



Duurzame energieopties bij integrale verbetering van de Afsluitdijk

P. Lako

A. Wakker

Verantwoording

In opdracht van Rijkswaterstaat geeft ECN Beleidsstudies in deze studie een overzicht en analyse van duurzame energieopties voor de Afsluitdijk zoals deze naar voren komen in vijf plannen voor integrale verbetering van de Afsluitdijk. De auteurs willen Joost van de Beek van Rijkswaterstaat IJsselmeergebied en de collega's Luuk Beurskens en Hans Reith bedanken voor suggesties voor verbeteringen in deze korte studie. De studie is bij ECN geregistreerd onder projectnummer 5.0200.

Abstract

This study on behalf of Rijkswaterstaat IJsselmeergebied gives an overview and analysis of renewable energy options that are considered in five plans that suggest integral improvements for the Afsluitdijk. The renewable energy options may be developed in the framework of improvements of the Afsluitdijk that are mainly driven by safety concerns, viz. sea level rise and the need to protect the country against flooding. The options considered range from wind energy and photovoltaic power (PV) to hydro or tidal power, osmotic power based on freshwater and sea water, and production of biofuels from algae. Another option is the realisation of a pumped hydro system in the Netherlands (a so-called 'valmeer' in the IJsselmeer).

Inhoud

Lijst van tabellen	4
Lijst van figuren	4
Samenvatting	5
1. Inleiding	7
2. Duurzame energieopties in plannen voor de Afsluitdijk	8
3. Analyse van duurzame energieopties	9
3.1 Inleiding	9
3.2 Windenergie	9
3.3 Fotovoltaïsche zonne-energie (PV)	10
3.4 Waterkracht c.q. getijdenenergie	13
3.5 Energieopwekking uit potentiaalverschil tussen zoet en zout water	13
3.6 Productie van biodiesel uit aquatische biomassa	15
3.7 Elektriciteitsopslag door middel van pompaccumulatiecentrale (valmeer)	16
3.8 Samenvatting	17
4. Conclusies en aanbevelingen	20
Referenties	22
Internetbronnen	24

Lijst van tabellen

Tabel 3.1	<i>Huidige en toekomstige (2020) specifieke investeringskosten en kosten van opwekking met duurzame energieopties en geselecteerde CSS^a opties</i>	12
Tabel 3.2	<i>Samenvatting analyse (duurzame) energieopties bij integrale verbetering van de Afsluitdijk</i>	19

Lijst van figuren

Figuur 3.1	<i>Prijs fotovoltaïsche en andersoortige elektriciteit in Nederland, 2000-2005</i>	11
Figuur 3.2	<i>Membraan efficiency voor toepassing bij ‘osmose-energie’</i>	14
Figuur 3.3	<i>Ontwikkelingstraject ‘osmose-energie’ volgens Statkraft</i>	14

Samenvatting

Rijkswaterstaat (RWS) IJsselmeergebied heeft aan ECN Beleidsstudies gevraagd om een overzicht te geven en een analyse te maken van duurzame energieopties voor de Afsluitdijk. Het Ministerie van Verkeer en Waterstaat en RWS zullen een visie ontwikkelen op de Afsluitdijk. Daarvoor hebben externe partijen plannen ingediend, waarvan er vijf door RWS zijn geselecteerd. In deze plannen voor integrale verbetering van de Afsluitdijk komen de volgende duurzame energieopties naar voren:

1. Windenergie
2. Fotovoltaïsche zonne-energie (PV)
3. Waterkracht c.q. getijdenenergie
4. Energieopwekking uit het potentiaalverschil tussen zoet en zout water (Blue Energy).

In een enkel plan wordt het gebruik van fotovoltaïsche zonne-energie (PV) alleen aangestipt. Verder is er een plan waarin biodieselpductie uit aquatische biomassa (algen) wordt voorgesteld. Ten slotte is er een plan waarin wordt voorgesteld een systeem voor elektriciteitsopslag (in combinatie met duurzame energieopties) in het IJsselmeer te realiseren. Het gaat om een pompaccumulatiecentrale, ook wel valmeer genoemd.

Wat betreft *windenergie* streven de rijksoverheid en lagere overheden door middel van een rijkscoördinatieplan naar een verdrievoudiging van het windvermogen op land, van ca. 2.000 MW_e begin 2009 tot ca. 6.000 MW_e in 2020. Rekening houdend met gesignaleerde knelpunten en randvoorwaarden, lijkt een vermogen windturbineparken in de omgeving van de Afsluitdijk van 225-450 MW_e (50-150 windturbines) haalbaar. Daarmee zou in 0,5 tot 1% van de Nederlandse elektriciteitsvraag kunnen worden voorzien. De kosten kunnen dalen van 8-9,5 ct/kWh in 2009 tot 6-7 ct/kWh in 2020. Tegen die tijd zijn de productiekosten van windenergie mogelijk, kerwijs van dezelfde orde van grootte als die van conventioneel opgewekte elektriciteit.

Fotovoltaïsche zonne-energie (PV) levert bij toepassing op het talud van de Afsluitdijk 8-10 MW_e ofwel 7-8,5 GWh per jaar (0,007% van het Nederlandse elektriciteitsverbruik). Aangenomen wordt dat de kosten dalen van 46-53 ct/kWh in 2009 tot 20-25 ct/kWh in 2020 en 10-15 ct/kWh in 2030. De schattingen van het potentieel van PV in Nederland lopen sterk uiteen, van 6.000 MW_e in 2040 (woningen) tot 75.000 MW_e (technisch potentieel) in 2050 (woningen, gebouwen en open grond). Bij het technische potentieel (75.000 MW_e) past de kanttekening dat elektriciteitsopslag, grondverwerving en netintegratie van relatief kleine zonneparken substantiële additionele kosten met zich meebrengen.

De derde optie, *waterkracht c.q. getijdenenergie*, is bij de Afsluitdijk alleen van betekenis als er een nieuw uitwateringscomplex met een zoet-zout gradiënt en een bijbehorende substantiële getijdenstroom wordt ontwikkeld. Sommige plannen voorzien hierin. Getijdenenergie is voorts nog belangrijker dan waterkracht, omdat er nauwelijks peilverschil is tussen IJsselmeer en Waddenzee. Als het IJsselmeer een significant hoger peil zou krijgen dan de Waddenzee, zou met het verval elektriciteit kunnen worden opgewekt. Al met al schatten wij het potentieel op 10-50 MW_e ofwel 350-1.750 GWh per jaar (ca. 0,1% van het Nederlandse elektriciteitsverbruik). De kosten zijn naar schatting 13-20 ct/kWh in 2020 en 10-15 ct/kWh in 2030.

Een relatief nieuwe optie betreft 'osmose-energie', ofwel elektriciteitsopwekking op basis van het potentiaalverschil tussen zoet en zout water. Het potentieel hiervan in Nederland wordt geschat op 650-3.000 MW_e, waarmee ca. 6-10% van de Nederlandse elektriciteit zou kunnen worden opgewekt. Het potentieel op lange termijn (2030) bij de Afsluitdijk is ca. 200 MW_e, waarvan ca. 10 MW_e in 2020 kan worden gerealiseerd. Met het maximale vermogen bij de Afsluitdijk van 200 MW_e zou in 1,5% van de Nederlandse elektriciteitsvraag kunnen worden voorzien.

De kosten worden geschat op 10-20 ct/kWh in 2020 en 10-15 ct/kWh in 2030. Deze techniek bevindt zich nog in het R&D-stadium; er zijn nog geen praktische toepassingen gerealiseerd.

De laatste duurzame energieoptie betreft *biodieselproductie uit aquatische biomassa*. Zeewieren veeft wordt op pilot-schaal geïntegreerd. Een optie is combinatie met offshore wind. De Nederlandse Exclusieve Economische Zone (EEZ) van de Noordzee (57.000 km²) zou bij benutting van 5.000 km², geïntegreerd met offshore wind, een potentieel bieden van 25 miljoen ton zeewier (biomassa) droge stof per jaar (350 PJ). Met 2^e generatie processen - het HTU (Hydro Thermal Upgrading) proces - zou biodiesel uit zeewier kunnen worden geproduceerd.

De kosten van biobrandstoffen uit microalgen moeten met een factor 5-10 omlaag (Reith, 2009), door systeemvereenvoudiging c.q. kostenverlaging en toepassing van bioraffinage (bio-refinery). Biodieselproductie uit algen bij de Afsluitdijk is een lange termijn optie (na 2020). Bij 'ideale' klimatologische condities - 'open ponds' - worden deze geschat op ca. US\$ 5 per liter (ca. € 3,5/l) biodiesel in 2009, \$ 2,5 per liter (€ 1,75/l) in 2020 en \$ 1,25/l (€ 0,90/l) in 2030¹. Opgemerkt dient te worden dat de waarde van algen in andere sectoren (fijn chemicaliën) mogelijk hoger is.

Zoals eerder gemeld, is een van de vijf studies voornamelijk gebaseerd op realisatie van een *pompaccumulatiecentrale* (valmeer) in het IJsselmeer. Deze optie is vooralsnog niet rendabel. Dit geldt zeker voor de periode van opbouw van het windturbinevermogen in Nederland (nu 2.000 MW_e op land en 228 MW_e offshore) die, naar het zich laat aanzien, wel tot 2025 zal duren. In de tussenliggende tijd zou extra interconnectie capaciteit (Nederland-VK, tweede interconnector Nederland-Noorwegen) de integratie van windenergie in belangrijke mate kunnen opvangen, in samenhang met warmteopslag bij warmte-krachtcentrales. In het kader van deze studie kon de optie van de *Laddermolen* niet worden gevalideerd. Een feit is dat demonstratie van deze optie niet heeft plaatsgevonden. Afgezien van een bericht over toepassing op Malta, is nog geen planning van een demonstratieproject gerapporteerd. Daarom valt er over technisch-economische haalbaarheid weinig meer te melden dan dat deze onzeker is.

¹ De verhouding tussen de US\$ en de Euro is gebaseerd op de gemiddelde wisselkoers van 2007 en 2008.

1. Inleiding

In februari 2009 heeft Rijkswaterstaat (RWS) IJsselmeergebied - Joost van de Beek - ECN Beleidsstudies, groep Hernieuwbare Energie, benaderd om een overzicht en analyse te geven van duurzame energieopties in plannen voor de Afsluitdijk. Het Ministerie van Verkeer en Waterstaat en Rijkswaterstaat zullen een visie ontwikkelen op de Afsluitdijk. Daarvoor hebben externe partijen plannen ingediend, waarvan er vijf door RWS zijn geselecteerd. ECN Beleidsstudies is gevraagd om duurzame energieopties in deze plannen te analyseren. Het Ministerie van Verkeer en Waterstaat kan de review vervolgens benutten voor de ontwikkeling van een visie.

Deze review heeft daarom als primair doel om in kaart te brengen welke duurzame energieopties aan de orde komen in de plannen voor integrale verbetering van de Afsluitdijk die eind 2008 door Rijkswaterstaat zijn geselecteerd. Ook de mogelijkheid van een pompaccumulatiecentrale, die in een van de plannen wordt geopperd, wordt tegen het licht gehouden. Vervolgens worden de (duurzame) energieopties geanalyseerd in termen van technische haalbaarheid, betekenis (potentieel) en betaalbaarheid. De gehanteerde tijdshorizon is in het algemeen 2020, in sommige gevallen 2030. Wat betreft betaalbaarheid zijn de kosten per kWh elektriciteit of andere eenheid, indien geen elektriciteit wordt opgewekt, maatgevend. Voor commerciële opties zijn de kosten (per kWh) binnen nauwe marges aan te geven. Mogelijkerwijs kan er in de loop van de tijd nog een zekere kostendaling plaatsvinden. Voor opties die al zijn gedemonstreerd kan binnen ruimere marges een schatting van de kosten (per kWh) worden gegeven. Bij technieken die zijn gedemonstreerd kan een significante kostendaling in de tijd plaatsvinden.

Hoofdstuk 2 geeft een inventarisatie van de (duurzame) energieopties in vier plannen gericht op integrale verbetering van de Afsluitdijk. Hoofdstuk 3 omschrijft een beoordeling van de duurzame energieopties die in relatie staan tot de beoogde integrale verbetering van de Afsluitdijk. Tenslotte wordt in Hoofdstuk 4 een aantal conclusies en aanbevelingen geformuleerd.

2. Duurzame energieopties in plannen voor de Afsluitdijk

In september 2008 heeft het College van Rijksadviseurs (CRA) van Rijkswaterstaat (RWS) vier plannen voor integrale verbetering van de Afsluitdijk geselecteerd (RWS, 2008). Deze behelzen onder andere ontwikkeling van (duurzame) energieopties in samenhang met verbetering van de veiligheid en andere in het geding zijnde overwegingen. De vier plannen voor integrale verbetering van de Afsluitdijk zijn:

- ‘Waddenwerken’ van een consortium van DHV Delta Development, Imares, en Bureau Alle Hesper (DHV, 2008a).
- ‘Afsluitdijk 21’ ofwel ‘AD21’ van Arcadis, Dredging International, Nuon, H+N+S en Alkyon (Arcadis, 2008).
- ‘Monument Afsluitdijk’ van Boskalis BV, West 8 en Witteveen+Bos (Boskalis, 2008).
- ‘Monument in Balans’ van Noordpeil Landschap en Stedenbouw, GDArchitecten, CE Delft, Ingenieursbureau Oranjewoud BV (Noordpeil, 2008).

Een vijfde plan voor verbetering van de Afsluitdijk betreft ‘Natuurlijk Afsluitdijk’ van een consortium van Haskoning, Wubbo Ockels cum sui (Haskoning, 2008). Dit plan onderscheidt zich van de overige, doordat het accent ligt op de realisatie van een pompaccumulatiecentrale voor elektriciteitsopslag, ook wel ‘valmeer’ genoemd (in combinatie met duurzame opties).

In deze plannen komen de volgende (duurzame) energieopties naar voren:

1. Windenergie.
2. Fotovoltaïsche zonne-energie (PV).
3. Waterkracht c.q. getijdenenergie.
4. Energieopwekking uit het potentiaalverschil tussen zoet en zout water (Blue Energy).
5. Biodieselpductie uit aquatische biomassa (algen).
6. Elektriciteitsopslag door middel van een pompaccumulatiecentrale (valmeer) voor elektriciteitsopslag in het IJsselmeer.

In een enkel plan wordt het gebruik van fotovoltaïsche zonne-energie (PV) alleen aangestipt. Verder is er een plan waarin biodieselpductie uit aquatische biomassa (algen) wordt voorgesteld. Deze studie beperkt zich tot deze vijf duurzame energieopties, aangevuld met de optie van elektriciteitsopslag zoals voorgestaan door het consortium van Haskoning (het zogenoemde valmeer). De analyse richt zich op de technische haalbaarheid, de betekenis (potentieel) voor Nederland en de betaalbaarheid.

3. Analyse van duurzame energieopties

3.1 Inleiding

De in het vorige hoofdstuk genoemde (duurzame) opties worden in dit hoofdstuk geanalyseerd:

1. Windenergie (3.2).
2. Fotovoltaïsche zonne-energie, PV (3.3).
3. Waterkracht c.q. getijdenenergie (3.4).
4. Elektriciteitsopwekking uit het potentiaalverschil tussen zoet en zout water (3.5).
5. Biodieselproductie uit aquatische biomassa (algen) (3.6).
6. Elektriciteitsopslag door middel van een pompaccumulatiecentrale (valmeer) voor elektriciteitsopslag in het IJsselmeer (3.7).
7. Samenvatting (3.8).

3.2 Windenergie

Het potentieel van wind op land is gedeeltelijk ontwikkeld, maar het offshore potentieel² is vrijwel onontgonnen. Het Rijk stelt zich met provincies en gemeenten ten doel om het vermogen op land van ca. 2.000 MW_e begin 2009 (Internetbron 1) te verdrievoudigen tot 6.000 MW_e in 2020 (VROM, 2008). De volgende knelpunten en randvoorwaarden worden gesignaleerd:

1. Militaire en civiele luchtvaart: radars, veiligheidszones rond vliegvelden en laagvliegroutes.
2. Geluidsproductie van hoge windturbines en goede beoordeling hiervan.
3. Externe veiligheid: windmolens in relatie tot buisleidingen voor gevaarlijke stoffen.
4. Mogelijkheden en beperkingen van het Nederlandse elektriciteitsnet voor het aansluiten van windturbines.
5. Cumulatie natuureffecten in en nabij Natura 2000-gebieden.
6. Beleidsregel van het ministerie van V&W voor waterstaatswerken en windmolens, zoals ook toegepast door waterschappen en provincies.
7. Bouwhoogtebeperkingen in streek- en bestemmingsplannen en andere voorschriften.
8. Levertijd windturbines in relatie tot het realiseren van de doelstelling op korte termijn.
9. Beschikbare subsidie.

Conflicterende belangen en randvoorwaarden gelden ook voor windparken bij de Afsluitdijk. De rijksoverheid acht voldoende mogelijkheden aanwezig om te streven naar 6.000 MW_e.

Het huidige vermogen van wind op land van 2.000 MW_e kan 3,5% van de elektriciteitsvraag in Nederland (ca. 110 TWh) dekken. Een vermogen van 6.000 MW_e op land (in 2020) zou in 10-12% van de huidige elektriciteitsvraag kunnen voorzien. Gezien de lengte van de Afsluitdijk van ca. 30 km en de relatief hoge windsnelheid op het IJsselmeer, zou ter hoogte van de Afsluitdijk een vermogen van enige honderden MW_e kunnen worden gerealiseerd. Gezien de complicaties bij het verkrijgen van een vergunning voor windparken op land (inclusief het IJsselmeer), kan het als een majeur project binnen de ontwikkeling van wind op land worden gezien. Hiermee zou ca. 0,5 tot 1% van het elektriciteitsverbruik duurzaam kunnen worden ingevuld.

In (Tilburg et al, 2008) worden de specifieke investeringskosten van wind op land geschat op ca. € 1.325/kW_e en wordt het basisbedrag in het kader van de SDE (Stimuleringsregeling Duurzame Energie) vastgesteld op 9,4 ct/kWh. De kosten van conventionele elektriciteitsopwekking (kolen, gas, kernenergie) bedragen ca. 5-6 ct/kWh. In de komende jaren zullen deze kosten naar

² In deze studie wordt toepassing van wind op het IJsselmeer gerekend tot 'wind op land' en niet 'offshore wind'.

verwachting convergeren, zodat het verschil in kosten in 2020 mogelijksterwijs niet significant meer zal zijn.

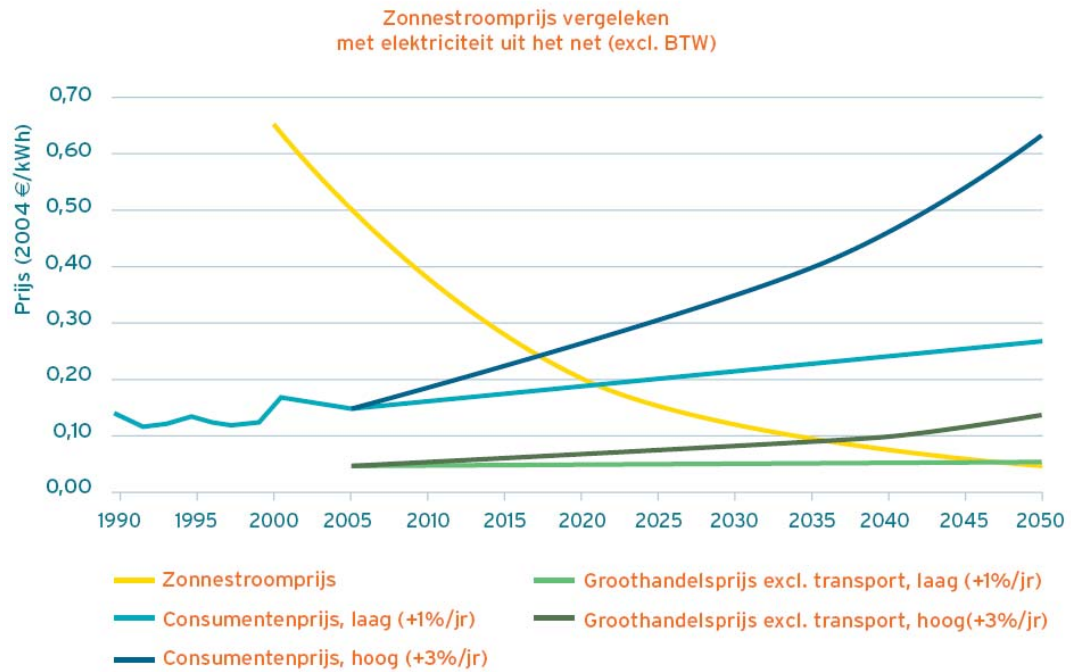
3.3 Fotovoltaïsche zonne-energie (PV)

Fotovoltaïsche zonne-energie (PV) is een tweede optie die aan de orde komt in plannen voor integrale verbetering van de Afsluitdijk. Deze toepassing wijkt af van de praktijk van *gebouwge-integreerde* PV. Het perspectief hiervan is enige miljoenen woningen met een geïnstalleerd vermogen van 1-2 kW_e per woning, culminerend in bijvoorbeeld 6.000 MW_e (MW_p) in 2040. Hier-na komt een optimistisch scenario aan bod. Aangezien het aantal vollasturen (ca. 850 uur/jaar) bij PV veel geringer is dan bij wind op land, is de hoeveelheid elektriciteit die in 2040 met PV zou kunnen worden opgewekt equivalent aan ca. 4,5% van de huidige elektriciteitsvraag.

Het talud van de Afsluitdijk kan onder bepaalde condities worden benut voor installatie van PV-panelen. De mogelijkheden hiertoe hangen af van de uitwerking van plannen voor verbetering van de Afsluitdijk. Het gaat dan om een vermogen van ca. 8-10 MW_e waarmee ca. 7-8,5 GWh kan worden opgewekt. Dat komt overeen met 0,007% van de huidige elektriciteitsvraag.

(Tilburg et al, 2008) schat de specifieke investeringskosten voor 2009-2010 op ca. € 3.800-5.200/kW_e. De basisbedragen in het kader van de SDE zijn ca. 46-53 ct/kWh. Wellicht kunnen de kosten per opgewekte kWh in de periode tot 2020 worden gehalveerd tot 20-25 ct/kWh. Na 2020 zouden de kosten verder kunnen dalen tot ca. 10-15 ct/kWh in 2030. Deze trend komt ook naar voren in Tabel 3.1, die is ontleend aan (Lako, 2008). Figuur 3.1 geeft een schatting van de toekomstige PV kosten volgens het 'Platform Duurzame Elektriciteitsvoorziening' (PDE, 2007).

Volgens het Platform kan PV een zeer grote bijdrage leveren: 'Op basis van internationaal erkende scenario's voor de mondiale energievoorziening en de ontwikkeling van zonnestroom en op basis van de Vision for Photovoltaic Technology van het Europese PV Technology Platform is door Branchevereniging Holland Solar de Roadmap Zonnestroom ontwikkeld. Die roadmap leidt tot een integratie van een geïnstalleerd vermogen van 75 GW_p (technisch potentieel) in 2050. Dat zou in dat jaar genoeg zijn om 25 procent van de elektriciteitsbehoefte te dekken. Het belangrijkste knelpunt waardoor die doelstelling pas op langere termijn bereikbaar is, is de hoge prijs van systemen op dit moment'. Dit plan vereist grootschalige toepassing van PV op woningen, gebouwen en open grond. Ook is op termijn elektriciteitsopslag nodig, zodat PV-elektriciteit 's zomers overdag niet onbenut blijft. Elektriciteitsopslag, grondverwerving en net-integratie van relatief kleine zonneparken brengen substantiële additionele kosten met zich mee.



Figuur 3.1 *Prijs fotovoltaïsche en andersoortige elektriciteit in Nederland, 2000-2050*

Tabel 3.1 *Huidige en toekomstige (2020) specifieke investeringskosten en kosten van opwekking met duurzame energieopties en geselecteerde CSS^a opties*

		Specifieke investeringskosten [\$/ ₂₀₀₇ /kW _e]		Opwekkingskosten [\$/ ₂₀₀₇ /MWh]		Bron	
		2007	2020	2007	2020		
Concentrating Solar Power ^a	[\$/kW _e]	4,100	2,500-3,000	[\$/MWh]	150-170	100-125	Internetbron 2
Fotovoltaïsch (PV)	[\$/kW _e]	8,000	2,850-3,250	[\$/MWh]	450-550	175-225	Borenstein, 2008
Wind op land	[\$/kW _e]	1,900	1,200-1,300	[\$/MWh]	80-110	50-80	Lako et al, 2009
Offshore wind	[\$/kW _e]	3,250	2,000-2,400	[\$/MWh]	160-180	100-125	Lako et al, 2009
Golf	[\$/kW _e]	4,875	2,000-2,500	[\$/MWh]	275-325	125-150	Internetbron 3-5
Getijden barrière	[\$/kW _e]	3,750	2,400-2,800	[\$/MWh]	175-225	125-150	Internetbron 6
Getijdenstroming	[\$/kW _e]	3,250-5,750	2,000-2,500	[\$/MWh]	225-275	100-125	DTI, 2004; Davidson, 2007
Conventioneel geothermisch	[\$/kW _e]	1,750-2,750	1,500-2,250	[\$/MWh]	60-90	50-75	Lundin et al, 2006
Hot Dry Rock (geothermisch)	[\$/kW _e]	-	2,250-3,250	[\$/MWh]	-	75-100	Lundin et al, 2006
Micro waterkracht (< 1 MW _e)	[\$/kW _e]	2,250-3,500	2,000-3,000	[\$/MWh]	54-84	48-72	Lako et al, 2003
Kleine waterkracht (1-10 MW _e)	[\$/kW _e]	2,000-3,000	1,750-2,750	[\$/MWh]	48-72	42-66	Lako et al, 2003
Grote waterkracht (> 10 MW _e)	[\$/kW _e]	1,500-2,500	1,500-2,500	[\$/MWh]	35-60	35-60	Lako et al. 2003
Biomassa verbranding				[\$/MWh]			
Middelgroot (5-20 MW _e)	[\$/kW _e]	3,500-4,250	2,750-3,750	[\$/MWh]	65-95	55-85	Mozaffarian et al, 2009
Grootschalig (> 20 MW _e)	[\$/kW _e]	2,500-3,250	2,250-2,750	[\$/MWh]	45-75	40-70	Mozaffarian et al, 2009
Biomassa vergassing							
Middelgroot (5-20 MW _e)	[\$/kW _e]	3,750-6,500	3,000-3,750	[\$/MWh]	70-115	55-85	Mozaffarian et al, 2009
Grootschalig (> 20 MW _e)	[\$/kW _e]		2,750-3,500	[\$/MWh]		40-70	Mozaffarian et al, 2009
Kolengestookte elektriciteit & CCS							
‘Post combustion’	[\$/kW _e]		2,100-2,400	[\$/MWh]		60-80	Lako, 2004
‘Pre-combustion’ (IGCC)	[\$/kW _e]		2,100-2,400	[\$/MWh]		55-80	Lako, 2004
‘Oxy-fuel’	[\$/kW _e]		2,000-2,500	[\$/MWh]		60-80	Black, 2008

a CCS = CO₂ Capture and Storage, CO₂-afvang en -opslag. De investeringskosten van poederkool zonder CCS zijn ca. \$ 1,500/kW_e (Dalton, 2004). Volgens (Davis, 2007), zou een IG-CC (Integrated Gasification Combined Cycle, kolenvergassing STEG) centrale met CCS minimaal 17% meer kosten dan een superkritische poederkoolcentrale, d.w.z. \$ 1,750/kW_e.

b Concentrating Solar Power is een optie voor Zuid Europa en (nog meer) Noord Afrika. De gegeven kosten zijn representatief voor condities in Zuid Californië en Nevada (V.S.).

Bronnen: Internetbron 2 (CSP); Borenstein, 2008 (PV); Lako et al, 2008 (wind); Internetbronnen 3-6; DTI, 2004; Davidson, 2007 (golf en getijden); Lundin et al, 2006 (geothermisch); Lako et al, 2003 (waterkracht); Mozaffarian et al, 2009 (biomassa); Dalton, 2004; Lako, 2004; Davis, 2007; Black, 2008 (kolengestookte elektriciteit).

3.4 Waterkracht c.q. getijdenenergie

Sinds de jaren negentig zijn in Nederland enkele kleinschalige ($\leq 10 \text{ MW}_e$) waterkrachtcentrales in bedrijf, met een gezamenlijk vermogen van 37 MW_e (CBS, 2008). Onderzoek in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en een advies van ECN Beleidsstudies (ECN, 2009) laten zien dat er nog ca. 17 MW_e extra kan worden gerealiseerd. ECN Beleidsstudies heeft geadviseerd om een basisbedrag van $7,3 \text{ ct/kWh}$ te hanteren voor waterkrachtprojecten met een valhoogte hoger dan 5 meter en een basisbedrag van $12,5 \text{ ct/kWh}$ voor projecten met een (equivalente) valhoogte minder dan 5 meter. Voorts is er in Nederland een potentieel van getijdenenergie van minstens 65 MW_e met productiekosten van naar schatting $12,7 \text{ ct/kWh}$.

Getijdenenergie is vooralsnog belangrijker dan waterkracht, omdat er nauwelijks peilverschil is tussen IJsselmeer en Waddenzee. Als het IJsselmeer een significant hoger peil zou krijgen dan de Waddenzee zou met het verval elektriciteit kunnen worden opgewekt. Bij de Afsluitdijk heeft benutting van getijdenenergie alleen betekenis, als er een nieuw uitwateringscomplex met een zoet-zout gradiënt en een bijbehorende substantiële getijdenstroom wordt ontwikkeld. Sommige plannen voorzien hierin.

Afhankelijk van de keuze van verbeteringen aan de Afsluitdijk, zou een getijdenenergiecentrale van enige tientallen MW_e kunnen worden gerealiseerd. Hiermee zou ca. 100 GWh kunnen worden opgewekt, overeenkomend met $0,1\%$ van het huidige Nederlandse elektriciteitsverbruik. De kosten van elektriciteitsopwekking liggen in de orde van grootte van $13\text{--}20 \text{ ct/kWh}$. De marge in kosten van elektriciteitsopwekking wordt verklaard doordat veel afhangt van de wijze waarop de Afsluitdijk wordt verbeterd, bijvoorbeeld toepassing van een zoet-zout gradiënt.

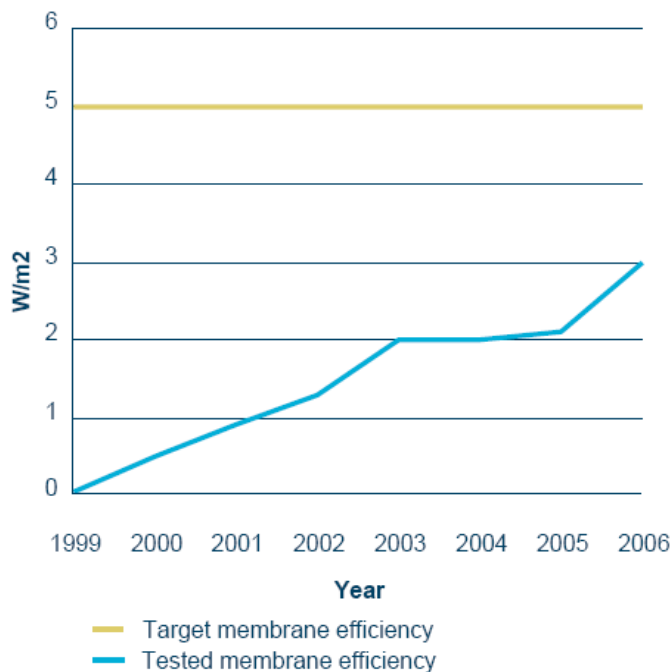
3.5 Energieopwekking uit potentiaalverschil tussen zoet en zout water

Uit het potentiaalverschil tussen zoet en zout water kan energie (elektriciteit) worden opgewekt. Er zijn twee varianten van ‘osmose-energie’ die in een uiteenlopend stadium van onderzoek en ontwikkeling (R&D) zijn, aldus een Ecofys studie voor Rijkswaterstaat (Molenbroek, 2007):

- Pressure Retarded Osmosis, afgekort PRO, ontwikkeld door Statkraft³.
- Reverse ElectroDialysis, afgekort R.E.D, ontwikkeld door REDstack.

Er zijn voor commerciële toepassing doorbraken nodig wat betreft membranen (Figuur 3.2).

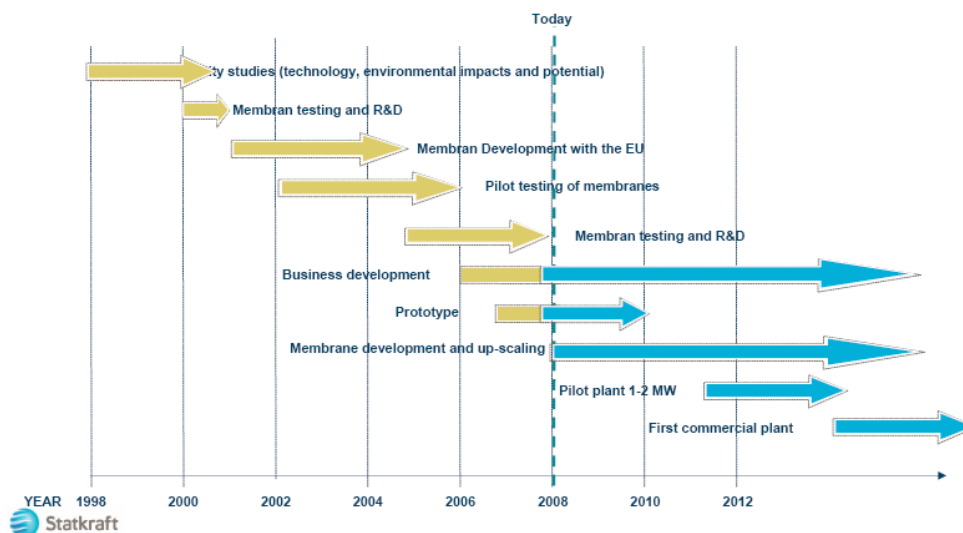
³ Statkraft schat het potentieel van Noorwegen op 12 TWh/jaar , ca. 10% van het Noorse elektriciteitsverbruik (Statkraft, 2005).



Figuur 3.2 Membraan efficiency voor toepassing bij ‘osmose-energie’

Bron: Dugstad, 2007.

REDstack, een spin-off van WETSUS (Leeuwarden), richt zich op het ontwikkelen, opschalen en vermarkten van de R.E.D. technologie (Post, 2006). Het technische potentieel in Nederland wordt geschat op 650-3.000 MW_e (Internetbron 7). Hiermee zou ca. 6-10% van de huidige Nederlandse elektriciteitsvraag kunnen worden gedekt. Het potentieel bij de Afsluitdijk, met een spuiroom van minimaal 200 m³/s, is ca. 200 MW_e. Bij succesvolle R&D (Figuur 3.3) kan ‘osmose-energie’ zijn opgeschaald van de huidige kW schaal tot ca. 10 MW_e in 2020. Pressure Retarded Osmosis (PRO) kan het voordeel bieden dat ermee kan worden gepompt, waardoor spuien onafhankelijk van het getij kan plaatsvinden. Afhankelijk van het type bedragen de kosten van elektriciteitsopwekking 8-16 ct/kWh. Omdat Ecofys rekent met een lage rentevoet van 4% zijn de opwekkingskosten in 2020 bij commerciële exploitatie (marktrente) ca. 10-20 ct/kWh.



Figuur 3.3 Ontwikkelingstraject ‘osmose-energie’ volgens Statkraft

Bron: Skilhagen, 2008.

3.6 Productie van biodiesel uit aquatische biomassa

Biodiesel kan worden geproduceerd uit aquatische biomassa, met karakteristieke capaciteiten:

- Macroalgen, zoals zeewier; productieniveau van 2 miljoen ton droge stof per jaar.
- Microalgen; productieniveau 10.000 ton droge stof per jaar (Schulz, 2006).

Macroalgen, waaronder zeewier

Zeewieren worden momenteel toegepast in voeding, diervoeders, chemicaliën, cosmetica en farmaceutische producten (Reith et al, 2005; EPOBIO, 2007). Ze worden bevestigd aan lijnen of netten die aan de bodem en/of met boeien worden verankerd. Belangrijke groeifactoren zijn:

- nutriënten
- saliniteit
- temperatuur
- licht
- diepte
- stroming
- predatie (vangst door vissen e.d.)
- epifyten (algen die op een gekweekte wiersoort leven)
- vervuiling.

Zeewier- en visteelt wordt op pilot-schaal geïntegreerd. Een optie is combinatie met offshore wind. De Nederlandse Exclusieve Economische Zone (EEZ) van de Noordzee (57.000 km²) zou bij benutting van 5.000 km², geïntegreerd met offshore wind, een potentieel bieden van 25 miljoen ton zeewier (biomassa) droge stof per jaar (350 PJ). Met 2^e generatie processen - het HTU (Hydro Thermal Upgrading) proces - zou biodiesel uit zeewier kunnen worden geproduceerd.

Microalgen

Microalgen zijn microscopisch kleine fotosynthetische organismen die zowel in zoet als zout water voorkomen, met een fotosynthese mechanisme dat gelijk is aan dat van planten op land. Doordat ze een eenvoudige celstructuur hebben en in water zweven, is de toegang tot water, CO₂ en voedingsstoffen optimaal. Daardoor is de omzetting van zonne-energie in biomassa doorgaans efficiënter dan op land (EPOBIO, 2007). Bekende toepassingen zijn (DHV, 2008b):

- *Fijnchemicaliën*
Eiwitten (aminozuren), koolhydraten, vitamines, mineralen en natuurlijke pigmenten zijn potentiële grondstoffen voor de farmaceutische, cosmetica- en levensmiddelenindustrie.
- *Visvoer*
Algen zijn een natuurlijke bron van voedsel voor diverse vissen. Van geteelde algen kan hoogwaardig visvoer gemaakt worden voor viskwekerijen.
- *Diervoer*
Algen kunnen dienen als vee/diervoer voor o.a. koeien, paarden, honden, katten en varkens.
- *Biobrandstoffen*
Op basis van de olie in de algen kan puur plantaardige olie (PPO) of via transesterificatie biodiesel worden gemaakt. De koolhydraatfractie kan ingezet worden voor de productie van ethanol en de algen of restfracties (vezels) kunnen worden vergist tot methaan of verbrand.

Perspectief voor omgeving Afsluitdijk

Zeewierteelt in combinatie met offshore wind op de Noordzee is een optie voor 2020 en later. De kosten van biobrandstoffen uit microalgen moeten met een factor 5-10 omlaag (Reith, 2009),

door systeemvereenvoudiging c.q. kostenverlaging en toepassing van bioraffinage (bio-refinery). Biodieselpductie uit algen⁴ bij de Afsluitdijk is een lange termijn optie (na 2020).

3.7 Elektriciteitsopslag door middel van pompaccumulatiecentrale (valmeer)

In de studie van Haskoning, Wubbo Ockels cum sui (Haskoning, 2008), wordt de pompaccumulatiecentrale die zij in het IJsselmeer zouden willen realiseren als volgt omschreven:

“Een Valmeer, ook pomp accumulatie systeem genoemd, bestaat in principe uit twee meren met verschillende waterstanden waartussen een pomp/turbine systeem geplaatst wordt. Bij een overschot aan energie wordt het water naar het hogere meer gepompt. Bij een tekort kan energie juist opgewekt worden door het water naar het lagere meer te brengen. De efficiëntie van een pomp accumulatie systeem is 70 tot 80%. Het verval dient zo hoog mogelijk te zijn, omdat investeringen in de turbines een sterk omgekeerd verband hebben met de grootte van het verval.”

Elektriciteitsopslag, bijvoorbeeld op basis van een valmeer zoals Haskoning voorstaat, wordt vaak gesuggereerd als een logische aanvulling op systemen voor elektriciteitsopwekking met grootschalige toepassing van windenergie. In een zeer recente dissertatie van Bart Ummels (Ummels, 2009) aan de TU Delft, wordt echter geconcludeerd dat elektriciteitsopslag voorlopig niet nodig is. In een geïsoleerd elektriciteitsopwekking systeem (zonder uitwisseling met omringende landen) blijft een significant deel van de elektriciteit van grootschalige windparken onbenut, zelfs als er een grootschalig opslagsysteem zou zijn. Verder toont een kosten-batenanalyse aan dat pompaccumulatie oplossingen in Nederland waarschijnlijk geen positief resultaat zullen opleveren, zelfs in het geval van een zeer hoge penetratie van windenergie. Dit is het gevolg van de zeer hoge investeringskosten die met zulke opslagsystemen zijn gemoeid. Bart Ummels tekent hierbij aan dat business cases van pompaccumulatiesystemen erg gevoelig zijn voor de verschillen in de marginale kosten van elektriciteit in en buiten de piekuren.

Een ander belangrijk resultaat van de dissertatie is dat elektriciteitsopslag systemen de CO₂-emissie van het systeem voor elektriciteitsopwekking als geheel verhogen, vooral bij lage penetratie van windenergie. De oorzaak hiervan is dat kWh'en die 's nachts worden opgeslagen van basislastcentrales op basis van kolen de plaats innemen van overdag op te wekken kWh'en van gasgestookte centrales (STEG's, SToom- En Gasturbines) met een hoger opwekkingsrendement (52-58% in plaats van 40-43%). Bovendien heeft aardgas een 40% lagere specifieke CO₂-emissie dan steenkool. Ook treden bij elektriciteitsopslag verliezen van 20-25% op. In feite doet een elektriciteitsopslagsysteem de CO₂-emissiereductie van windenergie gedeeltelijk teniet, tenzij zeer grote capaciteiten van windparken zouden worden geïnstalleerd.

In het proefschrift wordt geconcludeerd dat een meer flexibele bedrijfsvoering van basislastvermogen, in Nederland in het bijzonder door middel van warmteopslag bij (industriële) warmte-krachtcentrales, een kosteneffectieve oplossing vormt voor integratie van windenergie. In perioden van hoog windaanbod en lage belasting kunnen warmte-krachtunits worden stilgelegd. Dit voorkomt ook dat deze eenheden met verlies draaien in tijden van hoog windaanbod en lage belasting. Ontwikkeling van additionele interconnectiecapaciteit, bijvoorbeeld met Noorwegen, biedt het grootste technische potentieel voor integratie van windenergie. Een business case voor deze optie is vooral gevoelig voor synergie tussen het Nederlandse en Noorse systeem van elektriciteitsopwekking en kan niet alleen worden gebaseerd op integratie van windenergie.

Wat betreft technisch-economische haalbaarheid, blijkt een pompaccumulatiesysteem zoals een valmeer in het IJsselmeer vooralsnog niet rendabel. Dit geldt zeker voor de periode van opbouw

⁴ De waarde van biodiesel is ca. 1 US\$/l, maar die van Omega-3 vetzuren tot ca. 100 US\$/l (Internetbron 8). De marktwaarde bepaalt waar algen ingezet worden. Op basis van hiervan heeft biodieselpductie geen prioriteit.

van het windturbinevermogen in Nederland (nu 2.000 MW_e op land en 228 MW_e offshore) die, naar het zich laat aanzien, wel tot 2025 zal duren. In de tussenliggende tijd zou extra interconnectie capaciteit (Nederland-VK, tweede interconnector Nederland-Noorwegen) de integratie van windenergie in belangrijke mate kunnen opvangen, in samenhang met warmteopslag bij warmte-krachtcentrales.

De duurzame energieopties in (Haskoning, 2008) zoals fotonvolatische energie (PV, in het bijzonder zogenoemde ‘dunne-film’ PV) en energieopwekking uit het potentiaalverschil tussen zoet en zout water (Blue Energy) onderscheiden zich niet van die in de overige plannen. Een uitzondering hierop vormt de zogenoemde ‘Laddermill’, die als volgt wordt gekarakteriseerd:

“Laddermill heeft in augustus 2007 publiek het proof-of-concept geleverd. Met deze vlieger-technologie kan de enorme hoeveelheid windenergie, die zich op hoogtes van 500 tot 9.000 meter bevindt, worden ontgonnen. Naar verwachting zal deze nieuwe vorm van windenergie tegen concurrerende prijs energie leveren en is de milieu-impact klein.”

In het kader van deze studie kon de optie van de Laddermolen niet worden gevalideerd. Een feit is dat demonstratie van deze optie niet heeft plaatsgevonden. Afgezien van een bericht over toepassing op Malta, is nog geen planning van een demonstratieproject gerapporteerd. Daarom valt er over technisch-economische haalbaarheid weinig meer te melden dan dat deze onzeker is.

3.8 Samenvatting

Potentieel en kosten van (duurzame) energieopties bij integrale verbetering van de Afsluitdijk zijn samengevat in Tabel 3.2. De karakteristieken van de opties zijn als volgt samen te vatten:

- *Windenergie*

Windenergie in de omgeving van de Afsluitdijk heeft een relatief groot potentieel van naar schatting 225-450 MW_e (40 tot 150 windturbines), waarmee 520-1.040 GWh per jaar kan worden opgewekt. Dit komt overeen met 0,5 tot 1% van het huidige elektriciteitsverbruik in Nederland. De kosten worden geschat op 8-9,5 ct/kWh in 2009 en 6-7 ct/kWh in 2020.

- *Fotovoltaïsche zonne-energie (PV)*

PV op het talud van de Afsluitdijk heeft een potentieel van 8-10 MW_e, overeenkomend met 7-8,5 GWh per jaar (0,007% van het huidige Nederlandse elektriciteitsverbruik). De kosten zijn bij benadering 46-53 ct/kWh in 2009, 20-25 ct/kWh in 2020 en 10-15 ct/kWh in 2030. De schattingen van het potentieel van PV in Nederland lopen sterk uiteen, van 6.000 MW_e in 2040 (woningen) tot 75.000 MW_e (technisch potentieel) in 2050 (woningen, gebouwen en open grond). Bij een technisch potentieel van 75 GWe zullen elektriciteitsopslag, grondverwerving en netintegratie van relatief kleine zonneparken substantiële additionele kosten met zich meebrengen.

- *Waterkracht/getijden*

Waterkracht c.q. getijdenenergie bij de Afsluitdijk heeft een potentieel van 10-50 MW_e, waarmee 35-175 GWh per jaar kan worden opgewekt (ca. 0,1% van het huidige Nederlandse elektriciteitsverbruik). De kosten zijn ca. 13-20 ct/kWh in 2020 en 10-15 ct/kWh in 2030.

- *Osmose-energie*

Osmose-energie bij de Afsluitdijk heeft een potentieel van 200 MW_e, waarvan 10 MW_e in 2020 zou kunnen zijn gerealiseerd. Op lange termijn zou bij de Afsluitdijk ca. 1.500 GWh per jaar kunnen worden opgewekt (ca. 1,5% van het huidige Nederlandse elektriciteitsverbruik). De kosten zijn ca. 10-20 ct/kWh in 2020 en 10-15 ct/kWh in 2030. Deze techniek bevindt zich nog in het R&D-stadium; er zijn nog geen praktische toepassingen gerealiseerd.

- *Biobrandstoffen uit aquatische biomassa*

Zeewier- en visteelt wordt op pilot-schaal geïntegreerd. Een optie is combinatie met offshore wind. De Nederlandse Exclusieve Economische Zone (EEZ) van de Noordzee (57.000 km²) zou bij benutting van 5.000 km², geïntegreerd met offshore wind, een potentieel bieden van 25 miljoen ton zeewier (biomassa) droge stof per jaar (350 PJ). Met 2^e generatie processen - het HTU (Hydro Thermal Upgrading) proces - zou biodiesel uit zeewier kunnen worden geproduceerd.

De kosten van biobrandstoffen uit microalgen moeten met een factor 5-10 omlaag (Reith, 2009), door systeemvereenvoudiging c.q. kostenverlaging en toepassing van bioraffinage (bio-refinery). Biodieselproductie uit algen bij de Afsluitdijk is een lange termijn optie (na 2020). Bij ‘ideale’ klimatologische condities - ‘open ponds’ - worden deze geschat op ca. US\$ 5 per liter (ca. € 3,5/l) biodiesel in 2009, \$ 2,5 per liter (€ 1,75/l) in 2020 en \$ 1,25/l (€ 0,90/l) in 2030⁵. Opgemerkt dient te worden dat de waarde van algen in andere sectoren (fijn chemicaliën) mogelijk hoger is.

- *Pompaccumulatiecentrale (valmeer)*

Een *pompaccumulatiesysteem* zoals een valmeer in het IJsselmeer is vooralsnog niet rendabel. Dit geldt zeker voor de periode van opbouw van het windturbinevermogen in Nederland (nu 2.000 MW_e op land en 228 MW_e offshore) die, naar het zich laat aanzien, wel tot 2025 zal duren. In de tussenliggende tijd zou extra interconnectie capaciteit (Nederland-VK, tweede interconnector Nederland-Noorwegen) de integratie van windenergie in belangrijke mate kunnen opvangen, in samenhang met warmteopslag bij warmte-krachtcentrales. In het kader van deze studie kon de optie van de *Laddermolen* niet worden gevalideerd. Een feit is dat demonstratie van deze optie niet heeft plaatsgevonden. Afgezien van een bericht over toepassing op Malta, is nog geen planning van een demonstratieproject gerapporteerd. Daarom valt er over technisch-economische haalbaarheid weinig meer te melden dan dat deze onzeker is.

⁵ De verhouding tussen de US\$ en de Euro is gebaseerd op de gemiddelde wisselkoers van 2007 en 2008.

Tabel 3.2 *Samenvatting analyse (duurzame) energieopties bij integrale verbetering van de Afsluitdijk*

Maximaal vermogen	Maximaal vermogen [MW _e]			Maximale elektriciteitsopwekking [GWh/jaar]			Geschatte kosten [€ct/kWh] c.q. (US\$/l biodiesel ^a)			Toelichting
	2009	2020	2030	2009	2020	2030	2009	2020	2030	
Windenergie	«1	225-450	225-450	<1	520-1.040	520-1.040	8-9,5	6-7	5-6	Kosten mogelijkwerijs gelijk aan conventionele elektriciteit in 2030
PV	-	8-10	8-10	-	7-8,5	7-8,5	46-53	20-25	10-15	Halvering kosten per kWh mogelijk per decennium
Waterkracht/getijden	-	10-50	10-50	-	35-175	35-175	-	13-20	10-15	Toepassing afhankelijk van substantiële getijdenstroom ten behoeve van zoet-zout gradiënt
Osmose-energie	-	10	200	-	75	1.500	-	10-20	10-15	Afhankelijk van doorbraken in membranen
Biobrandstoffen uit algen, uitgaande van 'ideale' klimatologische condities ('open ponds')	-	n.v.t.	n.v.t.	-	n.v.t.	n.v.t.	US\$ 5/l € 3,5/l	US\$ 2,5/l € 1,75/l	US\$ 1,25/l € 0,90/l	Halvering kosten per decennium? Huidige/toekomstige kosten: Benemann, 2008a-b; Benemann et al, 2003
Pompaccumulatie centrale (valmeer)		140			1,2 ^b			te hoog	?	Tot omstreeks 2025 (?) niet economisch haalbaar volgens (Ummels, 2009)
Laddermill (laddermolen)		?	?		?	?		onbekend	onbekend	Afgezien van een bericht over toepassing op Malta, is nog geen planning van een demonstratieproject gerapporteerd. Daarom valt er over technisch-economische haalbaarheid weinig meer te melden dan dat deze onzeker is

a De verhouding tussen de US\$ en de Euro is gebaseerd op de gemiddelde wisselkoers van 2007 en 2008.

b Opslagcapaciteit valmeer 1,2 GWh.

4. Conclusies en aanbevelingen

Het potentieel van *wind op land* is gedeeltelijk ontwikkeld, maar het offshore potentieel is vrijwel onontgonnen. In deze studie wordt toepassing van wind op het IJsselmeer gerekend tot 'wind op land' en niet 'offshore wind'. Het rijk heeft zich met provincies en gemeenten ten doel gesteld om het vermogen op land van ca. 2.000 MW_e (begin 2009) te verdrievoudigen tot 6.000 MW_e in 2020. Rekening houdend met de knelpunten en randvoorwaarden bij wind op land wordt verondersteld dat windenergie in de omgeving van de Afsluitdijk een relatief groot potentieel heeft van 225-450 MW_e. Gezien de complicaties bij het verkrijgen van een vergunning voor windparken op land (inclusief het IJsselmeer), kan het als een majeur project binnen de ontwikkeling van wind op land worden gezien. Hiermee zou ca. 0,5 tot 1% van het huidige elektriciteitsverbruik duurzaam kunnen worden ingevuld. De kosten zouden kunnen dalen van 8-9,5 ct/kWh in 2009 tot 6-7 ct/kWh in 2020, wat nauwelijks duurder is dan conventioneel opgewekte elektriciteit.

Het potentieel van *fotovoltaïsche energie (PV)* op het talud van de Afsluitdijk wordt geschat op 8-10 MW_e, waarmee ca. 0,007% van de huidige Nederlandse elektriciteitsvraag kan worden gedekt. Aangenomen wordt dat de kosten van zonne-electriciteit dalen van 46-53 ct/kWh in 2009 tot 20-25 ct/kWh in 2020 en 10-15 ct/kWh in 2030. De schattingen van het potentieel van PV in Nederland lopen sterk uiteen, van 6.000 MW_e in 2040 (woningen) tot 75.000 MW_e (technisch potentieel) in 2050 (woningen, gebouwen en open grond). Bij het technische potentieel (75.000 MW_e) past de kanttekening dat elektriciteitsopslag, grondverwerving en netintegratie van relatief kleine zonneparken substantiële additionele kosten met zich meebrengen.

Als het IJsselmeer een significant hoger peil zou krijgen dan de Waddenzee, zou met het verval elektriciteit kunnen worden opgewekt. Het potentieel van *waterkracht c.q. getijdenenergie* bij de Afsluitdijk is 10-50 MW_e en 35-175 GWh/jaar (ongeveer 0,1% van het huidige elektriciteitsverbruik). De kosten zijn naar schatting 13-20 ct/kWh in 2020 en 10-15 ct/kWh in 2030.

De vierde optie die in deze studie is geanalyseerd is die van *osmose-energie*, ook wel genoemd 'Blue Energy'. Deze optie heeft bij de Afsluitdijk een potentieel van 200 MW_e. In 2020 zou hiervan 10 MW_e kunnen zijn gerealiseerd. Op lange termijn zou bij succesvolle ontwikkeling van de techniek ca. 1.500 GWh per jaar kunnen worden opgewekt (ca. 1,5% van het huidige elektriciteitsverbruik). De kosten zijn ca. 10-20 ct/kWh in 2020 en 10-15 ct/kWh in 2030. Deze techniek bevindt zich nog in het R&D-stadium; er zijn nog geen praktische toepassingen gerealiseerd.

De laatste duurzame energieoptie is *biodieselpductie uit aquatische biomassa*. Zeewierteelt wordt op pilot schaal geïntegreerd met visteelt. Zeewierteelt in combinatie met bijvoorbeeld offshore wind is een lange termijn optie met een potentieel van 350 PJ biomassa op basis van een areaal van 5.000 km². Met 2^e generatie processen - het HTU (Hydro Thermal Upgrading) proces - zou biodiesel uit zeewier kunnen worden geproduceerd.

De kosten van biobrandstoffen uit microalgen moeten met een factor 5-10 omlaag (Reith, 2009), door systeemvereenvoudiging c.q. kostenverlaging en toepassing van bioraffinage (bio-refinery). Biodieselpductie uit algen bij de Afsluitdijk is een lange termijn optie (na 2020). Bij 'ideale' klimatologische condities - 'open ponds' - worden deze geschat op ca. US\$ 5 per liter (ca. € 3,5/l) biodiesel in 2009, \$ 2,5 per liter (€ 1,75/l) in 2020 en \$ 1,25/l (€ 0,90/l) in 2030. Opgemerkt dient te worden dat de waarde van algen in andere sectoren (fijn chemicaliën) mogelijk hoger is.

Een *pompaccumulatiesysteem* zoals een *valmeer* in het IJsselmeer is vooralsnog niet rendabel. Dit geldt zeker voor de periode van opbouw van het windturbinevermogen in Nederland (nu 2.000 MW_e op land en 228 MW_e offshore) die, naar het zich laat aanzien, wel tot 2025 zal duren. In de tussenliggende tijd zou extra interconnectie capaciteit (Nederland-VK, tweede interconnector Nederland-Noorwegen) de integratie van windenergie in belangrijke mate kunnen opvangen, in samenhang met warmteopslag bij warmte-krachtcentrales. In het kader van deze studie kon de optie van de *Laddermolen* niet worden gevalideerd. Een feit is dat demonstratie van deze optie niet heeft plaatsgevonden. Afgezien van een bericht over toepassing op Malta, is nog geen planning van een demonstratieproject gerapporteerd. Daarom valt er over technisch-economische haalbaarheid weinig meer te melden dan dat deze onzeker is.

Referenties

- Arcadis (2008): *Afsluitdijk 21^e eeuw - Rapportage fase 2 marktverkenning. Voltooing Zuiderzeewerken: van dam naar Watermachine*. Arcadis, Dredging International, Nuon, H+N+S Landschapsarchitecten en Alkyon, 2008.
http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Afsluitdijk%2021e%20eeuw_tcm174-218398.pdf
- Benemann, J.R. (2008a): *Overview: Algae Oil to Biofuels*. NREL-AFOSR Workshop - Algal Oil for Jet Fuel Production, Arlington, VA, USA, February 19th, 2008.
<http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/benemann.pdf>
- Benemann, J.R. (2008b): *Opportunities and Challenges in Algae Biofuels Production*. Position Paper by Dr. John R. Benemann in line with Algae World 2008.
http://www.futureenergyevents.com/algae/whitepaper/algae_positionpaper.pdf
- Benemann, J.R. et al (2003): *Technology Roadmap for Biofixation of CO₂ and Greenhouse Gas Abatement with Microalgae*. IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham, UK, 2004. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/carbon-seq/PDFs/017.pdf>
- Black, S. (2008): *Carbon captures the moment: A chilled ammonia pilot project*. Power Engineering International, June 2008, pp. 40-42.
- Borenstein, S. (2008): *The Market Value and Cost of Solar Photovoltaic Electricity Production*. University of California Energy Institute, Berkeley, California, January 2008.
- Boskalis (2008): *Monument Afsluitdijk - Visie op behoud en groei*. Boskalis bv, West 8 Landscape architects & Urban design bv, Witteveen+Bos bv, 2008.
http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Monument%20Afsluitdijk_tcm174-193370.pdf
- CBS (2008): *Duurzame energie in Nederland 2007*. Centraal Bureau voor de Statistiek, Voorburg/Heerlen, 2008.
- Dalton, S. (2004): *Cost Comparison IGCC and Advanced Coal*. EPRI, Roundtable on Deploying Advanced Clean Coal Plants, July 29, 2004.
http://www.climatevision.gov/pdfs/coal_roundtable/dalton.pdf
- Davidson, B. (2007): *A Feasibility Study: Tidal Power Generation for a Remote, Off-Grid Community on the British Columbia Coast*. Prepared for British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, Canada, February 21, 2007.
- Davis, K.L. (2007): *Proposed IGCC/CCS Incentives in Utah (ES Cat B and Cat C)*. Utah Blue Ribbon Advisory Council on Climate Change - Energy Supply Catalog of State Actions, PacifiCorp, June 4, 2007.
http://www.deq.utah.gov/BRAC_Climate/docs/Proposed_IGCC_CCS-UT_Energy_Supply_State_A.pdf
- DHV (2008a): *WaddenWerken - Een veilige kering die meegroeit met de zee. Eindrapportage marktverkenning Afsluitdijk*. DHV bv, IMARES en Bureau Alle Hesper, november 2008. http://www.rijkswaterstaat.nl/images/WaddenWerken_tcm174-218403.pdf
- DHV (2008b): *Kansen voor algen in Noord Nederland*. DHV-Nonagon Knowledge Transfer bv, NN-ON20080313, 26 mei 2008.
<http://www.provinciegroningen.nl/informatiebalie/publicaties/kansenvalgen.pdf>
- DTI (2004): *Cycloidal Tidal Power Generation - Phase 1*. QinetiQ Ltd, on behalf of DTI, UK, 2004.

- Dugstad, J. (2007): *Osmotic Power “a new, renewable energy source”*. Desalination and the Environment, Halkidiki, Greece, April 2007.
http://www.statkraft.com/Images/Osmotic%20Power%20presentation%20April%202007_tcm4-8796.pdf
- ECN (2009): *Kosten van kleinschalige waterkracht en getijdenenergie in Nederland*. Notitie ECN Beleidsstudies, Petten, 26 januari 2009, ECN-BS--09-001.
- EPOBIO (2007): *Micro- and macro-algae: utility for industrial applications*. EPOBIO: Realising the Economic Potential of Sustainable Resources - Bioproducts from Non-food Crops, September 2007. <http://www.epobio.net/pdfs/0709AquaticReport.pdf>
- Haskoning (2008): *Natuurlijk Afsluitdijk. Marktverkenning fase 2*. Haskoning Nederland bv, Wubbo Ockels bv, Coöperatieve Centrale Raiffeisen-Boerenleenbank B.A., Van Oord Dredging and Marine Contractors bv, Koninklijke BAM Groep N.V., Lievense bv, Eneco Milieu bv, december 2008.
http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Natuurlijk%20Afsluitdijk_tcm174-218400.pdf
- Lako, P., J. van Stralen, L.W.M. Beurskens (2009): *Update of European wind potentials and cost data for the ADMIRE REBUS model*. ECN-E--08-001 (forthcoming).
- Lako, P. (2008): *Mapping climate mitigation technologies/goods within the energy supply sector - Study on state of the art of renewables for ICTSD*. ECN-E--08-072.
- Lako, P. (2004): *Coal-fired power technologies - Coal-fired power options on the brink of climate policies*. ECN-C--04-076, October 2004.
- Lako, P. et al (2003): *Hydropower Development with a focus on Asia and Western Europe*. ECN and Verbundplan (Austria), ECN, Petten, July 2003, ECN-C--03-027.
- Lundin, J., et al (2006): *EUSUSTEL WP3 Report - Geothermal power production*. Uppsala University, Sweden, 2006.
http://eusustel.be/public/documents_public/WP/WP3/WP3_Geothermal_energyFINAL.pdf
- Molenbroek, E.C. (2007): *Energie uit zout en zoet water met osmose*. Ecofys in opdracht van Rijkswaterstaat, 17 oktober 2007.
- Mozaffarian, M. et al (2009): *European biomass resources, bio-energy prices, and power generation technologies for energy and climate models*. ECN-E--09-008 (forthcoming).
- Noordpeil (2008): *Monument in Balans - Integrale visie op de Afsluitdijk*. Noordpeil landschap en stedenbouw, GDArchitecten, CE Delft, Ingenieursbureau Oranjewoud bv, 2008.
http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Monument%20in%20Balans_tcm174-218399.pdf
- PDE (2007): *Naar een duurzame elektriciteitsvoorziening - Transitiepad fotonvoltaïsche zonne-energie*. Platform Duurzame Elektriciteitsvoorziening, Nederland, 14 november 2007.
http://www.senternovem.nl/energietransitiedev/onderwerpen/zon_pv.asp
- Post, J. (2006): *Reverse Electro Dialysis from concept to application*. REDstack, March 2006.
http://www.redstack.nl/RS-Pres01/RS-pres_bestanden/frame.htm
- Reith, J.H. (2009): *Persoonlijke mededeling J.H. Reith*, ECN.

- Reith, J.H. et al (2005): *BIO-OFFSHORE - Grootschalige teelt van zeeuwen in combinatie met offshore windparken in de Noordzee*. ECN, PRI (Plant Research International) Wageningen Universiteit en Research centrum (WUR) en Nederlands Instituut voor Visserijonderzoek / RIVO, Petten/Wageningen, ECN-C--05-008, Augustus 2005.
- RWS (2008): *Onderzoek integrale verbetering Afsluitdijk*. College van Rijksadviseurs (CRA), Den Haag, Kenmerk 2008074274, 8 september 2008.
http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Advies%20rijksbouwmeester%20toekomst%20Afsluitdijk_tcm174-204149.pdf
- Schulz, T. (2006): *The economics of micro-algae production and processing into biodiesel*. Department of Agriculture Western Australia, Australia, December 2006.
http://www.agric.wa.gov.au/content/SUST/biofuel/Algae_biodieselTSDec062.pdf
- Skilhagen, S.E. (2008): *Osmotic Power - A new, renewable energy source*. Statkraft, Norway, 2008.
http://www.statkraft.com/Images/Osmotic%20Power%20presentation%20March%202008_tcm4-8797.pdf
- Statkraft (2005): *Osmotic power - A huge renewable energy source*. Statkraft, Norway, 2005.
http://www.statkraft.no/Images/Statkraft%20Osmotic%20Power%20Update%20SCRE EN_tcm3-8318.pdf
- Tilburg, van, X. et al (2008): *Technisch-economische parameters van duurzame energieopties - Eindadvies basisbedragen voor de SDE-regeling*. ECN/KEMA, Petten/Arnhem, ECN-E--08-090. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2008/e08090.pdf>
- Ummels, B.C. (2009): *Power System Operation with Large-Scale Wind Power in Liberalised Environments*. Proefschrift Technische Universiteit Delft, 26 februari 2009.
- VROM (2008): *Nationaal plan van aanpak Windenergie*. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer in samenwerking met andere Ministeries en betrokken partijen, Den Haag, 30 januari 2008.
<http://www.vrom.nl/pagina.html?id=2706&sp=2&dn=8093>

Internetbronnen

1. [Http://www.vrom.nl/pagina.html?id=38585](http://www.vrom.nl/pagina.html?id=38585)
2. [Http://www.nevadasolarone.net/the-plant](http://www.nevadasolarone.net/the-plant)
3. [Http://www.power-technology.com/projects/pelamis/](http://www.power-technology.com/projects/pelamis/)
4. [Http://www.rise.org.au/info/Tech/wave/index.html](http://www.rise.org.au/info/Tech/wave/index.html)
5. [Http://www.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/6beb8a00b54b0a94832572fa002f4214/\\$file/WavearticleABBReview.pdf](http://www.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/6beb8a00b54b0a94832572fa002f4214/$file/WavearticleABBReview.pdf)
6. [Http://renewableenergydev.com/red/tidal-power-south-korean-300mw-development](http://renewableenergydev.com/red/tidal-power-south-korean-300mw-development)
7. [Http://www.snm.nl/page.php?pageID=43&itemID=3224&editieID=3217](http://www.snm.nl/page.php?pageID=43&itemID=3224&editieID=3217)
8. [Http://blogs.flinders.edu.au/flinders-news/tag/biodiesel-from-microalgae](http://blogs.flinders.edu.au/flinders-news/tag/biodiesel-from-microalgae).