

Kansen voor energiewinning uit getijden in de Ooster- schelde

Ir. P.C. Scheijgrond
Ir. A. Schaap
Ir. E.A. Sjerps-Koomen

E 45074.1

Copyright ECOFYS, 25 mei 2000

ECOFYS, Postbus 8408, NL-3503 RK Utrecht, Nederland, tel. 030-2808300
Kanaalweg 16-G, 3526 KL Utrecht, fax. 030-2808301, www.ecofys.nl

SAMENVATTING

In deze rapportage worden de kansen onderzocht voor energiewinning uit de getijden in de Oosterschelde. Twee opties voor energieopwekking uit getijden zijn beschouwd:

1. Energiewinning uit het getijverschil (het hoogteverschil tussen eb en vloed) met behulp van bassins en laag verval waterturbines.
2. Energiewinning uit lokale getijdenstromingen met behulp van vrije turbines in de stroom, analoog aan windturbines.

Beide opties zijn beschreven aan de hand van principes, praktisch voorbeelden, en de huidige stand van zaken in Nederland. Het toetsen van de kansen voor deze opties gebeurt aan de hand van de volgende beoordelingscriteria:

1. Het aanbod van energie uit getijverschil en uit getijdenstroming in de Oosterschelde op basis van beschikbare data en schattingen.
2. Het Beleidsplan Oosterschelde (hierna het Beleidsplan), waarin de hoofdoelstellingen geformuleerd staan met betrekking tot veiligheid voor de bevolking, natuur, visserij, recreatie en scheepvaart.
3. De financiële beperkingen die bekend zijn uit ervaringen met de technologieën.
4. Het perspectief voor toepassingen buiten het Oosterschelde gebied.

Uit deze toetsing zijn de volgende conclusies getrokken:

Energieopwekking uit het **getijverschil** (het verschil tussen eb en vloed) biedt geen goede kansen in de Oosterschelde. Hoewel het aanbod in principe groot is (734 MW), is de implementatie -met name op grote schaal- in strijd met de doelstellingen van het Beleidsplan. Verder lijkt het vooralsnog economisch onrendabel om energie op te wekken bij een hoogteverschil van minder dan 7 meter. Er zijn ook geen bijkomende kostenbesparende voordelen voor de Oosterschelde in de vorm van bijvoorbeeld een verbindingsweg, omdat deze infrastructuur reeds aanwezig is. Tenslotte zijn er weinig perspectieven om de opgedane ervaring en kennis elders toe te passen in Nederland.

Energieopwekking uit **getijdenstromingen** biedt meer kansen in de Oosterschelde. Het aanbod is beperkt tot een aantal specifieke locaties, waarvan de stormvloedkering het grootste aanbod biedt (100-200 MW), daarbuiten is het aanbod geringer gezien de lage stroomsnelheden (1-10 MW). Realisatie *op grote schaal* van deze optie is in strijd met het Beleidsplan, vanwege de invloed op getijverschil. Een eerste orde benadering toont aan dat het effect van een

grootschalige toepassing (10 MW) een niet verwaarloosbaar effect op het getijverschil in de Oosterschelde zal hebben (in de orde van 4 cm op het huidige getijverschil van 285 cm). Gezien dit effect bestaat er twijfel over het achterwege blijven van mogelijke negatieve gevolgen voor het ecosysteem (voorzorgsprincipe uit Beleidsplan). Het opwekken van energie uit getijdenstromingen *op grote schaal* in de Oosterschelde kan daarom niet worden aanbevolen.

Het effect van *kleinschalige* energieopwekking uit de getijdenstromingen (tot 500 kW) op het getijverschil is veel kleiner (0.4 mm per 100 kW opgesteld vermogen). Hoewel dit effect niet ontkend mag worden, wordt het belang ervan verwaarloosbaar geacht (door Rijkswaterstaat) ten opzichte van andere aanpassingsprocessen die de Oosterschelde ondergaat. *Kleinschalige* energie opwekking uit de getijdenstromingen lijkt dus acceptabel, mits de installatie voldoet aan nog op te stellen randvoorwaarden ten aanzien van bijvoorbeeld verankering en het effect op de bodem.

Wanneer een proefinstallatie wordt toegestaan rond de Oosterschelde moet een goede locatie worden aangewezen. De meest optimale locatie moet gezocht worden daar waar de installatie geen hinder veroorzaakt voor scheepvaart, recreatie of visserij en waar de stroomsnelheden hoog en laminair zijn. Verder moet de installatie goed bereikbaar zijn voor onderhoud en metingen. Een locatie in de Stormvloedkering, tussen de peilers, voldoet het beste aan deze voorwaarden. Mocht deze locatie technisch niet te realiseren zijn, dan moet een proeflocatie gezocht worden in de buurt van de kering, maar buiten het turbulente gebied.

Er zijn perspectieven voor toepassingen van deze vorm van energieopwekking elders in Nederland. Hoge stromingen zijn te vinden voor de Zeeuwse kust in de Noordzee, de Westerschelde en rond de Wadden eilanden. Voor deze locaties zullen echter ook de consequenties voor milieu, scheepvaart, etc. moeten worden onderzocht. Het Europees potentieel is geschat op een technisch realiseerbaar vermogen van 12.5 GW. Tenslotte beschikt de provincie Zeeland bij uitstek over de nodige kennis, faciliteiten en omgeving om deze technologie verder te ontwikkelen.

De volgende aanbevelingen worden gedaan aan de provincie Zeeland:

1. Geen energieopwekking uit het **getijverschil** (het verschil tussen eb en vloed) in de Oosterschelde,
2. faciliterend optreden bij initiatieven voor *kleinschalige* energieopwekking uit de **getijdenstromingen** (tot 500 kW) in de Oosterschelde op een aan te wijzen proeflocatie onder bepaalde randvoorwaarden,
3. bundelen en verspreiden van de kennis, initiatieven en actoren via een voorlichtingsbijeenkomst of workshop over het onderwerp “energie uit getijdenstroming”.

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING	2
INHOUDSOPGAVE	4
1. INLEIDING	5
1.1 Het Oosterschelde Gebied.....	5
1.2 Getijverschil en getijdenstroming.....	7
1.3 Beoordelingscriteria voor toetsing.....	9
2. ENERGIEOPWEKKING UIT HET GETIJVERSCHIL	11
2.1 Principe.....	11
2.2 Praktijkvoorbeelden	13
2.3 Ervaringen in Nederland	14
2.4 Toetsing aan beoordelingscriteria.....	15
3. ENERGIEOPWEKKING UIT GETIJDENSTROMING	19
3.1 Principe.....	19
3.2 Praktijkvoorbeelden	21
3.3 Ervaringen in Nederland	26
3.4 Toetsing aan beoordelingscriteria.....	31
4. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	36
4.1 Energieopwekking uit het getijverschil.....	36
4.2 Energieopwekking uit het getijdenstroming.....	36
4.3 Aanbevelingen	37
5. REFERENTIES	38
BIJLAGEN	39

1. INLEIDING

Deze rapportage is geschreven in opdracht van provincie Zeeland in het kader van het provinciale actieprogramma Energie. Ecofys is gevraagd parallel aan dit actieprogramma ook de kansen voor energieopwekking uit getijden rond de Oosterschelde te inventariseren. Dit onderwerp is in de belangstelling geraakt vanwege een aantal initiatieven om prototype waterturbines te testen in de wateren van de Oosterschelde. De initiatieven worden nader beschreven in dit rapport en in een breder kader geplaatst. Voor de informatie zijn er telefoongesprekken gevoerd en is beschikbare en toegezonden literatuur bestudeerd.

In dit hoofdstuk wordt eerst het kader geschapen waarbinnen dit onderzoek plaatsvindt. Een schets van het Oosterschelde gebied wordt gegeven. Vervolgens wordt ingegaan op de methoden om energie te winnen uit getijden en tenslotte worden beoordelingscriteria gedefinieerd voor het toetsen van kansen voor energie opwekking uit getijden in de Oosterschelde. Deze criteria worden in de hoofdstukken 2 en 3 toegepast voor de toetsing van respectievelijk de kansen voor energiewinning uit het getijverschil en getijdenstroming.

1.1 Het Oosterschelde Gebied

De Oosterschelde wordt gekarakteriseerd als een grootschalig getijdenlandschap met grote mate van natuurlijkheid. Als gevolg van getijdenstromen vinden erosie- en sedimentatieprocessen plaats die resulteren in een wisselend patroon van diepe getijgeulen, slikken, platen en schorren. Het landschapsbeeld wordt gekenmerkt door dijken en dammen en andere infrastructurele werken zoals de Oosterscheldekering, de Zeelandbrug, havens, windturbines, woonkernen en recreatieconcentraties [ref 1].



Figuur 1 Oosterschelde kering.

Het water, de schorren en het intergetijdengebied vormen, mede in samenhang met de binnendijs gelegen natuurgebieden, het leefmilieu voor de rijke flora en fauna in het gebied. Het milieu wordt bepaald door abiotische factoren als getij, stroming, watertemperatuur, hoogteligging, waterkwaliteit en sediment-samenstelling. Wijziging van één van deze factoren leidt tot verandering in de omvang en samenstelling van milieutypen en levensgemeenschappen.

Als gevolg van de uitvoering van de Oosterscheldewerken zijn de stroomsnelheden, het getijvolume en de getijbeweging afgenomen. De verblijftijd van het water is hierdoor langer geworden dan voorheen. De geulen, die ingesteld waren op grotere watertransporten, werden te ruim. De geulen willen zich aanpassen aan de nieuwe situatie door ondieper en smaller te worden. De hoeveelheid zand die hiervoor nodig is wordt geschat op ongeveer 400 miljoen m³. Dit zand te kort van de geulen wordt aangeduid als de zandhonger. Het zand dat tijdens stormen door golven op de platen en slikken erodeert, komt niet meer zoals vroeger tijdens springtij terug op deze ondiepe gebieden. Slikken en platen worden daardoor elk jaar lager en kleiner en ook schorren kalven af. Deze ontwikkeling is structureel en kan leiden tot: meer water, minder schor en een kleiner gebied dat bij laagwater zal droogvallen [ref 2,3].

Samengevat zijn de volgende belangrijke wijzigingen in het watersysteem van de Oosterschelde opgetreden:

- Het getijverschil is groter gebleven dan was voorspeld
- De stroomsnelheden zijn gemiddeld 30% lager geworden
- De waterkwaliteit is verbeterd en het zoutgehalte is hoger dan werd verwacht
- De bodemligging is nog lang niet in een nieuw evenwicht gekomen. Er is een tendens tot erosie en afvlakking van de plaatgebieden. Ook de schorren zijn aan erosie onderhevig.
- Ten dele bevindt het ecosysteem zich nog in een aanpassingsfase.
- Wijzigingen hebben zich voorgedaan in de geschiktheid van het gebied voor de schelpdiercultuur. Plaatselijk is de geschiktheid verminderd; elders is deze juist toegenomen.

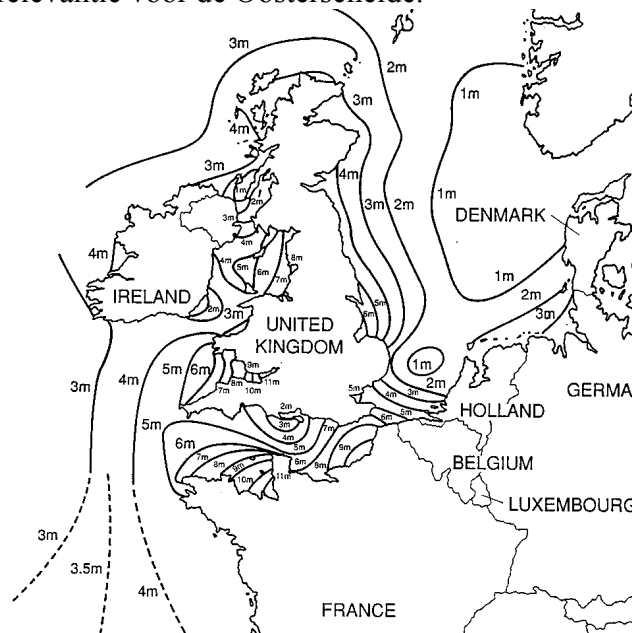
1.2 Getijverschil en getijdenstroming

Getijden worden veroorzaakt door de gravitatiekrachten tussen de maan, zon en de aarde. De combinatie van deze aantrekkingskrachten en de rotatie van de aarde zorgt voor een voorspelbare afwisseling tussen hoog en laag water. Om de 12 uur en 25 minuten herhaalt het patroon zich, waardoor er zich in een etmaal twee keer hoog en twee keer laag water voordoet. Het verschil in hoogte varieert van 0.5 m op de meeste locaties tot 10 m op specifieke locaties nabij continentale landmassa's (zie figuur 2). De beweging van het water veroorzaakt getijdenstromingen met snelheden tot wel 5 m/s in kustzones en in stroomgaten tussen eilanden (zie figuur 3).

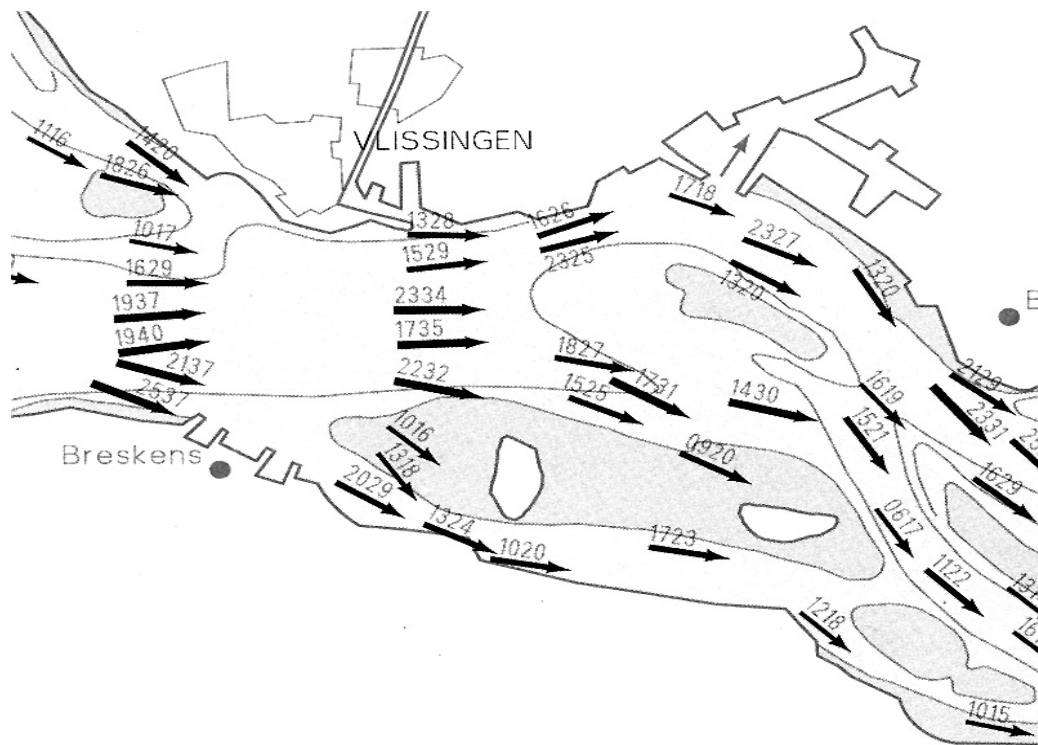
Energiewinning uit getijden kan op twee fundamenteel verschillende manieren:

1. door het *getijverschil* te benutten in afsluitbare bassins
2. door lokale *getijdenstromingen* te benutten op een manier analoog aan windturbines.

Beide principes worden afzonderlijk in hoofdstukken 2 en 3 nader beschreven en geïllustreerd aan de hand van praktijkvoorbeelden. In dit hoofdstuk wordt een referentie kader geschetst waarbinnen de twee opties kunnen worden getoetst op relevantie voor de Oosterschelde.



Figuur 2 Kaart van Europa met lijnen van gelijk springtij niveau [ref 4]. Het getijverschil kan aanzienlijk toenemen in de estuaria. Dit wordt veroorzaakt door het aflopen van de zeebodem en de trechtersvorm van de estuaria. Het verschil kan nog extra worden versterkt door effecten zoals reflectie van de getijdengolf bij de kuststrook (mn. bij Cherbourg schiereiland in Frankrijk) en resonantie van de getijdengolf (bijv. In de Severn Estuarie in Groot Brittanie)



ZEEUWSCH VLAANDEREN

Figuur 3 Kaart uit de Stroomatlas van de Westerschelde/Oosterschelde [ref 5], 1 uur voor hoog tij. De uit metingen verkregen stroomrichtingen en -snelheden (in zeeknopen) zijn aangegeven met zwarte pijlen. Het zijn gemiddelden in de voor scheepvaart meer belangrijke bovenste waterlagen bij gemiddeld doottij en gemiddeld springtij. "1940" is 1.9 knopen (1.0 m/s) bij doottij en 4.0 knopen (2.1 m/s) bij springtij.

1.3 Beoordelingscriteria voor toetsing

Hoe kan worden bepaald of en op welke wijze energiewinning uit de Oosterschelde interessant is? Voor het doel van deze rapportage zijn vier beoordelingscriteria gedefinieerd om een referentiekader te scheppen aan de hand waarvan toetsing kan plaatsvinden, te weten: het aanbod, het beleidsplan Oosterschelde, financiële beperkingen en toekomst perspectieven. Deze beoordelingscriteria worden hieronder kort toegelicht en komen in hoofdstukken 2 en 3 weer terug om een oordeel te kunnen vellen.

Het aanbod

Zowel voor het benutten van het getijverschil (het hoogteverschil tussen eb en vloed) als getijdenstroming moet een schatting worden gemaakt van het te installeren vermogen en de opbrengsten. Het vermogen wordt uitgedrukt in kW of MW, de opbrengst in kWh per jaar.

Het is belangrijk om te weten welke parameters van invloed zijn op het vermogen en de opbrengst om een afweging te kunnen maken met andere (duurzame) energie bronnen. Het vermogen van een getijcentrale die gebruik maakt van het hoogteverschil wordt bepaald door het hoogteverschil in meters tussen laag water en hoog water en het debiet in m^3/s . Een waterstromingsturbine haalt het vermogen juist uit de lokale snelheid van het water (m/s) door het beschikbare doorstromingsoppervlak A (m^2).

Voor dit onderdeel van de studie is hoofdzakelijk gebruik gemaakt van beschikbare gegevens.

Het Beleidsplan Oosterschelde

Eén van de belangrijkste toetsingscriteria wordt bepaald door het Beleidsplan Oosterschelde (hierna het Beleidsplan) [ref 6]. Dit beleidsplan is opgesteld in 1995 door de Stuurgroep Oosterschelde voor de Provinciale Staten van Zeeland. In dit beleidsplan staan de hoofddoelstellingen geformuleerd met betrekking tot veiligheid voor de bevolking, natuur, visserij, recreatie en scheepvaart. Alle initiatieven die betrekking hebben op de Oosterschelde worden getoetst aan dit beleidsplan, zo ook initiatieven op het gebied van energiewinning uit de getijden. Het plan heeft betrekking op de periode tot het jaar 2005. In het jaar 2000 (dit jaar) zal op basis van een uitgebreide evaluatie bezien worden of het beleidsplan grotendeels gehandhaafd kan blijven.

Hieronder volgt een samenvatting van de hoofddoelstellingen:

- De hoofddoelstelling in het beleidsplan voor inrichting en beheer van de Oosterschelde luidt als volgt: *"Het behoud en zo mogelijk versterken van de aanwezige natuurlijke waarden, met inachtneming van de basisvoorwaarden voor een goed maatschappelijk functioneren van het gebied, waaronder met name visserij wordt begrepen."*

- Het hanteren van deze doelstelling mag aan de primaire doelstelling van de deltawerken, te weten het bieden van veiligheid voor de bevolking, geen afbreuk doen.
- Uit de hoofddoelstelling blijkt een hiërarchie van functies die bepalend is voor het inrichtings- en beheersbeleid, te weten: 1. natuur, 2. visserij, 3. overige functies zoals recreatie, scheepvaart en andere.
- Bij twijfel over de toelaatbaarheid van een activiteit in verband met mogelijke effecten op het ecosysteem wordt het voorzorgprincipe toegepast. Dit houdt in dat, wanneer op basis van de best beschikbare informatie bij de afweging sprake blijkt te zijn van duidelijke twijfel over het achterwege blijven van mogelijk belangrijke negatieve gevolgen voor het ecosysteem, het voordeel van de twijfel dan zal gaan in de richting van het behoud van de natuurfunctie.

De belangrijkste beleidspunten die hieruit volgen zijn als volgt geformuleerd:

- Handhaving van een dusdanige waterkwaliteit dat een optimaal functioneren van de hoofdfuncties natuur en visserij mogelijk is.
- Behoud van de natuurwaarde van het gebied.
- Behoud van het schorareaal.
- Geen wezenlijke verder vermindering van het areaal intergetijdengebied.
- Handhaving van de geschiktheid van de Oosterschelde voor de visserij.
- Recreatievoorzieningen dienen naar aard, omvang en ligging aan te sluiten bij het karakter van de Oosterschelde.
- Gereguleerd gebruik van de Oosterschelde door de beroepsscheepvaart.

Financiële beoordeling

Het succes en de commerciële haalbaarheid van energiewinning uit getijden zal uiteindelijk getoetst worden aan de kosten per kWh. Er zijn geen standaard gegevens hierover bekend, evenmin is er een financiële analyse uitgevoerd binnen deze opdracht. Zover bekend uit de literatuur zullen financiële gegevens worden genoemd.

Toekomst perspectieven

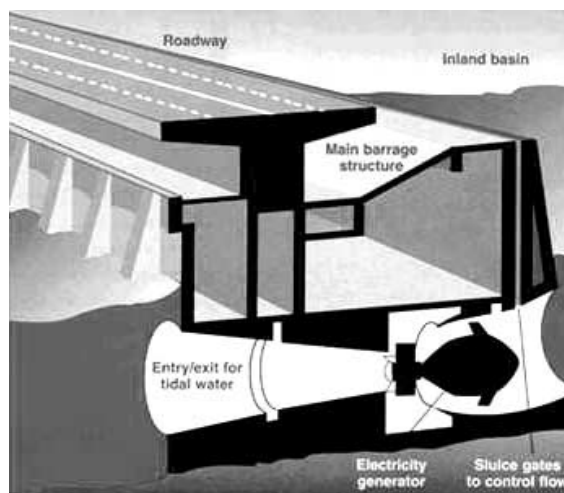
Het winnen van energie uit getijden is relatief onbekend. Het ontwikkelen van een eventuele getijcentrale (op kleine of grote schaal) voor de Oosterschelde vergt investeringen in kennis en materialen en het opdoen van ervaring. Er moet daarom ook gekeken worden naar toepassingen buiten het Oosterschelde gebied (herhalingspotentieel).

2. ENERGIEOPWEKKING UIT HET GETIJVERSCHIL

2.1 Principe

Turbines die werken op een hydraulisch verval (hoogteverschil van water) hebben een zeer hoog omzettingsrendement (80% en hoger). Om deze reden is waterkracht op basis van verval een hoogwaardige vorm van energieomzetting (ter illustratie; wind≈40%, photo-voltaïsch≈10%, gas (STEG)≈50%, kolen≈40%).

Om het hydraulisch verval van getijden te benutten voor energieopwekking is een bassin nodig. Dit bassin kan van nature aanwezig zijn in de vorm van een estuarium, inham, fjord of kunstmatig worden gecreëerd. In het geval van de Oosterschelde zou niet alleen aan de Oosterschelde zelf als bassin gedacht kunnen worden, maar ook aan hergebruik van een polder (ontpolderen), een buiten gebruik gestelde haven, of zelfs inlagen (gebied tussen twee dijken). Het ENERGO project (zie hierna en ref [7]) stelt bijvoorbeeld voor om de bouwputten op het werkeiland Neeltje Jans te benutten als bassin voor een getijcentrale.



Figuur 4 Schema voor getijcentrale

De bassins staan in verbinding met het zeewater middels één of meer sluisen en laag verval turbines. De “Bulb” turbines zijn hiervoor het meest gangbaar. Energieopwekking kan dan plaats vinden op drie manieren:

1. Alleen bij hoogwater: het bassin vult tijdens de vloedperiode, en bij hoog water sluiten de sluisen. Bij laag water loopt het bassin leeg door laag verval turbines. Met deze methode vindt er energieopwekking plaats gedurende 40% van de getijdencyclus.

2. Alleen bij laag water: de sluizen sluiten bij laag water. Bij hoog water vult het bassin zich met water dat door de turbines stroomt.
3. Bij hoog en laag water: combinatie van bovenstaande twee methodes.

Er zijn aanvullende methoden mogelijk om de continuïteit van energie opwekking te verbeteren. Dit kan door een extra bassin toe te passen of gebruik te maken van pompen, die het getijverschil kunstmatig vergroten.

2.2 Praktijkvoorbeelden

Er zijn weinig getijcentrales gebouwd. De bekendste en grootste is de 240 MW centrale bij La Rance in Frankrijk, die nu sinds 1965 operationeel is (zie figuur 5). In de Bay of Fundy bij Annapolis (Canada) is een 20 MW centrale gebouwd. Hier is geëxperimenteerd met een ring-generator turbine (“Straflo” turbine) in plaats van de meer gangbare “Bulb” turbine. Verder is er een 400 kW experimentele centrale bij Kislaya Guba (Rusland). In China is er een aantal kleine centrales gebouwd waarvan de 3.2 MW centrale in Jiangxia de grootste is. In tabel 1 staan meer gegevens over de centrales.



Figuur 5 Getijcentrale bij La Rance in Frankrijk. De eerste (1966) en voorlopig enige centrale in Europa met een vermogen van 240 MW. De huidige kostprijs voor de elektriciteit bedraagt omstreeks f0.06 per kWh.

Alle genoemde centrales maken gebruik van slechts een enkel bassin. Bij La Rance en Kislaya is het mogelijk energie op te wekken bij zowel laag als ook hoog water.

Voor een degelijke samenvatting van deze projecten wordt verwezen naar de rapportage “Actieve Getij Centrale” van Alkyon aan Novem [ref 8].

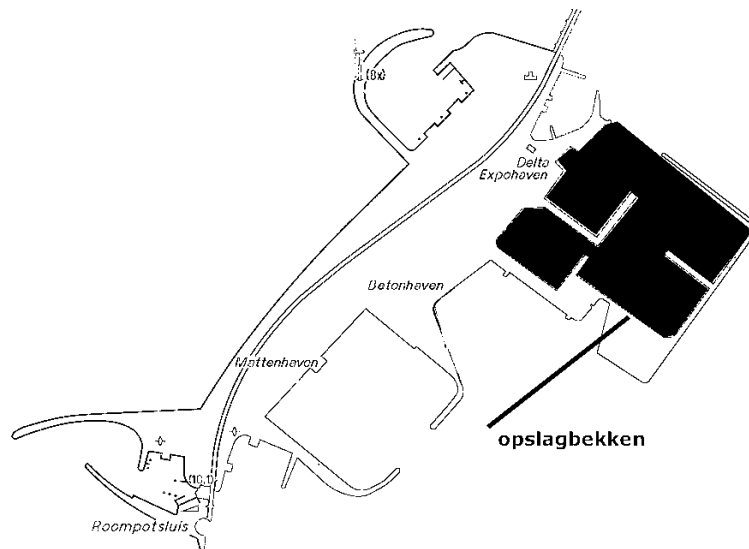
	gem. Getijverschil (m)	Bassin oppervlak (km ²)	Geïnstalleerd vermogen (MW)	Opbrengst (GWh/jaar)	in gebruik
La Rance (Frankrijk)	8	17	240	540	1966
Kislaya Guba (Rusland)	2.4	2	0.4	-	1968
Annapolis (Canada)	6.4	6	17.8	30	1984
Jiangxia (China)	7.1	2	3.2	11	1980

Tabel 1 Overzicht van operationele getijcentrales wereldwijd

2.3 Ervaringen in Nederland

Ook in Nederland zijn de opties voor getijcentrales bestudeerd. In de nota van ir L. Lievense uit 1979 werd een plan gemaakt om de Markerwaard te bestemmen als opslagbekken. De met windenergie opgepompte hoeveelheid water kon naar behoefte elektriciteit produceren met name tijdens pieken (piek shaving) [ref 9]. Het opslagbekken zou gebruikt worden om een waterkrachtcentrale aan te drijven met een totaal geïnstalleerd vermogen van ongeveer 1500 MW.

In de voorstudie proefproject ENERGO [ref 7] werd herkend dat voor het plan Lievense in principe mogelijkheden aanwezig waren in de reeds bestaande bouwputten van de Stormvloedkering Oosterschelde (figuur 6). Dit, gekoppeld aan het inmiddels gerealiseerde windturbinepark op het werkeiland Neeltje Jans, maakte deze locatie tot een ideale plaats voor een proefproject. Het hoogwater opslagbekken zou worden voorzien van een omkeerbare (pomp/turbine) bulb generator met een vermogen van 15 MW. De kosten voor de getijcentrale werden geraamd op $f4.600,-/kW$.



Figuur 6 Plattegrond van werkeiland Neeltje Jans met het bouwdok zichtbaar ten noordoosten van het eiland. Door het dok af te sluiten zou 15 MW kunnen worden geproduceerd met bulb turbines zo stelt het ENERGO project voor.

Toen duidelijk werd dat er voorlopig geen behoefte was aan grootschalige opslag van energie ten behoeve van peak shaving, is waarschijnlijk ook de interesse voor het proefproject ENERGO opgegeven.

De plannen voor een getijcentrale in de Oosterschelde waren niet geheel nieuw. Een belangrijke studie was uitgevoerd door ir Kooman van Rijkswaterstaat-Deltadienst in 1975 [ref 10]. Hierin werd een bekken beschouwd ter grootte van vrijwel de gehele Oosterschelde met een installatie van 734 MW. Eén van de verwachtingen van de studie was dat de investering gunstig kon zijn in combinatie met de nog te realiseren stormvloedkering. De kosten per geïnstalleerde

kW werden geschat op f9.675,-/kW, in welk geval de kWh-prijs tenminste f0.35 zou zijn (na aftrek van een deel van de kosten over de stichtingskosten van de stormvloedkering). Het rapport werd afgesloten met de volgende conclusie: "een getijcentrale in de mond van de Oosterschelde lijkt dan ook voor lange tijd economisch niet haalbaar te zijn".

2.4 Toetsing aan beoordelingscriteria

Er kunnen twee opties worden beschouwd: een bassin ter grootte van de gehele Oosterschelde (een bassin met een oppervlakte van 35.000 ha¹), of een kleiner bassin in of aan de Oosterschelde (100 ha of meer).

Het aanbod

De resultaten van de verschillende studies die zijn uit gevoerd voor een getijcentrale in de Oosterschelde staan in Tabel 2 samengevat. Volledige afsluiting van de Oosterschelde zou destijds een geïnstalleerd vermogen van 734 MW mogelijk maken volgens de studie van ir. D. Kooman. De jaar opbrengst zou 1243 GWh per jaar bedragen. Onder paragraaf "Beleidsplan" wordt deze optie tot niet haalbaar verklaard. Er wordt hier daarom niet verder op het energieaanbod ingegaan.

Een kleiner bassin ter grote van het Bouwdok kan volgens het ENERGO voorstel een vermogen leveren van 15 MW met een jaaropbrengst van 1.6 GWh. Hierbij kan worden opgemerkt dat het moment van productie van elektriciteit uit een klein bassin geheel bepaald wordt door het getijdenpatroon en bovendien van relatief korte duur is: namelijk de tijd die nodig is om het bassin te legen bij eb. Hier is minder dan een uur voor nodig. Dit is een ongunstige situatie omdat het moment van aanbod niet af te stemmen is op het moment van vraag.

LOKATIE	gem. Getijverschil (m)	Bassin oppervlak (km ²)	Geïnstalleerd vermogen (MW)	Opbrengst (GWh/jaar)	Jaar
Oosterschelde (aan Deltacommissie)	2.4	350(?)	?	?	1954
Oosterschelde (PZEM)	2.4	90	50	182	1967
Oosterschelde (RWS-Deltadienst)	2.3	350	734	1243	1975
Bouwdok Neeltje Jans (ENERGO=PZEM/RWS/ECN)	3.7	1	15	1.6	1981

Tabel 2 Overzicht van verschillende voorstellen voor een getijcentrale in de Oosterschelde.

¹ uit het Beleidsplan Oosterschelde, pagina 7

*Het Beleidsplan Oosterschelde***Functie hiërarchie, landschap en geomorfologie**

De eerste optie valt af omdat het niet denkbaar zou zijn de Oosterschelde volledig af te sluiten met een dichte dam en geheel in dienst te stellen van energieopwekking. De stormvloedkering was juist zodanig uitgevoerd om het oorspronkelijke milieu zoveel mogelijk in stand te kunnen houden. Door volledige afsluiting zal de doorstroming van de Oosterschelde veranderen en het getijdenpatroon worden verstoord. Deze veranderingen dragen consequenties met zich mee voor het huidige ecosysteem en zijn daarom in strijd met het Beleidsplan. De volgende milieubezwaren worden genoemd in referentie [6]:

- "De uitwisseling van water, sediment en biota (kraamkamerfunctie) tussen de zee en het estuarium vermindert; daarmee vermindert in het algemeen de dynamiek en de ecologische potentie van dit hele (kust)systeem.
- In het getijbekken treedt, direct samenhangend met de regimeverandering ten behoeve van de getijcentrale, een sterke vermindering op van de omvang van het getijverschil en daardoor ook van de omvang van de platen en schorren. Daardoor vermindert op zijn beurt onontkoombaar de omvang van de belangrijkste habitat voor de vogels die hun voedsel nu eenmaal moeten halen uit de bodem van de tijdelijk droogvallende platen."

Een voorstel voor een kleiner bassin in of aan de Oosterschelde zal moeten concurreren met bestaande functies van het gebied. Denkbare locaties zijn bijvoorbeeld de Weelse inlagen (figuur 7), de Jacobahaven (figuur 8), het Bouwdok op Neeltje Jans (figuur 9), en Schelphoek (geen figuur). In principe zijn hier mogelijkheden om een afgesloten bassin te creëren. Echter hebben deze gebieden reeds aangewezen functies voor natuur, visserij, recreatie of scheepvaart, die geheel of grotendeels zullen moeten wijken.



Figuur 7 Weelse inlagen (oppervlak ca. 50 Ha groot)



Figuur 8 Jacobahaven (oppervlak ca. 5 Ha groot)



Figuur 9 Bouwdok Neeltje Jans (oppervlak ca. 100 ha groot)

In het ENERGO voorstel voor een proefcentrale werd al gewezen op de volgende consequenties voor het landschap en milieu:

- "Een hoog bekken [...] zal met daarbij behorende voorzieningen een zeer nadrukkelijk beeldelement vormen in de directe nabijheid van de kering.
- Onvoldoende kennis ten aanzien van de inwerking van het pomp- en gereerbedrijf op de geomorfologie in de omgeving en de ter plaatse in het water levende organismen.
- Er bestaat verder een (geringe) kans op stratificatie in het bassin."

Wellicht dat met onderzoek en maatregelen de consequenties kunnen worden gekwantificeerd, gereduceerd en ondervangen. Echter is de wijziging in functie van het aangewezen gebied in strijd met de hoofddoelstelling uit het Beleidsplan, te weten de hiërarchie van functies (natuur, visserij en overige functies) die bepalend is voor het inrichtings- en beheersbeleid (zie paragraaf 1.4).

Financiële beoordeling

De bestudeerde literatuur over getijdenenergie gaat uit van de constatering dat getijdenenergie slechts op enkele plekken op aarde economisch winbaar is, namelijk waar het natuurlijk getijverschil minimaal in de orde van 7 meter bedraagt. Eerdere voorstellen voor de Oosterschelde zijn ook tot vergelijkbare conclusies gekomen. De stand der techniek is niet wezenlijk veranderd ten opzichte van de uitgangspunten die in het ENERGO project zijn aangenomen. Er zijn zover bekend geen nieuwe turbines of technieken op de markt gekomen die

tot aanzienlijke kostenbesparing leiden voor de aanleg en bouw van een getijcentrale.

De investering kan worden gereduceerd wanneer er andere voordelen zijn waarvoor kosten kunnen worden afgeschreven, zoals de realisatie van een brug of verbinding. Deze voordelen lijken zich niet voor te doen in het geval van de Oosterschelde.

Toekomst perspectieven

Gezien de boven genoemde bezwaren, lijkt er weinig perspectief voor toepassing van de technologie elders in Nederland. Er bestaat wel interesse voor unieke locaties met een hoog getijverschil in onder andere Engeland, Argentinië, China, Australië, India en Korea. Er zijn voor al deze locaties verschillende plannen en voorstellen gemaakt, maar het heeft nog niet tot realisatie van de plannen geleid. Terugkerende bezwaren zijn de hoge investeringen en de onzekerheden over de gevolgen voor natuur en milieu.

3. ENERGIEOPWEKKING UIT GETIJDENSTROMING

In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op de mogelijkheden voor energiewinning uit de getijdenstromingen. Er zal hier en daar extra aandacht geschonken worden aan ontwikkelingen die relevant zijn voor actuele initiatieven voor de provincie Zeeland zoals de "Worms Turbine" en de "Whale Tail Wheel". Van beide concepten worden momenteel prototypes gemaakt door Zeeuwse ondernemingen. De prototypes zullen in Zeeuws water worden getest. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een toetsing aan de beoordelingscriteria uit paragraaf 1.4.

3.1 Principe

Energie opwekking uit getijdenstroming is fundamenteel anders dan het voorgaand besproken principe voor de getijcentrale die werkt op getijverschil (hoogteverschil tussen eb en vloed). Terwijl de getijcentrale potentiële energie onttrekt aan water dat op een hoger niveau gelegen is, wordt bij getijdenstroming juist de kinetische energie benut (snelheid van het water). Door een rotor in de vrije stroming te plaatsen kan energie worden onttrokken. De stroomsnelheid van het water achter de rotor is lager dan voor de rotor. Dit principe is identiek aan de werking van windturbines.

Het is onmogelijk om alle kinetische energie te onttrekken aan de stroming; het water heeft altijd een bepaalde snelheid nodig om de rotor te kunnen verlaten. De Duitse ingenieur Betz toonde in 1920 aan dat het theoretische maximum rendement uit een vrije stroom gelijk is aan $16/27$ (0.593) van de totale kinetische energie.

Het rendement van de rotor wordt uitgedrukt met de vermogenscoëfficiënt C_p (van Coëfficiënt of Power) die maximaal gelijk is aan Betz limit ($C_{pmax}=0.593$). Te samen met hydrodynamische verliezen, verliezen ten gevolge van turbulentie en mechanische verliezen in de overbrenging, heeft een waterstromingsturbine in de praktijk een omzettingsrendement tussen de 10% en 40% afhankelijk van het type rotor dat wordt gebruikt.

Het is handig om onderscheid te maken tussen type rotors op basis van hydrodynamische karakteristieken:

1. Rotors die hoofdzakelijk werken op de *weerstandskrachten* ("drag forces" in het engels) zoals een schoepenrad of Savonius rotor. De weerstand ontstaat ten gevolge van de relatieve snelheid tussen de omwentelingen van de rotor (die laag is) en de snelheid van het water die altijd hoger is (omloopsnelheid kleiner dan 1). Dit zijn doorgaans simpele constructies, die eenvoudig te fabriceren zijn, maar wel veel materiaal bevatten en daardoor vaak een relatief laag vermogen hebben in verhouding tot hun omvang. De vermogenscoëfficiënt is in praktijk niet hoger dan ongeveer 0.25. Het is een low-tech oplossing die vooral interessant is voor toepassingen in ontwikkelingslanden.

2. Rotors die hoofdzakelijk energie omzetten door gebruik te maken van hydrodynamische *draagkrachten* ("lift forces" in het engels). Deze rotors maken gebruik van vleugels of bladen met "aero-" (eigenlijk hydro-) dynamische vorm zoals vliegtuigvleugels of de bladen van een moderne windturbine en halen een optimaal rendement bij omwentelingsnelheden die een aantal malen hoger liggen dan de stromingssnelheid (omloopsnelheid groter dan 1). Vermogenscoëfficiënten tot 0.50 zijn mogelijk. Deze rotors hebben doorgaans een compacte constructie met een hoog omzettingsrendement (goede verhouding tussen vermogen en omvang). De productie van de aërodynamische bladen vereist hightech expertise. Binnen deze laatste categorie kan weer onderscheid gemaakt worden tussen twee typen:

- axiale rotors, waarbij de richting van de stroming parallel is aan de as van de rotor en de bladen radiaal geplaatst zijn (zoals een Horizontale-As Windturbine (HAWT)). De rotor moet dus altijd gericht worden op de richting van de stroming.
- cross-flow rotors, waarbij de richting van de stroming haaks op de as van de rotor staat en de bladen parallel aan de as zijn geplaatst. (zoals een Verticale-As Wind Turbine (VAWT), ook wel bekend als de Darrieus molen). Een speciale variant is de zogenaamde Voith-Schneider turbine, waarvan de rotor bladen beweegbaar zijn en optimaal worden afgesteld op de stroomsnelheid. De rotor kan zowel een horizontale as als verticale as hebben en is "omni-directional", dwz kan stromingen uit alle richtingen ontvangen en hoeft niet gericht te worden. Dit kan een voordeel zijn bij getijdenstromingen, waar de stroming uit twee tegenovergestelde richtingen komt.

Voor alle typen rotoren geldt dat bewegende delen zoveel mogelijk moeten worden vermeden. Bewegende delen leiden tot rendementsverliezen, extra kosten en gevoeligheid voor falen.

In de volgende paragraaf wordt een aantal praktijkvoorbeelden gegeven.

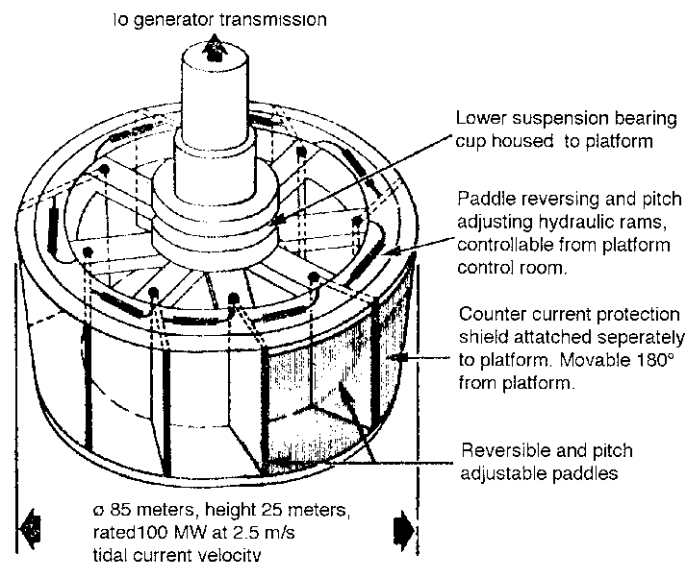
3.2 Praktijkvoorbeelden

De belangrijkste naoorlogse ontwikkelingen op het gebied van waterstromingsturbines vonden plaats van eind jaren 70 tot begin jaren 80 in de periode van aanhoudende olieprijsstijgingen op de wereldenergiemarkt. Recentelijk is er hernieuwde interesse voor deze vorm van energieomzetting vanwege een groeiend bewustwording van het gevaar van het versterkte broeikas effect en een streven naar een meer duurzame samenleving.

De vroegste en meeste intensieve ontwikkelingen komen uit Amerika gevolgd door Groot-Brittannië, Canada, Australië, Japan en Rusland. Referentie [11] behandelt meer dan 70 publicaties over waterstroming en geeft een uitgebreid overzicht van ruim 30 projecten wereldwijd. Hieronder volgen de belangrijkste ontwikkelingen.

Weerstandrotoren

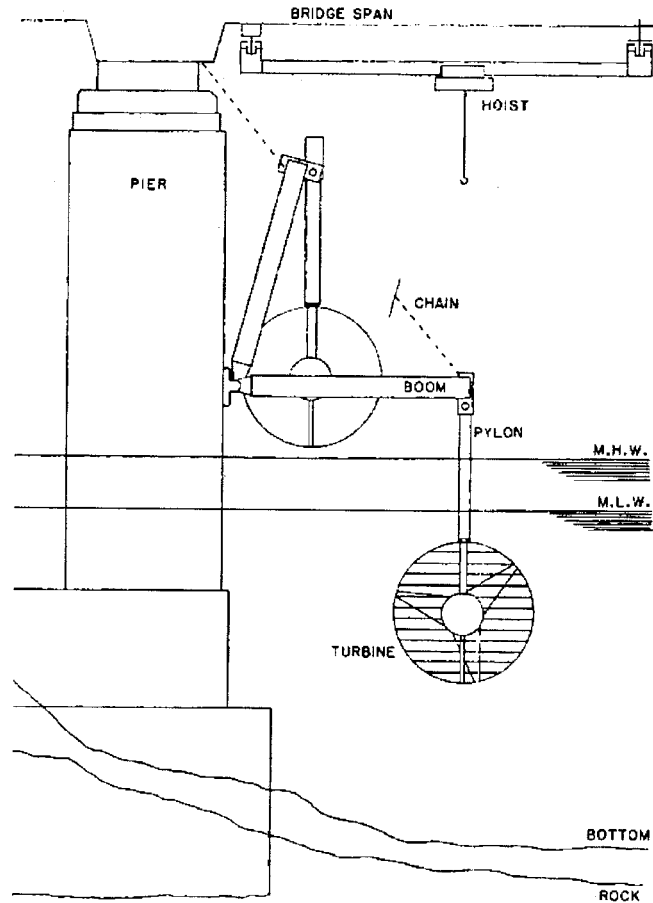
Rotoren die werken op het principe van weerstand zijn beter bekend als eenvoudige watermolens al dan niet met verstelbare schoepen. Het is een eeuwenoud principe waarvan de voorbeelden legio zijn. Recente voorbeelden zijn hoofdzakelijk renovatie projecten van oude watermolens of toepassingen voor ontwikkelingslanden. Gezien de slechte verhouding tussen vermogen en omvang van de constructie, lijkt dit type turbine weinig economisch rendabel voor fabricage en toepassingen in niet-ontwikkelingslanden. Figuur 10 geeft een voorbeeld van een getijdenmolen met verstelbare schoepen.



Figuur 10 100 MW getijdenmolen met verstelbare schoepen ontworpen maar nooit uitgevoerd in Australië (Weber, 1976).

Axiale rotoren

De grootste praktijk experimenten hebben plaats gevonden in de East River in New York waar een 60 kW turbine met axiale rotor was geïnstalleerd. Er waren verder plannen voor een 30 kW turbine ontwikkeld door de New York University. Er is weinig bekend over de resultaten van deze experimenten.



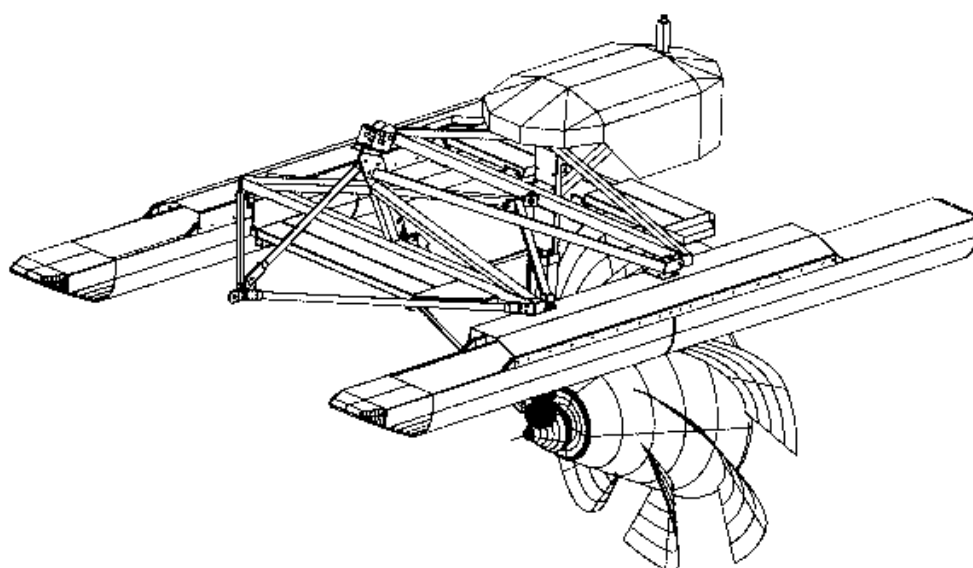
Figuur 11 Schema voor een 30 kW turbine gemonteerd aan een brug over de East River in New York.

Veel bekender zijn de activiteiten van ITPower. Ruim 25 jaar geleden waren zij al actief in ontwikkelingslanden met waterstromingsturbines ten behoeve van irrigatie. In 1994 ontwikkelde de groep een 15 kW experimentele turbine die korte tijd getest is in stromingen (tot 2.5 m/s) van Loch Linnhe, Schotland (zie figuur 12). Met deze ervaring leidt ITPower nu een consortium in Europees verband om een eerste generatie onderwater molens te ontwikkelen en te realiseren voor de kust van Groot-Brittannië. De eerste molen zal een vermogen van ongeveer 300 kW hebben. Uiteindelijk is het doel om 1 MW turbines te ontwikkelen.



Figuur 12 15 kW turbine gezamenlijk ontwikkeld door IT Power, National Engineering Laboratory en Scottish Nuclear in 1993.

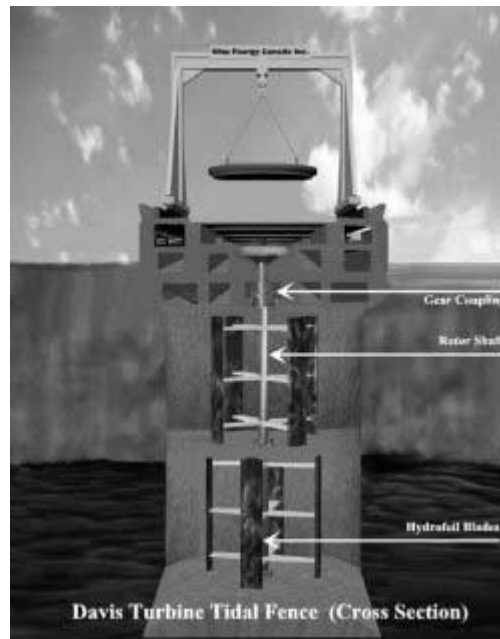
Andere interessante ontwikkelingen betreffen de Tyson Turbine, getest in de Straat van Apsley in Australië en de Tocardo turbine die in paragraaf 3.3 verder wordt behandeld.



Figuur 13 Tyson turbine

Cross flow rotoren

In Canada zijn sinds begin jaren 80 verscheidene prototypes van cross-flow of Darrieus turbines ontwikkeld (max. 5 kW) en getest zowel in laboratorium omgeving als ook op zee. The Blue Energy Company uit Vancouver is tot op heden actief bezig de Davis Turbine te exploiteren in onder meer de Filippijnen. Er is geen informatie bekend van gerealiseerde projecten.

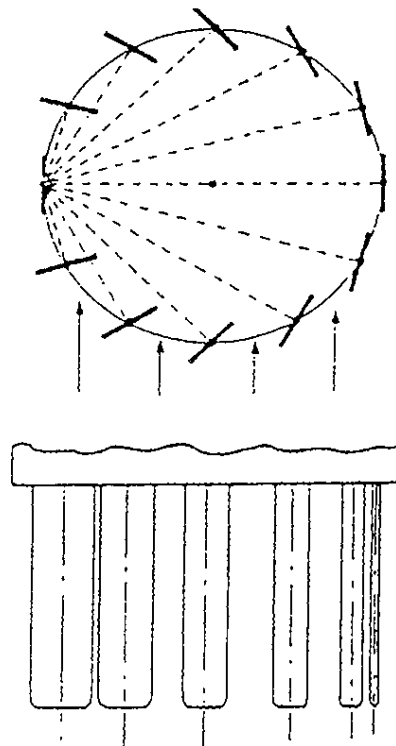


Figuur 14 Davis Turbine. Schematisch overzicht van hoe de turbines in een dam bij Dalupiri (Filippijnen) worden geplaatst.

In Japan heeft waarschijnlijk de langst geïnstalleerde waterstromingsturbine bestaan. Nihon Universiteit ontwikkelde een 3.5 kW Darrieus turbine die van 1983 tot 1988 op de zeebodem van de Straat van Kurushima heeft bestaan.

Cross-flow rotoren van Voith Schneider type

Voith Schneider turbines zijn voor eerst getest door de US Navel Academy in 1980. Het programma is gestaakt omdat er geen goed werkende oplossing kon worden gevonden voor het regelen van de posities van de bladen. In Japan zijn goede resultaten verkregen met een Voith Schneider turbine (een rotor coëfficiënt (C_p) van 0.25 en een omloopsnelheid van 1.25). In Italië bestonden serieuze plannen voor het realiseren van een 100 MW waterstromingscentrale in de Straat van Messina gebruikmakende van 100 Voith Schneider turbines. Het projectteam bestond uit onder meer Ponte d'Archimede en Voith GmbH. Er is weinig meer vernomen van deze plannen, maar twee onderzoeksgroepen op Italiaanse universiteiten voeren momenteel theoretisch en experimenteel onderzoek uit naar de optimalisatie van de Voith Schneider turbine en zijn op zoek naar Europese partners voor vervolg onderzoek.



Figuur 15 Schema van Voith Schneider type turbine met cyclisch bewegende bladen voor optimaal hydraulisch rendement.

Tenslotte werd recentelijk aangekondigd² dat Ponte d' Archimede met Europees steun een getijcentrale op getijdenstroming gaat bouwen bij de Zhoushan eilanden voor de Oost kust van China's Zhejiang provincie (kosten 1.2 miljoen US Dollar).

Ook in Nederland is in het verleden onderzoek verricht naar dit type turbine door het NPS (voormalig Marin) in Wageningen in opdracht van de Koninklijke Maatschappij "de Schelde". In een sleeptank zijn experimenten uitgevoerd waarbij men met zeer hoge snelheden (7 m/s!) een rotor coëfficiënt behaalde van 0.33. Ook dit project zou zijn gestaakt wegens problemen met het stellen van de bladposities.

² 01/08/99: zie: ce.cei.gov.cn/einv/d31m0a01.htm

3.3 Ervaringen in Nederland

In Nederland is een aantal initiatieven ontstaan om concepten te ontwikkelen waarmee getijdenstromingen benut kunnen worden. Het toeval wil dat van elk type rotor (weerstand, axiaal en cross-flow) hierboven beschreven er één praktisch voorbeeld bestaat in Nederland. Deze zullen hieronder nader worden behandeld:

Tocado Turbine (axiale rotor met venturi behuizing)

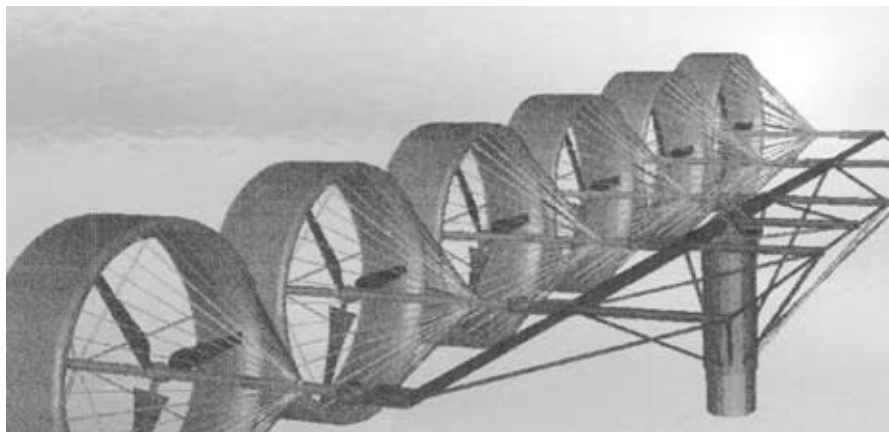
Teamwork Technology (Zijdewind, NH) is op verschillende vlakken betrokken bij projecten op het gebied van duurzame energie. Het bedrijf neemt onder andere deel aan het project de Archimedes Wave Swing (AWS). De AWS is een golfenergie turbine, waarvan een prototype wordt gerealiseerd voor de kust van Portugal. Tevens beschikt het bedrijf over de knowhow en de rechten tot exploitatie van de Tocardo turbine (figuur 16).



Figuur 16 Tocardo Turbine (Aqua75). De behuizing in de vorm van een venturi hangt onder een ponton. De generator is ingebouwd zoals een Bulb generator in lijn met de as van de rotor en geheel onder water.

Deze turbine is oorspronkelijk ontwikkeld door Dhr. van der Pol van het voormalige bedrijf Tocardo bv uit Rhenen voor kleinschalige energiewinning uit rivierstromingen (één richting). Het prototype met een vermogen van 1 kW bestaat uit een drijvend ponton met daaronder een rotor die geplaatst is in een behuizing met de vorm van een venturi. De behuizing (augmentor/diffussor) dient ervoor de stroomsnelheid door de rotor te vergroten (een vergrotingsfactor van 4). Het voordeel van de venturi is dat de rotor compacter kan worden uitgevoerd en dat de snelheid hoger wordt. Het rendement zal echter niet toenemen, en waarschijnlijk zelfs afnemen. Potentiële nadelen zijn de extra kosten voor de behuizing en constructie die voor de ondersteuning daarvan nodig is en de toenemende weerstand van het water op de gehele installatie.

Sleeptesten waarbij de turbine aan een zijde van een boot bevestigd was, resulteerden in een totaal omzettingsrendement (water naar elektriciteit) rond de 17%.



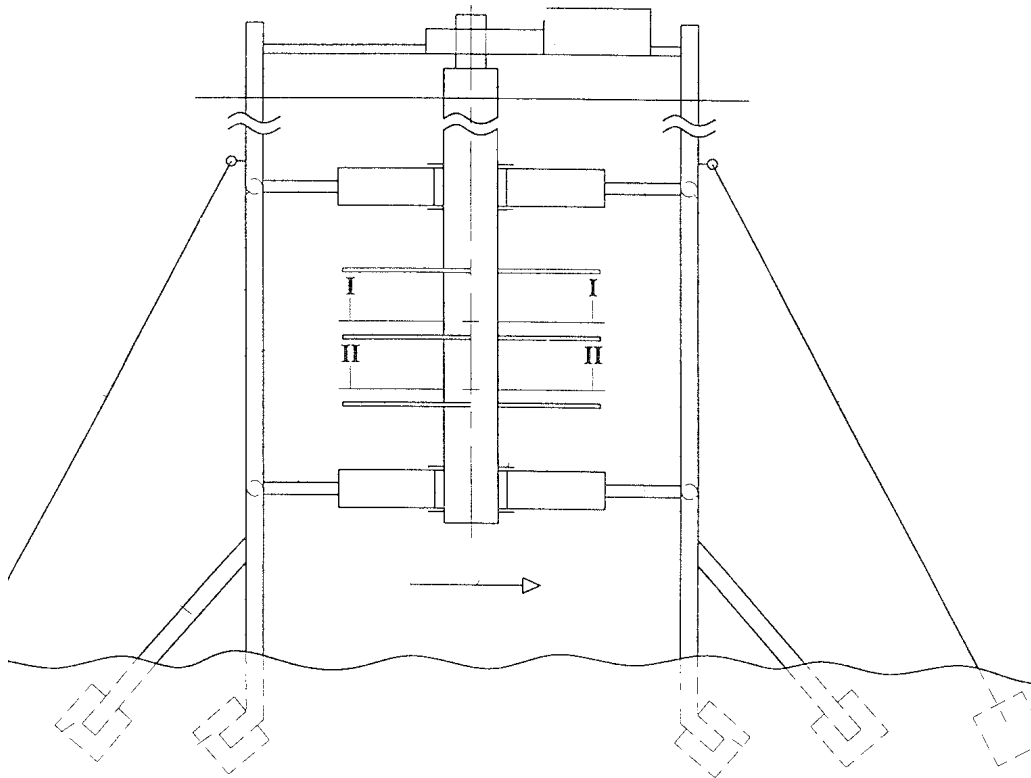
Figuur 17 Artist impressie van een getijcentrale (150-300 kW) zoals voorgesteld door Teamwork Technology.

Onlangs (Metro, 8 maart 2000) melde het bedrijf dat er plannen bestaan om nog dit jaar een turbine te plaatsen in het Marsdiep bij Den Helder. Het zou om een pilot project gaan met één turbine van 7 meter diameter. Daarna kan deze configuratie uitgebreid worden tot zes turbines met een capaciteit tussen de 150 en 300 kW afhankelijk van de plaatsing en stroomsnelheid (figuur 17).

Worms Turbine

De Worms turbine is een concept bedacht door Dhr Worms en is ook bekend onder de naam "Peddelturbine" of "Water Tol". Het concept omvat een schoepenrad dat volledig onder water wordt geplaatst en waarvan de schoepen zodanig kunnen bewegen dat ze gedurende de "inefficiënte" helft van omwenteling minimale weerstand veroorzaken in de stroming. Het schoepenrad kan in twee richtingen draaien (zowel bij uitgaand als inkomend tij). In 1985 heeft het Waterloopkundig Laboratorium te Delft een schaalmodel getest. De resultaten van dit onderzoek zijn niet openbaar gemaakt.

In 1993 is in samenwerking met Hubert Stavoren (fabrikant van oa. waterzuiveringsinstallaties) een werkend prototype gebouwd en geïnstalleerd bij de sluisen van Kornwerderzand in de Afsluitdijk. De installatie had vier wielen van 3.5 m diameter met elk 3 schoepen. De constructie is na een maand los geslagen van zijn ankerkabels, door de sluisen gezogen en gestrand op het wad. Of de oorzaak van dit falen een constructiefout is geweest of een onderschatting van de weerstandskrachten op de installatie is niet duidelijk. Het is niet bekend hoe de installatie gefunctioneerd heeft.

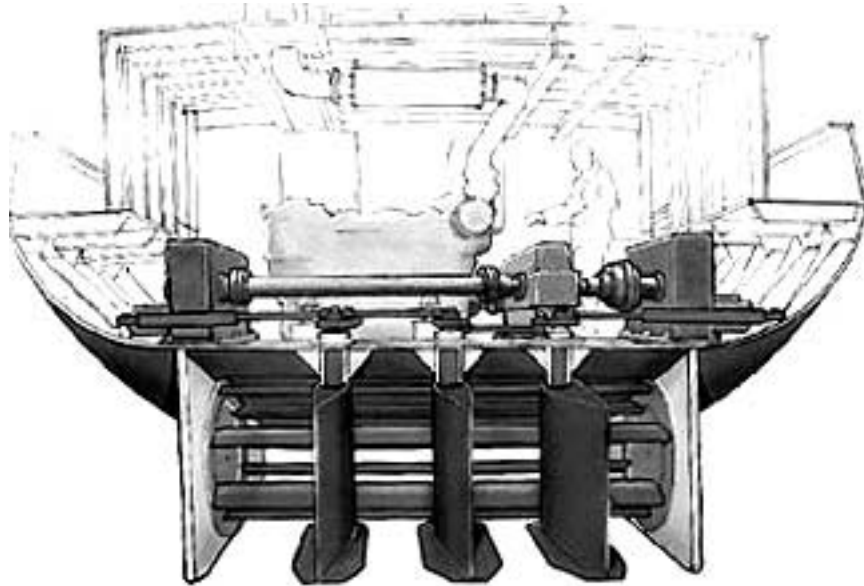


Figuur 18 Overzicht van de Worms turbine met bevestigingsconstructie. De as loopt verticaal met daar aan bevestigd meerder schoepen. De pijl geeft de stroomrichting van het water aan.

Dankzij steun van Senter in de vorm van een subsidie (f245.000) en onder coördinatie van het bedrijf WattEng b.v. wordt momenteel gewerkt aan een tweede prototype door Swets Marine Services in Terneuzen. Dit prototype zal eerst zonder generator worden getest. Het prototype zal nog dit voorjaar worden getest. De turbine wordt bevestigd aan een boot en zal op verschillende snelheden door -stil- water worden gesleept ten einde de vermogensopbrengst te bepalen. Indien de testen succesvol zijn (wanneer tussen de 80-100kW kan worden gegenereerd), is het de bedoeling om het prototype verder uit te bouwen tot een permanente netgekoppelde installatie (figuur 18). Er is reeds een overeenkomst gesloten met Nuon voor een Standaard Terugleververgoeding (STV) voor de elektriciteit die wordt geproduceerd (15 cent per kWh).

Whale Tail Wheel

Het Whale Tail Wheel is een prototype scheepsaandrijving dat momenteel op een binnenvaartschip met succes wordt ingezet en beproefd door Whale Tail Systems B.V. uit Leiden. Het Whale Tail Wheel bestaat uit twee onder water draaiende trommels die in een scheg achter onder het schip zijn geplaatst. Tussen de trommels zijn 4 of 6 bladen geplaatst. Deze bladen draaien rond en worden tijdens het draaien voortdurend in de hydrodynamische ideale positie gezet (figuur 19).



Figuur 19 Het Whale Tail Wheel achter onder een schip geplaatst. De bladen draaien rond en worden tijdens het draaien voortdurend in de hydrodynamische ideale positie gezet

Hydrauvison B.V. te Schoondijke heeft zich verdiept in energiewinning uit waterstroming en is betrokken geweest bij de ontwikkeling van de Archimedes Wave Swing (zie Teamwork Technology). Momenteel onderzoekt het bedrijf de inzetbaarheid van de Whale Tail Wheel technologie voor energieopwekking. Hydrauvison heeft hiervoor een ontwikkelingskrediet ontvangen van de provincie Zeeland. Een prototype met een diameter van 60 cm en een (blad) lengte van 2 m is reeds beproefd aan de zijkant van een schip. Bij een gesimuleerde stroomsnelheid van 3 m/s, leverde de turbine een positief vermogen.

Een tweede prototype dat gebouwd wordt, zal een diameter van 1.5 m en (blad) lengte van 3.5m krijgen.

Het verschil met de Voith-Schneider turbines (zie 3.1) is dat ieder blad afzonderlijk van positie kan veranderen. Hierdoor kan het systeem nog optimaler worden afgesteld, zodat de rotor een hoger rendement heeft over een reeks van

omloopsnelheden. Dit is een belangrijk voordeel wanneer de turbine op constante snelheid moet draaien. Tenslotte kan de turbine door gebruik van de variabele bladposities eenvoudig zelf starten en stoppen.

Hier tegenover staan de nadelen van een ingewikkeld en kostbaar mechaniek. Vergeleken met een Darrieus type rotor met vaste bladposities, is dit systeem potentieel onderhoudsgevoeliger. Een ander punt van aandacht dat geldt voor de cross-flow rotor in het algemeen, is de gevoeligheid voor vermoeiing. De bladen worden tijdens een omwenteling aan beiden zijden afwisselend belast.

3.4 Toetsing aan beoordelingscriteria

Er kunnen twee opties worden beschouwd: grootschalige energieopwekking uit de stroming direct in de stormvloedkering of kleinschalige opwekking in of buiten de kering.

Het aanbod

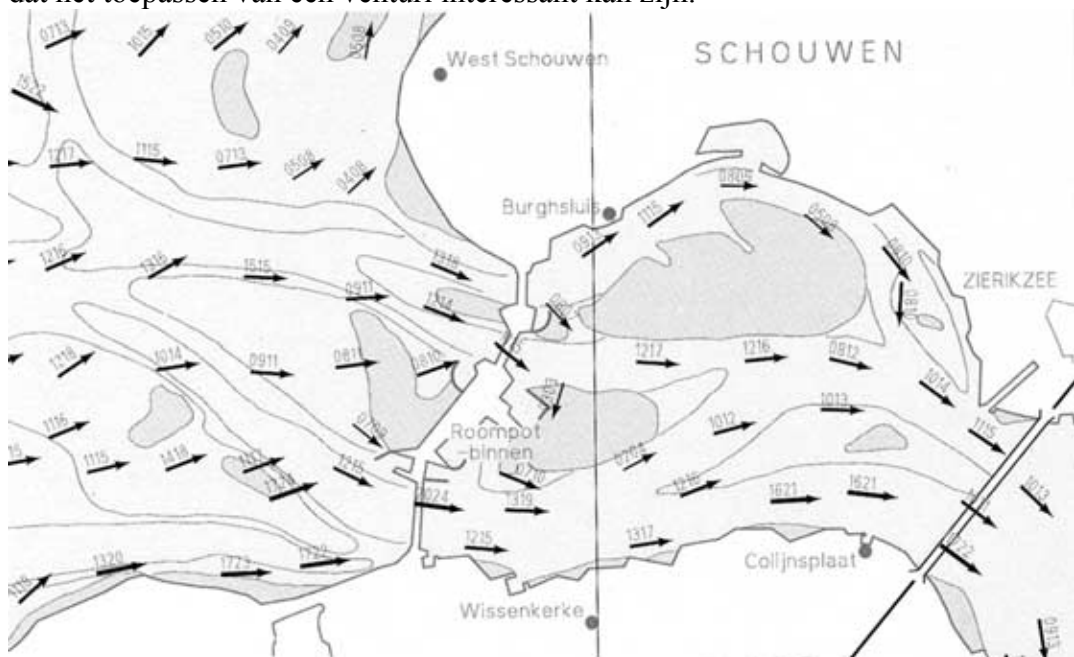
Het aanbod uit de getijdenstromingen wordt bepaald door de stroomsnelheid v (m/s) en het beschikbare doorstromingsoppervlak A (m²). Het vermogen wordt in grote mate bepaald door de derdemachtsrelatie met de stroomsnelheid, zoals volgt uit de volgende formule voor het maximale potentiële vermogen P :

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

Het gemiddeld technische beschikbare vermogen P_{gem} wordt beperkt door het rendement van de turbine η en de gemiddelde snelheid over een getijperiode van 12 uur en 25 minuten. Uitgaande van een rendement η van 0.2 en een correctie van 0.5 voor de middeling van de stroomsnelheid [ref 12], wordt het technische aanbod gegeven door:

$$P_{gem} = 0.05 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

Het is duidelijk dat een verhoging van de snelheid een veel groter effect heeft op het vermogen dan een vergroting van het doorstromingsoppervlak. Vandaar dat het toepassen van een venturi interessant kan zijn.



Figuur 20 Detail uit de Stroomatlas van de Westerschelde/Oosterschelde, 1 uur voor hoog tij. De piek stroomsnelheid bij springtij is vlak achter de Roompotsluizen: 2.4 knopen (1.3 m/s)

De stroming is het hoogst in de kering (4 tot 5 m/s). Het maximale aanbod uit de Oosterschelde ligt dus hier. Buiten de kering zijn de stromingen minder spectaculair, en hooguit 1.3 m/s (zie figuur 20). Dit zijn stroomsnelheden die zich overigens ook voordoen voor de Zeeuwse kust in open zeewater

Voor een eerste orde benadering van het gemiddeld (continue) technische beschikbare vermogen door een oppervlak ter grootte van de totale doorstroomopeningen van de kering is een eerste orde benadering opgenomen in de bijlage. De resultaten staan weergegeven in tabel 3:

Stroom snelheid [m/s]	Opgestelde vermogen [MW]	Continue vermogen[MW]
1	2	1
2	14	7
3	48	24
4	115	57
5	224	112

Tabel 3 Opgesteld en continue vermogen uit getijdenstroom voor verschillende piek stroomsnelheden voor een doorstomingsoppervlak ter grootte van de opening van de Oosterscheldekering

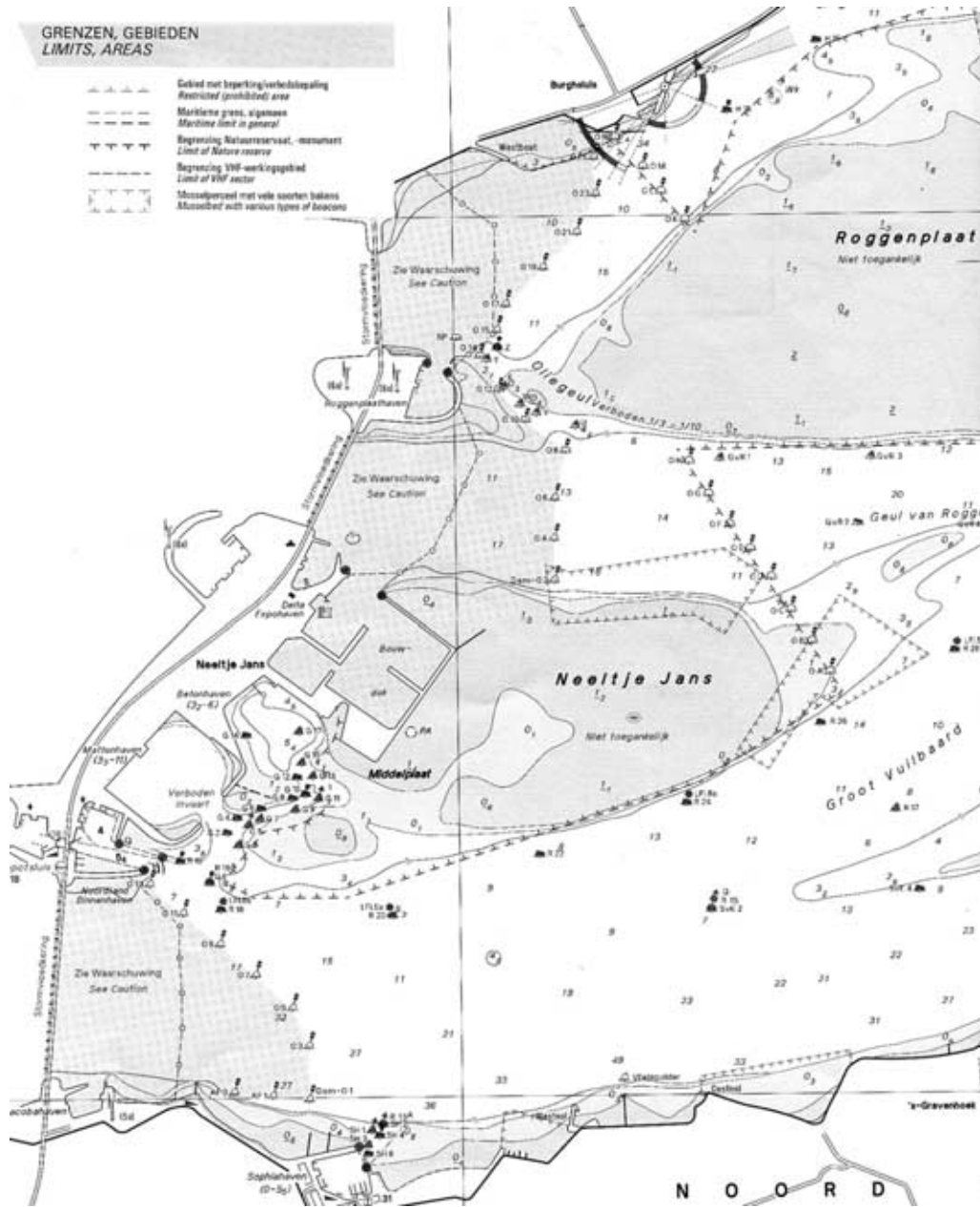
Uit de tabel is te lezen dat een piek vermogen tussen de 100-200 MW mogelijk zou kunnen zijn in de gehele opening van de Oosterschelde. Een installatie van gelijke grootte daar buiten zou hooguit 2 tot 10 MW bedragen. Dit komt overeen (ook qua oppervlak!) met 1 tot 7 windturbines van het grootste commerciële type van 1,5 MW.

Het Beleidsplan Oosterschelde

Functie hiërarchie

De primaire doelstelling van de deltawerken is het bieden van veiligheid voor de bevolking. Het plaatsen van turbines in de kering mag hieraan geen afbreuk doen. Hoewel reeds is aangetoond dat het aanbod niet zeer groot is, bestaan er in principe mogelijkheden voor energie opwekking zonder afbreuk te doen aan de primaire doelstelling, wanneer er tegemoet kan worden gekomen aan strenge technische beperkingen (krachten mogen geen invloed op fundering hebben, turbine moet verwijderbaar zijn in noodsituaties etc). Ook al kan aan deze eisen worden voldaan, dan is de invloed van een dergelijke installatie op het getijverschil een belangrijk tweede criterium (zie hierna).

Voor een installatie buiten de kering zullen lokaal functies moeten wijken (figuur 21). Zo zullen scheepvaart en recreatie (duikers!) in een bepaalde straal rondom de installatie moeten wijken. Verder zal moeten worden onderzocht of er speciale maatregelen nodig zijn om watervogels, vissen en zeehonden te weren. Een scherm voor en achter de turbine zou voldoende kunnen zijn.



Figuur 21 Detail van de Hydrografische kaart [ref 13]. De markeringen geven grenzen aan van gebieden die niet toegankelijk zijn vanwege natuur, visserij of veiligheid (bij de kering). Alleen achter de Roompot sluis ten noorden van de Jacoba haven is de begrenzing beperkt tot een veiligheidszone. Wellicht zou hier mogelijkheid voor een proefproject gevonden kunnen worden.

Tenslotte kan de realisatie van een vrije stromingsturbine in of buiten de kering tevens een recreatieve of educatieve functie vervullen, wanneer er informatie wordt verschaft over het onderwerp. Dit gebeurt nu ook voor de windturbines, waarover informatie te vinden is in het bezoekerscentrum Neeltje Jans.

Landschap

De plaatsing van vrije stroom turbines onder water behoeft in vergelijking met een getijcentrale met een bassin, slechts kleine civiel technische ingrepen. Er hoeft geen dam te worden gebouwd of land onder water te worden gezet. De ingreep op het landschap is dus aanzienlijk kleiner. Wanneer de turbines in de kering zelf geplaatst worden, zijn de civiel technische voorzieningen reeds aanwezig. De turbines worden dan in de openingen tussen de pijlers geplaatst. Bij plaatsing buiten de kering kan gedacht worden aan twee mogelijkheden:

- een drijvend ponton dat verankerd is aan de zeebodem, kust of civiel kunstwerk (brug) of,
- een turbine die ondersteund wordt door één of meer masten geplaatst op de bodem (analoog aan offshore windturbines).

Geomorfologie

Beide opties hebben lokaal invloed op het stromingspatroon en de geomorfologie. Voor de turbine kan er depositie van slib en zand plaatsvinden, terwijl achter de turbine lokaal ontgroning plaats kan vinden. Het proces van verdieping en verontdieping wisselt van richting met het keren van het tij. Dit effect werd reeds onderkend bij het ontwerp van de Stormvloedkering. Om het effect te ondervangen is over een strook van 650 m aan weerszijden van de kering een bodembescherming aangebracht. De precieze invloed van een vrije stromingsturbine op de bodem zal nader moeten worden onderzocht. Parameters als schaalgrootte, verankeringsmethode, venturi effecten en type rotor hebben een bepaalde invloed. In referentie [8 en 15] wordt er nader op dit onderwerp ingegaan.

Invloed op getijverschil en stroming

Hoewel het in het Beleidsplan niet expliciet genoemd wordt, is de afname van het getijverschil een belangrijk beoordelingscriterium. Rijkswaterstaat wijst er op dat significante afname van het getijverschil onacceptabel is. Het is echter onontkoombaar dat energieopwekking uit het getij samen gaat met een afname van het getijverschil. De aanleg van de kering heeft de opening tot de Oosterschelde vernauwd tot ongeveer 20% van het oorspronkelijke oppervlak. Door deze vernauwing is het getijverschil met ongeveer 13% afgenomen. Het plaatsen van turbines in deze opening gaat gepaard met een verdere vernauwing van de openingen en dus afname van het getijverschil. Het is daarom nuttig hier een eerste orde benadering te maken van de relatie tussen de schaal waarop energie wordt onttrokken en het effect daarvan op het getijverschil. Onderstaande tabel geeft de resultaten van de berekening (zie bijlage voor berekening). We zien dat bij een opgesteld vermogen van 10 MW (2.5 MW continu) de afname van het getij 40 mm is (over twee getijperioden). Bij een proefproject van 100 kW opgesteld vermogen (50 kW continu) is de afname van het getij circa 0,4 mm en daarmee niet geheel verwaarloosbaar. Het effect van deze afname op het milieu is niet eenvoudig te bepalen.

Opgesteld vermogen	Continu vermogen	Getijdeafname [mm]
100 kW	50 kW	0,4
1 MW	500 kW	4,0
10 MW	5 MW	40

Tabel 4 Potentieel uit getijdenstroming en het effect op het getijverschil in de Oosterschelde.

Het is mogelijk om de gevolgen van deze afname op de omvang van het wateroppervlak in Oosterschelde te analyseren met behulp van GIS systemen. Dit valt echter buiten deze opdracht en is bovendien niet relevant. Rijkswaterstaat rapporteert [, zie ook 1.2] dat de Oosterschelde nog in een aanpassingsfase is. De belangrijkste verstoringen worden veroorzaakt door de zandhonger van de geulen. Een afname van het getij met een aantal *tiende* millimeters wordt als niet significant beschouwd door benaderde experts van Rijkswaterstaat. Kleinschalige energieopwekking uit de stromingen in de Oosterschelde (100-500 kW) zal daarom een niet significant effect hebben op het getijverschil.

Financiële beperkingen

Er zijn nog geen commerciële toepassingen bekend van energieopwekking uit getijdenstromingen en dus ontbreken harde financiële gegevens hierover. IT Power verwacht met haar eerste generatie onderwatermolens elektriciteit op te wekken voor minder dan 0.10 euro/kWh (*f*0.24 per kWh). De Worms Turbine kan tegen een standaard vergoeding van *f*0.15 per kWh elektriciteit verkopen aan Nuon (de kostprijs van de opgewekte electriciteit is onbekend). De technologie zit nog in een ontwikkelingsfase en vraagt eerst nog om investeringen voor verder onderzoek en experimentele beproevingen van prototypes. Het is daarom niet mogelijk om op basis van de huidige gegevens een kostprijs per kWh aan te geven.

Toekomst perspectieven

Elders in Nederland zijn mogelijk nog interessantere locaties te vinden: de Westerschelde kent stroomsnelheden tot 2.2 m/s. Ook stromingen rond de Wadden kunnen hoog zijn. Het potentieel is nog niet eerder in kaart gebracht en verdient verder onderzoek, waarmee het marktpotentieel voor Nederland kan worden bepaald. Opgemerkt kan worden dat ook in deze gebieden de milieu eisen veelal stringent zijn (bijvoorbeeld de Waddenzee).

Tenslotte kan de technologie een interessant export product worden als er buiten Nederland een aantoonbaar potentieel is. Een EU-studie uit 1996 heeft 106 locaties met een hoge gemiddelde stroomsnelheid geïnventariseerd. Een technisch potentieel van 12.5 GW is hiervoor geschat, goed voor 48 TWh per jaar [ref. 14].

4. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

4.1 Energieopwekking uit het getijverschil

Energieopwekking uit het **getijverschil** (het verschil tussen eb en vloed) biedt geen goede kansen in de Oosterschelde. Hoewel het aanbod in principe groot is (734 MW), is de implementatie -met name op grote schaal- in strijd met de doelstellingen van het Beleidsplan. Verder lijkt het vooralsnog economisch onrendabel om energie op te wekken bij een hoogteverschil van minder dan 7 meter. Er zijn ook geen bijkomende kostenbesparende voordelen voor de Oosterschelde in de vorm van bijvoorbeeld een verbindingsweg, omdat deze infrastructuur reeds aanwezig is. Tenslotte zijn er weinig perspectieven om de opgedane ervaring en kennis elders toe te passen in Nederland.

4.2 Energieopwekking uit het getijdenstroming

Energieopwekking uit **getijdenstromingen** biedt meer kansen in de Oosterschelde. Het aanbod is beperkt tot een aantal specifieke locaties, waarvan de stormvloedkering het grootste aanbod biedt (100-200 MW), daarbuiten is het aanbod geringer gezien de lage stroomsnelheden (1-10 MW). Realisatie *op grote schaal* van deze optie is in strijd met het Beleidsplan, vanwege de invloed op getijverschil. Een eerste orde benadering toont aan dat het effect van een *grootschalige* toepassing (10 MW) een niet verwaarloosbaar effect op het getijverschil in de Oosterschelde zal hebben (in de orde van 4 cm op het huidige getijverschil van 285 cm). Gezien dit effect bestaat er twijfel over het achterwege blijven van mogelijke negatieve gevolgen voor het ecosysteem (voorzorgsprincipe uit Beleidsplan). Het opwekken van energie uit getijdenstromingen *op grote schaal* in de Oosterschelde kan daarom niet worden aanbevolen.

Het effect van *kleinschalige* energieopwekking uit de getijdenstromingen (tot 500 kW) op het getijverschil is veel kleiner (0.4 mm per 100 kW opgesteld vermogen). Hoewel dit effect niet ontkend mag worden, wordt het belang ervan verwaarloosbaar geacht (door Rijkswaterstaat) ten opzichte van andere aanpassingsprocessen die de Oosterschelde ondergaat. *Kleinschalige* energie opwekking uit de getijdenstromingen lijkt dus acceptabel.

Wanneer een proefinstallatie wordt toegestaan rond de Oosterschelde moet een goede locatie worden aangewezen. De meest optimale locatie moet gezocht worden daar waar de installatie geen hinder veroorzaakt voor scheepvaart, recreatie of visserij en waar de stroomsnelheden hoog en laminair zijn. Verder moet de installatie goed bereikbaar zijn voor onderhoud en metingen. Een locatie in de Stormvloedkering, tussen de peilers, voldoet het beste aan deze voorwaarden. Mocht deze locatie technisch niet te realiseren zijn, dan moet een proeflocatie gezocht worden in de buurt van de kering, maar buiten het turbulente gebied.

Er zijn perspectieven voor toepassingen van deze vorm van energieopwekking elders in Nederland. Hoge stromingen zijn te vinden voor de Zeeuwse kust in de Noordzee, de Westerschelde en rond de Wadden eilanden. Voor deze loca-

ties zullen echter ook de consequenties voor milieu, scheepvaart, etc. moeten worden onderzocht. Het Europees potentieel is geschat op een technisch realiseerbaar vermogen van 12.5 GW. Tenslotte beschikt de provincie Zeeland bij uitstek over de nodige kennis, faciliteiten en omgeving om deze technologie verder te ontwikkelen.

4.3 Aanbevelingen

De technologie is nog in ontwikkeling en vraagt nog om verder onderzoek en studies. Wellicht is hier een rol voor de provincie Zeeland weggelegd om faciliterend op te treden in deze ontwikkelingen. De provincie zou hier baat bij hebben indien een nieuwe industrie kan worden gestimuleerd en ontwikkeld met een duidelijk marktpotentieel. Wellicht kan zo op termijn een interessant export product ontstaan. Dit marktpotentieel moet dan wel aangetoond worden middels nader onderzoek.

Binnen de provincie Zeeland bestaan de nodige kennis, faciliteiten en omgeving om deze technologie verder te ontwikkelen. Voorop staat de kennis en ervaring door de realisatie van de Deltawerken. Verder zijn het RIKZ, het Oekologische Instituut te Yerseke en de Hogeschool van Zeeland kennisinstituten die betrokken kunnen worden bij deelonderzoeken. Ook is er de nodige industrie aanwezig -scheepswerven- met kennis van offshore installaties. Deze kennis zou gecoördineerd en gebundeld kunnen worden.

De volgende aanbevelingen worden gedaan aan de provincie Zeeland:

1. Geen energieopwekking uit het **getijverschil** (het verschil tussen eb en vloed) in de Oosterschelde,
2. faciliterend optreden bij initiatieven voor *kleinschalige* energieopwekking uit de **getijdenstromingen** (tot 500 kW) in de Oosterschelde op een aan te wijzen proeflocatie,
3. bundelen en verspreiden van de kennis, initiatieven en actoren via een voorlichtingsbijeenkomst of workshop over het onderwerp “energie uit getijdenstroming” (te betrekken actoren: WattEng, Swets Marine Services, Whale Tail Systems, Hydrauision, Teamwork Technology, ECN, MARIN, Nuon, RWS e.a.).

5. REFERENTIES

1. "De Stormvloedkering in de Oosterschelde voor veiligheid en milieu", Dosbouw, 1987.
2. "Zandhonger Oosterschelde", RWS, Rijksinstituut voor Kust en Zee, RIKZ/AB-2000.803X, december 1999
3. De Oosterschelde naar een nieuw onderwaterlandschap, Rijkswaterstaat, Dienst getijdewateren, Eindrapport Geomor, Nota DGW.Ao 87.029, 1987
4. "The Potential for Tidal Energy within the European Community", ETSU-OPET, DG XVII, 1991.
5. "Stroomatlas HP15", Westerschelde, Oosterschelde, Uitgegeven door de Chef der Hydrografie, 1992.
6. "Beleidsplan Oosterschelde 1995", Stuurgroep Oosterschelde, Provinciale Staten van Zeeland, 1995.
7. "Rapport ENERGO-project", PZEM, ECN, RWS, 1981.
8. "Actieve Getij Centrale, Verkenning van Hydraulische en kustmorfologische gevolgen", Alkyon, voor Novem, december 1997
9. "Wind energie en waterkracht", Rapport van de begeleidingscommissie Voorstudie Plan Lieveense", 1981.
10. "Getijcentrale Oosterschelde", nota W-75.060, Rijkswaterstaat, Deltadienst Waterloopkundige afdeling, ir D. Kooman, 1975
11. "The Exploitation of River and Marine currents", Scheijgrond, P.C., University of Strathclyde, 1998.
12. "Renewable Energy Resources", Twidell, J.W., Weir A.D., 1986.
13. Hydrografische kaart voor kust- en binnenwateren, Dienst der Hydrografie, 1805 Oosterschelde, Veerse meer en Grevelingenmeer.
14. "The exploitation of tidal and marine currents", Non-Nuclear energy-JOULE II, Wave energy, EUR16683 EN, 1996.
15. "Near shore Windenergie", Voorstudie Locatie selectie, Deelstudie Morfologie", Alkyon Hydraulic Research & Consultancy, 1997.

BIJLAGEN

Berekening technisch potentieel voor winning uit de getijdenstromingen

Aannames:

doorstromingsoppervlak	$A = 17900 \text{ m}^2$
Piek snelheid door de openingen (Kering)	$V_k = 3\text{-}5 \text{ m/s}$
Pieksnelheid buiten de kering (Oosterschelde)	$V_o = 1\text{-}2 \text{ m/s}$
Turbine rendement	$\eta = 0.2$
Correctie factor voor variatie in stroomsnelheid	$= 0.5$

Voor het piekvermogen:

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

Voor het continue vermogen:

$$P_{gem} = 0.05 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

Berekening effect op het getijverschil

Berekend is de potentiële energie in het bassin van de Oosterschelde. Uitgaande van een oppervlakte van 200 km^2 en een getijverschil van gemiddeld $2,5 \text{ m}$ over deze 200 km^2 . De potentiële energie van de massa water bij dit hoogteverschil wordt gegeven door:

$$E = \rho g H A \Delta H \eta$$

Hierin is:

E	=	Potentiële energie [J]
g	=	Zwaartekrachtversnelling [$9,8 \text{ m/s}^2$]
ρ	=	Dichtheid van water [kg/m^3]
H	=	Hoogteverschil getijde [m]
A	=	Oppervlak van de Oosterschelde [m^2]
ΔH	=	Afname van het getij [m]
η	=	Rendement van de omzetting

De werkelijke afname van het getijverschil is (ΔH maal η) vanwege het feit dat de turbine slechts een deel van de doorstroming omzet in vermogen. Het gemiddelde vermogen kan berekend worden door:

$$P = E / t$$

Hierin is:

P = Het continu beschikbare vermogen [W]

t = De tijdsperiode van 1 getij [12 uur en 25 min.]

Uitgaande van een oppervlak A van 200 km^2 , een dichtheid ρ van 1000 kg/m^3 , een hoogteverschil H van $2,5 \text{ m}$ (gemiddeld over die 200 km^2), een werkelijke getijdenafname van $0,2 \text{ mm}$ per getij en een rendement van 20% op de omzetting in de vrije stromingsturbine, komen we op een energie-inhoud van 1 GJ . Dit betekent een continu vermogen P van circa 50 kW . Bij een beschikbaarheid van $0,5$ betekent dit een op te stellen vermogen van 100 kW . Het te winnen vermogen is in eerste orde lineair met de afname van het getijverschil, dus bij 10 MW opgesteld vermogen is de afname 20 mm per getij. Het maximaal op te stellen vermogen is circa 100 MW (50 MW continu). In dat geval wordt de gehele Oosterschelde als 1 grote waterkrachtcentrale bedreven (via de Oosterscheldekering). Dit komt overeen met 66 windturbines van het grootste commerciële type van $1,5 \text{ MW}$.