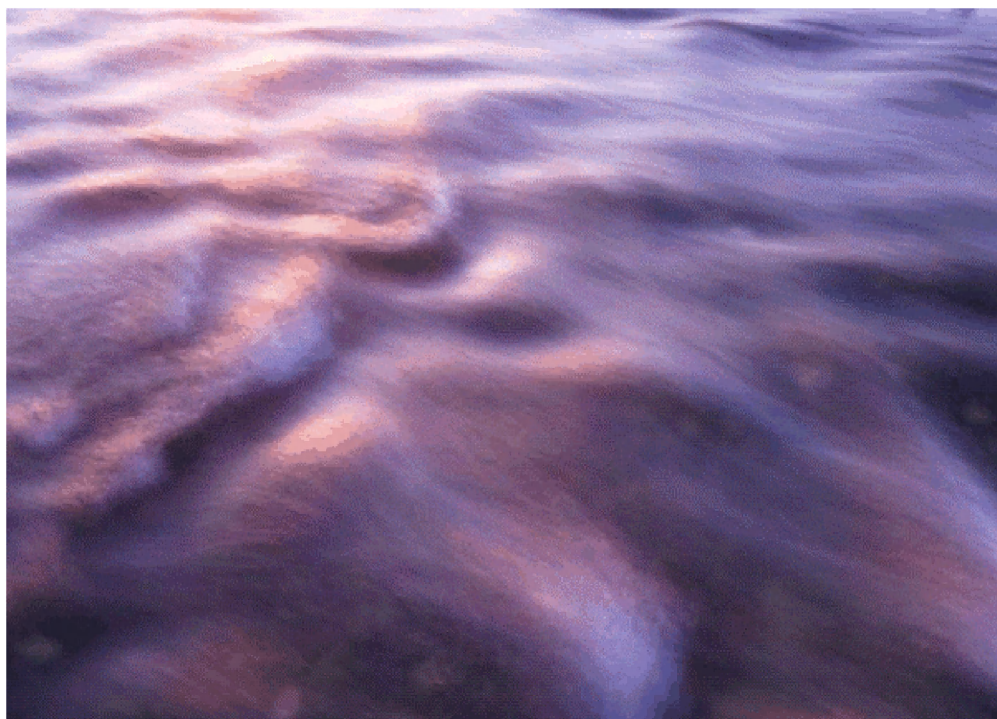


Potentieel voor energieopwekking uit getijden in de Westerschelde



DELTA Energy BV
Augustus 2004



Projectgegevens

Auteur: Bram Ledeboer

Review: Eelco Smaardijk
Michiel Jak

Datum: Augustus 2004

Opdrachtgever: Delta Energy BV – ir. J. Maas

Projectcodes: Altran Technologies Netherlands BV, SCSE281103v1
DELTA Energy BV, SAP S/0007101

Voorwoord.....	4
1. Inleiding.....	5
1.1. Gravitatie	5
1.2. Wind.....	6
1.3. Voor- en nadelen getijdestromingsenergie	7
2. Technologieën.....	9
2.1. Energie uit getijdestroming	9
2.2. Voorbeelden van technologieën en praktijkexperimenten	9
2.3. Golfenergie	19
2.4. Voorbeelden van technologieën en praktijkexperimenten	22
3. Potentiële opbrengst	26
3.1. Energie uit getijdestroming	26
3.2. Stroomsnelheid.....	26
3.3. Golfenergie	27
4. Kansenkaart	30
4.1. Stromingskaarten.....	30
4.2. Kansenkaart getijdestroming in de Westerschelde.....	33
4.3. Opbrengst.....	35
5. Financiële aspecten	36
6. Beleidsmatig.....	37
7. Conclusies en aanbevelingen	40
8. Referenties.....	42

Voorwoord

Deze studie is in opdracht van DELTA Energy BV uitgevoerd door Altran Technologies Netherlands BV.

In dit rapport wordt uiteengezet wat de kansen zijn voor energieopwekking uit getijdestroming in de Westerschelde. De kansen worden o.a. inzichtelijk gemaakt aan de hand van de volgende vragen:

- Op welke plaatsen in het Westerschelde estuarium kan energie opgewekt worden?
- Welke technologieën zouden in aanmerking komen?
- Wat zijn de kosten en de opbrengsten?
- Welke beperkingen zijn er met betrekking tot de omgeving, flora en fauna?
- Wat is potentieel in MW ?

In het rapport “Kansen voor energiewinning uit getijden in de Oosterschelde” van Ecofys, gepubliceerd in mei 2000, wordt geconcludeerd dat energieopwekking uit getijdeverschil geen goede kansen biedt in de Oosterschelde. Energieopwekking uit getijdestromingen op kleine schaal wordt een grotere kans van slagen toegedicht. In overeenstemming met de bevindingen in bovenstaand rapport zal in dit rapport geen aandacht worden besteed aan energieopwekking uit getijdeverschil aangezien het hoogteverschil te klein is. Dit wordt pas bij een getijdeverschil van meer dan 7 meter interessant.

De hele Westerschelde, inclusief de vaargeul, is aangewezen als beschermd natuurgebied. Bovendien is de Westerschelde tot aan het mondingsgebied aangewezen als vogel- en habitatrichtlijngebied. Er dient hierom extra rekening te worden gehouden met het (leef)milieu.

Als onderdeel van deze studie zijn ook verkenende gesprekken gevoerd met belanghebbenden rond de Westerschelde. Rijkswaterstaat, de beheerder van de Westerschelde, staat niet afwijzend tegenover het idee om energie uit getijdestroming op te wekken. Dit bleek uit gesprekken gevoerd met Projectdirectie ontwikkelingsschets Schelde-estuarium (ProSes) en Rijkswaterstaat.

1. Inleiding

Het water in zeeën, oceanen, en rivieren bevat energie in de vorm van kinetische en potentiële energie (respectievelijk stroming en hoogteverschil). Beide vormen van energie kunnen worden omgezet in nuttige energie (i.c. elektriciteit) met behulp van onderwaterturbines of vergelijkbare technieken.

Hieronder staat een overzicht van de verschillende voorbeelden van energie beschikbaar in het water, met uitzondering van “chemische energie” (concentratie verschillen met zoet water) en warmte.

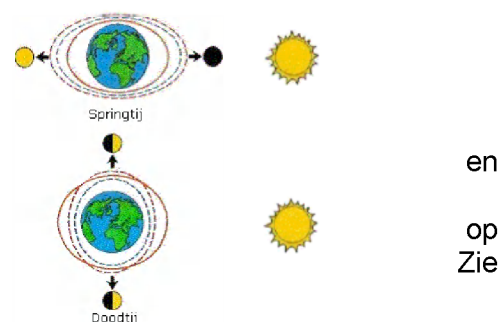
Tabel 1: Energie uit water

Bron	Energievorm	Kinetische energie	Potentiële energie
Gravitatie		Getijdestroming	Getijdeverschil Deining
Wind		Stroming	Golven

1.1. Gravitatie

Onder invloed van gravitatiekrachten tussen de zon, maan en de aarde ontstaan getijden. Doordat de aantrekkingskracht op het water niet overal op het zelfde moment gelijk is ontstaan ophopingen van water. Als gevolg hiervan ontstaan voorspelbare getijdestromingen. Deze stromingen zijn verantwoordelijk voor het ontstaan van eb en vloed. Het hoogteverschil van het water is de drijvende kracht voor deze getijdestromingen. Eb en vloed wisselen zich tweemaal per dag af. De cyclus duurt 12 uur en 25 minuten.

De getijden zijn afhankelijk van de stand van de maan. Springtij, d.w.z. bovengemiddeld groot verschil tussen hoog- en laagwater treedt op bij volle en nieuwe maan. Doodtij, d.w.z. beneden gemiddeld klein verschil tussen hoog- en laagwater, treedt bij eerste laatste kwartier. Door het verzamelen van waterstanden en de stand van de maan, kan het getij elke gewenste locatie nauwkeuring voorspeld worden. figuur 1 voor een overzicht van de maan- en zonnestanden



Figuur 1: Springtij en doottij

Er zijn drie vormen van getijde-energie zoals in Tabel opgenomen:

- Energie uit getijdestroming
- Energie uit getijverschil
- Energie uit deining

1 is

Energie uit getijdestroming

De eerste vorm van getijde-energie is de directe omzetting van de kinetische energie, in de vorm van stroming in elektriciteit. De getijdestroming wordt veroorzaakt door het aan- respectievelijk afvoeren van water bij vloed en eb. De vorm van energieopwekking is vergelijkbaar met het opwekken van windenergie.

Energie uit getijdeverschil

De energie ten gevolge van het hoogteverschil tussen eb en vloed kan worden omgezet in elektriciteit door bij vloed een bassin vol te laten stromen. Bij eb laat men het water uit het bassin stromen, waarbij het water door een turbine stroomt. Het wegstromende water drijft de turbine aan.

In het rapport van Ecofys wordt aangetoond dat energieopwekking uit getijdeverschil in de Oosterschelde niet kansrijk is door het beperkte hoogteverschil van slechts enkele meters. Het hoogteverschil, in de Westerschelde, tussen hoog- en laagwater is vergelijkbaar met de Oosterschelde. Bovendien is de Westerschelde een druk bevaren waterweg waardoor de mogelijkheden voor het aanleggen van een dam zeer beperkt zijn. Deze vorm van energieopwekking kan eventueel wel opnieuw bekeken worden bij de aanleg van overstroomgebieden.

Om deze twee redenen wordt in dit rapport geen aandacht besteed aan energieopwekking uit getijverschil.

Energie uit deining

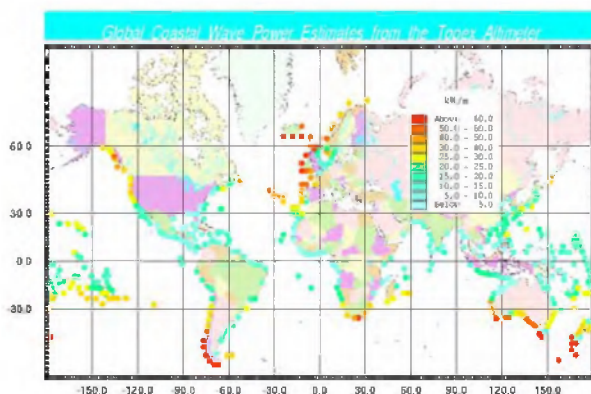
Energie uit deining is alleen kansrijk bij kusten die direct aan één van de oceanen grenzen. De deining op de oceaan is vele malen hoger en krachtiger dan op de Noordzee. De energie-inhoud van de oceaandeining is enkele orden groter dan die in het Nederlandse gedeelte van de Noordzee.

1.2. *Wind*

Wind is om twee redenen opgenomen in tabel 1. Ten eerste omdat het de oorzaak is voor het ontstaan van de golven aan de Nederlandse Noordzeekust. Ten tweede omdat er een technologie ontwikkeld is waarbij off-shore windenergie wordt gecombineerd met energie uit waterstroming (de Wave Rotor, figuur 18 en figuur 19).

Golfenergie

Golven ontstaan voornamelijk onder invloed van de wind. De golven langs de Nederlandse kust zijn hoofdzakelijk windgolven. De hoogte en energie-inhoud van de golven zijn relatief gering in vergelijking met oceaankusten. Figuur 2 toont de golfenergie in kW/m (golfbreedte) langs de diverse kusten. In hoofdstuk 3 zal in meer detail gekeken worden naar golfenergie in de buurt van de monding van de Westerschelde.



Figuur 2: Overzicht van gemiddelde golfenergie

1.3. Voor- en nadelen getijdestromingsenergie

In deze paragraaf worden de voor- en nadelen van energieopwekking uit getijdestroming besproken. Bij de bespreking is uitgegaan van de huidige stand der techniek op dit gebied.

Voordelen

Getijde-energie heeft een groot aantal voordelen ten opzichte van andere duurzame energie vormen.

- De getijden zijn zeer goed voorspelbaar. Dit betekent dat bekend is wanneer en hoeveel elektriciteit kan worden opgewekt. Het nadeel van zonne- en windenergie is dat deze minder goed voorspeld kunnen worden. Het risico van onbalans is daarom kleiner voor energie uit getijdestroming dan bij wind- en zonne-energie. De financiële gevolgen van het veroorzaken van onbalans zijn o.a. een mogelijke boete van TenneT.
- Getijdestroming is bidirectioneel in tegenstelling tot windenergie. Bij onderwaterturbines hoeft in het ontwerp daarom alleen rekening te worden gehouden met twee stromingsrichtingen. Een bijkomend voordeel is dat stromingsturbines dichter naast elkaar geplaatst kunnen worden in vergelijking met windturbines.
- Getijdestromingstechnologie heeft een beperkte visuele impact op het landschap. De constructie bevindt zich onderwater en de meeste constructies hebben enkel een markering boven water nodig in verband met de veiligheid van het scheepvaartverkeer.
- Onder water heersen, in vergelijking met wind, mildere omstandigheden wat betreft stroomsnelheden. Bovendien is de fluctuatie van de stroomsnelheid minder groot en minder frequent. Het ontwerpen op extreme situaties is hierdoor minder van belang dan bij windturbines.
- De ontwikkeling van stromingsturbines kan, vergeleken met de ontwikkeling van windturbines, een voordeel ondervinden van de ervaring die reeds bestaat in de scheepvaart- en offshore-industrie. Hierbij kan gedacht worden aan bijvoorbeeld afdichtingen, kennis van materialen en de invloed van zout water op constructiematerialen.

- De-icing en anti-reflectie coatings zijn niet nodig bij onderwaterturbines in tegenstelling tot windturbines.
- In tegenstelling tot windturbines leveren onderwaterturbines geen geluidsoverlast of slagschaduw.

Nadelen

- Nog geen enkele technologie is commercieel beschikbaar. Onbekendheid met de technologie brengt risico's met zich mee. Dit bleek o.a. bij de plaatsing van Archimedes Waveswing in Portugal door NUON.
- Aanpassingen aan de constructie zijn moeilijk te realiseren op het moment dat een apparaat eenmaal is geïnstalleerd onder water.
- Onder water is het gevaar van vervuiling groter dan in de lucht. Hierbij kan gedacht worden aan bijvoorbeeld visnetten of plastic afval. Algen en wier kunnen ook een bedreiging vormen.
- Zout water is corrosief. Hiermee dient extra rekening gehouden te worden ten aanzien het ontwerp, bijvoorbeeld wat betreft afdichtingen. Er is reeds veel kennis over dit onderwerp opgedaan, o.a. voor de bouw van off-shore olieplatforms.
- Vergelijkbaar met schepen en off-shore olieplatforms kan de aangroei van algen en andere micro-organismen een probleem worden. Dit effect kan eventueel worden onderdrukt door het regelmatig aanbrengen van een anti-fouling coating.
- Door de stroming worden zanddeeltjes verspreid in het water. Zand heeft een eroderende werking op het materiaal van onderwaterconstructies.

2. Technologieën

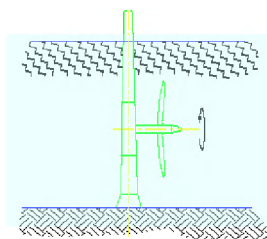
In dit hoofdstuk worden de basistechnologieën van getijde-energie en golfenergie worden behandeld.

2.1. *Energie uit getijdestroming*

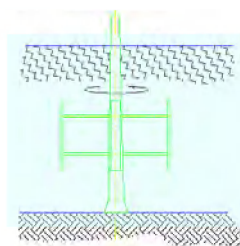
Hieronder volgt een overzicht van verschillende technologieën die betrekking hebben op energie uit getijdestroming. Deze kunnen in drie categorieën ingedeeld worden:

- (1) HAMCT (Horizontal Axis Marine Current Turbine)
- (2) VAMCT (Vertical Axis Marine Current Turbine)
- (3) Overige

Horizontale as propellorturbines zijn schematisch weergegeven in figuur 3. Een schematische weergave van een verticale as turbine, type Darrieusturbine, is te zien in figuur 4.



Figuur 3 : HAMCT (1)



Figuur 4: VAMCT (2)

De horizontale as turbines zijn vergelijkbaar met de horizontale as wind turbines (propellorturbines) en de verticale as turbines zijn vergelijkbaar met verticale as windturbines zoals de Turby.

Onder overige technologieën vallen vleugelconstructies zoals de Stingray, drijvende constructies met een propellor en systemen gebaseerd op magnetohydrodynamica (MHD). Voorbeelden van overige technologieën zullen in het volgende hoofdstuk worden besproken.

2.2. *Voorbeelden van technologieën en praktijkexperimenten*

Hieronder volgt een overzicht van verschillende projecten/apparaten met bijbehorende karakteristieken, zoals vermogen, afmetingen en financiële indicatie. Geen van de technologieën is op dit moment commercieel verkrijgbaar. Alle projecten bevinden zich nog in de ontwikkelings- en prototype fase. Niet voor elk voorbeeld zijn dezelfde karakteristieken bekend, daarom is het moeilijk de diverse praktijkexperimenten met elkaar te vergelijken.

In de bijlage bij dit rapport is van diverse systemen en praktijkexperimenten aanvullende informatie opgenomen.

Seaflow (Marine Current Turbines)

In 1982 is in de Nijl een stromingsturbine getest onder leiding van Peter Fraenkel. De turbine heeft twee jaar lang 2000 liter water per uur over een hoogteverschil van vijf meter omhoog gepompt. Hoewel het om een prototype ging, bleek dit rendabeler dan het gebruik van een dieselgenerator. Dit was een belangrijke stap in de richting van het Seaflow project.

Het Seaflow project heeft als doelstelling het produceren en testen van een turbine op ware grootte om een commercieel levensvatbare offshore technologie te ontwikkelen. Onder leiding van Marine Current Turbines is een uitgebreid consortium aan het werk om in 2010 totaal 300 MW aan installaties te hebben staan. Het doel is om het R&D traject af te ronden in 2006.

Marine Current Turbines Ltd heeft de gebruikte technologie, op basis van één onderwater axiale rotor op één enkelvoudige pijler (figuur 5), gepatenteerd.



Figuur 5: MCT rotor in de onderhoudsstand, foto voor de kust van Schotland (Marine Current Turbines Ltd.)

In onderstaande tabel zijn de afmetingen weergegeven van de Marine Current Turbine opstelling.

Technische gegevens MCT	
Gewicht	80 ton
Diepte	20 m
Hoogte	25 m
Diameter	10-15 m
Piek watersnelheid	2 – 3 m/s bij springtij

In onderstaande tabel is een overzicht weergegeven van de verschillende fasen van het Seagen project voor de ontwikkeling van een commerciële onderwaterturbine.

Tabel 2: Seagen ontwikkelingsprogramma

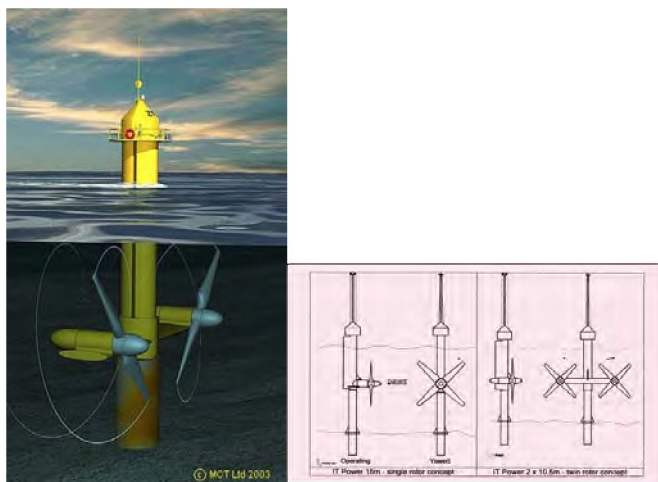
Fase	Naam	Vermogen	Beschrijving	Installatie
Fase 1	Seaflo	300 kW	Enkele rotor test	Mei 2003
Fase 2	Seagen	1000 kW	Dubbele rotor commercieel prototype	Nov 2005
Fase 3	Seagen serie	5 – 8 MW	Serie van 5 of 6 commerciële prototypes	Eind 2006 – eind 2006
Commerciële projecten		15 – 30 MW	Onafhankelijk gefinancierde commerciële haalbare projecten	2007 - verder

Tijdens Fase 1 van het project was er nog geen verbinding met het elektriciteitsnet. Voor het opstarten, de verlichting en de navigatiemisthoorn werd een diesलगenerator gebruikt. De rotorbladen zijn draaibaar zodat de rotor twee richtingen stroming kan verwerken. Met behulp van afstandsbediening vanuit ISET (Kassel, Duitsland) was het mogelijk de turbine op te starten en te monitoren.

Fase 2. Seagen

De commerciële versie zal waarschijnlijk een dubbele rotor hebben. Een voordeel is dat de rotors minder last hebben van turbulentie die ontstaat ten gevolge van de stroming langs de pijler. De kosten voor plaatsing en onderhoud zullen lager zijn bij een dubbelrotorsysteem per geplaatste rotor dan bij een enkel rotorsysteem. Figuur 6 toont een schematische weergave van het systeem met dubbele rotor.

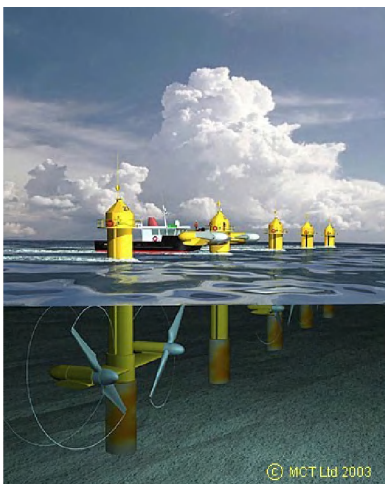
Op 18 maart 2004 werd in een persbericht bekend gemaakt dat de financiering voor deze tweede fase gerealiseerd was. Ongeveer 4,5 miljoen Euro werd, mede dankzij de bestaande en twee nieuwe financiële partners, BankInvest en Guernsey Electricity, bijeengebracht. Hiermee is toekomst van het Seagen project voorlopig gewaarborgd en kan de ontwikkeling van een netgekoppelde “twin rotor” officieel van start.



Figuur 6: Geplande commerciële versie van de Seagen met dubbele rotor (Bron: Marine Current Turbines Ltd.)

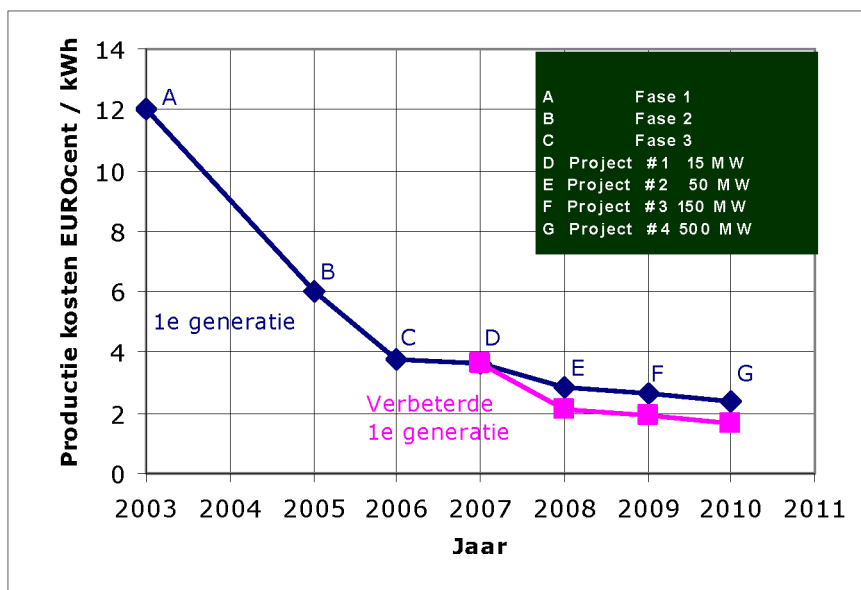
Fase 3

Het doel is om tijdens fase 3 een park met meerdere dubbele-rotor-turbines te plaatsen, zie Figuur 7. In deze fase zal grootschalige energieproductie, in de orde van enkele megawatts, worden getest.



Figuur 7: MCT Fase 3, serieopstelling (Marine Current Turbines Ltd.)

Met behulp van een technisch-economisch model is uitgerekend dat bij een gemiddelde stroomsnelheid van 2 m/s en bij toepassing op relatief grote schaal, een elektriciteitsprijs van 2 - 4 €/ct / kWh kan worden behaald. Deze prijs zal verder dalen naarmate projecten op grotere schaal worden uitgevoerd, zie Figuur 8. De elektriciteitsprijs in het fase 1 praktijkexperiment met een systeem met enkele rotor is in de orde van 12 €/ct/kWh.



Figuur 8: Door MCT geprojecteerde elektriciteits productie kosten¹

Peter Fraenkel van Marine Current Turbines verwacht dat rond 2010 getijdestromingsenergie een belangrijk deel van de duurzame energie productie in het Verenigd Koninkrijk zal uitmaken vanwege de lage geprojecteerde kosten per kWh, mits de overheid voldoende steun biedt gedurende de opstartperiode.

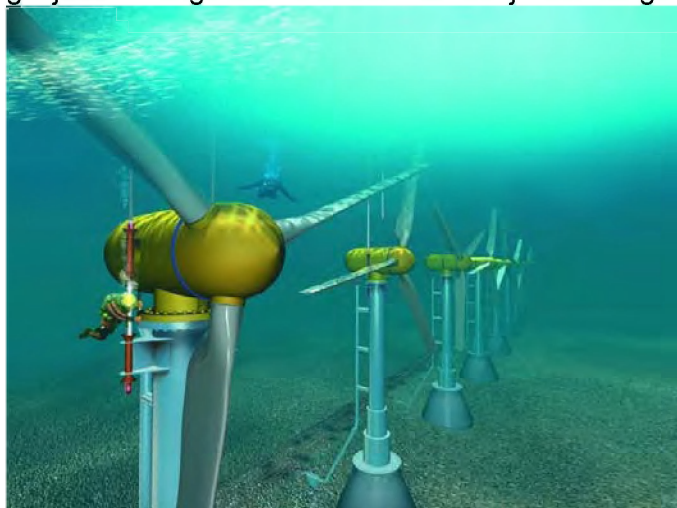
¹ TE Model: Techno-Economic Model, Marine Current Turbines (MCT)

Ervaringen

Marine Current Turbines is begin 2004 begonnen met Fase 2. MCT verwacht dat de installatie van Fase 2 voor het einde van 2005 gereed is. Ervaringen opgedaan in Fase 1 zijn niet in detail openbaar gemaakt uit concurrentie overwegingen. Het vermogen van 300 kW werd iets overschreden. De installatie produceerde consequent rond de 250 kW. Het rendement was ongeveer 40% (rotor efficiency). Er hebben zich geen problemen voorgedaan van constructieve aard. De opstelling heeft meerdere stormen van windkracht 8 doorstaan met golven van 5 meter. Financiering voor Fase 2 is rond. De gebruikte rotor in Fase 1 had een diameter van 11 meter. De constructie was voor het grootste deel gemaakt van staal. De rotor is gemaakt van composiet materiaal. Pijler diameter: 2.1 meter. Fase 2 zal groter worden uitgevoerd: 2 rotors van 16 meter diameter en een pijler van 3 tot 4 meter diameter. (vertaald uit email (april 2004) van Peter Fraenkel (Marine Current Turbines)).

Hammerfest Strøm AS

In september 2003 is Hammerfest (Noorwegen) begonnen met het testen van een 300 kW getijdestromingsturbine in een van de fjorden langs de Noorse kust.



Figuur 9: Hammerfest Strøm propellorturbines

De gebruikte propellorturbines hebben een enkele rotor. In tegenstelling tot de Seagen turbine van Marine Current Turbines, heeft dit systeem geen onderdeel die boven het water uitsteken.

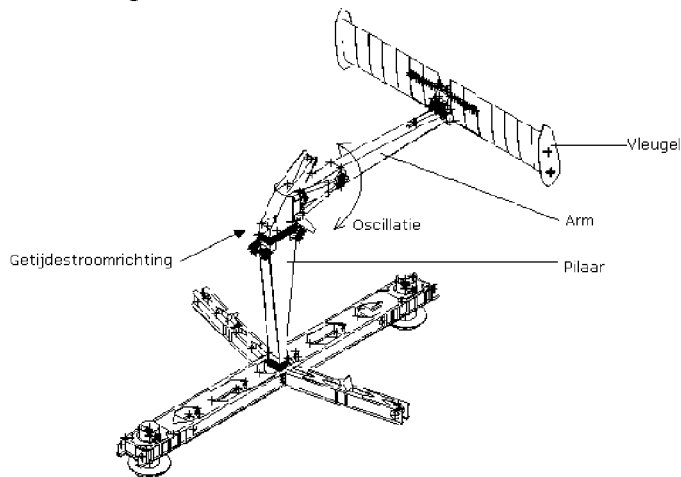
Op jaarbasis kan met dit systeem ongeveer 700 MWh worden geproduceerd, voldoende voor circa 200 gemiddelde Nederlandse huishoudens. De verwachte kostprijs van een kWh is circa 9 €ct/kWh, 3 maal hoger dan de kostprijs van door waterkrachtcentrales opgewekte elektriciteit.

Als de testen succesvol worden afgesloten, is het plan om 20 turbines te plaatsen bij de kust van Hammerfest (Noorwegen).

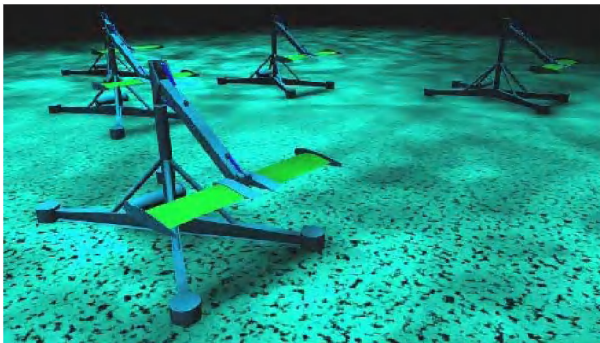
Technische gegevens Hammerfest	
Gewicht	120 ton
Diepte	17 m
Diameter	10 m

Stingray

De vleugelconstructie van de Stingray gaat oscilleren als gevolg van het langsstromende water. De beweging van de vleugel drijft via een cilinder een hydraulische motor aan. Deze drijft op zijn beurt een generator aan.



Figuur 10: Schematische weergave Stingray



Figuur 11: Artist impression van een Stingray park

De Stingray wordt ontwikkeld in samenwerking met de universiteiten van Durham en Newcastle. Financiering van het engelse ministerie voor Energie maakt de eerste fasen van het project mogelijk

Het project om de Stingray te ontwikkelen is opgedeeld in de onderstaande fasen.

Sept - Dec 2001	1	Feasibility study
Jan - Sept 2002	2	Design, build, commission, install and operate
Oct - Dec 2002	2	Evaluate results
Jan - May 2003	2e	Plan and develop test programme
June - Sept 2003	3	Detailed test programme - Establish TEB
Oct - Dec 2003	3	Evaluate results
Jan - Mar 2004	3	Evaluate 5MW power station concept
Mar - Jul 2004	3	Establish funding for P4, appoint CEO
Apr - Dec 2004	3 & 4a	Develop technology, site evaluation
Jan - Jun 2005	4b	Build and install 2 nd generation 500kW machine
Jul - Dec 2005	4c	Evaluate performance, design 1 st batch production machine
Jan - Aug 2006	4d	Build and install 5 x 500kW machines
Sep - Dec 2006	4e	Evaluate performance, design 2 nd batch production machine
Jan - Aug 2006	4d	Build and install 5 x 500kW machines

Tabel 3: Gepland ontwikkelingstraject Stingray

Fase 1 bestond uit een haalbaarheidsstudie in september 2001. De studie onderzocht de technische en commerciële haalbaarheid. Fase 2, het eerste praktijkexperiment, werd gestart in januari 2002 en bestond uit het installeren en testen van een 150 kW Stingray bij de Shetland eilanden. De begroting van het project bedroeg circa vier miljoen Euro.

De gerealiseerde piekproductie tijdens fase 2 was 250 kW, bij een stroming van 1.5 m/s werd een gemiddelde productie van 90 kW gerealiseerd. De voorbereidingen voor het testen in offshore condities zijn zullen in fase 3 worden uitgevoerd. Tegelijkertijd wordt fase 4 gestart. Het doel van deze fase is het installeren van een 5 MW netgekoppeld Stringray park.

Engineering Business voorspelt op basis van een Stingray park van 5 MW een elektriciteitsprijs tussen de 8 – 29 €/kWh. De kostprijs hangt o.a. af van de omstandigheden op de geplande locatie. De schatting is volgens Engineering Business realistisch aangezien gegevens van het praktijkexperiment zijn gebruikt.

Technische gegevens Stingray	Demonstratie model	2 ^o generatie model
Gewicht	185 ton (inclusief ballast)	500 ton (inclusief ballast)
Hoogte	24 m	28
Wijdte	16 m	28 m
Basis	21 x 19 m	25 x 20 m



Figuur 12: Stingray “power curve” voor de geplande 2e generatie.

Verdant Power

Verdant Power ontwikkelt turbines voor verschillende toepassingen en locaties in de Verenigde Staten. Een van de projecten behelst het testen van een onderwaterpropellorturbine (zie Figuur 13) in de East River (New York City, Figuur 14). Verdant Power heeft als doel een goed geïntegreerd “water to wire” systeem te ontwikkelen. “Water to wire” betekent dat de oplossing ook de aansluiting op het net omvat.

In tegenstelling tot de voorgaande systemen, is het Verdant Power systeem niet op de bodem bevestigd maar boven water. Het systeem hangt in het water.

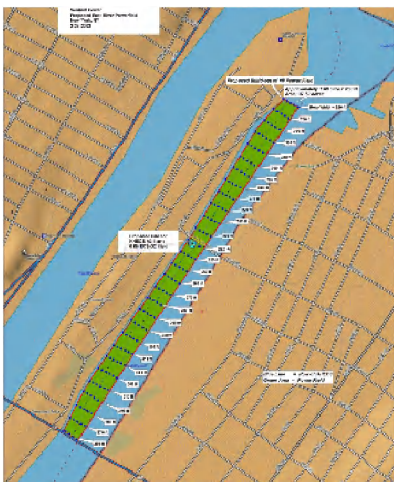


Figuur 13: Verdant Power propeller turbine



Figuur 14: East River, New York

Het uiteindelijke doel is om 5 tot 10 MW te installeren de komende 4 jaar. Het hele project zal ongeveer 15 - 20 miljoen Euro kosten. Een overzichtskaart van het gebied waar de turbines geplaatst zullen worden is weergegeven in Figuur 15. Het groene vlak is ongeveer anderhalve kilometer lang, 100 meter breed en 10 meter diep. Columbia University en de Green Mountain Energy Company hebben reeds interesse getoond om elektriciteit af te nemen.

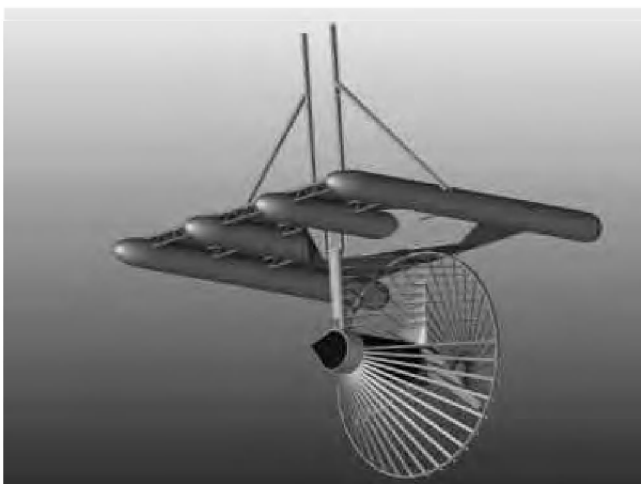


Figuur 15: Beoogde lokatie voor de installatie van de Verdant Power turbines in de East River (het groene gedeelte)

Op basis van de haalbaarheidsstudie wordt een kostprijs van 7 – 9 €/kWh verwacht.

Technische gegevens Verdant turbine	
Diepte	10 m
Diameter	3 m

Tevens zal in de toekomst worden onderzocht wat de mogelijkheden zijn om aan de Queensboro Bridge ten noorden van New York turbines op te hangen. Figuur 16 toont een schematische weergave van het ontwerp van de turbine voor dat project.



Figuur 16: Ontwerp van turbine voor aan een brug (voorzien van een beschermende kooi).

Wave Rotor

De Deen Eric Rossen is de uitvinder van de Wave Rotor. Dit apparaat combineert windenergie en energie uit circulerende stroming rond de mast afkomstig van golven. Hiervoor worden een verticale Darrieus rotor en een Wells rotor gecombineerd in een ontwerp, zie Figuur 17 en Figuur 18. Dit concept is door Ecofys verder ontwikkeld.



Figuur 17: Wave Rotor



Figuur 18: Wave Rotor variant

In Denemarken werd in augustus 2002 een test uitgevoerd met een netgekoppelde prototype. Uit de test bleek dat een rendement van 30 – 40 % kan worden gehaald.

Er wordt gewerkt aan een rekenmodel om het ingewikkelde systeem te beschrijven. Een volgende stap is het maken van een 50 kW demonstratie model. Uiteindelijk is het doel om de technische en economische haalbaarheid van een 0.5 MW Wave Rotor (offshore) met een diameter van 30 m vast te stellen.

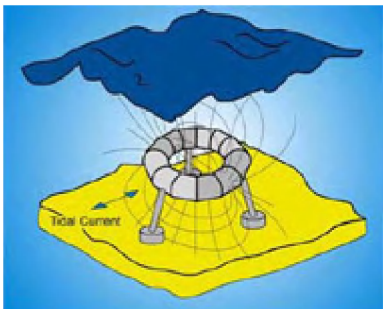
De geprognostiseerde kostprijs voor het 0.5 MW systeem is € 750.000, de verwachte kostprijs van de elektriciteit bedraagt 3 €/kWh. De jaarlijkse opbrengst van het systeem is, afhankelijk van de locatie, in de orde van 2 GWh.

Neptune

Neptune Systems is van plan een prototype voor het opwekken getijdestromingsenergie op basis van magnetohydrodynamica (MHD) te ontwikkelen. Er is een patent op het principe van het systeem verkregen. Op dit moment wordt nog gezocht naar partners en investeerders.

Het principe van MHD is dat als een geleidende vloeistof (bijvoorbeeld zeewater) door een magnetisch veld stroomt, er een elektrische stroom wordt opgewekt in de spoel. De diameter van de magneetring is 20 meter.

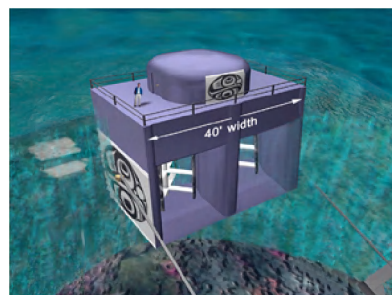
De verwachte kosten voor een systeem van 4 MW zijn 11 miljoen Euro exclusief de kosten van kabel naar land. De verwachte kostprijs van de elektriciteit is circa 4 €/kWh. De verwachte jaarlijkse elektriciteitsproductie van het systeem is in de orde van 17 GWh.



Figuur 19: Schematische weergave Neptune Systems MHD systeem

Blue Energy, Blue Energy Canada Inc., Vancouver, Canada

De “Blue Energy” is een voorbeeld van een verticale as marine current turbine (VAMCT). Er wordt gebruik gemaakt van zogenaamde Davis Hydro Turbines (verticaal gemonteerde bladen). Het systeem is modulair opgezet en kan eenvoudig worden uitgebreid.



Tocado, Teamwork Technology, Zijdewind, Nederland

Een derde voorbeeld van een horizontale as turbine is drijvende Tocardo. Net als de hierboven genoemde turbine van Verdant Power is het niet nodig de turbine de bodem te bevestigen. Om wegdrijven te voorkomen het systeem met een anker op zijn plaats gehouden.

Het getoonde ontwerp heeft een maximaal vermogen 1.5 kW maar er zijn plannen om een 300 tot 500 kW versie te ontwikkelen. Er waren plannen om een proefopstelling van de Tocardo in het Marsdiep, tussen Texel en Den Helder te plaatsen. Dit ging niet door, de milieuregels waren het voornaamste struikelblok hiervoor volgens Teamwork Technology.



de
aan
wordt
van

2.3. Golfenergie

Energie uit golven kan direct worden omgezet in een mechanische beweging via bijvoorbeeld een hefboom. De hefboom beweegt omhoog en weer omlaag als de golf passeert. Een tweede mogelijkheid is om het water van de golven eerst op te vangen in een bassin en vervolgens via een turbine weg te laten stromen. Een derde mogelijk is door de golven lucht te laten samenpersen om daarmee een turbine aan te drijven.

Alle technologieën op het gebied van golfenergie bevinden zich momenteel nog in de ontwikkelingsfase. Er worden met enkele systemen al praktijkexperimenten uitgevoerd.

De technologieën kunnen worden ingedeeld op basis van de lokatie waar de technologie toegepast kan worden.

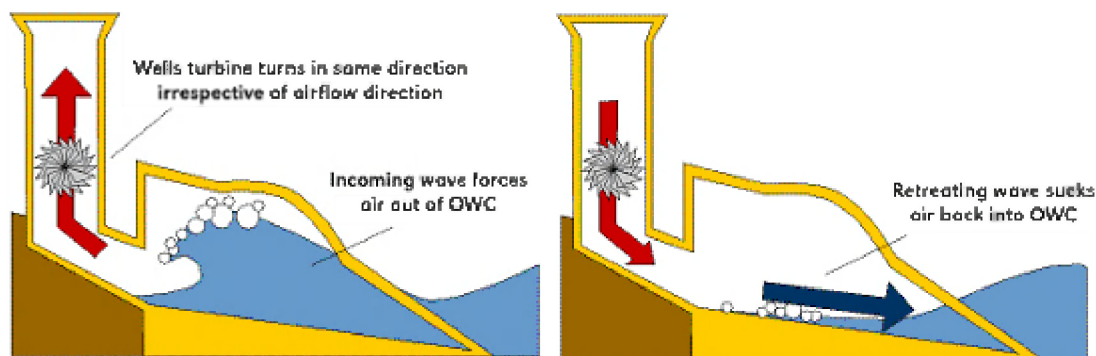
- Nearshore
- Offshore

Nearshore

In deze categorie vallen de technieken die direct aan de kust kunnen worden gebruikt. Binnen deze categorie zijn drie typen te onderscheiden:

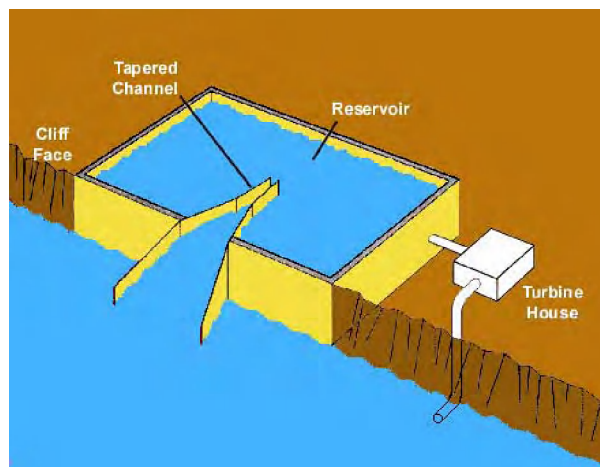
- Oscillating Water Column (OWC)
- Convergent Channel (TAPCHAN)
- Pendulor

De OWC technologie (Figuur 20) is gebaseerd op het samendrukken van de lucht boven het wateroppervlak waarmee een Wells turbine wordt aangedreven. Een voordeel van deze technologie is dat de turbine minder wordt blootgesteld aan het corrosieve zeewater.



Figuur 20: Oscillating Water Column (OWC)

de golven via een schuin oplopend kanaal in een waterbak opgevangen wordt. Het water stroomt vervolgens een turbine weer terug naar zee(niveau). Figuur 21 toont een schematisch plaatje van de TAPCHAN technologie.

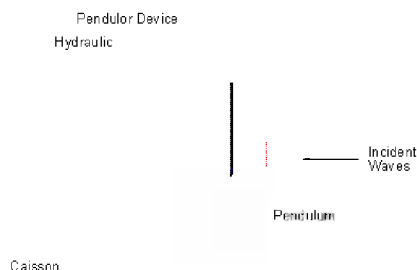


Figuur 21: Convergent Channel (TAPCHAN)

De TAPCHAN methode bestaat er uit dat het water van

via

In Figuur 22 is een schematische weergave van de Pendulor gegeven. De beweegt de klep(pendulum) in de richting de golf. De beweging van de klep wordt de hydraulische pomp doorgegeven aan generator. De generator zet de beweging in elektriciteit.



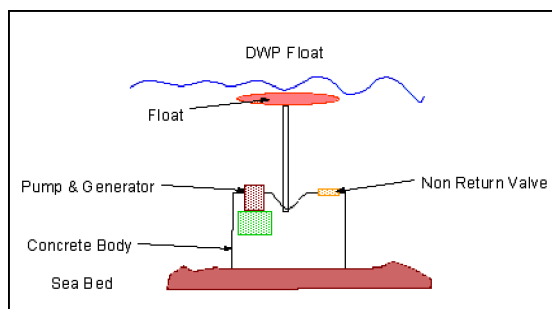
golf
van
door
de
om

Figuur 22: Pendulor

Offshore

Hieronder volgt een aantal voorbeelden van offshore technologieën. Deze worden over het algemeen in water dieper dan 40 meter toegepast.

De Danish Wave Power float pump device is de eerste offshore technologie besproken wordt. De technologie is gebaseerd op de beweging van een dobber door de golven. De dobber beweegt onder invloed van de golven omhoog en omlaag. De krukas zet de verticale beweging van de dobber om in roterende beweging. De krukas drijft de generator aan.



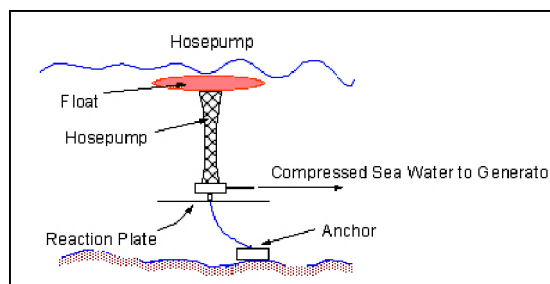
die

een

Figuur 23: Danish Wave Power float-pump device (DWP)

Figuur 23 toont schematisch de Danish Wave Power float-pump device. De constructie is bevestigd aan een betonnen fundering op de zeebodem.

Bij de Swedish hosepump techniek (Figuur 24) is de dobber aan een elastische slang bevestigd. De beweging de dobber o.i.v. de beweging van de golven drukt het water in de slang samen. Het water wordt door een turbine gestuwd en de turbine drijft een generator aan. Het geheel is met behulp een anker aan de bodem bevestigd.

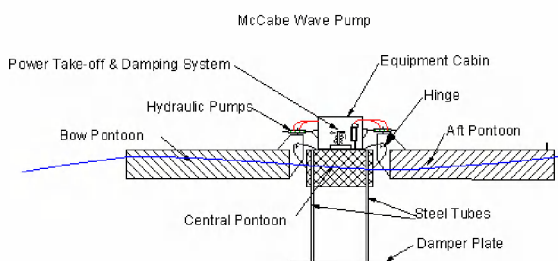


van

van

Figuur 24: Swedish Hosepump

Figuur 25 laat een schematische weergave zien van de McCabe Wave Pump, een techniek waarbij twee pontons aan weerskanten van een vaste constructie zijn bevestigd. O.i.v. de beweging van de golven bewegen de pontons ten opzichte van het centrale ponton. De buitenste pontons drijven via hydraulische pompen de generator aan.



Figuur 25: McCabe Wave Pump

De “zeeslang”, Pelamis, is vergelijkbaar deze techniek uit Figuur 25. De Pelamis wordt besproken in paragraaf 2.4.

met

2.4. Voorbeelden van technologieën en praktijkexperimenten

Hieronder volgt een overzicht van verschillende projecten/apparaten met bijbehorende karakteristieken. Geen van de technologieën is op dit moment al commercieel verkrijgbaar. Alle projecten bevinden zich in de ontwikkelingsfase.

Pelamis

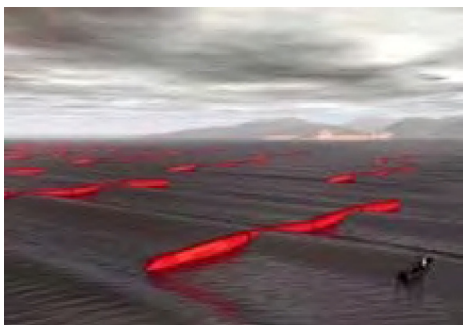
Ocean Power Delivery heeft een langwerpig apparaat ontworpen dat drijft op de golven, de Pelamis zeeslang. De constructie bestaat uit 4 buizen die door middel van scharnieren aan elkaar bevestigd zijn. De beweging van de Pelamis in de golven heeft iets weg van de voortbeweging van een slang, vandaar de naam zeeslang. Met behulp van hydraulische systemen en een generator wordt de beweging van de buizen omgezet in elektrische energie. In Schotland is een testprogramma aan de gang met een “full scale” prototype.

Technische gegevens Pelamis	
Gewicht	380 ton
Diepte	>50 m
Diameter	5 m
Lengte	150 m

Het nominale vermogen van de Pelamis is 750 kW. De verwachte jaaropbrengst bedraagt, mede afhankelijk van de hoogte en energieinhoud van de golven, 2,7 GWh.

De Pelamis zal naar verwachting 2 tot 3 miljoen Euro kosten, exclusief het bevestigen aan de zeebodem. Hoewel de Pelamis is ontworpen voor dieptes rond de 50 meter wordt niet uitgesloten dat ondieper water geschikt kan zijn.

Aangezien de Pelamis al bij golfhoogtes vanaf 1 meter energie kan produceren, kan de Pelamis eventueel toegepast worden in de “voordelta” van de Westerschelde. De energie-inhoud van de golven voor de Zeeuwse kust is in de orde van 0.5 kW/m, daarom zal er wel eerst gekeken moeten worden naar de haalbaarheid van plaatsing.



Figuur 26: Impressie Pelamis park

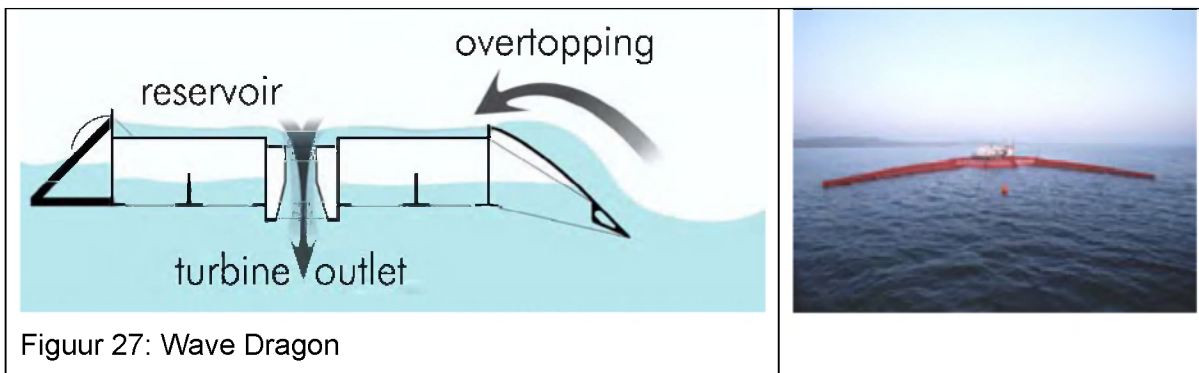
Wave Dragon

Het ontwerp van de Wave Dragon staat schematisch weergegeven in figuur 28. Het water van een inkomende golf wordt door middel van twee uitstekende armen in een groot reservoir geleid. Het water wordt via turbines weer afgevoerd uit het reservoir.

Het vermogen van de Wave Dragon bedraagt 4 MW, bij een energieinhoud van de golven van 24 kW/m is de verwachte jaarlijkse elektriciteitsproductie in de orde van 12 GWh. De verwachte kostprijs van de elektriciteit is 11 €/kWh.

Een prototype (schaal 1:4,5) van de Wave Dragon wordt sinds 2003 getest in Denemarken.

Technische gegevens Wave Dragon	1: 4.5 model	Definitief ontwerp
Gewicht	237 ton	22000 ton
Diepte	6 m	>20 m
Breedte tussen armen	57 m	260 m
Hoogte	4 m	16 m
Reservoir	55 m ³	5000 m ³



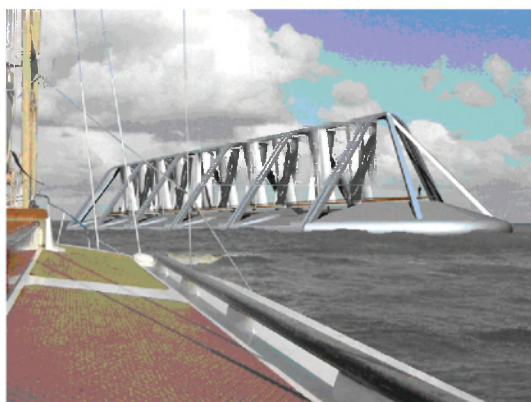
Figuur 27: Wave Dragon

Seawing

Het ontwerp van de Seawing is vergelijkbaar met dat van de Wave Dragon. Bij de Seawing zijn een verticale as windturbine, Savoniustype, een electrolyser, een brandstofcel en de kweek van mosselen toegevoegd.

Een gedeelte van de electriciteit wordt gebruikt om door middel van elektrolyse water om te zetten in waterstofgas en zuurstofgas. Deze gassen kunnen op elk gewenst moment bij elkaar worden gebracht in een brandstofcel. De elektriciteit van de brandstofcel kan gebruikt worden om het afgegeven vermogen constant te houden, d.w.z. voorkomen van onbalans. Het plan is om in het bassin van de Seawing mosselen te kweken.

De Seawing bevindt zich nog in een zeer vroeg stadium van ontwikkeling.



Figuur 28: Seawing (Plant Research International B.V.)

Archimedes Wave Swing

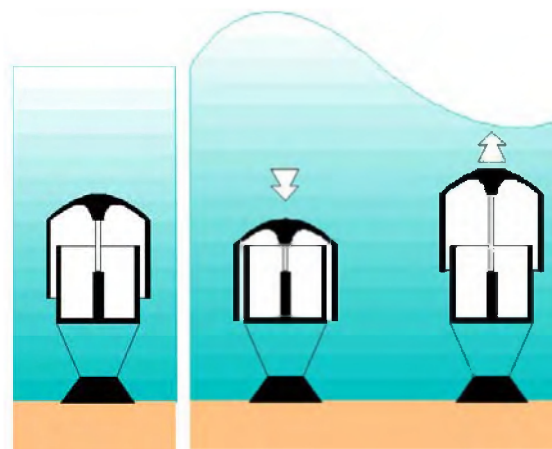
De Archimedes Wave Swing is gebaseerd op het Oscillating Water Column principe, zie paragraaf 2.2 voor een uitleg van het OWC principe. Door middel van grote kamers met lucht en een vliegwiel wordt elektriciteit opgewekt. In figuur 30 staat de werking schematisch weergegeven.

Teamwork Technology voorspelt productiekosten in de orde van 9 – 15 €cent/ kWh bij commerciële toepassing op grote schaal. Na grote problemen in eerste instantie met het

afzinken van deze constructie, is in mei 2004 de AWS succesvol voor de kust van Portugal afgezonken (50 meter diep).



Figuur 29: Archimedes Wave Swing (AWS) voor het afzinken



Figuur 30: Schematisch werkingsprincipe van de AWS

3. Potentiële opbrengst

In dit hoofdstuk wordt de energie die in getijdestroming en golven aanwezig is gekwantificeerd.

3.1. *Energie uit getijdestroming*

Wereldwijd ligt het totale vermogen aanwezig in getijdestroming in de orde grootte van de totale wereldwijde elektriciteitsbehoefte, ongeveer 3000 GW². Echter, de mogelijkheden om energie op een rendabele manier op te wekken beperken zich tot de plaatsen waar stromingen zich concentreren. Dit is het geval in riviermondingen en bijvoorbeeld tussen eilanden. Ongeveer 2% van de totale hoeveelheid beschikbaar vermogen is toegankelijk, 60 GW³.

Het vermogen dat een stromingsturbine uit water kan opwekken is afhankelijk van de snelheid van de stroming, het overall rendement van de turbine en het oppervlak van de turbine.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A$$

P : vermogen

η : rendement

ρ : dichtheid

v : stroomsnelheid

A : oppervlak

Met relatief lage stromingssnelheden van water in vergelijking met windsnelheden kunnen al behoorlijke vermogens worden opgewekt vanwege het dichtheidsverschil tussen water en wind. De dichtheid van water is circa 800 maal zo hoog als de dichtheid van lucht. Het maximale rendement is gelijk aan de Betz-limiet. (59% voor propellor turbines). De formule is ook geldig voor de energieinhoud van wind.

Een propellorturbine met een diameter van 10 meter haalt een piekvermogen van ongeveer 24 kW bij een stroming van 1 m/s. In het algemeen wordt gerekend dat een getijdestromingsturbine 30 % van de tijd in bedrijf is, d.w.z een stroomsnelheid van minimaal 1 m/s. Een piekvermogen van 24 kW komt dan overeen met ongeveer 62 MWh per jaar. Een aantal rekenvoorbeelden is opgenomen in onderstaande tabel.

Op basis van de kubische relatie tussen de stroomsnelheid en het beschikbare vermogen is in te zien, dat vooral de stroomsnelheid bepalend is voor het maximaal op te wekken vermogen. Een toename in de stroomsnelheid met 20% leidt tot een toename van 80% in beschikbaar vermogen. Om eenzelfde stijging te realiseren door het aanpassen van de bladlengte, zijn 80% langere turbinebladen nodig.

3.2. *Stroomsnelheid*

² International Energy Agency (IEA)

³ Department of Trade and Industry, Verenigd Koninkrijk (DTI)

De stroomsnelheid is niet constant over de diepte van het water. Doordat de stroming aan de bodem de meeste wrijving ondervindt, treedt hier de laagste snelheid op. Aan het oppervlak is de wrijving minimaal en is de stroomsnelheid het hoogste. In figuur 31 is een snelheidsprofiel te zien. De onderstaande empirische formule geeft het verband tussen de diepte en de snelheid.

$$v = 0.84 \cdot v_{\text{gemiddeld}} \cdot (d_{\%} / 0.4)^{0.15253}$$

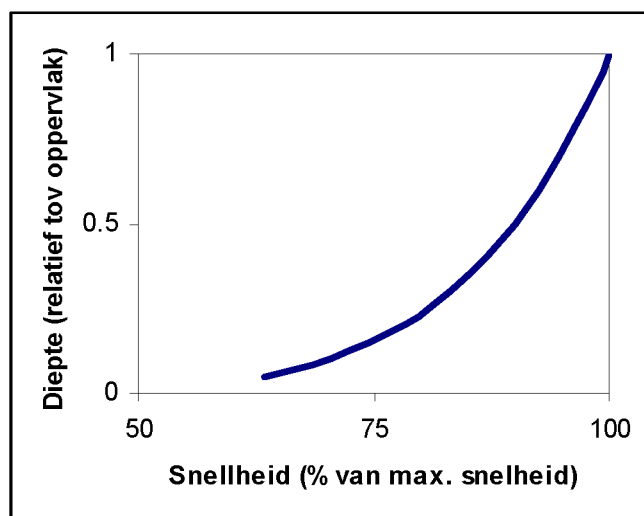
v : stroomsnelheid

$v_{\text{gemiddeld}}$: gemiddelde stroomsnelheid

$d_{\%}$: diepte

(0 ~ bodem, 1 ~ oppervlakte)

Deze formule is afgeleid van enkele algemene gegevens. Op 40% van de diepte is de stroomsnelheid gelijk aan de gemiddelde stroomsnelheid. Aan de oppervlakte is de stroming ongeveer 15% groter dan de gemiddelde snelheid.



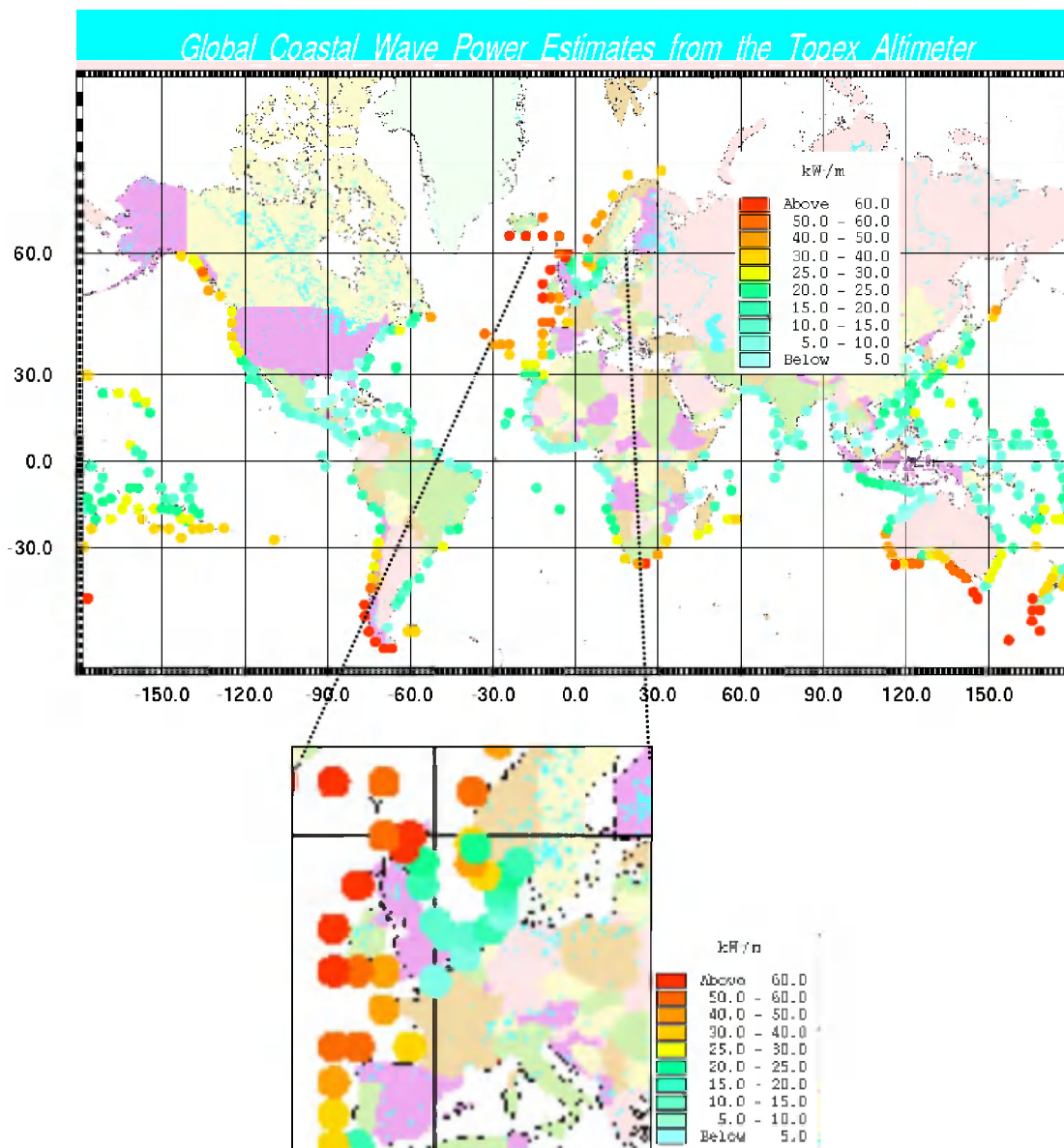
Figuur 31: Snelheidsprofiel

De stroomsnelheden variëren ook met het gerijde. De stroomsnelheid is het hoogst bij springtij. De stroomsnelheid van een gemiddeld getijde is 84% van de stroomsnelheid bij springtij.

3.3. Golfenergie

Energie-inhoud

Het vermogen van golven wordt uitgedrukt in kW/m. Dit geeft een beeld van de energie-inhoud per tijdseenheid en per meter golfbreedte. In Figuur 32 is de mondiale beschikbaarheid van golfenergie weergegeven. De totale beschikbare energie wereldwijd in golven ligt tussen de 2000 tot 3000 GW.

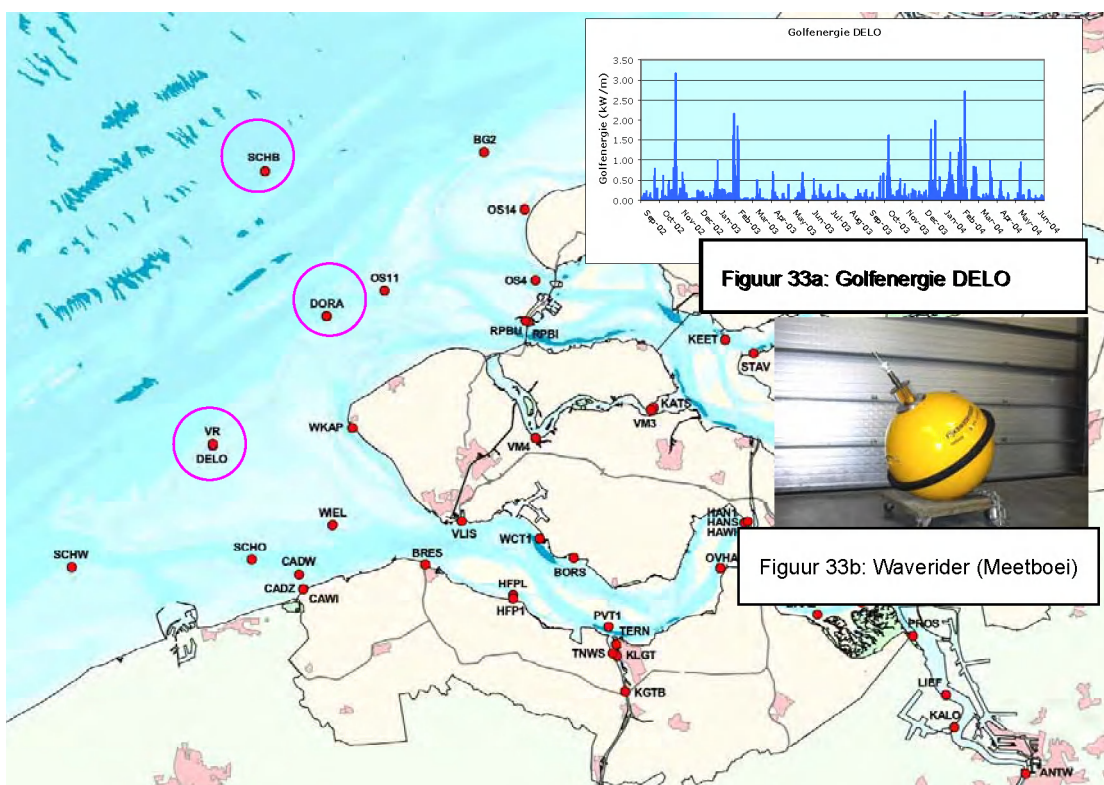


Figuur 32: Overzicht van gemiddelde golfenergie in Europa

In bovenstaande figuur (Figuur 32) is duidelijk te zien dat langs de kusten van Noorwegen, Ierland en Portugal de golfenergie-inhoud in het hoogste segment liggen. De kust langs de Noordzee heeft een beduidend lagere golfenergie-inhoud.

Figuur 33 toont de lokaties in Zeeland waar met behulp van meetboeien (zie Figuur 333b) golfgegevens worden verzameld. Met behulp van deze gegevens (afkomstig van Hydro Meteo Centrum Zeeland) is de golfenergie berekend op de lokaties Deurlo (DELO, figuur 33a) en Domburger Rassen (DORA) over een periode van ongeveer 2 jaar. Deze lokaties zijn gekozen omdat de golven op deze lokaties de minste invloed van zandbanken ondervinden. Van de lokatie SCHB (de meest noordwestelijke boei) waren geen data beschikbaar. De verwachting is

dat op deze lokatie de golfenergie in dezelfde orde van grootte ligt als op de lokaties DELO en DORA.



Figuur 33: Meetnet ZEGE (Zeeuwse Getijdewateren)

Figuur 33a (inzet bij figuur 33) toont de golfenergie-inhoud op lokatie DELO. De waarden zijn berekend uit de meetgegevens. Hieruit blijkt dat voor de kust van Zeeland de golfenergie kleiner is dan 5 kW/m (zie Figuur 33a).

De maximale golfenergie op lokatie DELO is ongeveer 3 kW/m. De gemiddelde golfenergie is circa 0.5 kW/m. De golfenergie voor de lokatie DORA is vergelijkbaar met de locatie DELO.

De benodigde breedte om bijvoorbeeld 1 MW op te wekken met behulp van golven van 3 kW/m (tweejaars maximum DELO), uitgaande van een rendement van 50% is bijna 700 meter. Bij een gemiddelde golfenergie van ongeveer 0.5 kW/m (gemiddelde DELO) is een breedte van 4 kilometer nodig.

Uit bovenstaande figuren en het rekenvoorbeeld blijkt dat opwekken van energie uit golven niet haalbaar is in de provincie Zeeland. Technische ontwikkelingen zullen hier naar verwachting geen verandering in brengen.

4. Kansenkaart

De kansenkaart geeft het aantal beschikbare plaatsen weer waar de mogelijkheid bestaat om getijdestromingsenergie op te wekken. De kansen zijn aan de hand van onderstaande criteria vastgesteld.

1. Stroomsnelheid groter dan 1 m/s
2. Niet in de vaargeul
3. Dieper dan 10 m (niet voor drijvende systemen)

Stroomsnelheden van minder dan 1 m/s zijn over het algemeen niet interessant voor energieopwekking. Dit is gebaseerd op de huidige stand der techniek zoals beschreven in dit rapport. Hierbij is rekening gehouden met het feit dat er altijd een cut-in stroomsnelheid is, vergelijk met de cut-in windsnelheid voor een windturbine. Momenteel is de cut-in stroomsnelheid in de orde van 0.7 m/s.

Vanwege de huidige en verwachte afmetingen van de diverse technologieën is het niet mogelijk deze apparaten in de vaargeul te plaatsen zonder de scheepvaart te hinderen. Vanwege het economisch belang van de Westerschelde voor zowel Antwerpen als Vlissingen wordt hinder voor het scheepvaartverkeer onacceptabel geacht.

De locaties dieper dan 10 meter zijn in kaart gebracht. Deze eis wordt opgelegd door de apparaten die op dit moment in ontwikkeling zijn. Dit geldt niet voor drijvende systemen en ook niet voor systemen die aan niet natuurlijke objecten bevestigd kunnen worden, bijvoorbeeld bruggen.

Op basis van deze drie eisen valt een groot deel van het Westerscheldegebied af.

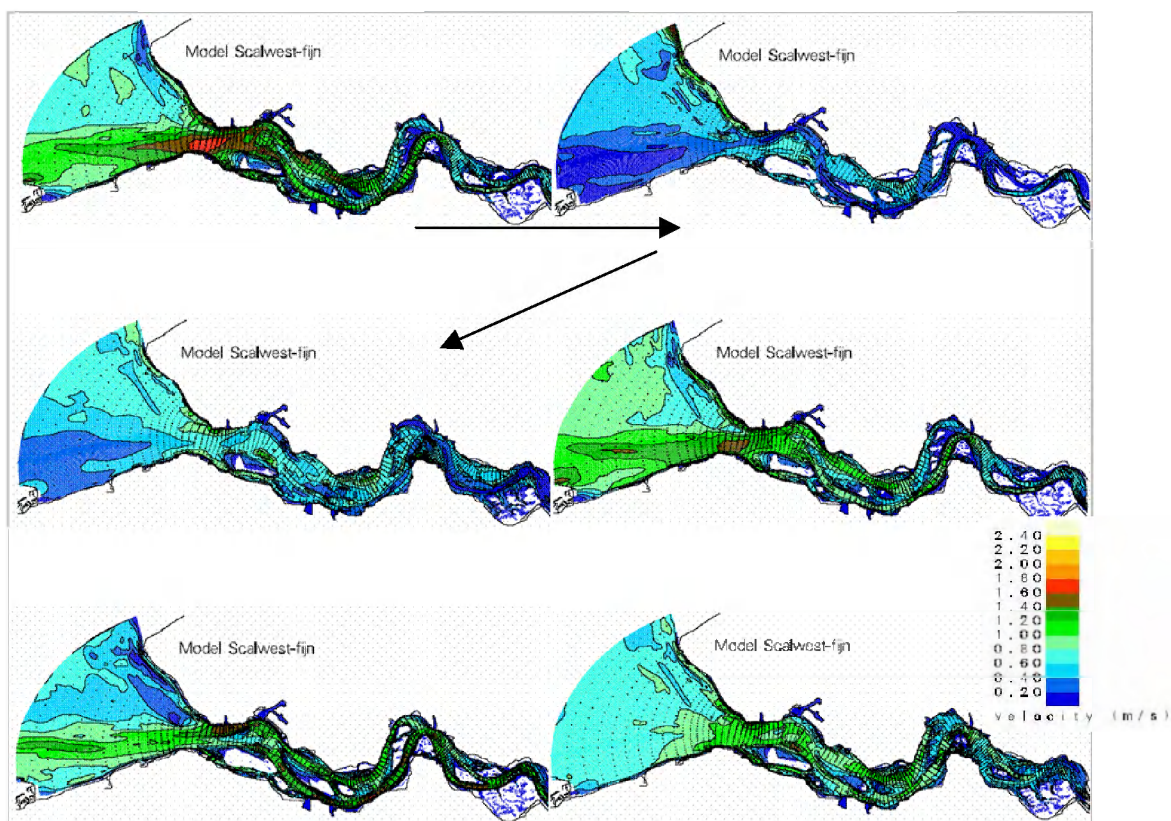
Vervolgens dient in kaart gebracht te worden hoeveel stroming er ter plaatse optreedt. Hierna moet een keuze worden gemaakt voor de technologie.

4.1. Stromingskaarten

Met behulp van informatie van de meetinformatiedienst van Rijkswaterstaat en officiële zeekaarten voor kust en binnenwateren⁴ kan een overzicht worden gemaakt waarin de verschillende mogelijke locaties worden aangegeven. In de officiële zeekaarten worden de vaargeulen met behulp van rode (bakboord) en groene (stuurboord) boeien weergegeven. Tevens zijn de dieptes duidelijk aangegeven.

In eerste instantie worden de maximale stroomsnelheden in kaart gebracht van het springtij van 5 mei 1996. De data van dit getij worden meestal als voorbeeld gebruikt door de Meetinformatiedienst van Rijkswaterstaat. De maximale stroomsnelheid varieert tijdens het getij. Dit is duidelijk te zien in Figuur 34.

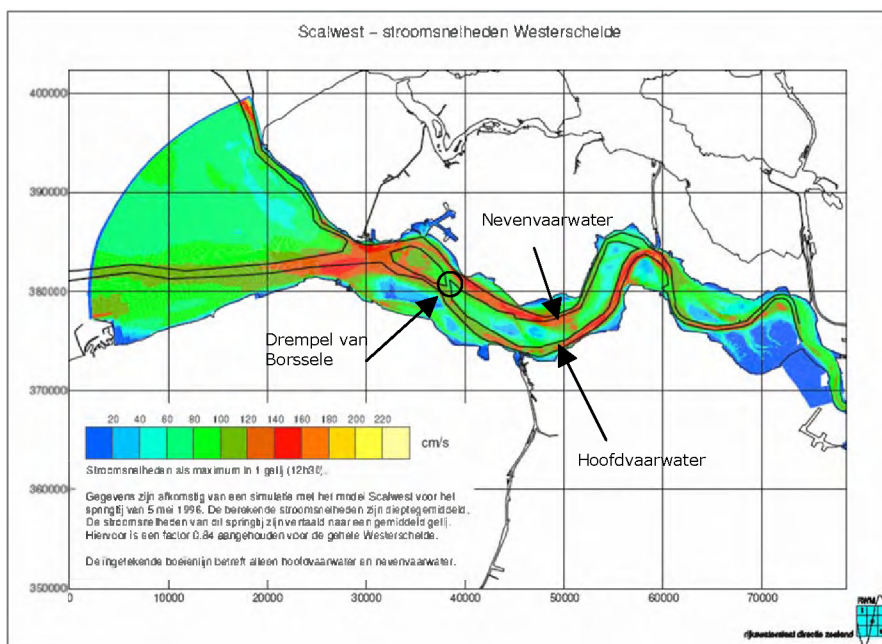
⁴ Kaart nummer 1801 en 1803, 2004



Figuur 34: Verloop van stroomsnelheden tijdens springtij 1996. Het figuur toont de stroomsnelheid als functie van de tijd. Het figuur dient van links naar rechts en dan naar de volgende regel gelezen te worden (zoals aangegeven door de pijlen).

In Figuur 34 is een aantal momentopnames van de stroming opgenomen van één getij. Dit geeft een idee van de locaties met de hoogste stroomsnelheid.

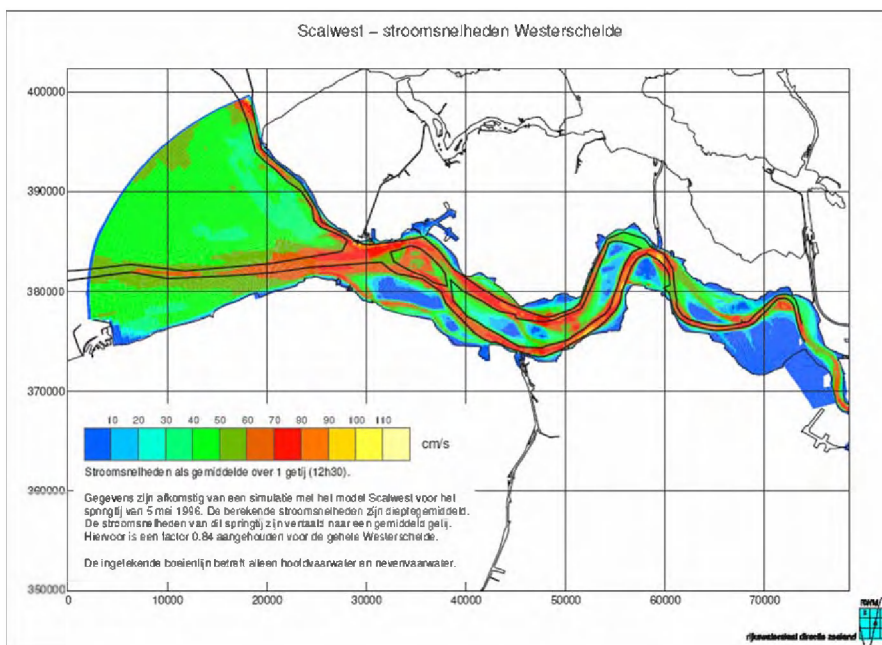
Figuur 35 toont in één kaart de maximale snelheid gedurende één getij. Als basis is wederom het springtij van 5 mei 1996 gebruikt. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de stroomsnelheden gecorrigeerd zijn naar een gemiddeld getij door een factor 0,84 toe te passen.



Figuur 35: Maximale stroomsnelheden gedurende een gemiddeld getij

Het is duidelijk te zien dat de hoogste stroomsnelheden optreden in de vaarwegen. De vaarwegen zijn in de figuur hierboven met pijlen benoemd.

De gemiddelde snelheid gedurende dit getij is weergegeven in Figuur 36.

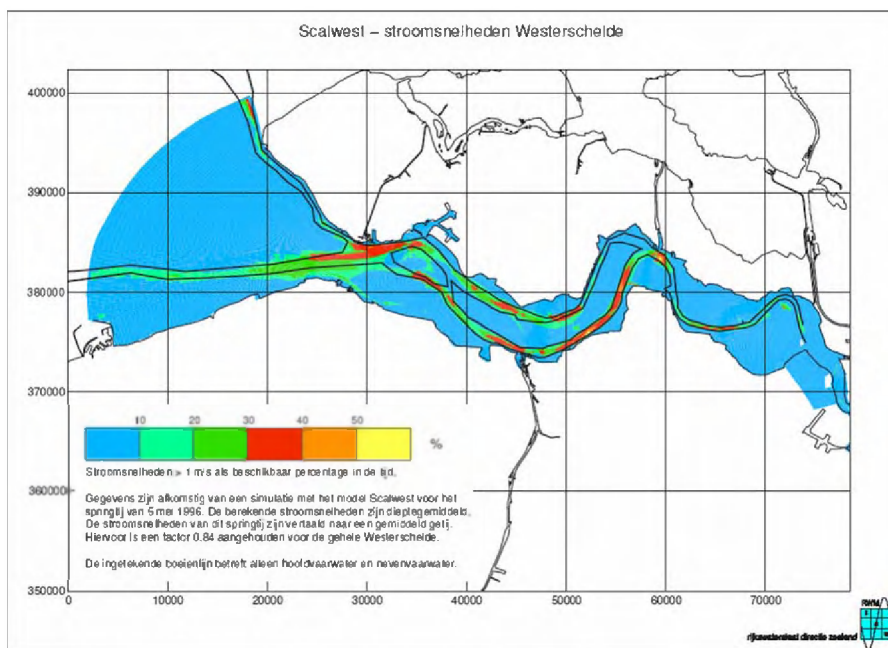


Figuur 36: Gemiddelde stroomsnelheden van een gemiddeld getij

De figuur hierboven geeft een aardig beeld van de gemiddeld beschikbare stroming. Omdat stroomsnelheden onder de 1 m/s minder interessant zijn voor opwekking van energie wordt in

de volgende figuur (Figuur 37) weergegeven welk percentage van de tijd de stroming boven de 1 m/s is.

Dit percentage is als volgt benaderd. Het aantal keren dat de snelheid boven de 1 m/s was op een bepaalde coördinaat is gedeeld door het aantal metingen. In dit geval is een interval van 30 minuten gebruikt. Aangezien een volledig getij 12 uur en 30 minuten duurt, is totaal aantal data per coördinaat 25. Op het moment dat er 5 keer een stroomsnelheid groter dan 1 m/s is geteld op coördinaat x-y, dan wordt gesteld dat de de stroomsnelheid 20% van de tijd groter dan 1 m/s is geweest.



Figuur 37: Stroomsnelheden groter dan 1 m/s als percentage van de tijd.

4.2. Kansenskaart getijdestroming in de Westerschelde

In figuur 38 is de kansenskaart voor getijdestroming in de Westerschelde weergegeven. De kaart geeft een overzicht van de locaties waar op basis van de drie eerder gestelde criteria voldoende potentieel aanwezig is voor de opwekking van elektriciteit uit de stroming. De kansenskaart is opgesteld door de resultaten van de drie criteria te combineren.

In Figuur 38 is te zien dat de locaties waar de stroming meer dan 30 % van de tijd groter dan 1 m/s is, in de vaargeul liggen. Er zijn slechts een paar locaties vlak buiten de vaargeul waar ook aan de drie criteria wordt voldaan. Deze locaties zijn via een stippellijn verbonden met de corresponderende delen op de hydrografische kaartfragmenten. Hier is te zien dat er inderdaad een klein beetje ruimte is buiten de boeien van de vaargeul.



Figuur 38: Kansenkaart Westerschelde

vaargeul loopt. Met andere woorden, de lichtrode gebieden geven de gebieden aan die niet geschikt zijn.

Lokatie **a** ligt vlak naast de Geul van Baarland (Nevenvaarwater, zie Figuur 35). De geul is op deze lokatie ongeveer 5 à 6 meter diep. Hoewel dit niet voldoet aan de eis van 10 meter diepte is deze lokatie wellicht geschikt voor een drijvende constructie.

Lokatie **b** is tussen de 13 en 14 meter diep. Bovendien is de stroming hier interessant. Op deze plek bestaat de mogelijkheid om een getijdestromingsturbine neer te zetten met een diameter van maximaal 10 meter.

Lokatie **c** bevindt zich ten noorden van Plaat van Saeftinge, vlak onder het Nauw van Bath (diepte ongeveer 13 meter). Wat betreft diepte en stroming is deze plek geschikt. De vaargeul is hier smal. Bovendien bevindt zich ten zuiden van de Plaat van Saeftinge het Verdrongen land van Saeftinge wat een verboden gebied is. Bovenstaande factoren maken deze lokatie minder aantrekkelijk.

Op basis van bovenstaande informatie valt te concluderen dat het overgrote deel van de Westerschelde afvalt. Aangezien geschikte stroomsnelheden van meer dan 1 m/s alleen in of vlak bij de vaargeulen voorkomen, zal voor een eventueel experiment uitgezocht moeten worden welke afstand tot de vastgestelde vaargeul aangehouden moet worden.

4.3. Opbrengst

In onderstaand overzicht is de mogelijke opbrengst weergegeven. Deze gegevens zijn gebaseerd op stromingsgegevens van Rijkswaterstaat.

Lokatie	Beschikbare ruimte (m)	Minimale diepte (m)	Diameter (m)	Oppervlakte per apparaat (m ²)	# apparaten	Stroming (m/s)	Vermogen/apparaat bij 1 m/s (kW)	Totaal gemiddeld vermogen (MW)	% van de tijd	Opbrengst (GWh)
a	1100 x 200	6	2	3.1	78 x 50 3900	1	0.95	3.7	35	11.3
b	1200 x 100	14	5	19.6	34 x 10 340	1	5.9	2.0	35	6.2
c	800 x 50	13	4	12.6	28 x 6 170	1	3.5	0.6	35	2.0
Totaal	-	-	-	-	4410	-	-	6.4	-	19.5

In de breedte van de beschikbare ruimte wordt het aantal apparaten bepaald door de diameter. Er wordt een diameter afstand tussen twee apparaten gebruikt. In de lengte (in de stromingsrichting) wordt 7 maal de diameter als afstand toegepast. De maximale diameter van de rotor wordt op 1/3 van de minimale diepte gesteld.

Het maximale vermogen wat uit 1 m/s stroming (water) gehaald kan worden is 0.3 kW/m² (gebaseerd op de Betz-limiet). Het totale vermogen van bovengenoemde lokaties (op basis van 1 m/s stroming) is ongeveer 6.4 MW. De opbrengst is minimaal 19.5 GWh per jaar, hetgeen een zeer conservatieve schatting is.

5. Financiële aspecten

Totale kosten

Aangezien er op dit moment nog geen installaties worden geëxploiteerd of verkrijgbaar zijn, is moeilijk om op basis van de gegevens van de praktijkexperimenten in te schatten wat de kosten zullen zijn van het bouwen van een installatie in de Westerschelde. Op basis van de bedragen voor de praktijkexperimenten en testprojecten kan een grove inschatting worden gemaakt.

De kosten voor de praktijkexperimenten lopen in de miljoenen euro's, € 30.000 per kW geïnstalleerd vermogen is een ruwe schatting van de kosten van een praktijkexperiment.

De schatting van diverse leveranciers is dat de kosten in de toekomst zullen dalen tot circa € 2000 per kW geïnstalleerd vermogen. Dit is circa 4 maal hoger dan voor een huidige centrale op basis van fossiele brandstof en 2 maal hoger dan voor windturbines. In de vergelijking met wind is echter het aantal vollasturen per jaar belangrijk voor de kosten per kWh.

Productiekosten

De getijdestromingscentrale heeft, analoog aan bijvoorbeeld windenergie en in tegenstelling tot de conventionele centrale, geen kosten voor brandstof. De kosten voor onderhoud van de stromingsturbines zullen vanwege de moeilijkere bereikbaarheid hoger kunnen zijn dan bij windturbines.

De inschatting van diverse experts is dat op termijn, bij grootschalig gebruik van getijdenstroming, een kostprijs mogelijk is in de orde van 2 – 12 €ct / kWh. In de onderstaande tabel 3 zijn de verwachte kosten per kilowattuur voor de diverse apparaten weergegeven.

Product	Verwachte kostprijs (€ct/kWh)
MCT	4 (2006) en 2 (2010)
Hammerfest	5 – 9
Verdant	7 – 9
Wave Rotor	3
Stingray	8 – 29
AWS	9 – 15
Wave Dragon	11
MHD	4

6. Beleidsmatig

Rijkswaterstaat

Rijkswaterstaat en ProSes (Projectdirectie ontwikkelingsschets Schelde-estuarium) staan duidelijk niet afwijzend tegenover het idee van energie uit getijdestroming. Dit bleek uit gesprekken die gevoerd zijn in mei 2004, te Bergen op Zoom. Er is gewezen op een aantal problemen waar rekening mee gehouden moet worden.

Invloed op omgeving

De opwekking van energie uit getijdestroming is volledig duurzaam. Er wordt elektriciteit geproduceerd zonder productie van CO₂ of andere broeikasgassen.

Bewegende delen van getijde-installaties kunnen invloed hebben op de lokale omgeving. Zoals aangeven wordt in het rapport van Ecofys, is de invloed echter pas merkbaar bij grote installaties, zoals een dam (tidal fence).

De hele Westerschelde inclusief de vaargeul is aangewezen als beschermd natuurgebied. Bovendien is de Westerschelde tot aan het mondingsgebied een vogel- en habitatrichtlijn gebied.

Vogel- en habitatrichtlijnen

De vogel- en habitatrichtlijnen richten zich zowel op de directe bescherming van soorten als de instandhouding van hun leefgebieden en andere habitats. De vogelrichtlijn heeft betrekking op alle natuurlijk in het wild levende vogelsoorten op het Europees grondgebied van de lidstaten. De habitatrichtlijn is complementair aan de vogelrichtlijn en richt zich op de instandhouding van de natuurlijke habitats en de wilde flora en fauna met uitzondering van vogels en hun leefgebieden. Dit sluit niet uit dat de bedoelde habitats de leefgebieden van vogels overlappen. Het netwerk van beschermde gebieden in Europa heet 'Natura 2000'.

Voor de aangewezen gebieden betekent dit dat er de verplichting is om *passende maatregelen te treffen om ervoor te zorgen dat de kwaliteit van de natuurlijke habitats niet verslechtert en er geen storende factoren optreden voor de soorten waarvoor de zones zijn aangewezen*.

Voor elk plan of project dat niet direct verband houdt met of nodig is voor het beheer van het gebied, maar afzonderlijk of in combinatie met andere plannen of projecten significante gevolgen kan hebben voor een dergelijk gebied:

- Wordt een 'passende beoordeling' gemaakt rekening houdend met de noodzakelijke instandhouding van het gebied;
- Wordt toestemming slechts verleend nadat zekerheid is verkregen dat de natuurlijke kenmerken van het gebied niet zullen worden aangetast;
- Worden bij een negatieve beoordeling alternatieve oplossingen onderzocht en inspraakmogelijkheden geboden;
- Worden, indien alsnog tot uitvoering wordt besloten (om dwingende redenen van groot openbaar belang), alle nodige compenserende maatregelen genomen om te waarborgen dat de samenhang van Natura 2000 bewaard blijft.

Binnen de vogel- en habitatrichtlijnen is veel menselijk handelen mogelijk zolang deze maar geen significante effecten hebben op de beschermde natuurwaarden.

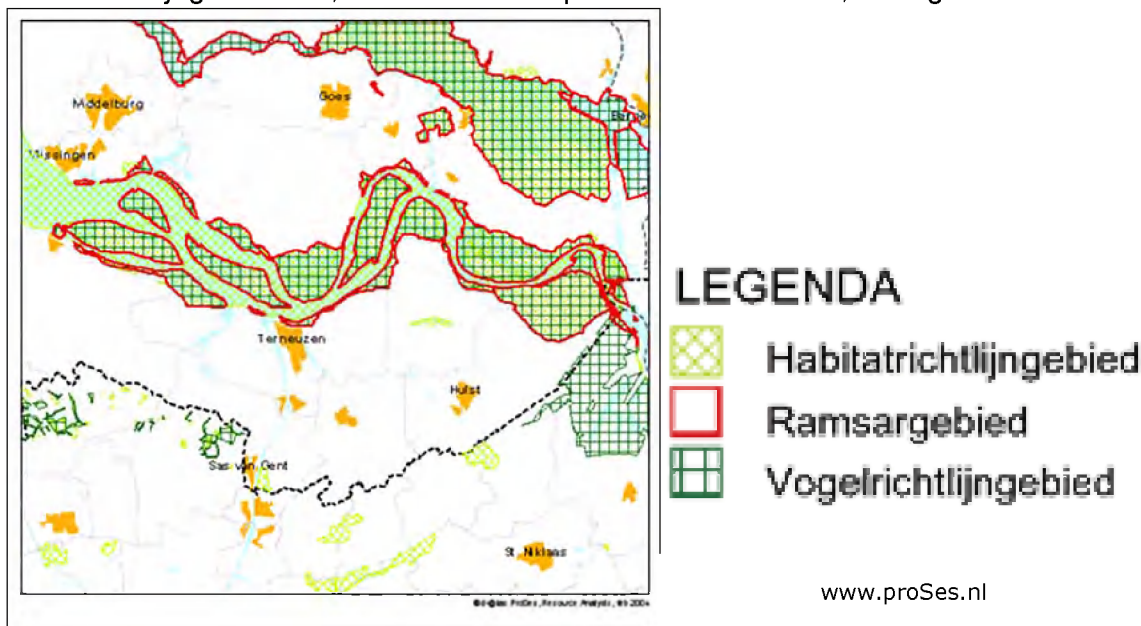
De opwekking van getijde-energie in het vogel- en habitatrichtlijngebied van de Westerschelde is toegestaan als duidelijk is dat de natuurlijke kenmerken van het gebied niet worden aangetast. Dit betekent dat het leefgebied van bijvoorbeeld vissen niet ingrijpend mag wijzigen door de plaatsen van turbines, bijvoorbeeld dat het gebied in tweeën gedeeld zou worden.

Uit gegevens van Marine Current Turbines blijkt dat een propellor met 10 tot 20 toeren per minuut ronddraait. Dit komt overeen met een tipsnelheid tussen de 30 en 60 km per uur. Het gevaar van deze snelheden voor bijvoorbeeld vissen is niet in deze studie onderzocht. Veronderstelt kan worden dat het gevaar van een getijdestromingsturbine veel kleiner is dan van schepsschroeven.

Project Ontwikkelingsschets 2010 Schelde-estuarium (ProSes)

Het doel van ProSes is “..een door de bevoegde bewindslieden van Nederland en Vlaanderen uiterlijk tegen december 2004 vastgesteld, integraal en onderbouwd pakket van maatregelen voor de middellange termijn met betrekking tot het Schelde-estuarium, die vervolgens nader zullen worden uitgewerkt.” ProSes heeft 3 hoofdlijnen gedefinieerd: Veiligheid, Toegankelijkheid en Natuurlijkheid.

Wat betreft Natuurlijkheid valt op te merken dat vrijwel de gehele Westerschelde onder het Habitatrichtlijngebied valt, zoals is te zien op onderstaande kaart, zie Figuur 39.



Figuur 39: Vogel- en Habitatrichtlijngebied en Ramsargebied⁵

Milieu-effect Rapportage (MER)

⁵ Volgens de Ramsar-conventie is een gebied van 'internationaal belang' als er regelmatig minstens 20.000 watervogels of minstens 1 % van de geografische populatie voorkomen.

Gezien de natuurlijke gevoeligheid van de Westerschelde zal een MER studie uitgevoerd moeten worden. De studie zal aan moeten geven dat plaatsing van de turbine niet te veel hinder geeft voor de natuur in het gebied.

7. Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

- De getijdestroming is goed voorspelbaar zowel wat betreft grootte als moment van optreden dit in tegenstelling tot windenergie. De variatie in de getijdestroming is klein in vergelijking met windenergie.
- De condities in de Westerschelde zijn geschikt voor het opwekken van getijdestromingsenergie. De stroomsnelheid is op diverse locaties meer dan 20% van de tijd meer dan 1 m/s en de diepte meer dan 10 m (bij laag water).
- De meeste locaties die aan bovenstaande criteria voldoen, liggen echter in de vaargeul. De plaatsing van stromingsturbinen in/naast de vaargeul is zeer waarschijnlijk niet acceptabel onder meer omdat de diepte van de vaargeul afneemt.
- Enkele locaties vlak naast een vaargeul (de locaties A, B en C in figuur 38) voldoen aan de drie gestelde criteria over de stroomsnelheid, de diepte en liggen buiten de vaargeul.
- Langs de Zeeuwse kust zijn geen mogelijkheden voor het opwekken van energie uit golven als gevolg van te lage energie-inhoud.
- Uit berekeningen komt naar voren dat getijdestroming de potentie heeft om duurzame elektriciteit op te wekken, bij grootschalige systemen en gunstige condities, tegen een kostprijs vanaf 2 €/kWh. Dit is duidelijk lager dan de huidige kostprijs van windenergie.
- Het gemiddelde vermogen van de drie locaties is 6.4 MW. De jaarlijkse opbrengst is 19.5 GWh. Aangezien dit afkomstig is van meer dan 4000 onderwaterturbines mag worden aangenomen dat 3 grote offshore windturbines, die een vergelijkbare opbrengst leveren, vele malen goedkoper zijn te realiseren. Opgemerkt dient te worden dat de stromingssnelheid acceptabel is, maar de diepte beperkt is waardoor het op te wekken vermogen relatief laag is. Het potentieel voor de Westerschelde is dus laag.

Aanbevelingen

- Mogelijkheden voor het toepassen van stromingsturbinen aan (geplande) niet-natuurlijke constructies, bijvoorbeeld de Westerschelde Container Terminal, kunnen worden onderzocht. Met name deze locatie biedt goede mogelijkheden gezien de grote diepte en hoge stromingssnelheden. Mogelijk kunnen stromingsturbinen in het ontwerp worden opgenomen en zo hinder voor de scheepvaart vermeden. Combinatie van getijdestromingstechnieken met andere infrastructuur kan de kostprijs drastisch verlagen.
- In samenwerking met de beheerder van de Westerschelde, Rijkswaterstaat, in meer detail kijken naar de geschikte locaties, A, B en C in figuur 38. Ter voorbereiding hierop kan men dit rapport met Rijkswaterstaat bespreken.

- Met de provincie Zeeland overleggen over de bestuurlijke haalbaarheid van de opwekking van getijdestromingsenergie in de Westerschelde. Ter voorbereiding hierop kan men dit rapport met de provincie Zeeland bespreken.
- Met de Zeeuwse Milieufederatie overleggen hoe zij de milieuaspecten van de opwekking van getijdestroming inschatten. Doel van dit overleg is te komen tot een eerste inschatting van de maatschappelijke haalbaarheid. Ter voorbereiding hierop kan men dit rapport bespreken met de Zeeuwse Milieufederatie.
- In samenwerking met de provincie Zeeland dient te worden onderzocht wat de mogelijkheden zijn onderwaterturbines te installeren aan of in de geplande Westerschelde Container Terminal. Hierbij wordt gedacht aan technologie vergelijkbaar met die van Verdant Power (zie pagina 16).

Tips

- In samenwerking met ProSes kan een bijdrage worden geleverd aan het milieueffectenrapport Ontwikkelingsschets 2010 Schelde-estuarium.
- In september 2004 zal de Waterbouwdag 2005 van Rijkswaterstaat worden aangekondigd. Deze dag zal in het teken staan van de Westerschelde (onder voorbehoud). Als men verder wil met het onderzoeken van de mogelijkheid voor getijdestromingsenergie in het Westerscheldegebied, is het aan te bevelen hieraan een bijdrage te leveren, bijvoorbeeld in samenwerking met ProSes.
- De Oosterscheldekering werd in de studie “Kansen voor energiewinning uit getijden in de Oosterschelde” aangemerkt als potentiële lokatie gezien de geschikte diepte en stromingssnelheid. De mogelijkheden van deze lokatie en de constructie aan de kering dienen aan een grondiger onderzoek te worden onderworpen.
- De off-shore mogelijkheden van de Wave Rotor of de combinatie van de Marine Current Turbine met off-shore windturbines dienen apart te worden bepaald in samenwerking met de windspecialisten van DELTA. Met name de laatste combinatie is interessant gezien het hoge rendement en de ervaring van Marine Current Turbines met off-shore systemen.

8. Referenties

Gedurende het uitvoeren van deze studie is er overleg geweest met de meerdere personen. Op verzoek zullen de contactpersonen worden doorgegeven. Er is onder andere contact geweest met Rijkswaterstaat, de Meetinformatiedienst van Rijkswaterstaat, Meteo Hydro Meteo Centrum Zeeland en diverse vertegenwoordigers van bedrijven die getijdestromingstechnologie ontwikkelen.

Verslag van overleg met Rijkswaterstaat en ProSes

Bergen op Zoom, maandag 17 mei 2004, 10:00

Aanwezig:	Dhr. L.D. Boom	(Rijkswaterstaat, Directie Zeeland)
	Dhr. P.E.Th.M. Post	(ProSes)
	Dhr. P.F. Korthals Altes	(Altran)
	Dhr. M.J.G. Jak	(Altran)
	Dhr. A. Ledeboer	(Altran)

Introductie van ProSes (Projectdirectie ontwikkelingsschets Schelde Estuarium) door de heer Boom en de heer Post:

Doel van ProSes: "...een door de bevoegde bewindslieden van Nederland en Vlaanderen uiterlijk tegen december 2004 vastgesteld, integraal en onderbouwd pakket van maatregelen voor de middellange termijn met betrekking tot het Schelde-estuarium, die vervolgens nader zullen worden uitgewerkt." ProSes streeft in principe naar een dynamisch systeem.

Drie hoofdlijnen:

- Veiligheid
- Toegankelijkheid
- Natuurlijkheid

Introductie van Altran door de heer Korthals Altes en de heer Jak. Vervolgens werd de status van de studie naar getijdestroming gepresenteerd.

Rijkswaterstaat en ProSes staan duidelijk niet afwijzend tegenover het idee van getijdestromingsenergie. Tijdens het overleg werden de gepresenteerde aandachtsgebieden (scheepvaart, invloed op stroming, invloed op flora en fauna, beleidsmatige, opbrengst, economische factoren, mogelijkheden testlokatie) besproken. Verschillende technieken, types en eigenschappen en referentie projecten werden onder de aandacht gebracht. Hiernaast is er is een aantal (extra) onderwerpen besproken:

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Continue gebaggerd en gestort• Zandtransport• Gevolg bouw van turbine op omgeving• Stortstrategie zand• Voordelen t.o.v. andere DE• Afscherming van bovenwaterdeel• Gehele Westerschelde is beschermd behalve de monding• Europese vogel- habitatrictlijnen• Getijde verschil Antwerpen: 5 a 6 m• Overloop polders, komopvang | <ul style="list-style-type: none">• Terugleggen van dijken• Mondingsgebied evt meer ruimte• Voordelta niet geschikt• Voorbeeld mosselkwekers• Beoordelingsplicht (habitatrictlijn)• Project MER• Milieuwerkgroep Westerschelde• Getijde energie vs bijv wind• Mogelijkheden overloopgebieden• Sigma-plan (Vlaanderen) |
|--|--|
- DE (Duurzame Energie)

Eind juni 2004 is de (Strategische) MER studie gereed waarin milieueffecten als gevolg van voorgenomen projecten worden gerapporteerd, zoals oa waterstanden.

In 2005 wordt er een Waterbouwdag georganiseerd (waaraan een prijsvraag wordt gekoppeld) voor bureaus, aannemers en studenten. Thema: Westerschelde estuarium.

Het kustfundament van Walcheren behoeft wellicht bescherming.

In verband met het feit dat de bodem van de Westerschelde aan verandering onderhevig is zou het interessant kunnen zijn een mobiele toepassing van getijdestromingsenergie te overwegen.

Mogelijkheden voor synergie in het streefbeeld 2030 wat betreft duurzaamheid, kustbescherming en compensatie projecten dienen onderzocht te worden.

De heer Boom biedt de mogelijkheid aan om via hem contact te leggen met de nautische dienst.

Op basis van stroomsnelheden, dieptes, potentiële opbrengst en scheepvaartroutes kunnen 1 of meer mogelijke locaties worden voorgesteld.

~

