlage E

Interessante locaties voor een TEC

Punt met coördinaat (51.365 ; 3.2175)

Ligging

Een interessant punt is het punt met coördinaten $3^{\circ}13'30''$ oosterlengte en $51^{\circ}21'54''$ noorderbreedte (51.365 ; 3.2175). Deze plaats ligt aan de oostdam en wordt weergegeven op figuur E.1.



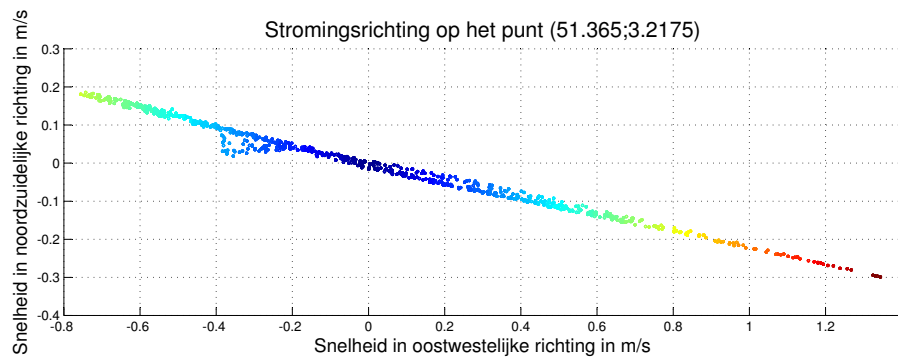
Figuur E.1: Situering van het punt met coördinaten $51^{\circ}21'54''$ noorderbreedte en $3^{\circ}13'30''$ oosterlengte (51.365 ; 3.2175).

Stromingsroos

Voor het punt kan een stromingsroos opgesteld worden. De vectoren in figuur E.2 is een uitgemiddelde snelheid over de diepte. In figuur E.3 wordt een beeld van het dwarsprofiel van de stroomsnelheid gegeven. De stroming varieert van grootte, maar is zeer sterk richtingsgebonden. Men merkt duidelijk dat de stroming altijd volgens eenzelfde hoek stroomt. De hoek heeft een grootte van 12.53 graden ten opzicht van het oosten.

Dwarsprofiel

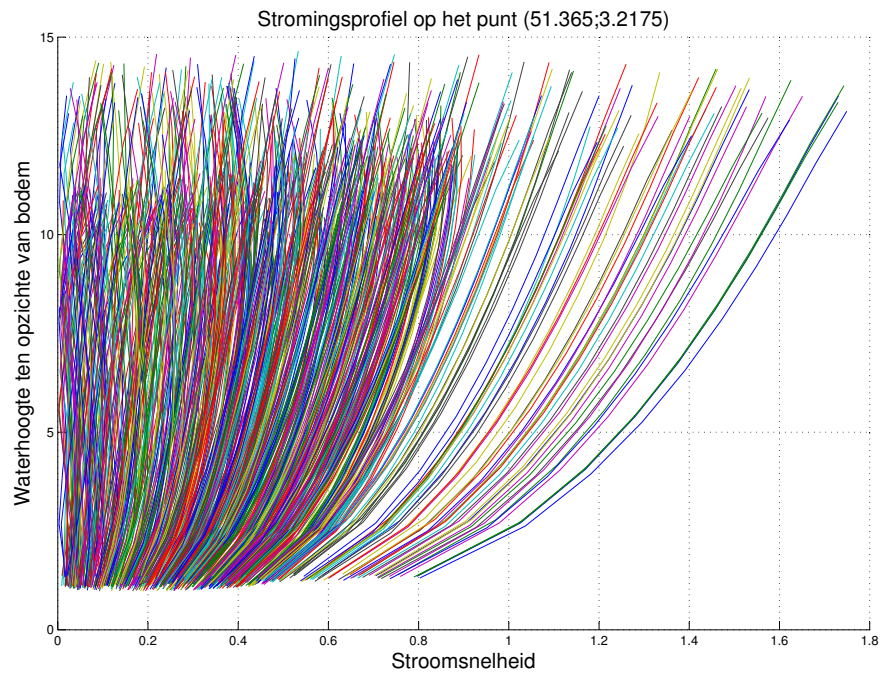
Figuur E.3 heeft een stromingsprofiel weer van het punt met coördinaten (51.365 ; 3.2175).



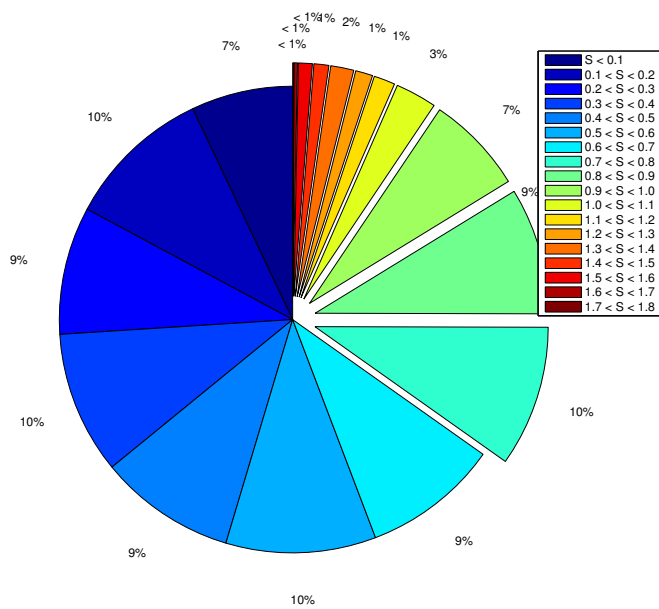
Figuur E.2: Stromingsbeeld over 16 dagen bekeken op het punt met coördinaat (51.365 ; 3.2175) met bijhorende richting en grootte. De grootte van elke vector is berekend als een gemiddelde over de diepte.

Uitbreiding naar zone (51.368;51.378 ; 3.2055:3.2105)

Het spreekt vanzelf dat men getijden energie goedkoper kan maken indien men meerdere toestellen plaatst. Aan de oostelijke dam is er een mogelijkheid om een groter gebied te bezetten. Er is over de zone (51.368;51.378 ; 3.2055:3.2105) een vrij gelijkwaardige stroming met hogere stroomsnelheden. De grote en de voorkomensfrequentie wordt weergegeven in figuur E.4. Indien de cut-in snelheid 0.7 m/s bedraagt, dan is de turbine ongeveer 35 procent van tijd werkzaam.



Figuur E.3: Het dwarsprofiel van de snelheid van de getijdenstroming over een periode van 16 dagen. Het dwarsprofiel is een plaatselijke opname van het punt met coördinaten (51.365 ; 3.2175).



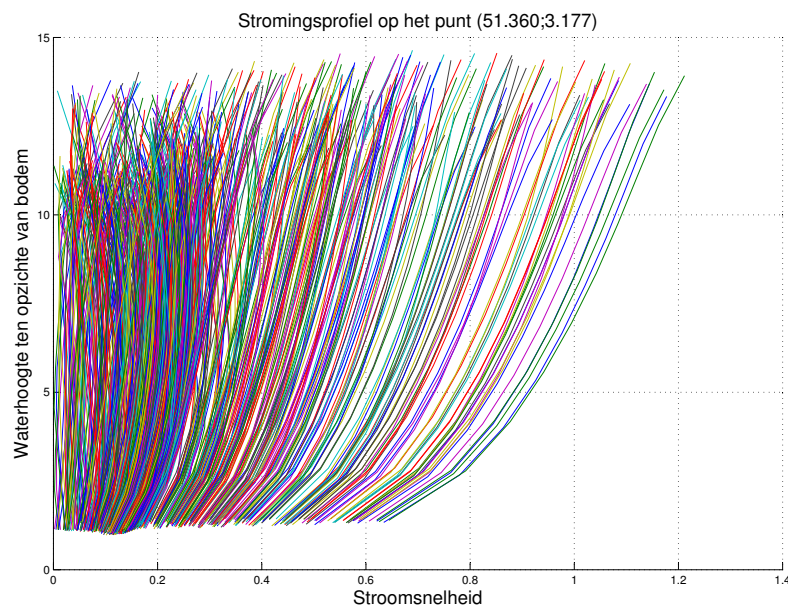
Figuur E.4: Voorkomensfrequentie van de stroming in de zone (51.368;51.378 ; 3.2055;3.2105).

Het punt (51.360 ; 3.177)

Het punt met coördinaten $3^{\circ}10'37''$ oosterlengte en $51^{\circ}21'36''$ noorderbreedte(51.360 ; 3.177) is gelegen aan de westelijke dam. Dit is weergegeven in figuur 8.4.

Stromingsroos

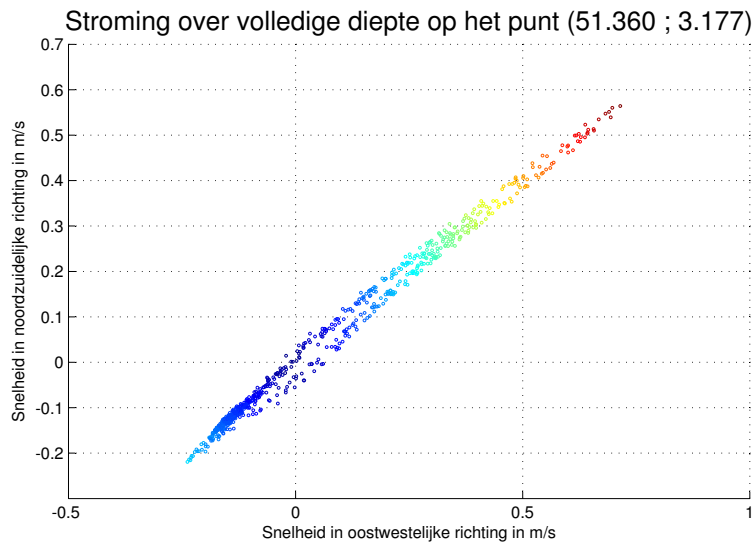
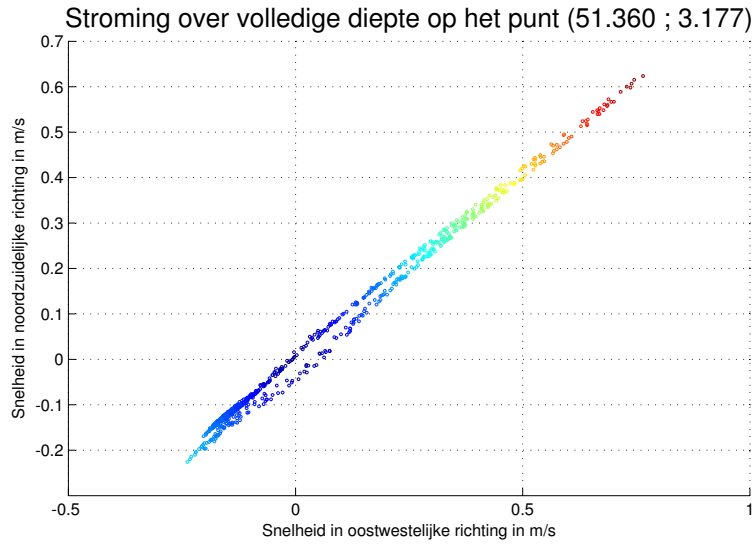
Het stromingsbeeld ziet eruit als in figuur E.6. Elk punt stelt hierbij het eindpunt voor van een stromingsvector met beginpunt de oorsprong. de stromingsvector is een gemiddelde over de diepte. Het valt op in figuur E.6 dat de grootste stromingen optreden in een bepaalde richting. Benaderend zou men de puntenwolk kunnen voorstellen door een rechte met richting 51 graden ten opzichte van de verticale. Dit is de rechte in de figuur. Volgens figuur E.6 is dit in oost noordoostelijke richting. Indien alle punten kleiner dan de cut-in snelheid verwijderd worden, dan ziet men in dat deze richting van 51 graden nog sterker benadert wordt.



Figuur E.5: Het dwarsprofiel van de snelheid van de getijdenstroming over een periode van 16 dagen. Het dwarsprofiel is een plaatselijke opname van het punt met coördinaten (51.360 ; 3.177).

Dwarsprofiel

Het dwarsprofiel van de stroming wordt weergegeven in figuur E.5. Indien men het gemiddelde van elk stromingsprofiel neemt, dan krijgt men figuur E.5. De grootste stroming treedt niet op bij maar net voor hoog water.



Figuur E.6: De richting van de stroming op het punt (51.360 ; 3.177). De bovenste figuur is de stroming uitgemiddeld over de diepte van de TEC (van -1.06 tot -8.56 meter GLLWS) In de onderste figuur is de stroming uitgemiddeld over de diepte.

Besluit

Voor de oostelijke dam van Zeebrugge is het mogelijk om een beperkt park aan te leggen. Ongeveer 35 procent van de tijd ligt de stroomsnelheid boven 0.7 m/s. Dit is ruimschoots meer dan gemiddeld werd gevonden (21 procent voor de volledige omgeving nabij zeebrugge).

Indien men het punt (51.360 ; 3.177) beschouwd, dan merkt men een mindere energetische opbrengst. Dit punt ligt ongeveer 100 meter zeewaarts van het midden van de westelijke dam. De zeer beperkte afstand tot het vaste land kan zijn voordelen hebben. Zeker in het opzicht als prototype. De gemakkelijke toegang is hier een voordeel.

Bijlage F

Monopaal met 2 TECs van het propellertype

Er wordt een monopaal verondersteld met 2 getijden convertoren. De turbines zijn van het propellertype en de vleugels zijn NACA0018 profielen.

Resultaten

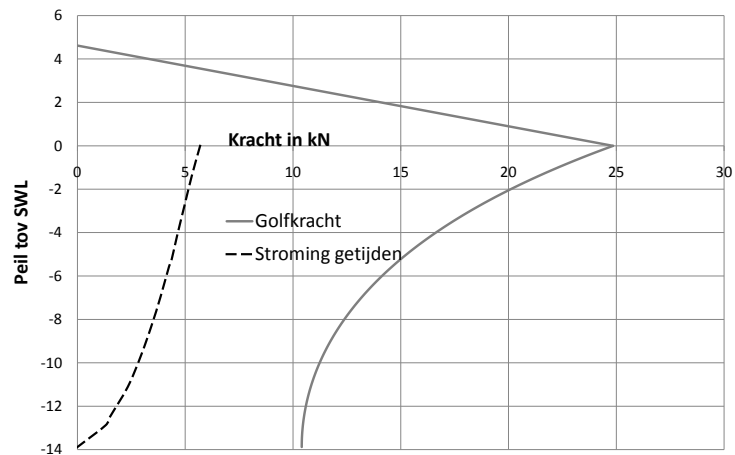
De resultaten worden in tabel F.1 weergegeven. Voor een monopaal 1600x16, 1700x17 en 1800x18

Monopaal	Peil aan top [m GLLWS]	Lengte [m]	Gewicht [kN]	M [kNm]	δ_{top} [mm]	δ_{grond} [mm]	Rot.top [mm/m]	Stabiel
1600x16	tot -27.78	38	1507	10600	235	115	24.0	nee
	tot -29.78	40	1586	10600	230	112	23.6	nee
1700x17	tot -23.78	34	1428	11260	250	130	24.0	nee
	tot -25.78	36	1428	11330	208	105	20.6	nee
	tot -27.78	38	1507	11350	200	100	20.0	nee
	tot -29.78	40	1586	11300	200	100	20.0	nee
	tot -31.78	42	1666	11300	200	100	20.0	nee
1800x18	tot -23.78	34	1428	12000	235	130	21.0	nee
	tot -25.78	36	1428	12050	187	97	18.0	nee
	tot -27.78	38	1507	12100	175	89	17.2	ja
	tot -29.78	40	1586	12120	175	89	17.2	ja

Tabel F.1: Resultaten van berekeningen van een monopaal (met 2 TECs van propeller type) te Zeebrugge.

bedraagt $M_{S,d}$ volgens tabel 8.1 respectievelijk 9637 kNm, 11559 kNm en 13721 kNm. Uit de berekening volgt dat een monopaal 1600x16 onstabiel is. Een monopaal 1700x17 wordt onstabiel bevonden wegens te hoge hoekrotatie. De rotatie aan de top mag maximaal 17.45 mm/m bedragen.

In geval van een monopaal 1800x18 valt het op dat de horizontale zetting maximaal 9 centimeter bedraagt en dit bij extremale belasting. De TEC zal in dat geval een rotatie ondervinden van ongeveer 0.99 graden. Dit ligt binnen het vooropgestelde criterium en is daarom aanvaardbaar. Bovendien is de hoekrotatie niet permanent maar wel tijdelijk in uitzonderlijke omstandigheden.



Figuur F.1: Golf- en stromingskrachten op een monopaal 1800x18.

Krachten

De golf- en stromingskrachten op de buispaal worden weergegeven in figuur F.1. De grootte van de krachten is gegeven in tabel F.2. De resulterende horizontale krachten worden gegeven in tabel F.3.

Verticaal	736 kN
Horizontaal	897 kN
Moment (ter hoogte van 'naaf')	3917 kNm

Tabel F.2: Krachten (in ULS) op een monopaal 1800x18, lengte 38 meter.

	Kracht [kN]	Aandeel [%]
Golven paal	664	74
Stroming paal	67	7.5
Golven TEC	0	0
Stroming TEC + draagsysteem	166	18.5
	897	100

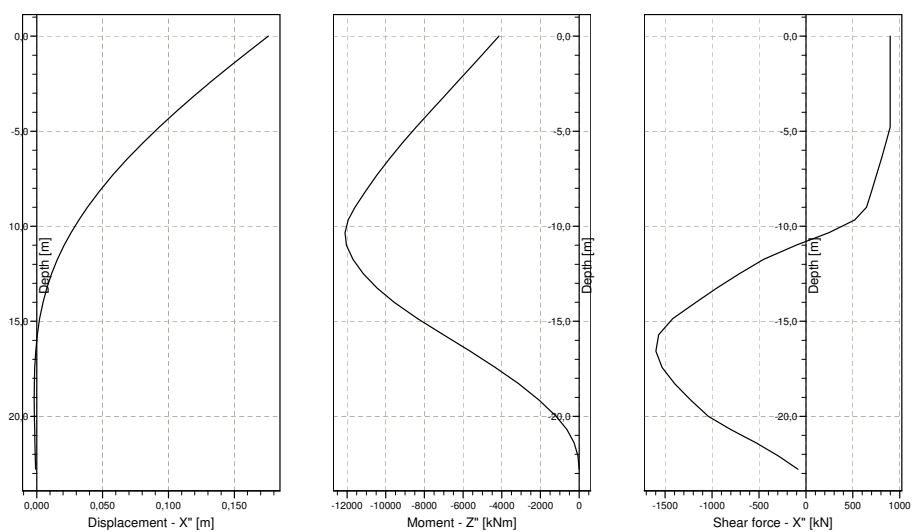
Tabel F.3: De grootte van elke kracht op een monopaal 1800x18 en het aandeel ervan in de totale horizontale kracht.

Momenten en verplaatsingen

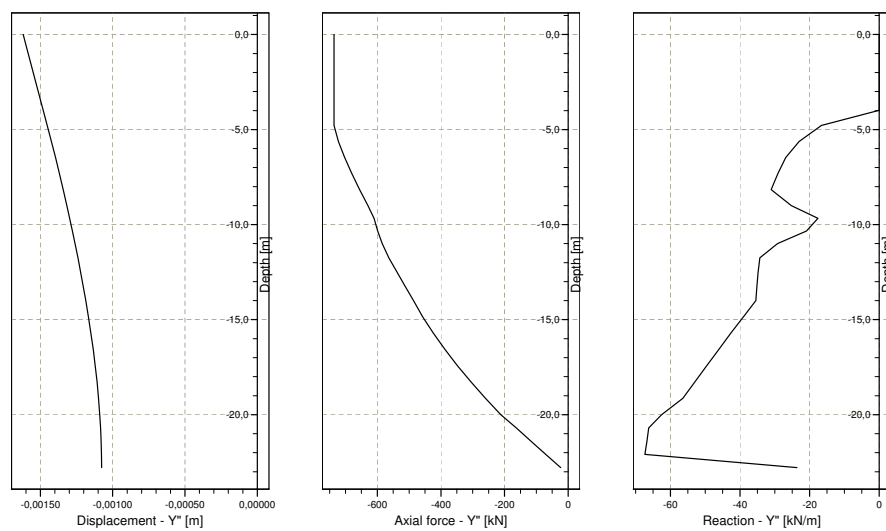
Men krijgt een momentenlijn, horizontale verplaatsingen en dwarskrachtenlijn als in figuur F.2. In figuur F.3 zijn de verticale verplaatsingen, normaalkracht op de monopaal en de schuifspanningen voorgesteld.

Besluit

Een monopaal 1800x18 met lengte 38 meter voldoet aan de gestelde eisen.



Figuur F.2: Horizontale verplaatsing, momentenlijn en dwarskrachtenlijn van een monopaal 1800x18.



Figuur F.3: Verticale verplaatsing, normaalkracht en schuifspanning in de grond bij een monopaal 1800x18.

Bijlage G

Grondmechanische parameters te Zeebrugge

In onderstaande figuren worden de boring en sonderingen in de omgeving van de TEC voorgesteld. Deze zijn afkomstig van [DOV, 2008]. In alle gevallen werd vanaf een hefeiland gesondeerd met een 200 kN apparaat en punt M4. Tabel G.1 heeft waarden weer die gebruikt werden voor een ontwerp van funderingen op de Thorntonbank.

Boring

Proefnummer:	kb5d11w-B301	Aanvangsdatum:	27/09/1977
X (mLambert):	66805.0 (van topokaart - gedigitaliseerd)	Uitvoeringsmethode:	onbekend
Y (mLambert):	228605.0 (van topokaart - gedigitaliseerd)	Diepte (m):	20.50
Z (mTAW):	-6.18 (uit dossier)		
Gemeente:	BUITEN VLAANDEREN		
Uitvoerder:	Smet-Dessel		
Opmerking:	opdrachtgever : RIG		

lithologische beschrijving - 27/09/1977

Auteur: Boormeester (bedrijf-dienst onbekend) Betrouwbaarheid: goed

<u>Van(m)</u>	<u>Tot(m)</u>	<u>Beschrijving</u>
0.00	1.50	slibhoudend fijn zand
1.50	4.00	Fijn zand met slibblenzen en weinig schelpgruis
4.00	4.00	Fijn zand met slibblenzen
4.00	7.00	Sterk slibhoudend fijn zand
7.00	11.00	Fijn zand met slibblenzen
11.00	12.00	Fijn zand met slibblenzen, met weinig schelpgruis
12.00	13.00	Fijn zand, weinig slib en schelpgruis
13.00	15.50	Weinig schelpgruishoudend fijn zand
15.50	16.00	Veel schelpgruishoudend fijn zand
16.00	18.00	Weinig schelpgruishoudend zeer fijn zand
18.00	18.50	Zeer fijn zand, weinig grind en schelpgruis
18.50	20.50	Sterk versteend, weinig grind en schelpgruis

formele stratigrafie - 26/02/1998

Auteur: De Ceukelaire Marleen (Universiteit Gent) Betrouwbaarheid: goed

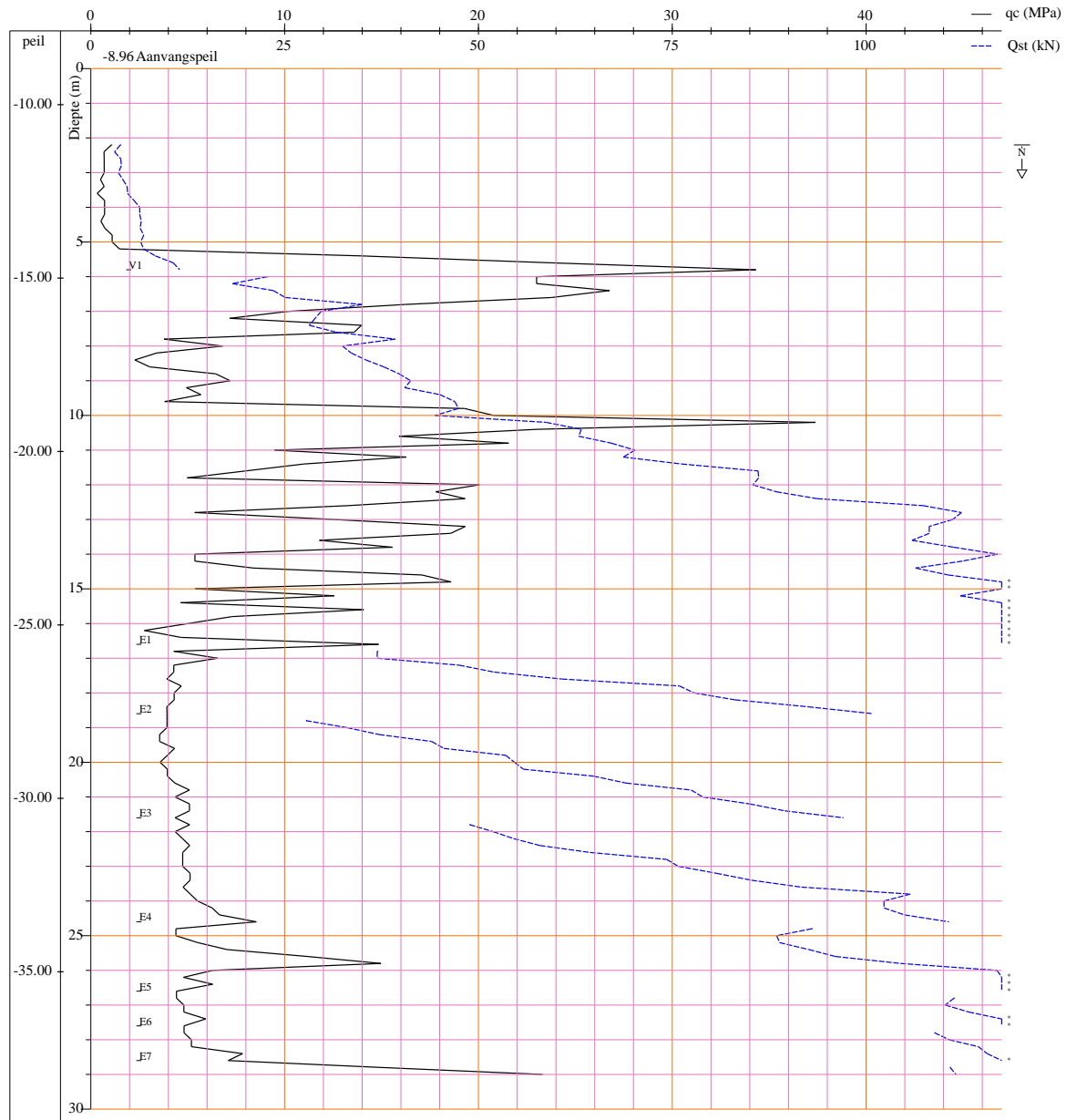
<u>Van(m)</u>	<u>Tot(m)</u>	<u>Beschrijving</u>	<u>Betrouwbaarheid</u>
0.00	20.50	Quartaire afzetting	goed

informele stratigrafie - 01/02/1992

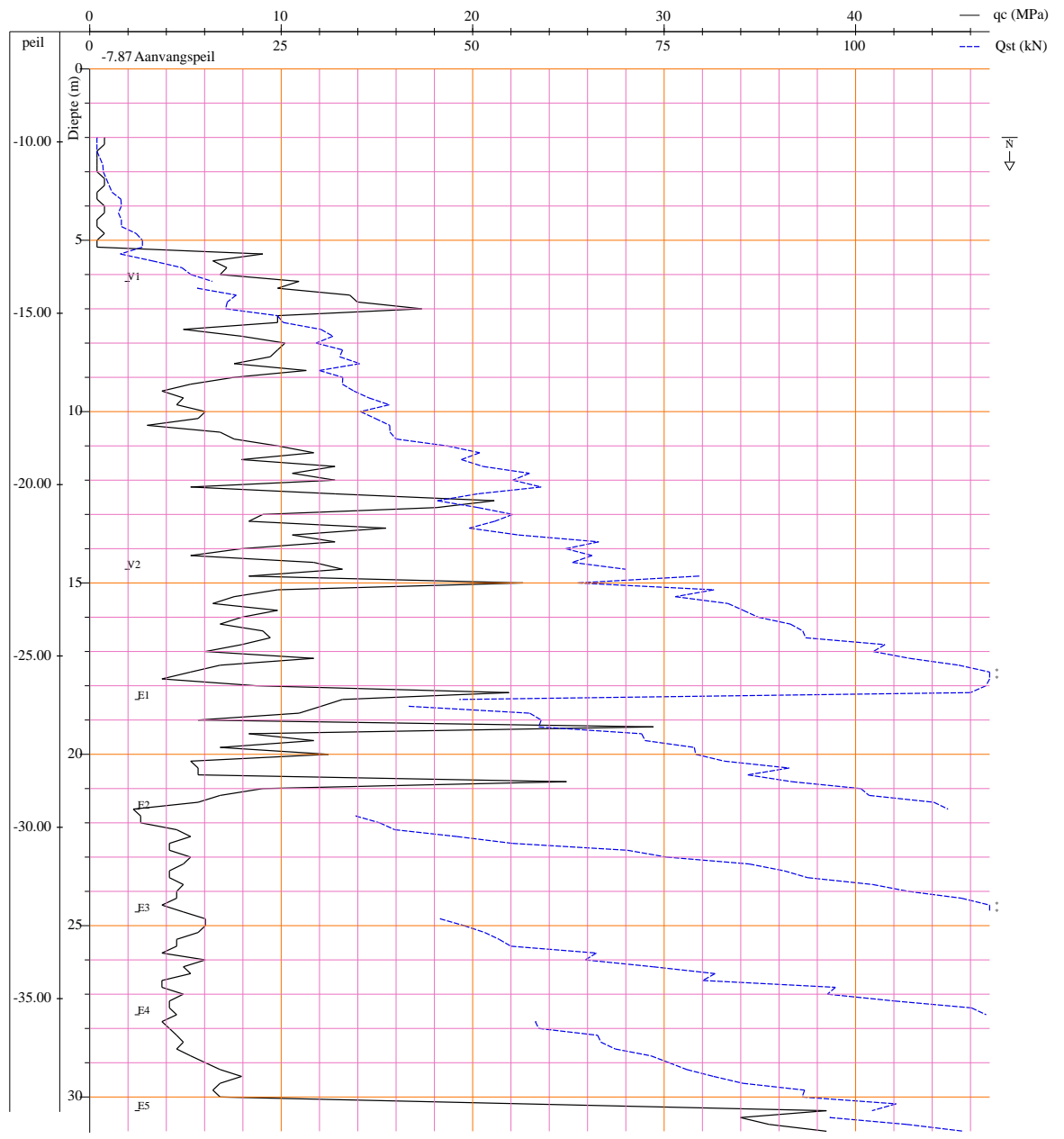
Auteur: Vander Sluys J. (Belgische Geologische Dienst) Betrouwbaarheid: goed

<u>Van(m)</u>	<u>Tot(m)</u>	<u>Beschrijving</u>
0.00	18.50	Kwartair
18.50	20.50	Formatie van Aalter

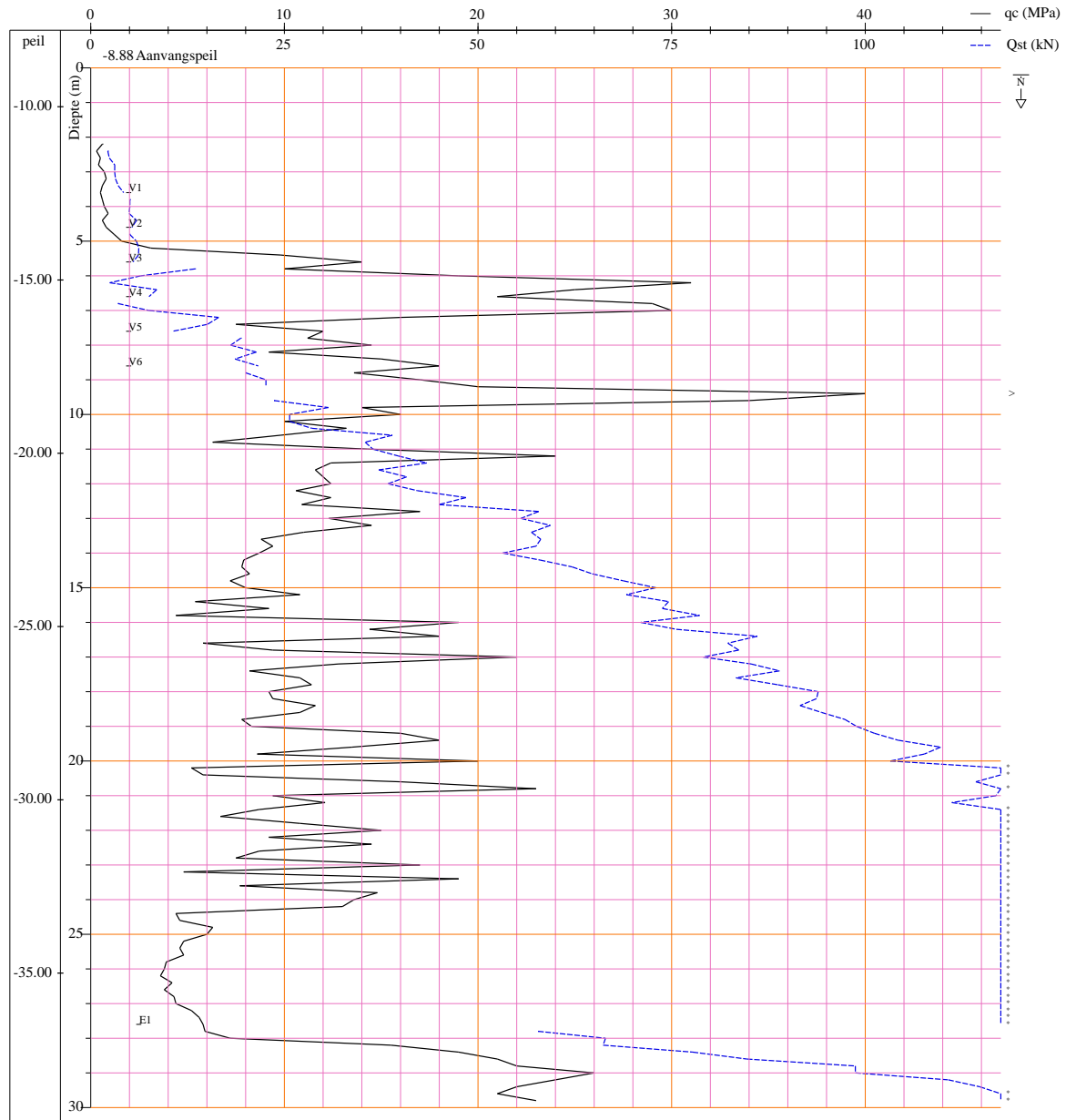
Figuur G.1: Boring in de omgeving van een TEC volgens [DOV, 2008]



Figuur G.2: Sondering GEO-80/194-SCCCI volgens [DOV, 2008]



Figuur G.3: Sondering GEO-80/194-SCCCIII volgens [DOV, 2008]



Figuur G.4: Sondering GEO-77/151-SLIII volgens [DOV, 2008]

Diepte	Dikte [m]	Grondtype	γ_u [kN/m ³]	ϕ'	c' [kPa]	c_u [kPa]	$E_{oed,ref}$ [MPa]	m	E [MPa]	ν	G [MPa]
-20.43 tot -29.25	8.8	Medium sand	20	35	0	0	70	0.55	46.7	0.3	50
-29.25 tot -32.30	3.1	Clayey sand	20	27.5	0	0	15	0.75	10	0.3	60
-32.30 tot -34.80	2.5	Fine sand	20	32.5	0	0	30	0.60	20	0.3	100
-34.80 tot -37.00	2.2	Clay (Urseel)	18.5	20	8	120	5	0.95	3.3	0.5	35
-37.00 tot -41.00	4.0	Sandy Clay (Asse)	19.5	22	2	200	7	0.95	4.7	0.5	55
-41.00 tot -47.80	6.8	Slightly silty fine sand	19	32.5	0	0	40	0.65	26.7	0.3	120
-47.80 tot -49.80	2.0	Sandy clay	18	22	5	250	10	0.95	6.7	0.5	60
-49.80 tot -54.27	4.5	Fine sand	19	35	0	0	40	0.65	26.7	0.3	120
-54.27 tot -61.10	6.8	Stiff clay	19	18	10	250	10	0.95	6.7	0.5	75
-61.10 tot -64.00	2.9	Clayey fine sand	20	32.5	0	0	30	0.75	20	0.3	120

Tabel G.1: Grondkarakteristieken op de Thornton zandbank (Positie D6) volgens [Mengé en Gunst, 2008]. De parameters zijn bruikbaar voor karakteristieken te Zeebrugge.

Bibliografie

- [Abdul Azis et al., 2003] Abdul Azis, P. K., Al-Tisan, I., Al-Daili, M., Green, T. N., Ba-Mardouf, K., Ali Al-Qahtani, S., and Al-Sabai, K. (—2003—). *Marine macrofouling: a review of control technology in the context of an on-line experiment in the turbine condenser water box of Al-Jubail phase-1 power/msf plants*. *Desalination*, 154(3):277-290.
- [Achmus et al., 2007] Achmus, M., K Abdel Rahman, h., and Worden, F. t. (—2007—). *Geotechnical design of piles supporting foundation structures for offshore wind energy converters*. In Proceedings of the Seventeenth (2007) International Offshore and Polar Engineering Conference, pages 322-327, Lisbon, Portugal. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- [Achmus et al., 2008] Achmus, M., Kuo, Y.-S., and Abdel-Rahman, K. (—2008—). *Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load*. In *Computers and Geotechnics*, In Press, Corrected Proof.
- [American Petroleum Institute, 1984] American Petroleum Institute. (—1984—). *Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms*.
- [Bartrop et al., 2005] Bartrop, N., Grant, A., Varyani, K. S., and Pham, X. P. (—2005—). *Wave-current interactions in marine current turbines*. In 6th European Wave and Tidal Energy Conference, Glasgow UK. Energy Systems Research Unit Department of Mechanical Engineering University of Strathclyde, UK.
- [Bonami, 2004] Bonami, D. (—2004—). *Fluidomechanica*. Technical report, KaHo Sint-Lieven, 2de Kandidatuur Industriel Ingenieur.
- [Bryden et al., 2007] Bryden, I. G., Couch, S., Owen, A., and Melville, G. (—2007—). *Tidal current resource assessment*. In Proceedings IMechE, volume 221 Part A: J. Power and Energy, pages 125–135.
- [C-Power, 2009] C-Power (—2009—). C-power. *Windmolenpark op de Thorntonbank*.
- [CEM, 2006] CEM (—2006—). *Water Wave Mechanics: Part 2. Coastal Engineering Manual*.
- [CIRIA/CUR, 1991] CIRIA/CUR (—1991—). *Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering*. CUR, 154.
- [Cuerva et al., 2007] Cuerva, A., Leizabe, I., Roura, M., Franchini, S., and Sanz-Andres, A. (—2007—). *Depence of blade optimum geometry and rotor speed on the tip loss model implemented in bemt models*.
- [Davies et al., 2008] Davies, P., Bosseau, A., Choqueuse, D., Nellisen, P., Peters, L., Adolphs, G., Renaud, C., Nickel, R., Thiebaud, F., and Perreux, D. (—2008—). *Long term durability of composites for ocean energy conversion systems*.
- [De Rouck, 2008a] De Rouck, J. (—2008—a). *Offshore constructies*. Technical report, Universiteit Gent, 2de Master Burgerlijk Bouwkundig Ingenieur.

- [De Rouck, 2008b] De Rouck, J. (—2008—b). Rivieren en kanalen. Technical report, Universiteit Gent, 1ste Master Burgerlijk Bouwkundig Ingenieur.
- [De Rouck, 2008c] De Rouck, J. (—2008—c). Zee- en havenbouw. Technical report, Universiteit Gent, 2de Master Burgerlijk Bouwkundig Ingenieur.
- [De Vos, 2008] De Vos, L. (—2008—). *Optimisation of scour protection for monopiles and quantification of wave run-up. Engineering the influece of an Offshore Wind Turbine on local flow conditions.* PhD thesis.
- [De Wolf et al., 1994] De Wolf, P., Van den Bergh, P., Thomas, R., Lanckzweirt, M., and Hyde, P. (—1994—). *Measuring platforms in the north sea in belgian territorial waters and on the belgian continental shelf: Measuring platforms in front of the Flemish Coast.* In Bulletin of the Permanent International Association of Navigation Congresses.
- [DOV, 2008] DOV (—2008—). *Databank ondergrond Vlaanderen.* www.dov.vlaanderen.be
- [DOWEC, 2002] DOWEC (—2002—). Dutch Offshore Wind Energy Converter project. Comparison extra steel consumption versus scour protection.
- [ESRU, 2009] ESRU (—2009—). Environment: Significant Impact Factor. Technical report.
- [EU, 2006] EU (—2006—). The European climate change programme. Technical report, European Union.
- [Geodelft, 2006a] Geodelft (—2006—a). Mpile version 4.1. In Geosystems, D., editor, *Analysis of piles and pile groups.* Geodelft.
- [Geodelft, 2006b] Geodelft (—2006—b). Soil behaviour. *MPile User Manual.*
- [Geoslope, 2006] Geoslope (—2006—). Sigma/w version 5.18. In *Modelling with Sigma/W.* Geoslope.
- [Glauert, 2007] Glauert, H. (—2007—). *The Elements of aerofoil and airscrew theory.* Cambridge University Press.
- [Glynn et al., 2005] Glynn, J., Hamilton, K., McCombes, T., and MacDonald, M. (—2005—). *Marine Power Project.* www.esru.strath.ac.uk
- [Goda, 2000] Goda, Y. (—2000—). *Random Seas And Design Of Maritime Structures.* World Scientific Publishing Company.
- [Guinot, 2008] Guinot, F. (—2008—). *Realistic marine flow conditions for current turbines studies.*
- [Guinot, 2009] Guinot, F. (—2009—). *Numerical and experimental work on wave and current interaction.*
- [Hepperle, 2006] Hepperle, M. (—2006—). Javafoil - Analysis of airfoils. www.mh-aerotoools.de
- [Jaky, 1948] Jaky, J. (—1948—). *Pressure in soils.* In ICSMFE, 1:pp 103 – 107.
- [Lacor, 2005] Lacor, C. (—2005—). Aërodynamica. Technical report, Vrije Universiteit Brussel, 2de master Burgerlijk Ingenieur Werktuigkunde optie Lucht- en Ruimtevaart.
- [Lammertyn en Depraetere, 2008] Lammertyn, K. en Depraetere, H. (—2008—). *Getijdenenergie, een toekomst vanuit Belgisch perspectief? Onderzoek naar technische en economische haalbaarheid.* Master thesis.
- [Living Steel, 2009] Living Steel (—2009—). Corrosion of steel.
- [Luccofier, 2008] Luccofier, M. (—2008—). Dynamica van constructies. Technical report, Universiteit Gent, 1ste Master Burgerlijk Bouwkundig Ingenieur.

- [Mathys, 2008a] Mathys, P. (—2008—a). *Analytisch model van de stromingen te zeebrugge*. Universiteit Gent.
- [Mathys, 2008b] Mathys, P. (—2008—b). *Beleidsmatige en financiële ondersteuning van golf en getijdenenergie*. Master thesis.
- [May et al., 2002] May, R., Ackers, J., and Kirby, A. (—2002—). *Manual on scour at bridges and other hydraulic structures*. CIRIA.
- [Mengé en Gunst, 2008] Mengé, P. en Gunst, N. (—2008—). *Gravity base foundations for the wind turbines on the Thorntonbank - Belgium*. In Innovatieforum Geotechniek.
- [Mineco, 2009] Mineco (—2009—). *Exploitatie van zeezand en zeegrond op het BCP*.
- [MUMM, 2008a] MUMM (—2008—a). *Golfklimaat gemeten op de Bol van Heist*. Technical report.
- [MUMM, 2008b] MUMM (—2008—b). *Operationele voorspelling van de stroming*. www.mumm.ac.be
- [Nilsson et al., 2007] Nilsson, K. and Grabbe, M. and Yuen, K. and Leijon, M. (—2007—). *A direct drive generator for marine current energy conversion - first experimental results*. In 7th European Wave and Tidal Energy Conference.
- [Van Oord, 2002] Van Oord. (—2002—). *Concept study bottom protection around pile foundation of 3 mw windturbine*. Dutch Offshore Wind Energy Converter project.
- [OpenHydro, 2004] Group Limited OpenHydro. (—2004—). Patent openhydro.
- [Peire et al., 2008] Peire, K., Nonneman, H., en Bosschem, E. (—2008—). *Gravity base foundations for the Thornton bank offshore wind farm*.
- [Schönborn en Chantzidakis, 2007] Schönborn, A. en Chantzidakis, M. (—2007—). *Development of a hydraulic control mechanism for cyclic pitch marine current turbines*. In *Renewable Energy*, 32(4):662-679.
- [SDC, 2007] SDC, Sustainable Development Commission. (—2007—). *Turning the tide: Tidal power in the UK*. Book.
- [Seaflow, 2005] Seaflow (—2005—). *Seaflow: Worlds first pilot project for the exploitation of marine currents at a commercial scale*. Technical report.
- [Spera, 1994] Spera, D. A. (—1994—). *Wind Turbine Technology*. In American Society of Mechanical Engineers.
- [SPM, 1984] SPM (—1984—). *Shore Protection Manual*. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. U.S. Government.
- [Troch, 2008] Troch, P. (—2008—). *Offshore constructies, hydraulische randvoorwaarden*. Technical report, Universiteit Gent, 1ste Master Burgerlijk Bouwkundig Ingenieur.
- [Troch en Verhoeven, 2006] Troch, P. en Verhoeven, R. (—2006—). *Waterbeheer en leefmilieu: getijden en benedenrivieren*. Technical report, Universiteit Gent, 1ste Master Burgerlijk Bouwkundig Ingenieur.
- [Van Impe, 2008a] Van Impe, W. (—2008—a). *Geotechniek: Ontwerpprincipes diepfunderingen*. Technical report, Universiteit Gent, 2de Master Burgerlijk Bouwkundig Ingenieur.
- [Van Impe, 2008b] Van Impe, W. (—2008—b). *Offshore constructies, geotechnische beschouwingen*. Technical report, Universiteit Gent, 2de Master Burgerlijk Bouwkundig Ingenieur.

- [Van Impe en Reese, 2000] Van Impe, W. en Reese, L. C. (—2000—). *Single piles and pile groups under lateral loading*. Taylor and Francis.
- [van Vledder et al., 1993] van Vledder, G., Goda, Y., Hawkes, P., Martin, M. H., Mathiesen, M., Peltier, E., en Thompson, E. (—1993—). Case studies of extreme wave analysis: a comparative analysis. In *Proc. 2nd Int. symposium ocean wave measurement and analysis*, pages 978-992. ASCE.
- [Venugopal et al., 2006] Venugopal, V., Varyani, K. S., and Barltrop, N. D. P. (—2006—). *Wave force coefficients for horizontally submerged rectangular cylinders*. In *Ocean Engineering*, 33(11-12):1669-1704.
- [VREG, 2009] VREG (—2009—). Vlaamse reguleringsinstantie voor de elektriciteits- en gasmarkt: Groene stroom certificaten.
- [Zaaier, 2003] Zaaier, M. B. (—2003—). *Comparison of monopile, tripod, suction bucket and gravity base design for a 6 MW turbine*. Technical report, TU Delft.

