

Water als duurzame energiebron

Aanbevelingen en energierugverdiertijden van
acht technologieën

Water als duurzame energiebron

Aanbevelingen en energierugverdiertijden van acht technologieën

Door: Maarten van de Berg, Fieke Geurts, Nico Stolk

Datum: 19 februari 2010

Project nummer: PWNDNL084685

© Ecofys 2010

In opdracht van Deltares in het kader van het WINN (Waterinnovatie
Rijkswaterstaat)

Voorwoord

Onderliggend rapport geeft een overzicht van de energieprestaties van acht water gerelateerde energieconversietechnologieën: laag verval waterkracht, warmte koude opslag, benutting van energie uit oppervlaktewater, getijdenstroming, getijdenenergie op verval, golfenergie, aquatische biomassa en blue energy.

De resultaten bouwen voort op de resultaten *Water als bron van duurzame energie. Energiebalans en omgevingseffecten van energietechnologieën met water*, dat in 2009 door Ecofys in opdracht van Deltares is opgesteld. De samenhang met het eerdere rapport is als volgt:

- Er zijn drie nieuwe technologieën bestudeerd: laag verval waterkracht, energie uit oppervlaktewater en getijdenenergie op verval;
- De nadruk is vooral gelegd op de energierugverdiensijd. Het begrip CO₂-terugverdiensijd is vervangen door CO₂-intensiteit waar mogelijk;
- Omgevingseffecten zijn in dit rapport buiten beschouwing gelaten;
- Er is aandacht besteed aan een eenduidige weergave in tabelvorm;
- De vergelijking met zon-PV en wind is uitgebreid;

Nieuwe inzichten vormden aanleiding tot nuancering van enkele resultaten en daarmee gewijzigde conclusies ten opzichte van het eerste rapport.

- De methodologische grondslag van het onderzoek is niet langer een levenscyclus analyse. Er is gekozen te spreken over een *ketenaanpak*. Dit geeft beter weer dat informatie vaak niet uit primaire bronnen beschikbaar is en dat "energie" een van de vele milieu-impacts is die in een levenscyclusanalyse onderzocht worden.
- Hoewel aquatische biomassa zich richt op een gesloten algenkweekstelsel op land, moeten we concluderen dat gesloten kweek in Nederland niet méér voor de hand ligt dan open teelt in 'raceway ponds' of offshore wierenteelt. Open of offshore teelt dient nader onderzocht te worden.
- In het eerdere rapport wordt geconcludeerd dat de energierugverdiensijd van Blue energy ongunstig is. Gezien de stand van de techniek en de energetische potentie is het echter zaak de technologie niet op basis van een tussenresultaat af te schrijven.

Wij willen de volgende mensen bedanken voor hun bijdrage aan dit rapport. Marcel Bruggers en Joost Icke (Deltares), Benno Schepers en Anneke Sleeswijk (CE Delft), Leo Korving en Tom Van Den Noortgaete (Royal Haskoning), Hans Chr Sorensen (Wavedragon), Jan Post (REDstack), Peter Wagener (Business Development Holland b.v.), Jan Maas (Delta N.V.), Jos van den Bedem (Unica), Peter Scheijgrond, Anton Schaap, Anouk Florentinus, Edith Molenbroek, Sjors van Iersel, Anna Ritzen, Yvonne de Bie, Margriet Geesink, Hanneke Pieters, Marjorie Thilliez, Robert Harmsen, Lennart Luten, Lucas van den Boogaard (allen Ecofys).

Nico Stolk, Maarten van den Berg en Fieke Geurts

Samenvatting

Het thema duurzaamheid wordt steeds belangrijker in onze maatschappij. Steeds meer mensen, bedrijven en overheden raken doordrongen van de noodzaak (en het nut) om op een verantwoorde wijze om te gaan met hulpbronnen en zo het milieu te sparen.

De Nederlandse regering heeft als doelstelling in 2020 20% van de energievraag op te wekken met duurzame energie. De bestaande technologieën die daaraan kunnen bijdragen zijn onder andere zonne-energie, windenergie, waterkracht, biomassa en aardwarmte. Om echt verder te komen zijn er werkende, betaalbare, milieuvriendelijke en in de omgeving inpasbare innovatieve technologieën nodig. Nederland is een waterland bij uitstek – en energie uit waterkracht van rivieren, getijden en golfbewegingen, fysisch-chemische energie in zoet-zoutgradiënten in de kuststreken en biomassaproductie in aquaculturen zijn innovaties die kunnen bijdragen aan de doelstelling van de regering.

Voor een duurzame energievoorziening is het zaak dat de opties gekozen worden die een netto positieve energiebalans hebben. Dat wil zeggen, opties die meer energie opleveren dan verbruiken gedurende hun levensduur. Voor acht watergerelateerde technieken is gekeken naar de energierugverdiëntijd: de tijd die het kost voordat de energie die het gekost heeft voor grondstofwinning, productie, transport, installatie en onderhoud, weer is terugverdiend. De technieken zijn gespiegeld aan de resultaten voor zon-PV en wind.

Ecofys concludeert dat de energierugverdiëntijden voor water gerelateerde energietechnologieën uiteenlopen en sterk afhankelijk zijn van de fase van ontwikkeling van de techniek.

- Van de bestudeerde technologieën zijn (traditionele) waterkracht en warmte koude opslag het verst ontwikkeld. Deze techniek hebben ook de kortste energierugverdiëntijd (1 tot 2,8 jaar). Dit betekent een energierugverdiëntijd die in de zelfde orde van grote ligt als windenergie (tussen de 0,5 en 2,5 jaar afhankelijk van locatie).
- De twee energietechnieken die op dit moment nog in de kinderschoenen staan (aquatische biomassa en blue energie (RED)), verdienen zich energetisch nog niet of nauwelijks terug. Technologische verbeteringen zijn nodig om tot (aanzienlijk) lagere energierugverdiëntijden te komen. In beide technieken zijn er ontwikkelingen te verwachten die zullen leiden tot een lagere energierugverdiëntijd.
- Voor getijde- en golf energie geldt dat de energierugverdiëntijd varieert tussen de 3,5 en 15 jaar voor de Nederlandse situatie. Het gaat hierbij om technieken die onder optimale omstandigheden al hebben laten zien dat energierugverdiëntijden rond de 1 à 2 jaar mogelijk zijn. Deze technieken zijn te vergelijken met zon-pv in Nederland, waarvoor een energierugverdiëntijd in

Nederland geldt tussen de 3-11 jaar, afhankelijk van de gebruikte techniek en productiemethode.

Het onderliggende rapport gaat allereerst in op de onderzoeksaanpak in hoofdstuk 1. In hoofdstuk 2 worden de conclusies en aanbevelingen voor verdere ontwikkeling per techniek gegeven. Vervolgens wordt er verder ingegaan op de verschillende technieken. In hoofdstuk 3 worden de resultaten uit het literatuuronderzoek naar energierugverdiertijden in Nederland voor zon-PV en wind gegeven. In de hoofdstukken 4 tot en met 11 worden de acht watergerelateerde technieken uitgediept.

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Inleiding | 1 |
| 1.1 | Doel..... | 1 |
| 1.2 | Onderzoeksaanpak | 2 |
| 1.2.1 | Systeemgrenzen..... | 3 |
| 1.2.2 | Allocatie | 3 |
| 1.2.3 | Dataverzameling | 4 |
| 2 | Conclusies en aanbevelingen | 5 |
| 2.1 | Algemene conclusie | 5 |
| 2.2 | Conclusies en aanbevelingen voor verdere ontwikkeling per techniek | 7 |
| 2.2.1 | Waterkracht..... | 7 |
| 2.2.2 | Warmte koude opslag | 7 |
| 2.2.3 | Energie uit getijdenstroming | 7 |
| 2.2.4 | Getijdenenergie uit verval..... | 8 |
| 2.2.5 | Golfenergie | 9 |
| 2.2.6 | Aquatische biomassa..... | 9 |
| 2.2.7 | Blue energy (RED)..... | 10 |
| 3 | Energie terugverdientijden van PV en wind | 11 |
| 3.1 | Resultaten | 11 |
| 4 | Gestuwde waterkracht | 14 |
| 4.1 | Korte beschrijving technologie..... | 14 |
| 4.2 | Energiebalans | 15 |
| 4.2.1 | Energie-input | 15 |
| 4.2.2 | Opbrengsten | 17 |
| 4.2.3 | Resultaten en gevoeligheid | 17 |
| 4.3 | Conclusies en aanbevelingen..... | 17 |
| 5 | Warmte koude opslag – conventioneel | 18 |
| 5.1 | Korte beschrijving technologie..... | 18 |
| 5.2 | Energiebalans | 19 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.2.1 | Energie-input | 20 |
| 5.2.2 | Opbrengsten | 21 |
| 5.2.3 | Resultaten en gevoeligheid | 22 |
| 5.3 | Conclusies en aanbevelingen | 23 |
| 6 | Warmte koude opslag – regeneratie met oppervlaktewater | 24 |
| 6.1 | Korte beschrijving technologie..... | 24 |
| 6.2 | Energiebalans..... | 25 |
| 6.2.1 | Energie-input | 26 |
| 6.2.2 | Opbrengsten | 27 |
| 6.2.3 | Resultaten en gevoeligheid | 28 |
| 6.3 | Conclusies en aanbevelingen | 28 |
| 7 | Getijstroom energie..... | 30 |
| 7.1 | Korte beschrijving technologie..... | 30 |
| 7.2 | Energiebalans..... | 31 |
| 7.2.1 | Energie-input | 32 |
| 7.2.2 | Opbrengsten | 33 |
| 7.2.3 | Resultaten en gevoeligheid | 33 |
| 7.3 | Conclusies en aanbevelingen | 34 |
| 8 | Getijdenverval | 36 |
| 8.1 | Korte beschrijving technologie..... | 36 |
| 8.2 | Energiebalans..... | 37 |
| 8.2.1 | Energie-input | 37 |
| 8.2.2 | Opbrengsten | 38 |
| 8.2.3 | Resultaten en gevoeligheid | 39 |
| 8.3 | Conclusies en aanbevelingen | 39 |
| 9 | Golf energie | 41 |
| 9.1 | Korte beschrijving technologie..... | 41 |
| 9.2 | Energiebalans..... | 42 |
| 9.2.1 | Energie-input | 43 |
| 9.2.2 | Opbrengsten | 44 |

| | | |
|-----------|-------------------------------------|-----------|
| 9.2.3 | Resultaten en gevoeligheid | 44 |
| 9.3 | Conclusies en aanbevelingen..... | 46 |
| 10 | Aquatische biomassa | 48 |
| 10.1 | Korte beschrijving technologie..... | 48 |
| 10.2 | Energiebalans | 51 |
| 10.2.1 | Energie-input | 52 |
| 10.2.2 | Opbrengsten | 54 |
| 10.2.3 | Resultaten en gevoeligheid | 54 |
| 10.3 | Conclusies en aanbevelingen..... | 57 |
| 11 | Blue energy (RED) | 58 |
| 11.1 | Korte beschrijving technologie..... | 58 |
| 11.2 | Energiebalans | 59 |
| 11.2.1 | Energie-input | 59 |
| 11.2.2 | Opbrengsten | 63 |
| 11.2.3 | Resultaten en gevoeligheid | 63 |
| 11.3 | Conclusies en aanbevelingen..... | 64 |

1 Inleiding

Het thema duurzaamheid wordt steeds belangrijker in onze maatschappij. Steeds meer mensen, bedrijven en overheden raken doordrongen van de noodzaak (en het nut) om op een verantwoorde wijze om te gaan met hulpbronnen en zo het milieu te sparen.

De Nederlandse regering heeft als doelstelling in 2020 20% van de energievraag op te wekken met duurzame energie. De bestaande technologieën die daaraan kunnen bijdragen zijn onder andere zonne-energie, windenergie, waterkracht, biomassa en aardwarmte. Om echt verder te komen zijn er werkende, betaalbare, milieuvriendelijke en in de omgeving inpasbare innovatieve technologieën nodig. Nederland is een waterland bij uitstek – en energie uit waterkracht van rivieren, getijden en golfbewegingen, fysisch-chemische energie in zoet-zoutgradiënten in de kuststreken en biomassaproductie in aquaculturen zijn innovaties die kunnen bijdragen aan de doelstelling van de regering.

1.1 Doel

Voor een duurzame energievoorziening is het zaak dat de opties gekozen worden die een netto positieve energiebalans hebben. Dat wil zeggen, opties die meer energie opleveren dan verbruiken gedurende hun levensduur. Daarbij is het van belang dat duurzame energietechnologieën ook zo min mogelijk broeikasgassen uitstoten. De vragen die in dit rapport worden beantwoord zijn:

- 1** Hoe lang moet de installatie, waarmee energie uit water wordt opgewekt, energie leveren om de verbruikte energie voor het realiseren van de betreffende installatie in Nederland, terug te verdienen? Met andere woorden: wat is de energie terugverdientijd (ETVT) van de installatie?
- 2** Hoe vaak betaalt een installatie zich energetisch over de gehele levensduur terug? Met andere woorden: Wat is de energieproductie ratio (EPR) van de installatie?
- 3** Hoe schoon, in termen van broeikasgasemissies, is de installatie? Met andere woorden: wat is de CO₂ intensiteit van de installatie?

De nadruk van dit onderzoek ligt op de energetische aspecten van de technologieën. Waar mogelijk worden ook de CO₂ prestaties gepresenteerd maar niet voor alle technologieën is hierover voldoende informatie beschikbaar.

De ETVT geeft aan hoe lang het duurt voordat de energie die het gekost heeft voor grondstofwinning, productie, transport, installatie en onderhoud, weer is terugverdiend.

$$Energie_terugverdiëntijd = \frac{Totaal_Energie_Benodigd}{Energie_Jaarlijks_Opgewekt}$$

De ETVT geeft een goede indicatie van de energie-efficiënte van de systemen en is een maat voor de snelheid waarmee het systeem zich energetisch terugverdiend. Echter, het maakt een groot verschil of een systeem met hoge energie-investeringskosten dat zich na 1 jaar terugverdiend, een levensduur heeft van 2 jaar of van 20 jaar. Door de (verwachte) levensduur van het systeem in de berekening mee te nemen kan de energieproductieratio (afgekort met EPR) berekend worden. Samen met de ETVT geeft dit een volledig beeld van de energieprestaties.

$$Energie_Productie_Ratio = \frac{Totaal_Energie_Opgewekt}{Totaal_Energie_Benodigd}$$

In deze studie is gekozen om (waar mogelijk binnen de scope van het project) naast de ETVT en de EPR, de CO₂ intensiteit (in gram CO₂ equivalenten per kWh) te presenteren, een indicator voor de impactcategorie klimaatverandering. De meerwaarde van de CO₂-intensiteit ten opzichte van de energie-intensiteit is dat CO₂ emissies die niet direct aan energieverbruik verbonden zijn, zoals emissies van cement productie, worden meegenomen. De ETVT, EPR en CO₂ intensiteit geeft een goed beeld van de energie en klimaat prestaties van de bestudeerde vormen van duurzame energie.

$$CO_2_intensiteit = \frac{Totaal_CO_2_Geëmitteerd (gCO_2eq)}{Totaal_opgewekte_energie kWh}$$

1.2 Onderzoeksaanpak

De analyse van de ETVT, EPR en CO₂ intensiteit wordt gemaakt op basis van een ketenanalyse. De resultaten van de energierugverdiëntijden voor energie-opwekkers uit water worden vervolgens vergeleken met energierugverdiëntijden van andere duurzame energietechnologieën, te weten wind en zonne-energie (zon-pv).

De ketenanalyse die wordt gehanteerd is een vereenvoudigde vorm van de levenscyclusanalyse (LCA). Een levenscyclusanalyse is een methode waarmee de milieueffecten van een product, proces of dienst inzichtelijk kunnen worden gemaakt die, zoals de naam al zegt, optreden gedurende de gehele levenscyclus. Voor ontwerpers en beleidsmakers is het een handige methode om de milieueffecten van producten of processen te reduceren, respectievelijk te vergelijken. Ook energieconversietechnologieën kunnen aan de hand van levenscyclusanalyse studies met elkaar vergeleken worden, waarbij vooral het energieverbruik en de CO₂-emissies belangrijke indicatoren zijn.

Om een studie te betitelen met de term LCA moet de ISO 14044 standaard gevolgd worden. Hierin worden hoge eisen gesteld aan de structuur van de studie, maar vooral aan de kwaliteit van de gebruikte data. Weliswaar wordt in deze studie naar energie converstechnologieën zoveel mogelijk aangesloten bij de geldende methodiek, voor een echte levenscyclusanalyse worden onvoldoende aangesloten bij de voorwaarden van ISO 14044.

1.2.1 Systeemgrenzen

Alle processen van *cradle to grave* (wieg tot graf), die een significante bijdrage leveren aan het energieverbruik en de CO₂-emissies van de betreffende energieconversietechnologieën, worden meegenomen in de berekening. Grofweg kunnen de levenscyclusimpacts van energiesystemen verdeeld worden in vier ketenonderdelen:

- Het delven van de grondstoffen en het produceren van de verschillende componenten,
- Assemblage en installatie,
- Operatie en onderhoud,
- Ontmanteling en afval verwerking.

1.2.2 Allocatie

Een van de meest bediscussieerde aspecten binnen de levenscyclusanalyse is het gebruik van allocatie (oftewel toekenning) methoden voor de verdeling van impacts tussen nieuwe en gerecyclede materialen. Een goed voorbeeld is staalrecycling. De productie van nieuw staal heeft relatief hoge energiekosten in vergelijking tot gerecycled staal (de erts moet gemijnd worden), waardoor het een grote impact heeft of het effect van recycling wel of niet wordt meegenomen.

De ketenanalyse biedt twee verschillende mogelijkheden voor omgang met recycling:

- 1** *Systeem uitbreiding*. Hierbij wordt de gehele levenscyclus van een product dat meerdere gebruiksfasen kent (bijvoorbeeld nieuw en gerecycled staal) beschouwd als één geheel en worden de impacts van de verschillende fasen bij elkaar opgeteld. ISO 14044 schrijft deze methode voor. Met deze methode kan echter geen vergelijking gemaakt worden tussen een nieuw product en een gerecycled product.
- 2** *Allocatie*. Hierbij worden de impacts van de gehele levenscyclus van een product verdeeld over de verschillende gebruiksfasen (bijvoorbeeld over nieuw en gerecycled staal). Deze methode moet worden gehanteerd wanneer een vergelijking wordt gemaakt tussen een nieuw en een gerecycled product die dezelfde functies hebben. Omdat verschillende allocatie methoden gekozen kunnen worden, kunnen uitkomsten variëren.

In deze studie is gekozen voor *cut-off allocatie*, tenzij anders is aangegeven. Hierbij worden de impacts van een nieuw product volledig toegekend aan het nieuwe product en worden de impacts van recycling volledig toegekend aan het gerecyclede product. Er wordt dus geen credit aan het nieuwe product toegekend voor eventuele recycling

aan het einde van de eerste gebruiksfase. Enerzijds 'profiteert' het gerecyclede product van de impacts die veroorzaakt zijn bij de productie van het nieuwe product. Anderzijds vormt het een stimulans om producten te recyclen. Bij een andere allocatiemethode die soms gebruikt wordt in literatuurstudies wordt op voorhand aangenomen dat het nieuwe product gerecycled wordt. Door toekenning van recycling credits wordt de impact van het nieuwe product dan lager berekend.

1.2.3 Dataverzameling

Bij de dataverzameling is gebruikt gemaakt van verschillende bronnen. Waar mogelijk wordt voorgronddata gebruikt (specifieke data zoals productie- en operatieprocessen) van de installaties in kwestie. Deze informatie is verkregen uit bestaande levenscyclus- en ketenanalyses en via de netwerken van Ecofys en Deltares (leveranciers en onderzoeksinstituten). Achtergronddata wordt gebruikt voor niet-specifieke processen zoals transport- en afvalverwerking. Deze gegevens zijn verkregen uit verschillende levenscyclusanalyse databases en berekend met de SimaPro 7.1 software. Ook wanneer specifieke informatie ontbrak, is teruggevallen op gegevens van vergelijkbare processen uit bestaande levenscyclusanalyse databases. Waar geen representatieve processen werden gevonden, is door experts een inschatting gemaakt.

2 Conclusies en aanbevelingen

2.1 Algemene conclusie

Ecofys concludeert dat de energierugverdiertijden voor water gerelateerde energietechnologieën uiteenlopen en sterk afhankelijk zijn van de fase van ontwikkeling van de techniek. In de onderstaande figuur zijn de energierugverdiertijden weergegeven voor zowel de watergerelateerde technologieën als voor zon-pv en windenergie. Technieken die in Nederland kunnen worden toegepast zijn in oranje weergegeven. Indien ook informatie voorhanden is voor prestaties van de techniek in omstandigheden buiten Nederland, is dat in lichtgrijs aangegeven. Het mogelijke effect van technologische ontwikkelingen is met lichtgrijs gearceerd aangegeven.

Uit het onderzoek en de figuur kunnen de volgende punten worden afgeleid:

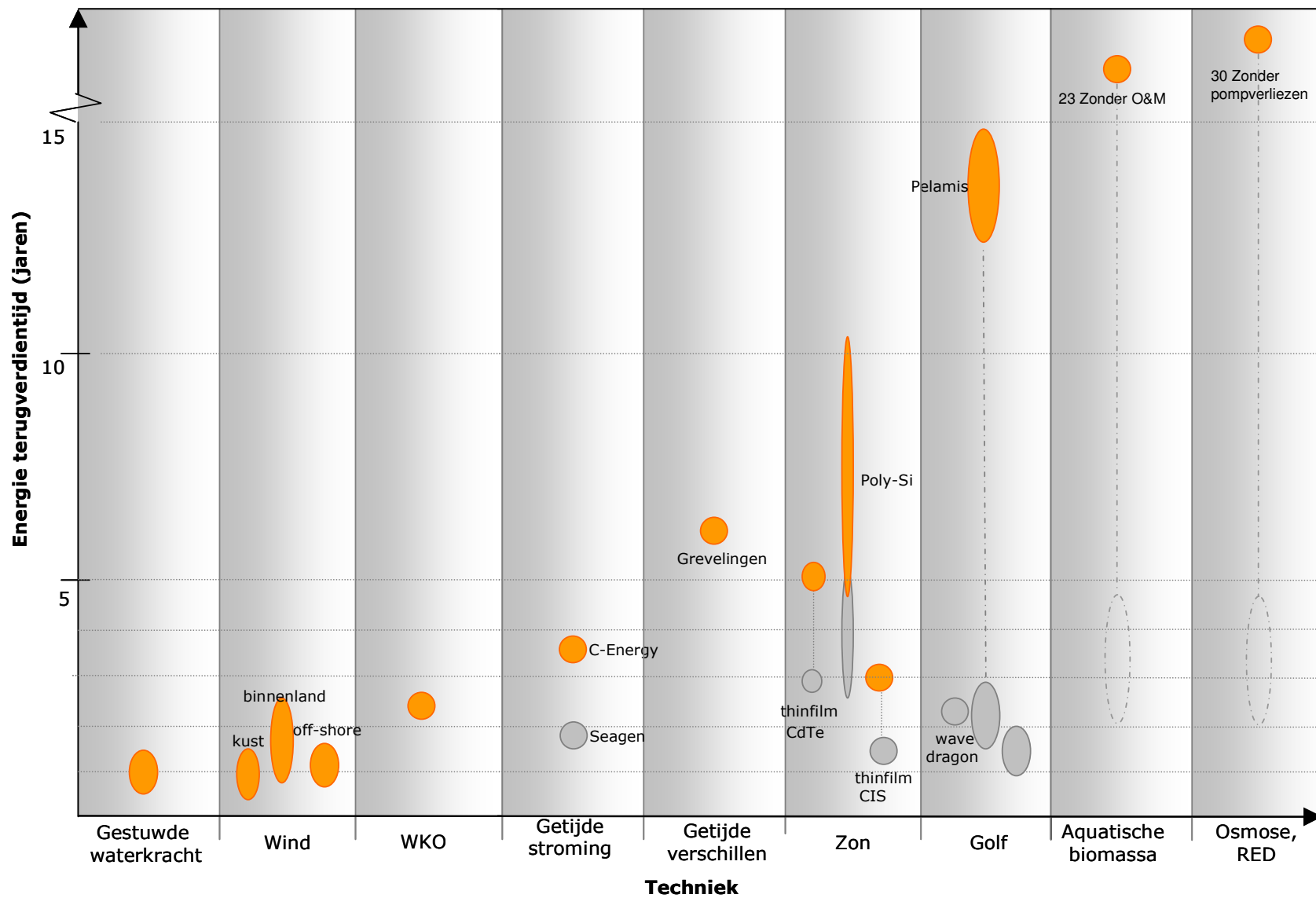
- Van de bestudeerde technologieën zijn (traditionele) waterkracht en warmte koude opslag het meest ontwikkeld. Deze techniek hebben ook de kortste ETVT (1 tot 2,8 jaar). Dit betekent een ETVT die in de zelfde orde van grote ligt als windenergie (tussen de 0,5 en 2,5 jaar afhankelijk van locatie).
- De twee energietechnieken die op dit moment nog in de kinderschoenen staan (aquatische biomassa en blue energie (RED)), verdienen zich energetisch nog niet of nauwelijks terug. Technologische verbeteringen zijn nodig om tot (aanzienlijk) lagere energierugverdiertijden te komen. In beide technieken zijn er ontwikkelingen te verwachten die zullen leiden tot een lagere ETVT.
- Voor getijde- en golf energie geldt dat de ETVT varieert tussen de 3,5 en 15 jaar voor de Nederlandse situatie. Het gaat hierbij om technieken die onder optimale omstandigheden al hebben laten zien dat ETVTen rond de 1 à 2 jaar mogelijk zijn. Deze technieken zijn te vergelijken met zon-pv in Nederland, waarvoor een ETVT in Nederland geldt tussen de 3-11 jaar, afhankelijk van de gebruikte techniek en productiemethode.

Legenda:

Van toepassing voor Nederland

Van toepassing bij omstandigheden buiten Nederland

Theoretisch haalbaar



2.2 Conclusies en aanbevelingen voor verdere ontwikkeling per techniek

2.2.1 Waterkracht

In Nederland staan vier "grotere" waterkracht centrales, bij Hagestijn in de Lek (1,8 MW uit 1958), Maurik in de Nederrijn (10MW uit 1988), bij Linne in de Maas (11,5 MW, 1989) en bij Lith in de Maas (14 MW, 1990). Deze centrales maken gebruik van gestuwde waterkracht in combinatie met aanwezige kunstwerken (stuw/sluis) en maken gebruik van het verschil in hoogte van de waterniveaus. Waterkrachtcentrales zijn een bestaande techniek, wat zich onder andere uit in een gunstige ETVT. Voor de waterkrachtcentrale in de Maas bij Linne wordt deze geschat rond de 0,9 jaar.

Om de techniek verder in Nederland toe te passen, zijn met name het aantal geschikte locaties en vergunningsprocedures beperkende factoren. In het buitenland wordt momenteel onderzoek gedaan naar turbines die gebruik maken van laagverval en die visvriendelijk zijn. Deze lage verval turbines zijn kansrijk in Nederland.

2.2.2 Warmte koude opslag

Warmte koude opslag is een techniek waarbij water als medium wordt gebruikt om omgevingswarmte te gebruiken voor de verwarming en koeling van gebouwen. Voor WKO in een open bron heeft Nederland een gunstig klimaat en geografie. Er zijn veel aquifers (en belangrijker, geen gesteenten) en in veel gevallen zal met het kleine verschil in temperatuur tussen de bron en het afgiftesysteem in geval van lage temperatuur verwarming een gunstige prestatiecoëfficiënt (COP) bereikt kunnen worden. WKO wekt geen energie op maar leidt tot energiebesparing. Door de besparing ten opzichte van een gasgestookt referentiesysteem zal de energie investering binnen 2,8 jaar terugverdiend zijn. Wanneer de warmtevraag groter is dan de koudevraag en de bron geregenereerd moet worden is regeneratie met warmte uit oppervlaktewater een energiezuinig alternatief. Wel dient oppervlaktewater in de buurt van de bron voorhanden te zijn om energiekosten voor het buizensysteem en pompenergieverliezen te beperken.

Om de techniek verder in Nederland te verspreiden is momenteel marktacceptatie het belangrijkste punt, waarbij goede voorlichting en bekendheid met de techniek van groot belang zijn. De techniek zou bij alle nieuwbouw de standaard moeten zijn. Technologische verbetering op het vlak van warmtewisselaars is wel gewenst. Veel 'goedkope' warmtewisselaars (van koper/nikkel) zijn gevoelig voor corrosie. Aan de betere kwaliteit titanium warmtepompen zitten hogere energieproductiekosten verbonden. Innovaties op het gebied van kunststof warmtewisselaars zouden deze hoge energiekosten omlaag kunnen brengen en het probleem van corrosie omzeilen.

2.2.3 Energie uit getijdenstroming

Opwekking van energie uit getijdenstroming wordt in Noord-Ierland precommercieel toegepast met de Seagen turbine van Marine Current Turbines. Deze vrije

stromingsinstallatie heeft een ETVT van ongeveer 1,5 jaar. Voor deze energierugverdiensdijd zijn stroomsnelheden van 2,25 tot 2,5 m/s nodig. Stroomsnelheden in Nederland vallen op de meeste locaties (afgezien van de Oosterscheldekering) lager uit. De eerste proefinstallatie voor getijdenstroom energie in Nederland is C-energy in de Westerschelde. De C-Energy is ontworpen voor een stroomsnelheid van maximaal 2 m/s. De energierugverdiensdijd van deze installatie is ongeveer 3,7 jaar (waarbij niet gerekend is met opbrengsten uit golfslag). De ETVT is erg gevoelig voor de stroomsnelheid, aangezien kleine verschillen in stroomsnelheid een groot effect hebben op de opbrengst - een verdubbeling in stroomsnelheid is een achtvoud in opbrengst.

Getijdenstroom energie is voor Nederland redelijk interessant, maar bevindt zich nog wel in de pilot fase. De techniek kan toegepast worden op plaatsen waar de stroming (eventueel kunstmatig) groter is dan 2 m/s. Om de techniek verder te ontwikkelen is het nodig om proefinstallaties voor langere tijd (tot vijftien jaar) financieel te ondersteunen. De energiebedrijven en offshore industrie zouden hier een belangrijke rol in kunnen spelen. Buitenlandse energiebedrijven hebben zich vaak gebonden aan de ontwikkeling van een bepaalde installatie, in Nederland is dit nog niet het geval. Om de techniek verder te ontwikkelen is met name onderzoek naar de impact van de installaties op vissen en zeehonden van belang. Daarnaast zijn er generieke technische problemen rondom corrosie en staalmoeheid.

2.2.4 Getijdenenergie uit verval

Benutting van getijdenenergie uit verval vindt in Nederland nog niet plaats. De meest bekende centrale van dit soort staat in La Rance, Frankrijk. Door de afsluiting van een bassin met een dam (in deze studie de Brouwersdam) ontstaat bij eb en vloed een hoogteverschil. De potentiële energie kan worden benut door drukturbines (die twee kanten op werken) in de dam te plaatsen. Bij maximale openstelling van de sluisen kan in het Grevelingenmeer een hoogteverschil van meer dan een meter worden gerealiseerd. Dit kan echter niet zonder aanpassingen aan havens en oevers van het Grevelingenmeer. Hoewel ongunstiger voor het vermogen van de getijdencentrale, is een peilvariatie van 0,7 meter voldoende voor optimalisatie van de zuurstofconcentratie en levert dit een aanzienlijke bijdrage aan de rivierafvoer. Bij een peilvariatie van 0,7 meter is de ETVT van plaatsing van een getijdencentrale in de Brouwersdam 6,3 jaar.

Getijdenenergie is voor Nederland redelijk interessant. Met een terugverdiensdijd van 6,3 jaar zit een getijdencentrale bij de Brouwersdam echter aan de hoge kant voor een technologie die al ver ontwikkeld is. Bij lage peilvariaties van rond de 0,7 meter, is het de vraag of (traditionele) drukturbines het geschiktst zijn. Er zijn twee ontwikkelingen die interessant zijn: lage verval turbines en vrij stromingsturbines. Zeer laag verval waterkracht turbines kunnen die bij laag verval kantelen en zo alsnog elektriciteit opwekken (te vergelijken met een 'solar tracking system'). Hoewel het rendement van vrije stromingsturbines lager ligt dan een drukturbine (30-50% ten

opzichte van 70-90% bij drukturbines), is de plaatsing ervan minder ingrijpend, waardoor de (energie) kosten lager zijn en de impact op het waterleven kleiner is. In de Brouwersdam zou ook een alternatief met vrije stromingsturbines onderzocht moeten worden, voor een volledig beeld van de mogelijkheden op het gebied van energie opwekking uit getijdenenergie. Daarnaast kan ook onderzocht worden of er andere locaties in Nederland geschikt zijn voor de benutting van getijdenenergie door middel van vrije stromingsturbines, bij voorkeur bij bestaande infrastructuur zoals havens en kunstwerken.

2.2.5 Golfenergie

Golfenergie wordt in Portugal en Groot-Brittannië precommercieel toegepast. In Nederland zijn er geen permanente installaties. Vanwege minder intensieve golfslag op de Noordzee zal de opbrengst voor eenzelfde type systeem in Nederland altijd lager liggen. De golven op de Noordzee leveren ver uit de kust (meer dan dertig kilometer) een gemiddelde energie van 10 tot 13 kW per meter golf, ongeveer vijf keer minder energie dan golven voor de kust van bijvoorbeeld Portugal of Schotland. De Pelamis, die in Portugal een ETVT van 2,8 jaar heeft, verdient zich in Nederland pas na 15 jaar terug. Voor golfenergie zijn echter veel verschillen technieken mogelijk, waardoor de ETVT behoorlijk kan variëren

Het gebruik van golfenergie in Nederland is op de korte termijn nog niet interessant. Om golfenergie voor Nederland interessant te maken, moet gekeken worden naar lichtere installaties die ontworpen zijn voor minder extreme golfslag en dichter voor de kust toepasbaar zijn of slim geïntegreerd kunnen worden met bestaande structuren (bijvoorbeeld met windparken en offshore platforms op zee). Om het potentieel op de langere termijn te benutten is het aan te bevelen aan te sluiten bij lange termijn studies zoals FLOW (Far and Large Offshore Wind).

2.2.6 Aquatische biomassa

Teelt van aquatische biomassa in de vorm van een gesloten algen kweekstelsel is in Nederland (nog) niet zinvol. Een gesloten algen kweekstelsel van zes photobioreactors met een totaal volume van 30 m³ is energetisch gezien anno 2009 in Nederland verre van rendabel. Op jaarbasis is de energie-input een factor tien hoger dan de hoeveelheid energie die wordt opgewekt. Los van de nog prille fase van ontwikkeling is de temperatuur en de lichtintensiteit in Nederland niet optimaal. Ook is de grond te duur en vruchtbaar voor grootschalige gesloten systemen. Het principe van de *biobased economy* waarin de hoogwaardige grondstoffen worden benut voor de farmaceutische en voedingsmiddelenindustrie en de restproducten voor energiedoeleinden verdient aandacht. Zowel economisch als energetisch (in verband met allocatie) zal dit eerder haalbaar zijn dan kweek uitsluitend voor energiedoeleinden.

Onderzocht zal moeten worden wat de meest geschikte algen en wieren zijn voor de omstandigheden in Nederland en welke producten (zowel hoogwaardige grondstoffen

als energie) hieruit gewonnen kunnen worden. Voordelen van offshore wierenkweeksystemen zijn onder andere de mogelijkheid tot integratie met windparken (en daarmee meervoudig ruimtegebruik), herstel van de visstand en het tegengaan van eutrofiëring. Een proefproject voor een wierenkweekstelsel in het Prinses Amalia windpark is in voorbereiding. Investerings in pilot projecten zoals deze zijn noodzakelijk om antwoord te geven op de vraag of de baten van offshore teelt opwegen tegen de kosten. Integratie in bestaande infrastructuur zoals windmolenparken kan de meerkosten van offshore kweeksystemen beperken. De operationele kosten voor een algen kweekstelsel op land lijken in eerste instantie voordeliger, de hoge grondprijs zal echter een groot obstakel zijn voor realisatie van een dergelijk stelsel. Met inachtneming van bovenstaande en gezien de suboptimale omstandigheden in Nederland voor algenkweek verdient de productie van wieren op zee momenteel de meeste aandacht. Hierbij moet worden opgemerkt dat het om twee totaal verschillende technieken gaat (waarbij binnen algenkweek nog onderscheid gemaakt moet worden tussen open en gesloten systemen) die ieder hun eigen voor en nadelen hebben.

2.2.7 Blue energy (RED)

Voor blue energy kent Nederland gunstige omstandigheden. De technologie is volop in ontwikkeling en energetisch gezien nog niet rendabel. Opschaling naar een 10 MW RED-centrale van de in 2008 behaalde resultaten met proefinstallaties zou nu gepaard gaan met een ETVT van 29,5 jaar. Gezien het theoretisch potentieel is een verlaging van de ETVT naar 3 jaar niet ondenkbaar. Hiervoor is het van belang dat naast de benodigde technologische doorbraken voor een hoge energie opbrengst per m² membraan (nu 0.8 Watt en 2 Watt beoogd) ook materialen worden gebruikt die niet energie intensief zijn. Het grootste energieverbruik voor productie zit momenteel in de productie van de membranen en de titanium elektroden.

Aanbevolen wordt voor de verdere ontwikkelingen van blue energy (RED) veel te investeren in R&D. Vooral de efficiëntie van de membranen moet omhoog voordat opschaling naar een grote installatie (van bijvoorbeeld 10 MW in de afsluitdijk) vruchtbaar kan worden. Het zal zeker enige tijd duren, voordat dit mogelijk is. Ook is het van belang een realistische inschatting te maken van het potentieel in Nederland en de geografische inpasbaarheid. Niettemin is het belangrijk om door te gaan op de ingeslagen weg en te streven naar een financieel en energetisch rendabel concept. Hierbij is de ontwikkeling van PRO, waar vooral Noorwegen op inzet, een alternatief om in de gaten te houden. Nederland loopt voorop in de ontwikkeling van RED en het wereldwijde potentieel is enorm. Terugkijkend op de ontwikkeling die PV de afgelopen 30 jaar heeft doorgemaakt (mede dankzij enorme investeringen) ligt de toekomst voor PRO nog helemaal open.

3 Energie terugverdientijden van PV en wind

De bestudeerde innovatieve energie conversietechnologieën op basis van water, zijn vergeleken met de meer volwassen duurzame energietechnologieën 'wind' en 'PV'. Op basis van een literatuuronderzoek is gekeken welke energierugverdientijd deze technieken hebben in Nederland.

3.1 Resultaten

In Tabel 3 - 1 is een overzicht gegeven met de ETVT van zon-PV en windenergie. Voor zonne-energie is gekeken naar de traditionele zonnepanelen op basis van silicium (Polikristallijn silicium, poly-Si) en naar de nieuwere dunne-film technieken op basis van Cadmium telluride (CdTe) en van Copper Indium diSelenide (CIS). Voor wind zijn drie locaties meegenomen: wind langs de kust en in het binnenland en windenergie op zee.

Tabel 3 - 1 Overzicht energierugverdientijd voor zon-PV en windenergie

| | ETVT (jaar) | | Toelichting en bron |
|----------------------|-------------|-----------|--|
| | literatuur | NL | |
| <i>Zonne-energie</i> | | | |
| Poly-Si | 2,4 – 5,5 | 4,8 - 11 | Gebaseerd op studies van Alsema (2005) en Raugai (2007) ^{1 2} Literatuur is gebaseerd op optimale omstandigheden, variatie in literatuur met name door verschillen in allocatie van silicium. |
| Thin film CdTe | 2,8 | 5,6 | Thin film techniek op basis van Cadmium telluride (CdTe), resultaten uit Raugai (2007) ³ met lagere opbrengst in Nederlandse omstandigheden. |
| Thin film CIS | 1,5 | 3,0 | Thin film op basis van Copper Indium diselenide (CIS), resultaten uit Raugai (2007) ⁴ met lagere opbrengst in Nederlandse omstandigheden. |
| <i>Windenergie</i> | | | |
| Kust | 0,5 – 1,7 | 0,4 – 1,4 | Literatuur gebaseerd op: Martínez et al (2008) ⁵ , Vestas (2006) ⁶ en Tremac et al (2009) ⁷ . De hoeveelheid energie benodigd voor productie varieert per studie. |
| Binnenland | n.v.t. | 0,8 – 2,5 | Gebaseerd op resultaten aan de kust – opbrengst is tot een factor twee lager in het binnenland. |
| Offshore | 0,5 -1,1 | 0,7 – 1,5 | Literatuur gebaseerd op: Vestas (2006) ⁸ en Weinzettel et al (2009) ⁹ . Studie van Vestas gaat uit van een park op 14 km uit de kust bij dieptes van 6.5 tot 13 meter. In Nederland is uitgaan van een park 25km. uit de kust met 25 meter diepte. |

De resultaten zijn gepresenteerd in een range die op basis van literatuur te verwachten is onder optimale omstandigheden en in Nederland. Voor de vertaling van de resultaten uit de literatuur is een drietal factoren meegenomen voor een goede vergelijking met de overige resultaten uit deze studie: de variatie in opbrengst afhankelijk van de locatie, de allocatie van grondstoffen en de manier waarop de opbrengst wordt omgerekend naar energie.

1 De opbrengst is regiogebonden

De resultaten zijn vertaald naar de Nederlandse situatie door de opbrengsten specifiek voor Nederland te maken. Hierbij is uitgegaan van de kentallen zoals die in Tabel 3 - 2 zijn weergegeven).

Tabel 3 - 2 Kentallen om opbrengst van zon-pv en windenergie te bepalen.

| | optimaal | Nederland | eenheid |
|---------------------------|----------|-----------|--------------------------|
| Zon-PV, instraling | 1700 | 850 | kWh/m ² /jaar |
| wind op zee | 4500 | 3800 | vollasturen |
| wind op land (kust) | 3200 | 3200 | vollasturen |
| wind op land (binnenland) | n.v.t. | 1600-2400 | vollasturen |

Dit heeft als effect dat de ETVT in Nederland:

- Voor zon-PV rond de 2 keer langer is dan in optimale omstandigheden in Zuid Europa of Afrika;
- Voor wind op land 1,3 tot 2 keer langer is in het binnenland dan in optimale regio's aan de kust.

2 De allocatie van gebruik van grondstoffen:

- Om de terugverdientijd van zon-PV te bepalen, hebben keuzes in de allocatie bij de productie van het benodigde silicium een grote impact. Silicium wordt geproduceerd voor zowel de zonnepanelen als voor de halfgeleiders industrie. Hierbij kan voor zon-PV een lagere kwaliteit silicium gebruikt worden dan in de halfgeleiderindustrie. Het verschil tussen worstcase en de geaccepteerde factor van 30% allocatie naar zon-PV is ongeveer een factor 2 in de ETVT.
- Voor zon-PV is naast de allocatie van belang of het frame (vaak van aluminium) en de overige apparatuur die nodig is om de panelen stroom te laten leveren (denk aan invertor) zijn meegenomen. Deze randapparatuur wordt in het Engels aangeduid met Balance of System (BOS) en kan tot ongeveer 30% bijdragen aan de ETVT. In alle resultaten die hier zijn gepresenteerd is het BOS meegenomen.
- Voor wind op land zijn de allocatie van grondstoffen en de systeemgrenzen redelijk eenduidig en is er weinig verschil tussen individuele molens en parken. Voor wind op zee moet er gekeken worden naar het hele park, waarbij gekeken moet worden naar het transformatorstation, de kabel naar de kust, de assemblage en het onderhoud. Het meenemen van kabel en transformatorstation zorgt voor een hogere ETVT.

3 De opbrengst kan worden uitgedrukt in $MJ_{\text{elektrisch}}$ of MJ_{primair}

De ETVT is gedefinieerd als de ratio tussen de totale hoeveelheid energie die benodigd is en de jaarlijkse opbrengst. Bij het omrekenen van de jaarlijkse opbrengst in MWh naar opbrengst in MJ kunnen er twee keuzes gemaakt worden. De keuze is om óf te rekenen met de energetische waarde van de opgewekte elektriciteit óf met de energetische waarde die nodig is om de elektriciteit op te wekken door conventionele technieken. De keuze hierin maakt een factor 2 tot 4 uit op het eindresultaat van de ETVT.

In deze studie is gekozen om te rekenen met de energetische waarde van de opgewekte elektriciteit. Dit betekent dat 1 MWh gelijk is aan 3,6 GJ. Hoewel dit correct is in energetische termen, kan beargumenteerd worden dat een duurzame techniek een conventionele techniek vervangt. Conventionele technieken hebben een efficiëntie tussen de 25% en 50%, wat betekent dat voor 1 MWh elektriciteit 7,2 - 14,4 GJ primaire energie nodig is. De redenatie is dan dat 1 MWh duurzame elektriciteit 7,2 - 14,4 GJ_{primair} bespaart. Deze methode wordt ook wel aangeduid met de *primaire energieterugverdientijd* (PETVT). Met name in de literatuur over windenergie, worden resultaten vaak in de PETVT uitgedrukt. Alle resultaten die hier gepresenteerd zijn vallen een factor 2 tot 4 lager uit als gekeken wordt naar de PETVT.

4 Gestuwde waterkracht

4.1 Korte beschrijving technologie

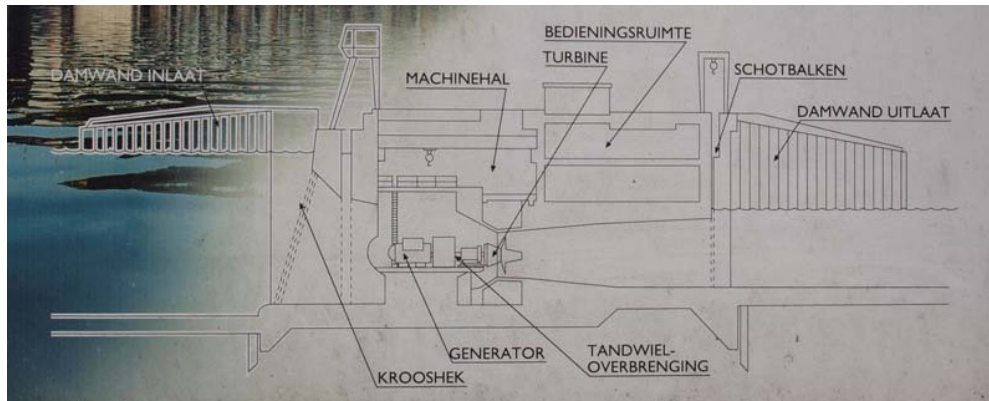
In Nederland staan vier “grotere” waterkracht centrales¹, waarvan er een sinds 1989 staat in het Midden-Limburgse dorp Linne naast een stuw in de Maas. De Maas heeft hier een verval van zo’n 4 meter. Om het Maaswater met extra veel kracht de centrale in te leiden, zijn aan elke kant van de centrale twee damwanden geplaatst. Deze wanden fungeren als een trechter voor het instromende water. In de rivier is een vistrap aangelegd om stroomopwaarts zwemmende vissen het hoogteverschil te laten overbruggen. De centrale bij Linne heeft een maximaal vermogen van 11,5 megawatt (MW) en levert jaarlijks circa 35 GWh elektriciteit. De centrale is momenteel in beheer van Essent.

De waterkracht centrale bestaat uit een betonnen bak, met daarin vier horizontale Kaplan turbines, met een schoepenrad van 4 meter doorsnede, die de elektriciteit opwekken. Het verval van 4 meter wordt geregeld met de stuw naast de centrale. De centrale wordt volautomatisch bestuurd vanuit de Clauscentrale.¹⁰



Figuur 1 Vistrap, waterkrachtcentrale en stuw in de Maas bij Linne (bron figuur: CADDET, 1995)

¹ In bij Hagestijn in de Lek (1,8 MW uit 1958), Maurik in de Nederrijn (10MW uit 1988), bij Linne in de Maas (11,5 MW, 1989) en bij Lith in de Maas (14 MW, 1990)



Figuur 2 Technisch ontwerp waterkrachtcentrale in Linne (bron figuur via microhydropower.net)

Tabel 4 - 3 Technische details van waterkrachtcentrale bij Linne

| Technische details ^{11,12,13,14} | |
|---|-------------------------------|
| Type | Waterkrachtcentrale |
| Locatie | Linne, in de Maas |
| Vermogen | 11,5 MW |
| Bouwjaar | 1989 |
| Verval | 4 meter |
| Gemiddelde debiet | 250 m ³ / uur |
| Maximale debiet | 450 m ³ / uur |
| Eenheden | 4 horizontale Kaplan turbines |
| Technische levensduur | 40 tot 50 jaar |
| Opbrengst | 35 GWh per jaar (gemiddeld) |

4.2 Energiebalans

4.2.1 Energie-input

Voor de energie-input is uitgegaan van de gebruikte materialen, de energie die nodig is geweest voor assemblage en installatie en vervolgens voor operatie en onderhoud. Geschatte gegevens zijn gebaseerd op publiek beschikbare informatie en de database van Ecoinvent. De vistrap en stuw zijn buiten beschouwing gelaten. Energiegebruik voor onder andere de bouw van deze twee installaties komen dus niet op het conto van de waterkrachtcentrale.¹⁵

- De waterkracht centrale bestaat uit een betonnen bak, bestaande uit 7.000 m³ beton en 1.250 ton wapeningsstaal.
- De energie wordt opgewekt met daarin vier horizontale Kaplan turbines, met een schoepenrad van 4 meter doorsnede. Er is geschat dat er ongeveer 500 ton staal (deels RVS) nodig is voor de vier turbines. Deze schatting is gebaseerd op een lengte van 16 meter, een dichtheid van 8 kg/dm³ en dat rond de 8% van het volume uit massief staal bestaat.
- Gegevens voor de damwanden zijn niet voorhanden, maar gebaseerd op de plannen voor een waterkrachtcentrale in Borgharen (3 turbines, 7 MW), gaat het hier om ongeveer 1.200 ton (uitgangspunt energiegebruik is gewapend beton).

- Voor de staalconstructie is eveneens uitgegaan van gegevens van de waterkrachtcentrale in Borgharen, waarbij geëxtrapoleerd is over het aantal turbines. Er is geschat dat er 4.700 kg staal is gebruik.
- Van de overige materialen zijn geen gegevens bekend. Het gaat hierbij om o.a. een tandwielkast; generator; toplaag van stenen; grofvuilrooster; PUR-schuim; verflagen; regelpanelen en de aantakkanalen. Voor deze ontbrekende gegevens is een correctiefactor van 10% gebruikt.

Tabel 4 - 4 Overzicht gebruikte materialen bij de Linne

| Materiaal | Waarde | Eenheid | Energie (GJ) |
|----------------------------|---------------|----------------|---------------------|
| Beton | 7.000 | m3 | 9.881 |
| Wapeningsstaal | 1.250 | ton | 37.399 |
| Damwand, gewapend beton | 1.199 | ton | 1.962 |
| Staalconstructie (staal) | 4.667 | kg | 249 |
| Kaplan Generatoren (staal) | 515 | ton | 27.484 |
| Overige materialen | nvt | | 7.697 |
| Totaal | | | 84.674 |

De bouw van de centrale heeft twee jaar geduurd. Voor de aanleg is een pneumatische afzinkmethode gebruikt voor de plaatsing van de betonnen bak. Daarnaast zijn er aantakkanalen gegraven, welke voor de centrale zijn voorzien van damwanden en is er een toplaag van stenen aangelegd rondom de centrale. Aangenomen is dat de energie die nodig was voor de bouw ongeveer 15% van de energie van de gebruikte materialen is.

Over het onderhoud van de centrale is weinig bekend, er is aangenomen dat dit eveneens 15% van de energie van de gebruikte materialen is.

Tabel 4 - 5 Energiebalans waterkrachtcentrale bij Linne

| Ketenstap | Energie (GJ) | Opmerkingen |
|---------------------------------|---------------------|--|
| Materialen | 85,000 | Zie tabel hierboven |
| Assemblage en installatie | 13,000 | Aanname: 15% van de energie intensiteit van de materialen. |
| Operatie en onderhoud | 13,000 | Aanname: 15% van de energie intensiteit van de materialen. |
| Ontmanteling en afvalverwerking | | Niet meegenomen. |
| Totaal | 110,000 | |

4.2.2 Opbrengsten

De centrale levert gemiddeld 35 GWh (126.000 GJ energie, waarmee ongeveer 315.000 GJ primaire energie vermeden wordt vergeleken met elektriciteitsopwekking in een conventionele elektriciteitscentrale). De opbrengst is gebaseerd op de gemiddelde opbrengst opgegeven door Essent. Jaaropbrengsten zijn publiekelijk bekend voor de jaren '92-'94, waarbij de gemiddelde opbrengst iets lager lag (31 GWh).

4.2.3 Resultaten en gevoeligheid

De energierugverdiëntijd van de waterkrachtcentrale in de Linne wordt geschat op 0,9 jaar. Bij een levensduur van 40 jaar is de energieproductieratio 44. Door de beperkte informatie is deze uitkomst gevoelig voor aannames.

De keuze om de stuw, vistrap en aantakkanalen niet mee te nemen is van (grote) invloed op de uitkomst.

Het energiegebruik van de bouw, met afgraving en afzinking, is nu geschat op basis van de energie-intensiteit van de gebruikte materialen.

Tabel 4 - 6 Overzicht resultaten

| Overzicht | Eenheid | Waarde | Opmerkingen |
|--------------------------------|---------|-----------|---|
| Energie input over levensduur | GJ | 110.000 | |
| Energie output over levensduur | GJ | 5.040.000 | Voor 40 jaar levensduur op basis van 35 GWh per jaar. |
| ETVT | jaar | 0,9 | |
| EPR | getal | 44 | |
| CO ₂ intensiteit | g/kWh | | niet berekend |

4.3 Conclusies en aanbevelingen

In Nederland staan vier "grotere" waterkracht centrales, bij Hagestijn in de Lek (1,8 MW uit 1958), Maurik in de Nederrijn (10MW uit 1988), bij Linne in de Maas (11,5 MW, 1989) en bij Lith in de Maas (14 MW, 1990). Deze centrales maken gebruik van gestuwde waterkracht in combinatie met aanwezige kunstwerken (stuw/sluis) en maken gebruik van het verschil in hoogte van de waterniveaus. Waterkrachtcentrales zijn een bestaande techniek, wat zich onder andere uit in een gunsite ETVT. Voor de waterkrachtcentrale in de Maas bij Linne wordt deze geschat rond de 0,9 jaar.

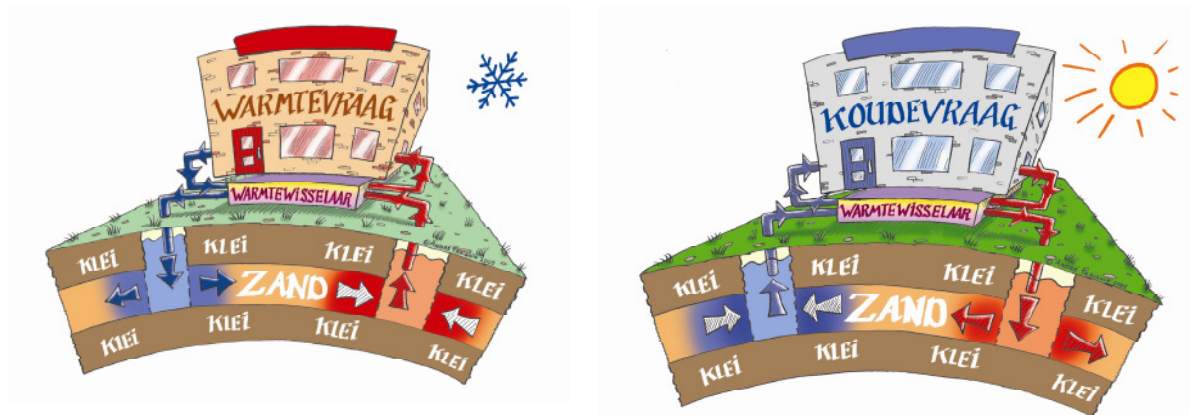
Om de techniek verder in Nederland toe te passen, zijn met name het aantal geschikte locaties en vergunningsprocedures beperkende factoren. In het buitenland wordt momenteel onderzoek gedaan naar turbines die gebruik maken van laagverval en die visvriendelijk zijn. Deze lage verval turbines zijn kansrijk in Nederland.

5 Warmte koude opslag – conventioneel

5.1 Korte beschrijving technologie

Een warmte- en koudeopslag (WKO) systeem is technisch relatief eenvoudig. In een WKO-systeem worden warmte en koude opgeslagen in grondwater en gebruikt voor zowel verwarming (in de winter) als koeling (in de zomer), zie Figuur 3. Het grondwater bevindt zich in zandlagen (aquifers) op een diepte tot ca. 150 meter en heeft normaliter een constante temperatuur van ongeveer ca. 11 °C.

In de winter, wanneer er behoefte is aan verwarming, wordt de lage temperatuur energie onttrokken aan het grondwater. Het afgekoelde grondwater wordt vervolgens weer in de grond geïnjecteerd. Om deze energie voor ruimteverwarming en tapwater te gebruiken maakt men gebruik van een warmtepomp. Een warmtepomp “pompt” energie van een lagere temperatuur naar de gewenste temperatuur. De warmtepomp is wel omschreven als “ een koelkast waarvan het koelvak buitenshuis staat”. Hiervoor is slechts een klein deel elektrische energie nodig. Hoe kleiner de temperatuursstijging, des te minder elektrische energie dit kost. Daarom worden warmtepompsystemen altijd uitgevoerd in combinatie met lage temperatuur verwarming zoals vloerverwarming.



Figuur 3 : Werking van een WKO systeem met open bron in de winter (links) en de zomer (rechts)

In de zomer, wanneer er juist behoefte is aan koeling, wordt het proces omgekeerd en wordt het overschot aan warmte gekoeld met koud water uit de koude bron (rechter helft van Figuur 3). Voor deze koeling is in principe geen elektrische energie meer nodig, waardoor het een zeer duurzame vorm van koelen is.

Na verloop van enkele jaren wordt het grondwater rond de warme bron enigszins warmer (13-16 °C) en rondom de koude bron enigszins kouder (7-10 °C). Door ervoor te zorgen dat er over het jaar heen netto geen warmte aan de ondergrond wordt

onttrokken of afgestaan, zijn de milieugevolgen voor de ondergrond minimaal en kan een dergelijk systeem in principe eindeloos mee.

In de woningbouw is de behoefte aan warmte (ruimteverwarming en warm tapwater) doorgaans groter dan de behoefte aan koeling. Hierdoor is er puur op basis van de energiebehoeften géén thermisch evenwicht in de ondergrond. Om toch aan deze voorwaarde te voldoen moet extra warmte geladen worden in de ondergrond. Dit wordt het regenereren van de ondergrond genoemd.

Het regenereren van de ondergrond gebeurt doorgaans door middel van (droge) koeltorens. Een goed alternatief is echter om hiervoor warmte aan oppervlaktewater te onttrekken. Oppervlaktewater wordt op een bepaalde plek ingenomen en door een warmtewisselaar geleid. Hier wordt warmte aan het water onttrokken en met een lagere temperatuur wordt het elders weer in het meer geretourneerd. Aandachtspunt voor een optimaal functionerend systeem is uiteraard dat het inname- en retourpunt zich op voldoende afstand van elkaar bevinden, zodat het afgekoelde water niet direct weer naar het inname-punt wordt gezogen.

Het grondwater en het oppervlaktewater bevinden zich dus in gescheiden circuits. Enkel de energie (warmte) wordt uitgewisseld. Deze combinatie van WKO en oppervlakte water kan in principe in ieder WKO project met een thermische onbalans waar ook oppervlaktewater aanwezig is, worden toegepast. Tot op heden is het echter nog niet (op grote schaal) toegepast.

Note: Wanneer er op een projectlocatie veel oppervlaktewater aanwezig is, maar de ondergrond niet geschikt is voor WKO, wordt soms overwogen om het oppervlaktewater als basis bron voor warmte en koude te gebruiken. Belangrijk nadeel is hierbij echter dat geen sprake is van seizoensopslag zoals WKO. In de winter, wanneer er behoefte is aan warmte, is ook de brontemperatuur laag waardoor de efficiëntie van warmtelevering sterk daalt. In de zomer is de temperatuur van de bron juist hoog, waardoor hiermee niet of beperkt gekoeld kan worden.

5.2 Energiebalans

De analyse van de WKO installatie wijkt enigszins af van de analyse van de andere energieconversiesystemen behandeld in deze studie. Dit heeft te maken met het feit dat een WKO systeem geen energie produceert maar alleen primaire energie bespaart. Toch is het mogelijk om tot een energierugverdiertijd te komen door gebruik te maken van het vermeden energieverbruik *ten opzichte* van de referentie situatie. Als referentie is de traditionele ruimteverwarming met gas gebruikt.

Voor de berekening van de energierugverdiertijd van WKO dienen de kenmerken van een nog te realiseren Utrechts project (woonzorgcomplex Transwijk) als basis. Het concept bestaat uit een standaard open bronsysteem voor ruimteverwarming, warm

tapwater en koeling van 173 appartementen (met 88 m² vloeroppervlak) en 5.826 m² utiliteitsruimten. Om de berekening van de energietेरugverdiertijd overzichtelijk te houden is het vloeroppervlak van de utiliteitsruimten omgerekend naar aantal appartementen. In het totaal is daarom voor dit WKO systeem uitgegaan van 239 'woning equivalenten'.

5.2.1 Energie-input

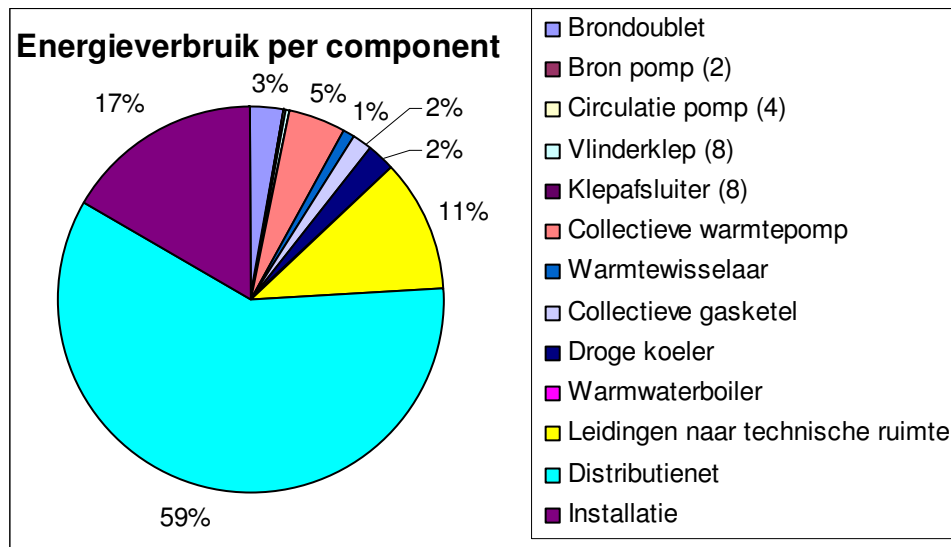
Voor alle WKO onderdelen uit Tabel 5 - 1 zijn de gewichten opgesplitst naar materiaaltipe (zie Tabel in de bijlage voor details). De materiaalspecificaties van de warmtepomp zijn verkregen uit een levenscyclusanalyse studie van Heikkila (2006)¹⁶. Ook de gewichten van de gasketel, droge koeler en warm water boiler zijn verdeeld volgens de percentages van de hoofcompenten uit deze studie.

Tabel 5 - 1 Overzicht van verschillende onderdelen WKO systeem

| Onderdelen WKO systeem | Gewicht (kg) | Aantal |
|----------------------------------|---------------|--------|
| Brondoublet | 1.312 | 1 |
| Bron pomp | 13 | 2 |
| Circulatie pomp | 240 | 4 |
| Vlinderklep | 25 | 8 |
| Klepafsluiter | 25 | 8 |
| Collectieve warmtepomp (500 kW) | 4.607 | 1 |
| Warmtewisselaar (500 kW) | 750 | 1 |
| Collectieve gasketel (750 kW) | 1.720 | 1 |
| Droge koeler (200 kW) | 2.300 | 1 |
| Warmwaterboiler (430 kW) | 205 | 1 |
| Leidingen naar technische ruimte | 4.830 | |
| Distributienet | 49.961 | |
| Totaal | 66.351 | |

Met behulp van life cycle databases is het energieverbruik voor de productie van alle benodigde materialen berekend. Het energieverbruik voor de assemblage van de verschillende componenten van het WKO systeem en de energiekosten voor het installeren zijn niet achterhaald. Hiervoor is aangenomen dat de energiekosten voor assemblage en installatie 20% van de materiaalproductie energiekosten zijn.

In totaal is voor deze fase 4.001 GJ nodig en wordt 168 ton CO₂ uitgestoten. Een verdeling van energieverbruik naar de componenten is te vinden in Figuur 4.



Figuur 4 Energieverbruik per component WKO

Voor de berekening van het jaarlijkse energieverbruik voor de operatie van het WKO systeem is de warmtevraag van een moderne woning met warmtepomp als uitgangspunt genomen. Een goed geïsoleerde moderne woning met een energie prestatie coëfficiënt (EPC) rond de 0.8 heeft een warmtevraag van ongeveer 13 GJ/jaar, gebaseerd op de volgende kenmerken:

- Een standaard warmtepomp voor ruimte verwarming van 4 kW
- Een COP² van 4,5
- 900 vollasturen

Vanwege de gunstige COP kan een warmtepomp deze 13 GJ warmte leveren met 2,88 GJ elektriciteit. De energiekosten voor onderhoud aan de installatie zijn geschat op 10% van het operationele energieverbruik. De totale primaire energiekosten voor operatie en onderhoud komen daarmee op 1.830 GJ/jaar.

5.2.2 Opbrengsten

Opbrengsten moeten bij deze energieconversietechnologie gezien worden als besparing ten opzichte van een referentiesituatie met gasgestookte warmteproductie. Alleen de besparing voor de warmtevoorziening is meegenomen, koeling is in deze studie achterwege gelaten. Wanneer tegelijkertijd ook traditionele airconditioning zou worden vervangen door een WKO systeem wordt de energierterugverdiensijd verkort.

² De Coëfficiënt of Performance (COP) geeft de verhouding aan tussen de hoeveelheid warmte die de warmtepomp afgeeft (verplaatst) en de hoeveelheid elektriciteit (arbeid) die hiervoor nodig is. Afhankelijk van het verschil in temperatuur tussen de bron en het afgiftesysteem kan de hoeveelheid afgegeven warmte 3-5 keer zo hoog zijn als de benodigde elektriciteit, wat aangeduid wordt met de COP. Het is in geen geval het thermodynamische rendement. Aangezien de opwekking van elektriciteit met een gemiddelde efficiëntie van 40% verloopt, is een COP van 2,5 qua primair energieverbruik vergelijkbaar met een HR-ketel met een efficiëntie van 100%.

De mate van additionele besparing hangt af van de vraag naar koude, die sterk afhankelijk is van het type bebouwing waarin de installatie is geïntegreerd. Aangezien de gemiddelde jaarlijkse koudevraag veel lager ligt dan de warmtevraag zal de extra besparing niet meer dan 50% bedragen en waarschijnlijk veel lager zijn.

De hoeveelheid vermeden energie is berekend aan de hand van de primaire energie benodigd om de 13 GJ/jaar warmte voor een goed geïsoleerde woning met aardgas te produceren (bij een efficiëntie van 95%). Voor 239 woningen met een conventionele gasketel zou de warmtevraag 3.263 GJ/jaar bedragen. Vergeleken met het jaarlijkse energieverbruik van het WKO systeem wordt hiermee per jaar 1.433 GJ primaire energie vermeden.

5.2.3 Resultaten en gevoeligheid

Wanneer de energie-input en de energiebesparing met elkaar vergeleken worden, wordt voor WKO een ETVT van 2,79 jaar gevonden. Indien de installatie 30 jaar mee gaat, wordt een energieproductieratio van ruim 10 behaald.

Tabel 5 - 2 Overzicht energie-input, besparing, TVT en EPR voor WKO

| | Energie | Eenheid | Emissies | Eenheid |
|--------------------------------------|---------|---------|----------|--------------|
| Productie & installatie | 4.001 | GJ | 168 | Ton CO2 |
| Energieverbruik operatie & onderhoud | 1.830 | GJ/jaar | 130 | Ton CO2/jaar |
| Warmtevraag gas referentiesysteem | 3.263 | GJ/jaar | 183 | Ton CO2/jaar |
| Besparing | 1.433 | GJ/jaar | 53 | Ton CO2/jaar |
| Terugverdientijd | 2,79 | Jaar | 3,14 | Jaar |
| Productie ratio (levensduur 30 jaar) | 10,7 | | 9,5 | |

Voor de factoren met de grootste invloed op het resultaat is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd (zie Tabel 5 - 3).

- De coëfficiënt of performance (COP) bepaalt in grote mate de efficiëntie van de warmteproductie. Een warmtepomp -zonder WKO- die energie haalt uit de buitenlucht heeft bijvoorbeeld een COP van 2. Bij deze COP zou een WKO systeem zelfs meer energie verbruiken dan het referentie systeem met gas en zich daardoor nooit terugverdienen. Dit is echter niet het geval bij een goed afgesteld WKO systeem dat gebruik maakt van opslag in een aquifer. Een range van 3,5 – 5,5 is realistisch.
- Variaties in de warmtevraag van de woningen laten zien dat naarmate de woning een hogere energievraag heeft, de besparing toeneemt.
- Een twee keer zo hoge warmtevraag levert een twee keer zo korte ETVT op. De 13 GJ per jaar staat voor goed geïsoleerde nieuwbouw en het is niet waarschijnlijk dat dit nog veel verder omlaag zal gaan.

- Een 50% hogere productie- en installatie impact doet de energie TVT oplopen tot ruim 4 jaar maar met een levensduur van 30 jaar verdient de installatie zich nog steeds meer dan 7 keer terug.
- In de berekening zijn extra impacts verbonden aan het vervangen van een CV installatie in bestaande bouw niet meegenomen. Bij het inpassen warmtepompen en WKO in oude gebouwen, zullen de impacts hoger komen te liggen dan bij nieuwbouw. Aan de andere kant is geen rekening gehouden met de impacts verbonden aan de productie, constructie en installatie van het gasgestookte referentiesysteem. In nieuwbouwprojecten zal een warmtepompsysteem met WKO in het licht van een gasgestookt alternatief zich daarom nog sneller terugverdienen dan de 2,79 jaar die berekend is in deze studie. Wanneer ook separate koeling wordt vervangen valt de berekening nog gunstiger uit.

Tabel 5 - 3 Gevoeligheidsanalyse WKO

| Gevoeligheid | Range | Gebruikt | ETVT | EPR |
|------------------------------|--------------|----------|-----------|------------|
| COP | 3,5 - 5,5 | 4,5 | 4,4 - 2,3 | 6,8 - 13,2 |
| Warmtevraag (GJ/jr) | 10 - 20 | 13 | 3,6 - 1,8 | 8,3 - 16,6 |
| Productie impact (GJ) | + 50%/ - 50% | 4000 | 4,2 - 1,4 | 7,2 - 21,5 |
| Installatie, % van productie | 100% - 10% | 20% | 4,7 - 2,6 | 6,4 - 11,7 |

5.3 Conclusies en aanbevelingen

Warmte koude opslag is een techniek waarbij water als medium wordt gebruikt om omgevingswarmte te gebruiken voor de verwarming en koeling van gebouwen. Voor WKO in een open bron heeft Nederland een gunstig klimaat en geografie. Er zijn veel aquifers (en belangrijker, geen gesteenten) en in veel gevallen zal met het kleine verschil in temperatuur tussen de bron en het afgiftesysteem in geval van lage temperatuur verwarming een gunstige prestatiecoëfficiënt (COP) bereikt kunnen worden. WKO wekt geen energie op maar leidt tot energiebesparing. Door de besparing ten opzichte van een gasgestookt referentiesysteem zal de energie investering binnen 2,8 jaar terugverdiend zijn.

Om de techniek verder in Nederland te verspreiden is momenteel marktacceptatie het belangrijkste punt, waarbij goede voorlichting en bekendheid met de techniek van groot belang zijn. De techniek zou bij alle nieuwbouw de standaard kunnen zijn.

6 Warmte koude opslag – regeneratie met oppervlaktewater

6.1 Korte beschrijving technologie

De Tasman Toren is een prestigieus woningbouwproject aan de rand van de stad Groningen. De bouw van 218 appartementen, een zwembad, fitnessruimte en winkels op de Noordoostelijke oever van de kruising tussen het Winschoterdiep en het Eemskanaal, is begonnen in de zomer van 2008. In september 2009 is het hoogste punt bereikt, de oplevering wordt eind 2010 verwacht. Bij het ontwerp is veel aandacht besteed aan energiezuinigheid. Het gebouw heeft een EPC (energie prestatie coëfficiënt) van 0.68, waar 0.8 sinds 2006 het maximum is voor nieuwbouw. Met gebruikmaking van subsidie vanuit het unieke kansen programma van de overheid wordt een geheel gasloos verwarmingssysteem gerealiseerd. Dit wordt mogelijk gemaakt door zeer goede isolatie in combinatie met warmtepompen, warmtewisselaars en zonnecollectoren. De techniek die in het kader van dit onderzoek de aandacht heeft getrokken is warmte koude opslag (WKO) met benutting van thermische energie uit het oppervlaktewater.



Figuur 5 Artist impression en webcambeeld 6 november 2009

In de woningbouw is de behoefte aan warmte (ruimteverwarming en warm tapwater) doorgaans groter dan de behoefte aan koeling in de zomer. Hierdoor is er puur op basis van de energiebehoefte géén thermisch evenwicht in de ondergrond. Om toch aan deze voorwaarde te voldoen moet extra warmte geladen worden in de ondergrond. Dit wordt het regenereren van de ondergrond genoemd.

Het regenereren van de ondergrond gebeurt doorgaans door middel van (droge) koeltorens. Een goed alternatief is echter om hiervoor thermische energie, bij voorkeur in de zomer, aan oppervlaktewater te onttrekken. Relatief warm oppervlaktewater wordt op een bepaalde plek ingenomen, door een warmtewisselaar geleid waarbij de warmte aan het grondwater wordt overgedragen en elders weer in

het kanaal geretourneerd. Het grondwater en het oppervlaktewater bevinden zich dus in gescheiden circuits. Enkel de energie (warmte) wordt uitgewisseld³.

Op het moment van schrijven is nog niet duidelijk of bij de Tasman Toren regeneratie van de bronwarmte met droge koelers of met thermische energie uit oppervlaktewater zal worden toegepast. 'Regeneratie' met warmte uit de woningen behoort ook nog tot de mogelijkheden. Indien in de zomer voldoende koudevraag vanuit de woningen komt ontstaat er namelijk geen thermische onbalans in de bron en is regeneratie overbodig. In het algemeen ontstaat er bij WKO installaties voor woningen een warmte tekort in de bron. Wettelijk is vastgelegd dat de temperatuur van de bron binnen 5 jaar weer het oude niveau weer gehaald moet hebben. De projectontwikkelaars Van Wijnen en Lefier hebben nog niet besloten over de oplossing van de thermische onbalans van het WKO systeem van de Tasman Toren. De locatie, vlak naast een kanaal, leent zich overigens uitstekend voor de oppervlaktewater variant. Omdat in deel I van 'Water als bron van duurzame energie' de ETVT van een WKO systeem met regeneratie via een droge koeler ten opzichte van een gasgestookte referentie is berekend, wordt in deze studie de ETVT van een WKO systeem met regeneratie van thermische energie uit het oppervlakte water berekend; ten opzichte van het alternatief met droge koeling. De exacte warmte- en koudevraag van de Tasman Toren zijn niet bekend. Van woon-zorgcomplex Transwijk waarop de WKO ETVT berekening is gebaseerd zijn deze gegevens wel beschikbaar. Qua energiebehoefte zijn de twee complexen goed met elkaar te vergelijken. Transwijk bestaat uit 173 appartementen en 5826 m² (gelijk aan het oppervlak van nog eens 66 appartement). De Tasman Toren heeft 218 appartementen en een onbekend oppervlak voor zwembad, fitnessruimte en winkels. Het totale oppervlak bruto vloeroppervlak van de Tasman Toren is naar alle waarschijnlijkheid wel iets groter. Maar vanwege de lagere EPC (0,68, tegen 0,8 voor Transwijk) zal de warmte- en koudevraag vergelijkbaar zijn.

6.2 Energiebalans

Evenals bij de berekening van gewone Warmte Koude Opslag kan het gebruik van thermische energie uit oppervlakte water voor het regenereren van de bron niet gezien worden als energie opwekking. De warmte uit het oppervlakte water wordt verplaatst naar de aquifer, die vanwege de thermische onbalans afkoelt. Bij

³ Opmerking: Wanneer er op een projectlocatie veel oppervlaktewater aanwezig is, maar de ondergrond niet geschikt is voor WKO, wordt soms overwogen om het oppervlaktewater als basis bron voor warmte en koude te gebruiken. Belangrijk nadeel is hierbij echter dat geen sprake is van seizoenopslag zoals WKO. In de winter, wanneer er behoefte is aan warmte, is ook de brontemperatuur laag waardoor de efficiëntie van warmtelevering sterk daalt. In de zomer is de temperatuur van de bron juist hoog, waardoor hiermee niet of beperkt gekoeld kan worden.

'conventionele' warmte koude opslag waar regeneratie van de bron noodzakelijk is, wordt gebruik gemaakt van een droge koeler. De 'ETVT' van regeneratie via oppervlakte water wordt daarom berekend uit het vermeden elektriciteit- en materiaalverbruik van de droge koeler. Het warmte tekort in de bron (en daarmee de benodigde thermische energie voor regeneratie) is berekend aan de hand van het verschil tussen de warmtevraag en de koude vraag.

6.2.1 Energie-input

Voor regeneratie met oppervlaktewater moeten pijpen (meestal van polyethyleen) aangelegd worden die het warme water vanuit het kanaal naar de warmtewisselaar en weer terug pompen. De locatie van de Tasman Toren, vlak aan het kanaal, is zeer gunstig. De afstand die de pijpen moeten overbruggen zal enkele tientallen meters bedragen, maar hoogst waarschijnlijk niet meer dan 100 meter. In de referentie situatie zal ook gebruik gemaakt moeten worden van pijpen die het water van de droge koeler naar de het WKO circuit vervoeren. Er van uitgaande dat de droge koeler op het dak wordt geplaatst, moet hiervoor toch ook minimaal 75 meter (de hoogte van de Tasman Toren worden overbrugd met PE pijpen. De pijp die het koude water aanvoert naar de droge koeler zal bovendien geïsoleerd moeten worden om condens te voorkomen. Vanwege het geringe verschil in afstand tussen beide alternatieven zijn de pijpen niet meegenomen in het materiaal gerelateerde energieverbruik. Dit betekent overigens niet dat het geen belangrijke bijdrage *kan* leveren aan het totale energieverbruik. Indien het oppervlaktewater verder weg ligt en de hoeveelheid PE significant gaat verschillen ten opzichte van een droge koeler moet deze impact meegenomen worden in de berekening.

Wat wel een groot verschil tussen de twee alternatieven oplevert is het gebruik van een Titanium warmtewisselaar in plaats van een droge koeler van roestvrij staal. Voor een warmtewisselaar die warmte uit oppervlaktewater benut, is vanwege het hoge zuurstofgehalte in oppervlaktewater, titanium nodig. Het energieverbruik voor de productie van Titanium is echter vele malen hoger dan dat voor RVS 316 (zie Tabel 6 - 1). Het gewicht van beide apparaten is gebaseerd op gelijk vermogen (200 kW), voldoende om de onbalans in de bodem te regenereren.

Energiegebruik voor het installeren is niet meegenomen. Verwacht wordt dat een oppervlakte water regeneratie systeem een vergelijkbaar energieverbruik heeft met het plaatsen van droge koelers, mits de afstand van het gebouw tot het oppervlaktewater niet heel ver is. Gezien de Tasman Toren vlak aan het water ligt is dat niet aan de orde.

De totale warmtebehoefte van de Tasman Toren (ruimteverwarming, tapwater en utiliteiten) is berekend op 4760 GJ/jaar, oftewel 20 GJ⁴ per woning (waarvan ruim 7

⁴ In de berekening uit het vorige hoofdstuk is uitgegaan van een gemiddelde warmtevraag van 13 GJ per appartement. Dit is exclusief warm tapwater, omdat dit hier wordt verwarmd door een gasketel.

GJ voor warm tapwater). Dit komt goed overeen met metingen uit voorbeeld projecten gepubliceerd door ECN¹⁷: 20 GJ voor ruimteverwarming (bij een EPC van 1) en 9 GJ voor warm tapwater. Met een EPC van 0,68 zoals in de Tasman Toren is een verlaging van de warmtevraag naar ongeveer 12 GJ goed mogelijk.

Tabel 6 - 1 Productie energiegebruik Tasman Toren

| kg materiaal | Gewicht (kg) | Waarvan Titanium (kg) | Waarvan RVS 316 (kg) | Productie Energie (GJ) ⁵ |
|-----------------------------|--------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------------|
| Droge koeler | 2300 | - | 1522 | 155 |
| Warmtewisselaar | 300 | 199 | - | 139 |
| Energie intensiteit (MJ/kg) | | 654 | 58 | |

De koudevraag van de woningen en utiliteiten komt neer op 610 GJ. Hiervoor is geen conversie energie nodig. Het WKO systeem wordt omgedraaid waardoor koude aan de appartementen wordt afgeleverd. Door 's zomers in het gebouw te koelen wordt warmte aan de bron toegevoegd wat de thermische onbalans van de bron beperkt.

Voor de hier beschreven situatie treedt een thermische onbalans op van 3092 GJ per jaar. Deze hoeveelheid energie wordt, voor deze studie, gecompenseerd met energie uit het water van het Eemskanaal/Winschoterdiep. De kentallen van deze vorm van regeneratie zijn te vinden in Tabel 6 - 2. Onder de hierboven geschetste voorwaarden komt het elektriciteitsverbruik voor het laden van 3092 GJ warmte in de bodem neer op 13,3 GJ.

Tabel 6 - 2 Energieverbruik regeneratie van de bron met oppervlaktewater

| Kenmerk | Waarde | Eenheid |
|--|-------------|-----------------------------|
| Warmte tekort | 3092 | GJ |
| Temperatuurverschil bronnen | 4 | °C |
| Benodigd volume voor warmte overdracht | 185000 | m ³ |
| Pomp energieverbruik | 100 | W/m ³ |
| Debiet | 5 | m ³ /uur |
| Energieverbruik regeneratie | 13,3 | GJ_{el}/jaar |

6.2.2 Opbrengsten

'Opbrengst' is in dit geval het vermeden elektriciteit- en materiaalverbruik van de referentie: regeneratie door middel van droge koelers. Het elektriciteitsverbruik van droge koeling⁶ voor het regenereren van de bron kost 103 GJ/jaar. Hier tegenover

⁵ Het energieverbruik voor de productie van de droge koeler en de warmtewisselaar is niet alleen het product van de energie intensiteit en het gewicht. In de berekening is een verdeling van het gewicht naar andere materialen (op basis van de samenstelling van warmtepomp) zoals koper en aluminium meegenomen.

⁶ In de berekening is uitgegaan van een COP van de droge koeler van 25

staat het elektriciteitsverbruik voor rondpompen van het oppervlaktewater langs de warmtewisselaar. De bron kan op deze manier ook geregenereerd worden, maar met slechts 13 GJ/jaar. De besparing op jaarbasis van regeneratie van de bron komt daarmee op 90 GJ/jaar.

6.2.3 Resultaten en gevoeligheid

Uit Tabel 6 - 1, valt af te leiden dat het energieverbruik voor de productie van een warmtewisselaar al lager ligt dan het energieverbruik voor de productie van een droge koeler die dezelfde hoeveelheid energie kan regenereren (139 GJ tegenover 155 GJ). Er hoeft dus niets 'terugverdiend' te worden. Daarbovenop komt dan nog een jaarlijkse energiebesparing van 90 GJ.

De onzekerheid van de uitkomst is afhankelijk van de volgende factoren.

- Het benodigde vermogen voor regeneratie per apparaat is onzeker. In deze studie is het vermogen van de warmtewisselaar gelijkgesteld aan dat van de droge koeler. De energiekosten verbonden aan de productie van de droge koeler vallen (onder gelijk vermogen) hoger uit dan voor de warmtewisselaar, terwijl de productie van Titanium, het hoofdbestanddeel van de warmtewisselaar, veel energie intensiever is. Hier aan ten grondslag ligt dat (1) de warmteoverdracht van lucht op water veel minder efficiënt gaat dan van water op water en (2) het soortelijk gewicht van titanium 56% lager ligt dan dat van RVS, waardoor voor hetzelfde oppervlak minder massa nodig is.
- De korte afstand van de Tasman Toren tot het water waar de thermische energie van benut wordt is aanleiding geweest om de benodigde pijpen mee te nemen (droge koelers op het dak moeten eveneens met pijpen aangesloten worden). Aan standaard PE pijpen voor dit soort toepassingen, met een diameter van 15 cm en een wanddikte van 10 mm, zitten per 100 meter 67 GJ aan energieproductiekosten verbonden. Als vanwege de ligging van het gebouw ten opzichte van het oppervlaktewater 200 meter meer PE pijp nodig is dan in de referentie situatie met droge koeler, dan duurt het 1.3 jaar voordat dit is terugverdiend met de energiebesparing.
- De benodigde elektrische energie voor regeneratie van beide varianten is zeer afhankelijk van de temperatuursverschillen tussen twee bronnen. Hierdoor kunnen grote verschillen optreden in het daadwerkelijke elektriciteitsverbruik.

6.3 Conclusies en aanbevelingen

Wanneer de warmtevraag groter is dan de koudevraag en de bron geregenereerd moet worden is regeneratie met warmte uit oppervlaktewater een energiezuinig alternatief. Wel dient oppervlaktewater in de buurt van de bron voorhanden te zijn om energiekosten voor het buizensysteem en pompenergieverliezen te beperken.

Technologische verbetering op het vlak van warmtewisselaars is wel gewenst. Veel 'goedkope' warmtewisselaars (van koper/nikkel) zijn gevoelig voor corrosie. Aan de

betere kwaliteit titanium warmtepompen zitten hogere energieproductiekosten verbonden. Innovaties op het gebied van kunststof warmtewisselaars zouden deze hoge energiekosten omlaag kunnen brengen en het probleem van corrosie omzeilen.

7 Getijstroom energie

7.1 Korte beschrijving technologie

Getijden worden veroorzaakt door de gravitatiekrachten tussen de maan, de 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. De beweging van het water veroorzaakt getijdenstromingen met snelheden tot wel 5 m/s in kustzones en in stroomgaten tussen eilanden. Energiewinning uit getijden kan op twee fundamenteel verschillende manieren¹⁸:

- 1 Door het getijdenverschil te benutten in afsluitbare bassins zoals estuaria waar een groot verschil optreedt tussen eb en vloed.
- 2 Door lokale getijdenstromingen te benutten op een manier analoog aan windturbines. Voorbeelden hiervan zijn de C-energy (die overigens ook golf energie kan benutten) en de Seagen in Noord Ierland.

In de Westerschelde bij Borssele wordt momenteel een proef gehouden met deze manier van energiewinning uit getijden. De stroomsnelheden zijn hier relatief hoog (tot 2 m/s), de locatie is buiten scheepvaartroutes en toch voldoende diep. De meteorologische boei ligt vlakbij, deze levert nauwkeurige data over stromingen en golven. Uit deze data is gebleken dat, naast hoge getijdenstromingen, er ook een gunstig golfklimaat heerst. Bij de juiste windrichting komen de golven uit de Noordzee tot wel 1,5 meter hoog, ook bij de steiger.



Figuur 6, Getijstroom energie door benutting van getijdenstromingen¹⁹

Marine Current Turbines heeft met Seagen een concept ontwikkeld analoog aan de windturbines met een horizontale as. De Seagen heeft twee rotorbladen met een

diameter van 16 meter, waarmee in totaal een vermogen van 1,2 MW wordt opgewekt. De Seagen is geïnstalleerd bij de kust van Noord-Ierland bij Strangford Narrows en zal naar verwachting 5 GWh per jaar opleveren.



Figuur 7: Getijstroom energie door Seagen Marine Current Turbine²⁰

7.2 Energiebalans

Er is een beperkt aantal studies gedaan naar de energierugverdiendtijd van getijstroom energie installaties. Een studie door Soerensen *et al* uit 2003²¹ schat de CO₂ intensiteit van getijstroom energie op 12 gram CO₂ / kWh, tegenover 14-22 gram CO₂ /kWh voor golfenergie.

Zover bekend is er één uitgebreide studie gedaan naar de energierugverdiendtijd van getijstroom energie. Aan de universiteit van Edinburg is in 2008 een studie uitgevoerd door Douglas *et al*²² naar de Seagen. Rekening houdende met gebruikte materialen, assemblage en installatie, operatie en onderhoud en ontmanteling, is er 25.903 GJ nodig voor de productie. Bij een verwachte opbrengst van 4.736 MWh per jaar geeft dit een energierugverdiendtijd van 1,5 jaar en een CO₂ intensiteit van 20 gram CO₂/kWh.

Van het C-energy concept is een ketenanalyse gemaakt op basis van beschikbare gegevens van de gebruikte materialen. Hierbij is voor zowel de energie-input als de opbrengsten uitgegaan van de bestaande proefinstallatie in de Westerschelde.

7.2.1 Energie-input

Er is gekeken naar de materialen die gebruikt zijn voor de rotor, de hijsinstallatie en het supportframe. Op een totaal gewicht van ongeveer 39 ton is staal met 98% het voornaamste materiaal. Naast staal zijn composiet, pur-schuim en verf meegenomen in de berekening. De kentallen die gehanteerd zijn voor de berekening zijn weergegeven in Tabel 7 - 1.

Tabel 7 - 1 Overzicht energie en emissie kengetallen uit EcoInvent

| Materiaal | Gewicht (kg) | Energie (MJ / kg) | CO ₂ (kg CO ₂ /kg) | Opmerkingen |
|---------------------------|-----------------|-------------------|--|--|
| Staal | ongeveer 39.000 | 28 | 1,5 | De energie en emissie getallen gelden voor de algemene Europese productiemix voor de productie van laag gelegeerd primair staal. Inclusief processen: vervoer van hete metaal en andere grondstoffen naar omzetter, staalproductie, gieten, walsen en afwerken |
| Pur schuim, lijm, plamuur | 90 | 102 | 5,2 | Kental gebruikt voor pur schuim. |
| Composiet | 500 | 138 | 6,2 | Kental voor Epoxihars |
| Verf (in liter) | 136 | 80 | 2,7 | Kental voor Alkyd verf |

De bijdrage van staal is 92% van de totale energie-input voor de grondstoffen. Composiet draagt 6% bij en verf en pur-schuim elk 1%.

Bij de productie van de installatie is gerekend met vlamsnijden, verspanen (bewerkingstechniek), lassen, zandstralen en schilderen. De gebruikte kengetallen komen overeen met de kengetallen gebruikt in de studie van Parker *et al* naar de Pelamis. De energie die deze technieken nodig hebben vormen in totaal 3% van de totale energie-input voor de productie van de installatie.

De energie en emissies gerelateerd aan assemblage & installatie en operatie & onderhoud is niet in detail bekeken. Uit de studie naar de Pelamis blijkt dat de energie voor deze twee stappen ongeveer 30% is van de energie-inhoud van de materialen. In het geval van het C-energy concept zullen deze stappen echter aanzienlijk minder energie vergen, omdat de proefopstelling niet op zee geplaatst is. Daarnaast is het ontwerp van de C-energy zo gemaakt dat deze geplaatst wordt bij bestaande installaties op zee, bijvoorbeeld bij windmolenparken. Hierbij is verondersteld dat assemblage en installatie 5%, en operatie en onderhoud 10% van de energie-inhoud van de materialen vergen.

Tabel 7 - 2 Overzicht van de energie en emissies per ketenstap voor de C-energy

| Ketenstap | energie (GJ) | emissies (ton CO ₂) | Opmerkingen |
|---------------------------------|--------------|---------------------------------|---|
| Materialen | 1.162 | 61 | Op basis van de hoeveelheden staal, pur-schuim, composiet en verf en productie van de installatie |
| Assemblage en installatie | 58 | 3 | Geschat op 5% van de energie-intensiteit van de materialen |
| Operatie en onderhoud | 116 | 6 | Geschat op 10 % van de energie-intensiteit van de materialen |
| Ontmanteling en afvalverwerking | - | - | Niet meegenomen, uitgangspunt is een cut-off benadering. |
| Totaal | 1.336 | 70 | |

7.2.2 Opbrengsten

Er is gerekend met een vermogen van 30 kW. Er zijn nog geen meetgegevens bekend van de gerealiseerde opbrengst. Verwacht wordt dat het prototype ongeveer 100 MWh per jaar kan opleveren, uitgaande van een maximale stroomsnelheid van 2 meter per seconde. De jaarlijkse energieopbrengst is hiermee 360 GJ. Met de opbrengsten kan ongeveer 900 GJ primaire energie worden vermeden, uitgaande dat een gemiddelde centrale in Nederland een rendement heeft van 40%. Hierdoor wordt jaarlijks ongeveer 45,6 ton CO₂ uitstoot vermeden, ongeveer evenveel als de emissies van het door kolen opgewekte elektriciteitsverbruik van 13 huishoudens.

Bij een levensduur van 20 jaar zal de totale energieopbrengst 7200 GJ zijn.

7.2.3 Resultaten en gevoeligheid

De resultaten van deze berekening laten zien dat de C-energy een energierugverdientijd heeft van 3,7 jaar. Aangezien de testopstelling, waar dit onderzoek op is gebaseerd, gepland is voor de duur van een jaar, zal de testopstelling zichzelf nog niet terugverdienen. Bij een verwachte levensduur van 20 jaar is de energieproductieratio 5,4.

Tabel 7 - 3 Resultaten getijdstroom energie op basis van C-Energy

| Overzicht | Eenheid | Waarde | Opmerkingen |
|--------------------------------|---------|--------|---|
| Energie input over levensduur | GJ | 1.336 | |
| Energie output over levensduur | GJ | 7.200 | Op basis van 20 jaar bij 100 MWh per jaar |
| ETVT | jaar | 3,7 | |
| EPR | getal | 5,4 | Uitgaande van een levensduur |

| | | | |
|-----------------------------|-------|----|--|
| | | | van 20 jaar, de testopstelling heeft een kortere levensduur |
| CO ₂ intensiteit | g/kWh | 35 | Soerensen <i>et al</i> uit 2003 ²³ geeft voor getijdestroom 12 gram CO ₂ / kWh en de Douglas <i>et al</i> ²⁴ berekenen 20 gram CO ₂ /kWh voor de Seagen. |

De gevoeligheid van de cijfers van deze berekening is groot. De belangrijkste factoren die de energierugverdiendtijd positief dan wel negatief beïnvloeden zijn weergegeven in Tabel 7 - 4.

Tabel 7 - 4 Effect op energie terugverdiendtijd van berekening voor de C-energy

| Positieve effecten op de ETVT | Negatieve effecten op de ETVT |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Minder gebruik van staal in supportframe en hijsinstallatie in uiteindelijke ontwerp (mogelijke synergie met bestaande installaties); • Gebruik van staal met lagere energie-intensiteit (secundair en/of efficiënt geproduceerd) • Hogere opbrengst in omgeving met zowel golfslag als getijdenstroming. Bij energie uit getijdenstroming levert een verdubbeling in stroomsnelheid, een achtvoud in opbrengst; • Hogere opbrengst door betere afstelling installatie en verbetering van het rendement; | <ul style="list-style-type: none"> • Lagere opbrengst dan voorzien; • Hogere energie-input door factoren zijn meegenomen als schatting: <ul style="list-style-type: none"> – Transport – Assemblage (op zee) – Operatie en onderhoud (op zee) – Gebruik van additionele materialen (elektrische systemen, bekabeling, overige materialen) |

7.3 Conclusies en aanbevelingen

Opwekking van energie uit getijdenstroming wordt in Noord-Ierland precommercieel toegepast met de Seagen turbine van Marine Current Turbines. Deze vrije stromingsinstallatie heeft een ETVT van ongeveer 1,5 jaar. Voor deze energierugverdiendtijd zijn stroomsnelheden van 2,25 tot 2,5 m/s nodig. Stroomsnelheden in Nederland vallen op de meeste locaties (afgezien van de Oosterscheldekering) lager uit. De eerste proefinstallatie voor getijdenstroom energie in Nederland is C-energy in de Westerschelde. De C-Energy is ontworpen voor een stroomsnelheid van maximaal 2 m/s. De energierugverdiendtijd van deze installatie is ongeveer 3,7 jaar (waarbij niet gerekend is met opbrengsten uit golfslag). De ETVT is erg gevoelig voor de stroomsnelheid, aangezien kleine verschillen in stroomsnelheid een groot effect hebben op de opbrengst - een verdubbeling in stroomsnelheid is een achtvoud in opbrengst.

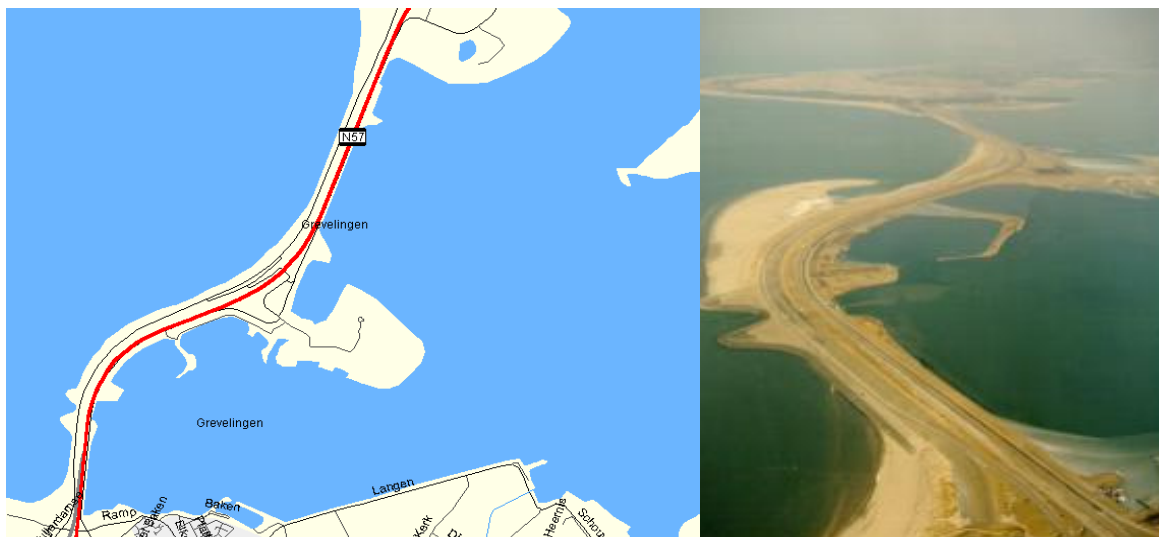
Getijdenstroom energie is voor Nederland redelijk interessant, maar bevindt zich nog wel in de pilot fase. De techniek kan toegepast worden op plaatsen waar de stroming (eventueel kunstmatig) groter is dan 2 m/s. Om de techniek verder te ontwikkelen is het nodig om proefinstallaties voor langere tijd (tot vijftien jaar) financieel te ondersteunen. De energiebedrijven en offshore industrie zouden hier een belangrijke rol in kunnen spelen. Buitenlandse energiebedrijven hebben zich vaak gebonden aan de ontwikkeling van een bepaalde installatie, in Nederland is dit nog niet het geval. Om de techniek verder te ontwikkelen is met name onderzoek naar de impact van de installaties op vissen en zeehonden van belang. Daarnaast zijn er generieke technische problemen rondom corrosie en staalmoeheid.

8 Getijdenverval

8.1 Korte beschrijving technologie

Wereldwijd wordt nog maar weinig getijdenenergie benut. De meeste technieken richten zich op het plaatsen van vrije stromingsturbinen in open water. Van de centrales waar een dam in een estuarium een soort natuurlijk bassin creëert is de Franse getijdencentrale in La Rance de meest bekende. In de 330 meter lange dam, waar een gemiddeld getijdenverschil van 8 optreedt, produceren 24 bulb turbines sinds 1966 gemiddeld 68 MW. Elke turbine heeft een piekvermogen van 10 MW en kan zowel bij opkomend als teruggaand tij elektriciteit opwekken. De centrale is al meer dan 40 jaar operationeel en de investering is ruimschoots terugverdiend. De elektriciteit productiekosten liggen momenteel onder de 2 cent/kWh²⁵.

Bij de uitvoering van het Deltaplan, na de watersnoodramp in 1953, is het Grevelingenmeer ontstaan. Na de volledige afsluiting van de zee met de voltooiing van de Brouwersdam in 1971, verdween de eb en vloed beweging en werd het Grevelingenmeer steeds zoeter. Als gevolg van de achteruitgang van het waterleven werd in 1979 een spuisluis in de Brouwersdam aangelegd. De zoutconcentratie van het meer werd hierdoor weer nagenoeg gelijk aan dat van de Noordzee, en de kwaliteit van het waterleven herstelde.



Figuur 8, Kaart en luchtfoto Brouwersdam²⁶

De eerste 20 jaar stond de sluis alleen in het winterhalfjaar open waardoor het water ongeveer 2 keer per jaar verversd werd. Sinds 1999 staat de sluis bijna het gehele jaar open en stroomt 4 keer per jaar het volume van het meer door de spuisluis²⁷. Toch is de waterkwaliteit nog niet optimaal te noemen. In 2006 is Rijkswaterstaat een verkenning gestart naar verbetering van de ecologische toestand van het

Grevelingenmeer. Eén van de mogelijke varianten voor herinrichting van het gebied betreft een terugkeer van de getijdencyclus. Herinstructie van het getij zal de diversiteit ten goede komen en het meer zuurstofrijker maken. De mogelijkheid om energie uit de getijdenstroming te benutten is meegenomen in de verkennende studie. Rijkswaterstaat Zeeland heeft in januari 2009 hierover gepubliceerd in de 'Verkenning Grevelingen water en getij'.

8.2 Energiebalans

In deze studie is de ETVT berekend van de variant waarbij een getijdenverschil van 0,7 meter wordt toegelaten. Maximaal getij zou voor de elektriciteitsproductie gunstiger zijn. Hiertoe moeten aanpassingen gedaan worden aan de dijken en havens van het Grevelingenmeer. Een peilvariatie van 0,7 meter is voldoende voor optimalisatie van de zuurstofconcentratie en een aanzienlijke bijdrage aan de rivierafvoer. Meerkosten (in termen van energie) voor de realisatie van een peilvariatie van één meter zullen worden toegeschreven aan de getijdenenergie installatie, hetgeen de terugverdientijd niet ten goede zal komen. Bovendien wordt, in verband met de vergaande maatregelen voor aanpassing van de oevers van het meer, de variant 'Maximaal getij' minder kansrijk geacht.

De energiebalans voor een getijdencentrale bij de Brouwersdam bestaat uit de energie input (energie benodigd voor de productie van de turbines en de caissons) en de energieproductie (de elektriciteitsproductie).

8.2.1 Energie-input

Voor de variant met een peilvariatie van 0,7 meter kunnen de bestaande caissons gebruikt worden. Toch zal een groot deel verwijderd moeten worden voor de doorstroomopeningen en turbines. Hierom is een berekening gemaakt van het energieverbruik voor de productie van de caissons. Het noordelijk deel van de Brouwersdam bestaat uit twaalf caissons van 68 meter lang, 18 meter breed en 16 meter hoog²⁸. Naast de dichtheid van het gebruikte materiaal (gewapend beton, 2,5 ton/m³) is het opgevuld volume van de caissons een belangrijke indicator voor het totale gewicht. Deze zogenaamde soliditeitsfactor is geschat op 20%²⁹. Met een energie-intensiteit van 1,64 MJ/kg³⁰ is de energie-input voor de productie van de 12 caissons berekend op 195 TJ.

De kenmerken van de turbines in La Rance zijn als uitgangspunt genomen voor de energievraag voor de productie van de turbines. Deze turbines wegen 470 ton per stuk en hebben een diameter van 5,35 meter³¹. In een inzending van *Δ Synergie* voor de prijsvraag 'Waterlandschap van de toekomst' wordt gerekend met een diameter van 6 meter voor elk van de 90 turbines. Dit is weliswaar iets groter dan in La Rance maar vanwege de minder hoge druk die de turbines in de Brouwersdam hoeven te weerstaan (een peilvariatie van 0,7 meter ten opzichte van 8 meter in La Rance) een is aangenomen dat de turbines in de Brouwersdam even zwaar zijn (470 ton per turbine). Waarschijnlijk zal het gewicht van de turbines vanwege technologische

ontwikkelingen in werkelijkheid lager uit vallen en kan deze aanname als conservatief worden beschouwd.

Met betrekking tot de energie-intensiteit van het materiaal van de turbines is uitgegaan van 53,4 MJ/kg, de waarde voor 'roestvrij staal 316'³². De primaire energie benodigd voor de productie van het staal van de turbines komt hiermee op 2257 TJ.

Voor de assemblage van met name de turbines wordt verwacht dat dit energie intensief is. De bladen van de turbine moeten zeer glad en precies op maat zijn. Tezamen met het energieverbruik voor installatie is dit geschat op 20% van de energie benodigd voor de productie van de materialen (turbines en caissons). Operatie en onderhoud zijn geschat op 5% van de opgewekte hoeveelheid elektriciteit per jaar. Een overzicht van het energieverbruik van de hierboven besproken ketenstappen is te vinden in Tabel 8 - 1.

Tabel 8 - 1 Primair energieverbruik per onderdeel van de getijdencentrale

| Materiaal/Ketenstap | Gewicht (ton) | Energie (GJ) | CO ₂ (ton) | Opmerkingen |
|---------------------------------|---------------|------------------|-----------------------|--|
| Materiaal (gewapend beton) | 118.973 | 194.660 | 12.968 | 12 Caissons |
| Materiaal (RVS 316) | 42.300 | 2.258.695 | 171.154 | 90 Turbines |
| Assemblage en installatie | | 490.671 | 36.824 | 20% van productie energieverbruik/emissies |
| Operatie en onderhoud | | 24.660 | n.v.t. | 5% van jaarlijks geproduceerde energie |
| Ontmanteling en afvalverwerking | | | | Niet meegenomen ⁷ |
| Totaal | | 2.968.687 | 220.946 | |

8.2.2 Opbrengsten

De in opdracht van Delta Energy uitgevoerde berekening van de TU Delft geeft een jaarlijkse opbrengst van 336 GWh/jaar (186 turbines met een gezamenlijke capaciteit van 105 MW) voor de variant 'Maximum getij'. Bij de meer realistische variant met een peilvariatie van 0,7 meter kan met ongeveer 100 turbines maximaal 220 GWh per jaar worden opgewekt³³. In de studie van *Δ Synergie* is een berekening gemaakt die uitkomt op een jaarlijkse opbrengst van 137 GWh per jaar (door middel van 90 turbines met een gezamenlijk vermogen van 56 MW). Vanwege de onzekerheid over

⁷ S. Pacca (2005, impacts from decommissioning of hydroelectric dams: a life cycle perspective) heeft berekend dat bij de ontmanteling van de dam van waterkrachtcentrales uit het geaccumuleerde organische sediment uit het reservoir een forse hoeveelheid CO₂ vrijkomt (varierend van 35-380 gram CO₂/kWh). Omdat bij een getijdencentrale bij het Grevelingenmeer geen sprake is van de vorming van een nieuw bassin is het niet nodig rekening te houden met dit effect.

het aantal te installeren turbines, het gezamenlijk vermogen en de werkelijke opbrengst, is in de berekening uitgegaan van de conservatievere 137 GWh per jaar uit de studie van *Δ Synergie*. Rekening houdend met 5% verlies aan operatie en onderhoud levert dit een jaarproductie op van **468.450 GJ**.

8.2.3 Resultaten en gevoeligheid

Voor een getijdenenergiecentrale in de Brouwersdam, is onder de in deze studie beschreven omstandigheden, een ETVT van 6,3 jaar berekend.

De volgende factoren hebben de grootste impact op de resultaten van de energiebalans:

- Het gewicht van de turbines en het type materiaal (met bijbehorende energie-intensiteit).
- Assemblage en installatie zijn moeilijk in te schatten. Vooral assemblage zou nog wel eens groot kunnen uitpakken, afhankelijk van de precisie waarmee turbinebladen zijn gefabriceerd. Voor kleine waterkrachtturbines (~2 kW) wordt laser technologie gebruikt om zeer gladde bladen te maken. Het energieverbruik voor installatie zal sterk afhangen van de mate waarin gebruik gemaakt kan worden van de bestaande dam constructie.
- De jaarlijkse elektriciteitsproductie. Met de hoeveelheid daadwerkelijk opgewekte elektriciteit wordt de snelheid waarmee de centrale zicht terugverdiend bepaald. De hoogte daarvan is onzeker en hangt af van meerdere factoren zoals het geïnstalleerd vermogen, de efficiëntie van de turbines en het spuiregime.

Tabel 8 - 2 Overzicht resultaten getijdenverschillen

| Overzicht | Eenheid | Waarde | Opmerkingen |
|--------------------------------|---------|------------|--------------------------------|
| Energie input over levensduur | GJ | 2.968.687 | Bij een levensduur van 60 jaar |
| Energie output over levensduur | GJ | 28.112.400 | |
| ETVT | jaar | 6,28 | |
| EPR | getal | 9,5 | |
| CO ₂ intensiteit | g/kWh | 27 | |

8.3 Conclusies en aanbevelingen

Benutting van getijdenenergie uit verval vindt in Nederland nog niet plaats. De meest bekende centrale van dit soort staat in La Rance, Frankrijk. Door de afsluiting van een bassin met een dam (in deze studie de Brouwersdam) ontstaat bij eb en vloed een hoogteverschil. De potentiële energie kan worden benut door drukturbines (die twee kanten op werken) in de dam te plaatsen. Bij maximale openstelling van de sluisen kan in het Grevelingenmeer een hoogteverschil van meer dan een meter worden gerealiseerd. Dit kan echter niet zonder aanpassingen aan havens en oevers van het

Grevelingenmeer. Hoewel ongunstiger voor het vermogen van de getijdencentrale, is een peilvariatie van 0,7 meter voldoende voor optimalisatie van de zuurstofconcentratie en levert dit een aanzienlijke bijdrage aan de rivierafvoer. Bij een peilvariatie van 0,7 meter is de ETVT van plaatsing van een getijdencentrale in de Brouwersdam 6,3 jaar.

Getijdenenergie is voor Nederland redelijk interessant. Met een terugverdientijd van 6,3 jaar zit een getijdencentrale bij de Brouwersdam echter aan de hoge kant voor een technologie die al ver ontwikkeld is. Bij lage peilvariaties van rond de 0,7 meter, is het de vraag of (traditionele) drukturbines het geschiktst zijn. Er zijn twee ontwikkelingen die interessant zijn: lage verval turbines en vrij stromingsturbines. Zeer laag verval waterkracht turbines, kunnen die bij laag verval gekanteld kunnen worden en zo alsnog elektriciteit opwekken (te vergelijken met een 'solar tracking system'). Hoewel het rendement van vrije stromingsturbines lager ligt dan een drukturbine (30-50% ten opzichte van 70-90% bij drukturbines), is de plaatsing ervan minder ingrijpend, waardoor de (energie) kosten lager zijn en de impact op het waterleven kleiner is. In de Brouwersdam zou ook een alternatief met vrije stromingsturbines onderzocht moeten worden, voor een volledig beeld van de mogelijkheden op het gebied van energie opwekking uit getijdenenergie. Daarnaast kan ook onderzocht worden of er andere locaties in Nederland geschikt zijn voor de benutting van getijdenenergie door middel van vrije stromingsturbines, bij voorkeur bij bestaande infrastructuur zoals havens en kunstwerken.

9 Golf energie

9.1 Korte beschrijving technologie

Golfenergie is een afgeleide vorm van de primaire energie van de zon. Windvelden boven de oceaan ontstaan doordat de zon de aarde niet gelijkmatig opwarmt. Als een wind waait over een wateroppervlakte, ontstaan golven. Op die manier wordt een deel van de windenergie omgezet in golfenergie. Naar schatting is het totaal beschikbaar golfvermogen van alle kustlijnen in de hele wereld vergelijkbaar met het huidige elektriciteitsverbruik: 56 EJ³⁴

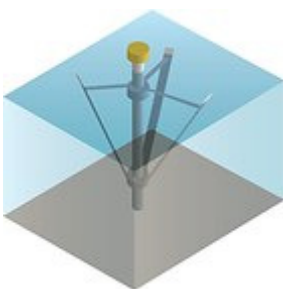
Tot nu toe werden tal van technieken bedacht om energie uit watergolven te winnen. Deze systemen zijn gebaseerd op totaal verschillende werkingsprincipes. Een aantal voorbeelden wordt hieronder genoemd.

De **Archimedes Waveswing**, een zogenaamd resonantiesysteem, bestaat uit twee



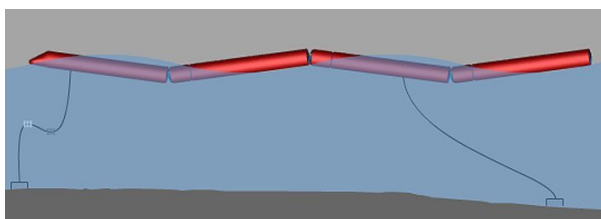
cilinders met een diameter van 10 meter en is ontwikkeld door het Nederlandse bedrijf Teamwork Technology. De bovenste cilinder gaat op en neer (resoneert) onder invloed van de golfbewegingen doordat er lucht binnenin zit. Hij schuift over de tweede cilinder heen, die op de bodem staat. Magneten zetten de beweging om in elektriciteit. In totaal is het apparaat ongeveer 35 meter hoog en kan 2 megawatt produceren.

De **C-energy** (te typeren als hydrodynamisch liftstelsel) bezit drie bladen die vanaf



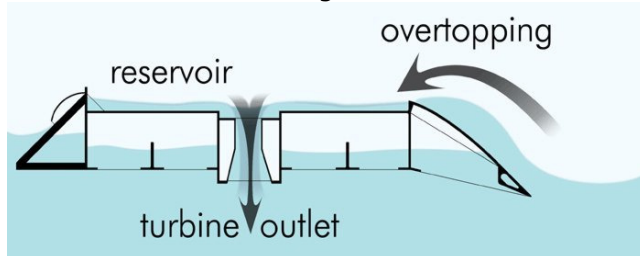
de as schuin omhoog gericht zijn. De verticale beweging van de golf zorgt voor liftkrachten waardoor de bladen gaan ronddraaien, onafhankelijk van de richting van de stroming. Indien de bladen in verticale positie worden geplaatst wordt alleen stromingsenergie benut en valt het concept te plaatsen onder getijstroom energie. Dit is het geval bij de huidige proefopstelling in de Westerschelde waarvan een berekening is gemaakt in hoofdstuk 8 (getijstroom energie).

De **Pelamis** is een golf contour systeem en bestaat uit een scharnierende buis van



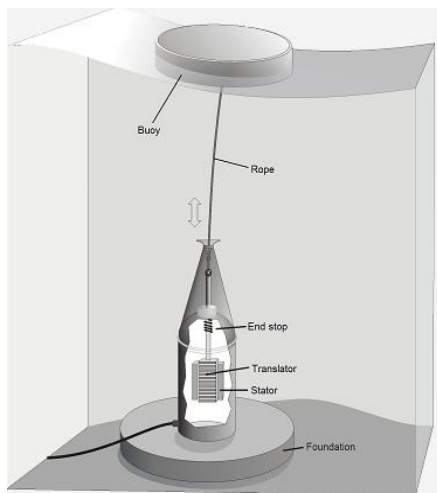
120 meter, die op de golven drijft. De bewegingen tussen de scharnieren worden omgezet in elektriciteit waardoor 0,75 megawatt geproduceerd wordt.

De **wave dragon** is een zogenaamd 'overtopping device'. Potentiële energie wordt opgeslagen doordat golven over de rand van een drijvend bassin slaan. Het water in het reservoir wordt vervolgens door een uistroom opening terug de zee in gelaten.



Gebruikmakend van laag verval turbines wordt hieruit elektriciteit gewonnen. Sinds 2003 wordt in Denemarken getest met een 20 KW prototype. Het beoogde doel voor commerciële installaties is opschaling naar 4 tot 11 MW (afhankelijk van de golfhoogte)³⁵.

De wave energy opwekker van het Noorse **Seabased** valt onder de "point absorbers".



De bewegingen van een boei ten opzichte van een vast referentiepunt worden omgezet in elektriciteit door middel van een generator die draait op het opgewekte magnetisch veld.

9.2 Energiebalans

Er zijn een aantal bestaande studies die gekeken hebben naar de levenscyclusemissies van energie-opwekkers uit golfenergie. In het algemeen valt te zeggen dat de energierugverdiensijd voor energie-opwekkers uit golfenergie wordt geschat tussen de 1 en 2 ½ jaar. De CO₂-intensiteit van de installaties ligt grofweg tussen de 14-50 gr CO₂/kWh. De onderzoeken zijn veelal uitgevoerd voor proefinstallaties. In Tabel 9 - 1 is een overzicht te vinden van de resultaten van het literatuuronderzoek naar de levenscyclusanalyses van energie-opwekkers uit golfenergie.

De belangrijkste bijdrage in de energiebalans van de energie-opwekkers uit golfenergie is de energie die nodig is voor het vervaardigen van de materialen die nodig zijn voor de installaties. Voor golfenergie-opwekkers is het belangrijkste materiaal staal. Het energieverbruik van het vervoer van de grondstoffen is meestal te verwaarlozen en het energieverbruik in de winning van grondstoffen is doorgaans een orde van grootte lager dan het energieverbruik in hun primaire verwerking. Het

energiegebruik in de assemblage, de ontmanteling en afvalverwerking is vaak ook een orde van grootte lager dan voor de productie van de materialen.

Tabel 9 - 1 Overzicht van levenscyclusanalyses golfenergie uit de literatuur

| Systeem | Kengetal | Type parameter | Toelichting en bron |
|----------------------|-----------------------------|------------------------------|--|
| Golfenergie algemeen | 14-22 gCO ₂ /kWh | CO ₂ -intensiteit | Studie door Soerensen <i>et al</i> uit 2003 ³⁶ . Uitgangspunt is dat de productie van het materiaal de belangrijkste energie- en emissiebron is. Emissies van transport en constructie worden als minder significant beschouwd. |
| Pelamis | 40 gCO ₂ /kWh | CO ₂ -intensiteit | Eerste orde schatting op basis van hoeveelheid staal door Banerjee <i>et al</i> uit 2005. |
| Pelamis | 23 gCO ₂ /kWh | CO ₂ -intensiteit | Gedetailleerde levenscyclusanalyse door Parker <i>et al</i> ³⁷ uit 2007 specifiek gericht op de Pelamis. Deze studie is verder bestudeerd in de volgende paragraaf. |
| | 1,7 jaar | energie-TVT | |
| Anonieme installatie | 24-50 gCO ₂ /kWh | CO ₂ -intensiteit | Eerste orde schatting op basis van hoeveelheid staal (665 ton) door de Carbon Trust ³⁸ . |
| Wave Dragon | 2,4 jaar | energie-TVT | Volledige levenscyclusanalyse door Soerensen <i>et al</i> (2006), waar energie en CO ₂ , twee van de vijftien impactcategorieën zijn. |

Voor de ketenanalyse van de Pelamis is uitgegaan van de uitgebreide levenscyclusanalyse die hierover is uitgevoerd aan de universiteit van Edinburg door Parker *et al*. Deze studie gaat uit van ideale omstandigheden voor de kust van Portugal. De onderzoeks aanpak is bekeken en er is een vertaling gemaakt naar de Nederlandse situatie.

9.2.1 Energie-input

De studie naar de Pelamis is een uitgebreide studie die kijkt naar alle stappen in de keten: de energie-intensiteit van de materialen (het energieverbruik over de gehele levensduur van een materiaal per gewichtseenheid), de assemblage & installatie, operatie & onderhoud en ontmanteling en afvalverwerking. De totale energie-input wordt berekend op 17.298 GJ. De verdeling over de vier stadia staat in Tabel 9 - 2.

Voor de Pelamis-studie geldt dat de assemblage- en installatieactiviteiten 10% van de energie-inhoud van de materialen vertegenwoordigen. Voor de operatie en het

onderhoud geldt dat dit 20% van de waarde van de materialen is. Deze waarden zijn relatief hoog. Dit komt doordat veel van deze activiteiten op zee plaatsvinden.

Tabel 9 - 2 Overzicht van de energie en emissies per ketenstap van de Pelamis

| Ketenstap | energie (GJ) | emissies (ton CO ₂) | Opmerkingen |
|---------------------------------|---------------|---------------------------------|--|
| Materialen | 22.000 | 1.791 | Van de materialen bestaat ongeveer 80% uit staal. Dit geeft dus ook de grootste bijdrage. De ankermechanismes, en de elektrische systemen zijn meegenomen. |
| Assemblage en installatie | 2.249 | 174 | Meegenomen zijn zeeschepen die nodig zijn voor de assemblage en het transport van de materialen naar de locatie en de overslag- activiteiten op de kade en de schepen. |
| Operatie en onderhoud | 4.712 | 366 | Meegenomen is jaarlijks onderhoud met zeeschepen, halfjaarlijkse aan- en afkoppelingsactiviteiten en tweemaandelijks inspectie met op afstand bestuurbare voertuigen. |
| Ontmanteling en afvalverwerking | -11.663 | -987 | In deze studie worden de milieuwinsten van de mogelijke recycling aan de Pelamis toegeschreven. Uitgangspunt is recycling van 90% van het staal. |
| Totaal | 17.298 | 1.356 | |

9.2.2 Opbrengsten

Voor de Pelamis is er van uitgegaan dat de golven bij de kust van Portugal een energie leveren van 55 kW per meter golf. De Pelamis is geschikt voor een waterdiepte van 50-100 m. Bij drie eenheden van 120 meter heeft de Pelamis een ontwerpvermogen van 2,25 MW. De verwachte productie is 2,97 GWh/jaar. Er is gerekend met een levensduur van 20 jaar. Hiermee zou de totale energieproductie op bijna 60 GWh uit moeten komen.

9.2.3 Resultaten en gevoeligheid

De studie van Parker *et al* laat zien dat onder ideale omstandigheden de energierugverdientijd ongeveer 1,7 jaar is, als recycling van staal wordt meegerekend, en 2,8 jaar is, als recycling van staal niet wordt meegerekend (in overeenstemming met de gekozen cut-off allocatie). De Pelamis is qua ontwerp niet de meest geschikte energie-opwekker voor golfenergie in de Nederlandse situatie. Met een opbrengst van ongeveer 0,5 GWh per jaar zal de energierugverdientijd uitkomen op ongeveer 15 jaar. De energieproductieratio is in dat geval 1,3.

De volgende factoren hebben de grootste impact op de resultaten van de energiebalans:

- de jaarlijkse opbrengst;
- de mogelijkheden tot recycling van het gebruikte materiaal en de manier waarop hiermee wordt gerekend in de levenscyclus analyse;
- de energie-intensiteit van het gebruikte staal;
- de levensduur van de installatie.

Hieronder zijn deze vier factoren beschreven. De effecten van de variatie van deze factoren op de energierugverdiertijd en de energieproductieratio zijn samengevat in Tabel 9 - 3 .

Tabel 9 - 3 Gevoeligheidsanalyse energiebalans Pelamis (geen cut-off allocatie)

| Parameter | Range | Waarde in studie | ETVT (jaren) | EPR |
|--------------------------------------|----------------|------------------|--------------|------|
| Referentiestudie Parker <i>et al</i> | | | 1,7 | 12 |
| Opbrengst | 0,5 – 2,97 GWh | 2,97 GWh | 1,7 – 8,3 | 2-12 |
| Recyclingratio staal | 0 % - 100% | 90% | 1,5 – 2,8 | 7-28 |
| Energie-intensiteit staal | 10–45 MJ/kg | ~ 27 MJ/kg | 0,8 – 2,8 | 7-13 |
| Levensduur | 10 – 50 jaar | 20 jaar | nvt | 6-31 |

De jaarlijkse opbrengst van de Pelamis is in Nederland aanzienlijk minder dan in de optimale omstandigheden. De golven op de Noordzee leveren ver uit de kust (meer dan dertig kilometer) een gemiddelde energie van 10 kW per meter golf, ongeveer vijf keer minder energie dan golven voor de kust van bijvoorbeeld Portugal of Schotland. De opbrengst van een Pelamis zou in Nederland dan ook aanzienlijk lager zijn met ongeveer 0,5 GWh per jaar. Dit heeft een direct effect op de energierugverdiertijd, die daarmee uitkomt op 8,3 jaar voor de suboptimale omstandigheden in Nederland.

In de levenscyclusanalyse van de Pelamis wordt gerekend met de aanname dat het nieuwe materiaal gerecycled gaat worden. Het uitgangspunt is dat 90% van het gebruikte staal kan worden hergebruikt. De energiebatan van het hergebruik worden toegekend aan de Pelamis. Als er gekozen wordt voor de cut-off allocatie methode, worden de batan van recycling toegekend aan de nieuwe toepassing voor het hergebruikte staal en niet aan de Pelamis. Bij deze benadering zal de energierugverdiertijd ongeveer 2,8 jaar zijn voor de optimale situatie.

De energie-input van de Pelamis wordt voor een groot deel bepaald door de energie-intensiteit van het gebruikte staal. In de huidige studie is gerekend met een waarde van ongeveer 27 MJ per kg staal. Dit komt overeen met de waarde voor de algemene Europese productiemix voor de productie van laag gelegeerd primair staal. Hiermee zijn de processen voor staalproductie, gieten, walsen en afwerken meegenomen. De

energie-intensiteit van het gebruikte staal kan variëren tussen de 10 en 45 MJ, waarbij de onderwaarden gelden voor secundair staal en de bovenwaarden voor erg energie-inefficiënte processen. Door variatie in energie-intensiteit van staal varieert de energierugverdiëntijd tussen de 0,8 en 2,8 jaar.

De levensduur van de Pelamis is geschat op 20 jaar. Aangezien het om een proefinstallatie gaat kan de levensduur aanzienlijk lager en hoger uitvallen, bijvoorbeeld tussen de 10 en 50 jaar. De levensduur heeft geen invloed op de energierugverdiëntijd, maar wel op de energieproductieratio. De energieproductieratio varieert hierdoor tussen de 6 en de 31.

Tabel 9 - 4 Resultaten golf energie – specifiek de Pelamis in Nederland zonder recycling bonus

| Overzicht | Eenheid | Waarde | Opmerkingen |
|--------------------------------|---------|--------|---|
| Energie input over levensduur | GJ | 28.961 | Bonus voor recycling wordt niet meegerekend |
| Energie output over levensduur | GJ | 38.880 | Uitgaande van de Nederlandse situatie bij levensduur van 20 jaar. |
| ETVT | jaar | 15 | Hoger dan de schattingen van 1 en 2 ½ jaar die in de literatuur te vinden zijn. |
| EPR | getal | 1,3 | |
| CO ₂ intensiteit | g/kWh | 216 | In de literatuur zijn schatting te vinden van 14-50 gr CO ₂ /kWh. |

9.3 Conclusies en aanbevelingen

Golfenergie wordt in Portugal en Groot-Brittannië precommercieel toegepast. In Nederland zijn er geen permanente installaties. Vanwege minder intensieve golfslag op de Noordzee zal de opbrengst voor eenzelfde type systeem in Nederland altijd lager liggen. De golven op de Noordzee leveren ver uit de kust (meer dan dertig kilometer) een gemiddelde energie van 10 tot 13 kW per meter golf, ongeveer vijf keer minder energie dan golven voor de kust van bijvoorbeeld Portugal of Schotland. De Pelamis, die in Portugal een ETVT van 2,8 jaar heeft, verdient zich in Nederland pas na 15 jaar terug. Voor golfenergie zijn echter veel verschillen technieken mogelijk, waardoor de ETVT behoorlijk kan variëren

Het gebruik van golfenergie in Nederland is op de korte termijn nog niet interessant. Om golfenergie voor Nederland interessant te maken, moet gekeken worden naar lichtere installaties die ontworpen zijn voor minder extreme golfslag en dichter voor de kust toepasbaar zijn of slim geïntegreerd kunnen worden met bestaande structuren (bijvoorbeeld met windparken en offshore platforms op zee). Om het potentieel op de

langere termijn te benutten is het aan te bevelen aan te sluiten bij lange termijn studies zoals FLOW (Far and Large Offshore Wind).

10 Aquatische biomassa

10.1 Korte beschrijving technologie

Met aquatische biomassa worden in dit rapport algen en fotosynthetiserende cyanobacteriën bedoeld (strikt genomen behoren alle in het water levende algen, planten, vissen, zoodieren, amfibieën, schelpdieren, micro-organismen etc. tot aquatische biomassa). Algen hebben recentelijk veel aandacht als nieuwe biomassa-bron voor de productie van hernieuwbare energie ontvangen. De belangrijkste redenen hiervoor zijn dat algen:

- een hoge biomassa-opbrengst per eenheid van licht en gebied kunnen hebben;
- een (zeer) hoog olie of zetmeelgehalte kunnen hebben;
- de kweek vereist geen landbouwgrond;
- zoet water is niet essentieel;
- afvalwater en mest kunnen als nutriëntenbron dienen;
- verbrandingsgassen kunnen als CO₂ = koolstofbron dienen;
- de zee kan ingezet worden als biomassa productie ruimte.

Het eerste onderscheid dat gemaakt moet worden is tussen macroalgen (of zeewier) en microalgen. Er bestaan vele verschillende soorten microalgen, met sterk verschillende samenstellingen. Ze leven als losse cellen of kolonies zonder enige specialisatie. Hoewel dit de kweek gemakkelijker en beter controleerbaar maakt, is het oogsten door het kleine formaat (enkele micrometers) ingewikkelder. Macroalgen zijn wat minder veelzijdig, en minder soorten zijn geschikt voor massale kweek, maar kunnen direct in zee gekweekt worden, terwijl microalgen door dispersie verloren zouden gaan.

Dit betekent dat de kweeksystemen voor microalgen compleet anders zijn dan die voor macroalgen, en ook andere karakteristieken verschillen. Beide soorten worden in dit hoofdstuk behandeld. Indien dit van toepassing is, wordt het verschil tussen micro- en macroalgen aangegeven.

Kweeksystemen voor microalgen

Algen hebben relatief simpele behoeften: licht, koolstofbron, nutriënten, water en een milde temperatuur. Er bestaan vele verschillende kweeksystemen die hieraan voldoen. Het belangrijkste onderscheid is tussen open systemen die direct blootgesteld worden aan de lucht, en gesloten systemen waarbij de algen door middel van transparant kunststof of glas van de omgeving gescheiden zijn.

Open kweeksystemen kunnen variëren van ondiepe, ongemixte bassins, variërend van een paar m² tot 250 ha (Figuur 9 a and b). CO₂, de koolstofbron van algen, lost relatief langzaam op, nutriënten diffusie is langzaam en drijvende of zinkende (dode of levende) algen limiteren de hoeveelheid ontvangen licht. Hierdoor heeft een

ongemengd systeem een suboptimale opbrengst. Mengen wordt in de praktijk gedaan met een roterende arm (Centre-Pivot pond, Figuur 9 c), of in de meer gebruikelijke, zogenaamde raceway pond, (vanwege het zigzag patroon) (Figuur 9 d), met een schoepenrad (Figuur 9 e). Het bubbelen van gas door het water geeft menging en levert ook CO₂. Lucht, CO₂ uit drukcilinders of CO₂-rijk gas zoals verbrandingsgas kan ingezet worden. De belangrijkste problemen met open systemen zijn een relatief lage biomassa concentratie, de gevoeligheid van organismen die zich voeden met algen, invasie/competitie met andere algen uit de omgeving, hoge verdamping van water en geen temperatuurcontrole. Hierdoor is het aantal soorten dat als monocultuur gekweekt kan worden zeer beperkt, en bijna altijd onder extreme condities zoals hoge pH, hoge nutriëntengehalte of hoog zoutgehalte^{39, 40, 41, 42}.

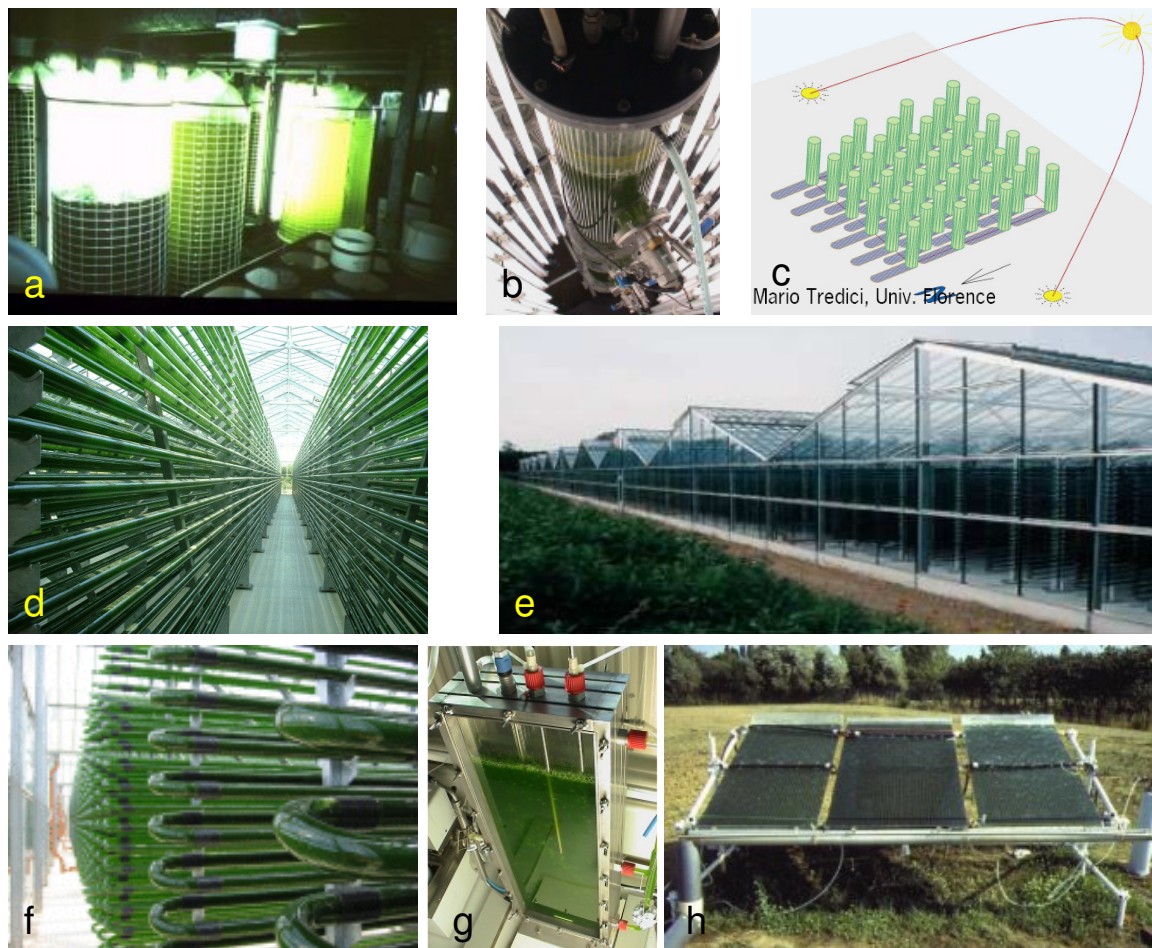


Figuur 9 Voorbeelden van open kweeksystemen

- a. Klein bassin voor *Spirulina* kweek, Azië⁴³
- b. *Dunaliella salina* bassins van Cognis, Western Australia⁴⁴
- c. Centre-Pivot pond voor de kweek van *Chlorella* in Taiwan
- d. Open raceway-type bassins van Earthrise in Californië, US⁴⁵
- e. Schoepenrad in een raceway pond⁴⁶

Al deze problemen kunnen verminderd worden door gesloten kweeksystemen te gebruiken. Simpele opties als polyethyleen zakken (Figuur 10 a) voor batchcultuur

gaan tot 1.000 liter maar zijn kwetsbaar. Verschillende systemen hebben een langere levensduur en zijn geschikt voor continue kweek. Deze systemen hebben een hogere biomassaconcentratie, wat resulteert in minder benodigde oppervlakte en lagere oogstkosten. Een voorbeeld is de bubbelkolom (Figuur 10 b), een verticale buisreactor. Opschalingmogelijkheden zijn beperkt, omdat de kolomen een schaduw op elkaar werpen (Figuur 10 c). Een reactor met horizontale buizen (Figuur 10 d-f) voorkomt dit probleem, maar heeft ook schaalproblemen: gedurende de groei consumeren algen CO₂ en nutriënten, terwijl zuurstof geproduceerd wordt, dus de groeiomstandigheden nemen af naar mate de algen dieper de buis doorgaan. Losse units met een optimale buislengte zijn nodig. Om optimaal gebruik te maken van invallend licht, kunnen platte systemen ingezet worden (Figuur 10 g en h). Het nadeel van deze systemen is het gecompliceerde flow regime in grotere systemen. Er bestaan vele variaties op de hier beschreven systemen.



Figuur 10 Voorbeelden van gesloten kweeksystemen

- a. 'Big Bag' kweek (BEAM)
- b. Bubbel kolom reactor (Tredici in Wijffels, 2007)
- c. Bubbel koloms met schaduw (Wijffels, 2007)
- d. Buisreactor systeem (Bioprodukte-steinberg.de)
- e. Platte reactor (Wijffels, 2007)
- f. Experimentele alveolar-panel fotobioreactor (Tredici and Materassi, 1992)
- g. Alternatief ten opzichte van buisreactoren: platte systemen
- h. Alternatief ten opzichte van buisreactoren: platte systemen

Kweeksystemen voor zeewier

Zoals eerder aangegeven, is de kweek van zeewier compleet anders dan die van microalgen. Zeewier kweek vindt al op grote schaal plaats in Azië, voor voedsel productie. Ook worden natuurlijke populaties geoogst, maar dit is niet geschikt voor grootschalige energieproductie. Ook voor zeewierkweek bestaan verschillende systemen, maar allen zijn gebaseerd op de aanhechting van zeewier op (horizontale of verticale) touwen, gespannen tussen frames die verankerd zijn aan de bodem of aan boeien. Enkele experimenten met systemen bedoeld voor bio-energie zijn uitgevoerd in de jaren '80 en '90, maar daaraan is door de lage olieprijs geen navolging gegeven⁴⁷. De problemen aangetroffen gedurende deze experimenten waren het afspoelen van biomassa en schade aan het kweekstelsel door zwaar weer. Buck en Buchholz⁴⁸ gebruikten een steviger ringsysteem tijdens hun experimenten in de Noordzee. Een grootschalig (in de orde van 1.000 ha), goedkoop, onderhoudsvriendelijk, stevig en gemakkelijk te oogsten systeem moet nog ontwikkeld worden. Het plaatsen van het kweekstelsel in offshore windturbine parken, boorplatforms of getijstroom energiesystemen geeft voordelen als verankeringspunten en bestaande aansluitingen op het elektriciteit/gas/olie net. De ruimte tussen windmolens is verboden gebied voor scheepvaart en de ruimte achter golfenergiesystemen heeft minder zeewerking. Geoogst zeewier bevat nog 80%-90% water en heeft dus hoge transport kosten. Afhankelijk van de afstand tot de kust kan gekozen worden om zeewier op zee te verwerken⁴⁹.

10.2 Energiebalans

Voor de ketenanalyse van aquatische biomassa is uitgegaan van een gesloten algen systeem met horizontale buizen. Realisatie van aquatische biomassa in Nederland is momenteel het meest haalbaar met gesloten systemen omdat open systemen onder andere kampen met oogstproblematiek, nutriëntenbeheersing en temperatuurschommelingen. Het gesloten kweekstelsel waarvoor de ETVT is berekend is een in het Spaanse Almería gerealiseerde proefopstelling van 6 units horizontale buizen van plexiglas met een lengte van 400 meter elk (analoog aan het systeem afgebeeld in Figuur 10 d-f). Het totale volume van de plexiglas buizen is 30 m³, wat in Almería goed is voor een jaarlijkse biomassaproductie van 6,5 ton. De installatie wordt in balans gehouden door een metalen frame en is geplaatst in een kas (het totale oppervlakte dat de biomassacentrale beslaat is 600 m², het materiaal voor de kas zelf is buiten beschouwing gelaten). Om de groeiomstandigheden voor de algen optimaal te houden en om de biomassa te oogsten en te verwerken zijn een aantal apparaten onmisbaar, waaronder een centrifuge en een droogunit. In de centrifuge worden de algen van het groeimedium gescheiden. Om het vochtgehalte verder te verlagen worden de algen gedroogd, met als resultaat een groene droge stof die als basis kan dienen voor onder andere biodiesel. Overigens is het beschreven systeem geoptimaliseerd voor productie van algen grondstoffen met een (veel) hogere waarde dan energie, en is dus niet uitsluitend ontworpen voor energie doeleinden. Bij de berekening van de opgewekte energie uit dit gesloten algensysteem is uitgegaan

van de onderste verbrandingswaarde van de algen. De conversie van droge stof naar biodiesel is niet meegenomen. Een overzicht van de benodigde materialen en apparaten voor het gesloten algenkweekstelsel zoals opgesteld in Almería is te vinden in Tabel 10 - 1⁵⁰.

10.2.1 Energie-input

De energie-input van het kweekstelsel is onder te verdelen in twee fasen: productie & installatie van de centrale en het energieverbruik voor operatie & onderhoud.

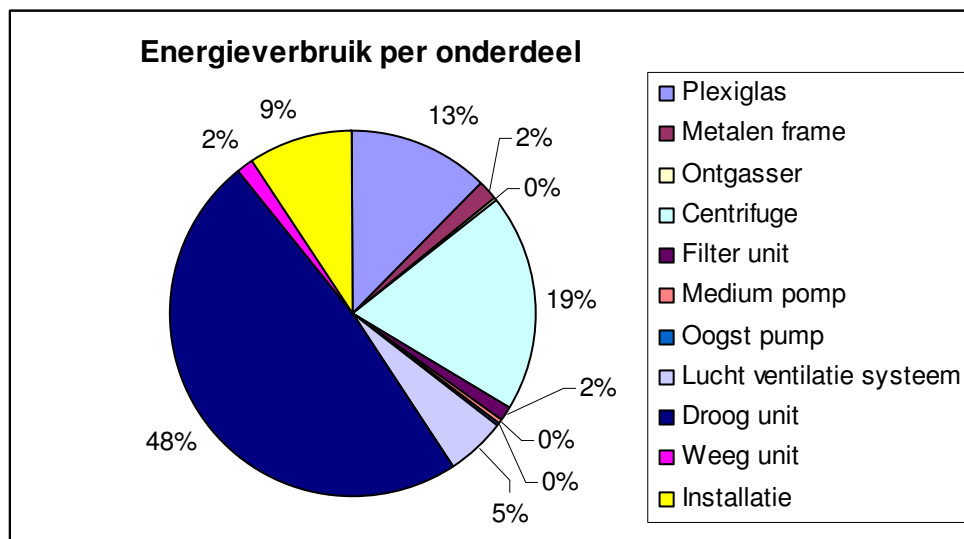
Details over de benodigde materialen voor het gesloten algenkweekstelsel zijn er in de vorm van materiaalspecificaties voor het buizensysteem (de photobioreactors) en de ondersteunende constructie enerzijds en de prijs van de apparaten voor de operatie van het kweekstelsel anderzijds. Voor het energieverbruik en de broeikasgasemissies voortkomend uit de productie van de materialen is gebruik gemaakt van de Ecoinvent 2 database⁵¹. Om de emissies gerelateerd aan de productie van de apparaten te achterhalen is de USA input-output database geraadpleegd. In deze database zijn goederen gegroepeerd per type; bijvoorbeeld 'pompen en compressors' of 'plastics'. Al deze productgroepen staan in een matrix die de monetaire stromen tussen de groepen weergeeft (de kosten die gemaakt worden om een bepaald product te produceren). Door de input-output matrix te koppelen aan een milieu-interventiematrix⁸ kan op basis van de kostprijs iets gezegd worden over de milieu-impact. Het gebruik van deze input-output data voor de berekening van de energierugverdiensdij van een gesloten algenkweekstelsel op basis van de prijzen van de verschillende onderdelen gaat wel ten koste van de nauwkeurigheid. Zo zijn de gebruikte getallen gebaseerd op de Amerikaanse industrie van 1998 (en de historische valutakoers), kan de kostprijs afwijken van de marktprijs en zijn ze veralgemeniseerd voor een productgroep en niet specifiek voor een product. Toch geeft deze aanpak een goede indicatie van het bijbehorende energieverbruik en CO₂-emissies voor de apparaten waarvan geen materiaalspecificaties en gewichten bekend zijn maar wel kosten. Het energieverbruik en de CO₂-emissies gerelateerd aan de productie van de materialen en apparaten is te vinden in Tabel 10 - 1.

Tabel 10 - 1 Onderdelen, energieverbruik en emissies proefinstallatie Almeria.

⁸ De milieu interventie matrix is opgesteld aan de hand van de toxic releases inventory 98 (TRI), de Air Quality Planning and Standard (AIRS) data van de US EPA, de Energy information administration (EIA) data van de US dep. of energy, de Bureau of economic analysis (BEA) data van de US Department of Commerce (DOC), het National Center for Food and Agricultural Policy (NCFAP) en het World Resource Institute (WRI).

| Materialen (kg) | kg | MJ/kg | kg CO ₂ /kg |
|---|---------|-------|------------------------|
| Plexiglas (polymethyl methacrylate), photobioreactors | 2.256 | 140,5 | 7,1 |
| Metalen frame (staal) voor photobioreactors | 1.507 | 28,2 | 1,5 |
| Ontgasser (PVC) | 14 | 59,2 | 2,0 |
| Overige onderdelen (€) | € | MJ/€ | kg CO ₂ /€ |
| Centrifuge | 39.520 | 14,3 | 1,39 |
| Filter unit | 703 | 64,5 | 1,71 |
| Mediumpomp | 703 | 11,7 | 0,90 |
| Oogstpomp | 703 | 11,7 | 0,90 |
| Luchtventilatiesysteem | 10.539 | 14,3 | 1,39 |
| Droog unit | 131.148 | 10,9 | 0,88 |
| Weeg unit | 4.684 | 10,9 | 0,88 |

De impacts voor het plaatsen van de installatie zijn geschat op 10% van de productie-impacts. Hiermee komt het totale energieverbruik voor de productie- en installatiefase op 2.516 GJ en wordt 200 ton CO₂ uitgestoten. In Figuur 11 is het totale energieverbruik voor productie en installatie opgesplitst naar de verschillende onderdelen.



Figuur 11 Verdeling energieverbruik Productie & Installatie gesloten algenkweekstelsel

Om de biomassacentrale draaiende te houden is veel elektriciteit nodig. Zowel voor het centrifugeren, pompen, filteren, ventileren als het drogen wordt stroom gebruikt. Per jaar komt dit voor de 6 photobioreactor units neer op 134 MWh, of wel 1.163 GJ primaire energie per jaar. De bijbehorende emissie voor dit elektriciteitsverbruik in

Nederland is 76 ton CO₂⁹. Voor onderhoud, wat zich vooral vertaalt in het schoonmaken van de photobioreactors, is 10% extra energieverbruik ingeraamd.

Op laboratoriumschaal en in proefinstallaties wordt nog gewerkt met kunstmatig vervaardigde meststoffen. In een grote algenenergiecentrale zal de nutriënten input echter uit afvalwater komen of door middel van recycling terug worden gebracht in het systeem. Met deze wetenschap is het in rekening brengen van extra energie-input voor meststofproductie voor de bespoediging van de groei achterwege gelaten. Hetzelfde geldt voor het toedienen van extra CO₂. Om de fotosynthese te bevorderen kan CO₂ het buizensysteem ingepompt worden. Zolang de algencentrale niet is aangesloten op een netwerk dat afvalgassen vanuit de industrie transporteert, zal er extra energie nodig zijn om deze CO₂ te produceren. Extra CO₂ zal de groei van de algen bespoedigen en daarmee de opbrengst vergroten maar het gebruik van biomassa voor energie doeleinden betekent niet dat er netto CO₂ wordt onttrokken aan de atmosfeer. Zodra de biomassa wordt verbrand komt de CO₂ weer terug in de lucht. De milieuwinst zit dus in de productie van alternatieve brandstoffen, waardoor het gebruik van fossiele energie deels vermeden wordt.

10.2.2 Opbrengsten

De 6 photobioreactors met een gezamenlijk volume van 30 m³ zijn in Almería goed voor een jaarlijkse biomassa opbrengst van 6.5 ton droge stof. Voor open algenteeltsystemen is door Prof. R. Wijffels (WUR) berekend dat de opbrengst in Nederland circa 45% lager ligt dan in Spanje vanwege klimatologische verschillen en een lagere lichtintensiteit⁵². Voor gesloten algenkweeksystemen is niet de lichtintensiteit maar de optimale verdeling van het beschikbare licht de meest beperkende factor, individuele algen overschaduwden elkaar, terwijl de algen met een hoge lichtontvangst meer licht absorberen dan gebruikt kan worden voor fotosynthese. Desalniettemin zal de lagere instraling een effect hebben op de groei van de algen en is uitgegaan van 20% minder opbrengst in Nederland ten opzichte van Spanje, wat resulteert in 5,2 ton droge stof per jaar. Omgerekend naar energie (met behulp van de lagere verbrandingswaarde) is dit een opbrengst van 109 GJ per jaar.

10.2.3 Resultaten en gevoeligheid

Bij het vergelijken van de opgewekte energie met de energie-input valt direct op dat de opbrengst (109 GJ/jaar) ruim tien keer lager ligt dan de benodigde energie voor operatie en onderhoud (1.163 GJ/jaar). De energie-input voor productie en installatie (2.516 GJ) komt daar nog eens bovenop. Het mag duidelijk zijn dat hier geen sprake is van een ETVT maar van een energieverlies. Met deze waarden is ook een EPR niet aan de orde. Indien operatie en onderhoud energie neutraal plaats zou kunnen vinden dan kan deze installatie van 6 photobioreactors de energie benodigd voor productie en

⁹ CO₂ emissie gebaseerd op de Nederlandse emissiefactor voor elektriciteit van 0,566 kg CO₂/kWh (SenterNovem, cijfers en tabellen 2007).

installatie in 23 jaar terug verdienen. Gezien de vele processen waar energie voor nodig is (zoals pompen, lucht laten circuleren, filteren, centrifugeren en drogen is energie neutraal operatie en onderhoud echter onmogelijk.

Tabel 10 - 2 Overzicht resultaten aquatische biomassa

| | Eenheid | Waarde |
|--|---------|--------|
| Productie & Installatie | GJ | 2.516 |
| Energieverbruik Operatie & Onderhoud | GJ/jaar | 1.163 |
| Opbrengst | GJ/jaar | 109 |
| Energie-input per jaar / energieopbrengst per jaar | | 11,7 |
| ETVT zonder Operatie & Onderhoud | Jaar | 23 |

Vanwege de beperkte hoeveelheid data is de berekening van de energiebalans van aquatische biomassa, in de vorm van een gesloten algen kweekstelsel, relatief onzeker. Van de totale benodigde energie voor de productie en installatie komt 67% op rekening van de droog unit en de centrifuge (zie Figuur 11). Deze apparaten in dit voorbeeld zijn nodig voor de productie van zeer droge biomassa, maar voor de productie van biobrandstoffen is veel minder droging vereist. De stap van algen naar biobrandstof zou wellicht met veel minder materieel kunnen plaatsvinden, maar nog belangrijker, wellicht met minder energie-input. Aangezien de impact van de droog unit berekend is met behulp van de Amerikaanse input/output database van 1998 (met de bijbehorende onzekerheden over de koppeling tussen prijs en energieverbruik in een sector alsmede kostprijs-marktprijs verschillen), wordt bij de gevoeligheidsanalyse het effect van efficiëntere alternatieven bekeken. Voor de droog unit is een innovatief alternatief berekend dat met 90 % minder energie is geproduceerd en voor de centrifuge een alternatief dat met 20 % minder energie is geproduceerd.

Twee andere factoren die relatief onzeker zijn en een grote impact hebben op de uitkomst zijn de energie benodigd voor de productie van plexiglas buizen en de biomassa opbrengst van de installatie. Materialen die een lager productie energieverbruik hebben zouden plexiglas kunnen vervangen, maar ook dunnere buizen zouden het productie energieverbruik van de photobioreactors kunnen verlagen. Het risico van beide alternatieven is dat de levensduur hierdoor significant verkort kan worden. Als alternatief voor het photobioreactors productie energieverbruik is desondanks een besparing van 50% op de productie kosten doorgerekend. Als alternatief voor de jaarlijkse biomassa opbrengst is een verdubbeling verondersteld.

De effecten van de alternatieve waarden op de ETVT zijn te vinden in Tabel 10 - 3. Indien alle alternatieven uitvoerbaar zouden kunnen zijn dan kan de ETVT van de installatie (zonder operatie en onderhoud) worden teruggebracht tot 3,3 jaar.

Tabel 10 - 3 Gevoeligheid ETVT aquatische biomassa voor innovatieve alternatieven

| Gevoeligheid | Gebruikt | Innovatief alternatief | ETVT zonder operatie en onderhoud |
|--|----------|------------------------|-----------------------------------|
| Droog unit (GJ) | 1.218 | Factor 10 lager | 12 jaar |
| Centrifuge (GJ) | 484 | Factor 5 lager | 19 jaar |
| Plexiglas photobioreactors (GJ) | 317 | Factor 2 lager | 21 jaar |
| Opbrengst (Ton/jaar) | 5,2 | Factor 2 hoger | 12 jaar |
| Innovatief alternatief alle 4 onderdelen | | | 3,3 jaar |

Verder zou een grote installatie naar het evenbeeld van de proefinstallatie in Almería schaalvoordelen hebben. De hoge energie-input voor productie en operatie van de apparaten die nodig zijn voor het kweek- en oogstproces zal relatief kleiner worden als er meer photobioreactors worden opgesteld. Om dit effect te analyseren is een berekening gemaakt op basis van 120 photobioreactors. Alleen de extra benodigde hoeveelheden plexiglas voor de photobioreactors en metaal voor het frame zijn toegevoegd aan de energie-input. Aangenomen wordt dat operatie en onderhoud van de 120 photobioreactors met dezelfde apparaten en zonder hoger energieverbruik kan worden uitgevoerd als voor 6 photobioreactors.

Onder de hierboven gestelde condities zal de netto jaaropbrengst van 120 photobioreactors 905 GJ zijn. De ETVT van dit opgeschaalde algen kweekstelsel bedraagt 11,1 jaar. De EPR, bij een levensduur van 25 jaar, is 2,25.



Figuur 12 Innovatieve photobioreactoren van Valcent Products Inc en Global Green Solutions⁵³

10.3 Conclusies en aanbevelingen

Teelt van aquatische biomassa in de vorm van een gesloten algen kweekstelsel is in Nederland (nog) niet zinvol. Een gesloten algen kweekstelsel van 6 photobioreactors met een totaal volume van 30 m³ is energetisch gezien anno 2009 in Nederland verre van rendabel. Op jaarbasis is de energie-input een factor 10 hoger dan de hoeveelheid energie die wordt opgewekt. Los van de nog prille fase van ontwikkeling is de temperatuur en de lichtintensiteit in Nederland niet optimaal. Ook is de grond te duur en vruchtbaar voor grootschalige gesloten systemen. Het principe van de *biobased economy* waarin de hoogwaardige grondstoffen worden benut voor de farmaceutische en voedingsmiddelenindustrie en de restproducten voor energiedoeleinden verdient aandacht. Zowel economisch als energetisch (in verband met allocatie) zal dit eerder haalbaar zijn dan kweek uitsluitend voor energiedoeleinden.

Onderzocht zal moeten worden wat de meest geschikte algen en wieren zijn voor de omstandigheden in Nederland en welke producten (zowel hoogwaardige grondstoffen als energie) hieruit gewonnen kunnen worden. Voordelen van offshore wierenkweeksystemen zijn onder andere de mogelijkheid tot integratie met windparken (en daarmee meervoudig ruimtegebruik), herstel van de visstand en het tegengaan van eutrofiëring. Een proefproject voor een wierenkweekstelsel in het Prinses Amalia windpark is in voorbereiding. Investerings in pilot projecten zoals deze zijn noodzakelijk om antwoord te geven op de vraag of de baten van offshore teelt opwegen tegen de kosten. Integratie in bestaande infrastructuur zoals windmolenparken kan de meerkosten van offshore kweeksystemen beperken. De operationele kosten voor een algen kweekstelsel op land lijken in eerste instantie voordeliger, de hoge grondprijs zal echter een groot obstakel zijn voor realisatie van een dergelijk stelsel. Met inachtneming van bovenstaande en gezien de suboptimale omstandigheden in Nederland voor algenkweek verdient de productie van wieren op zee momenteel de meeste aandacht. Hierbij moet worden opgemerkt dat het om twee totaal verschillende technieken gaat (waarbij binnen algenkweek nog onderscheid gemaakt moet worden tussen open en gesloten systemen) die ieder hun eigen voor en nadelen hebben.

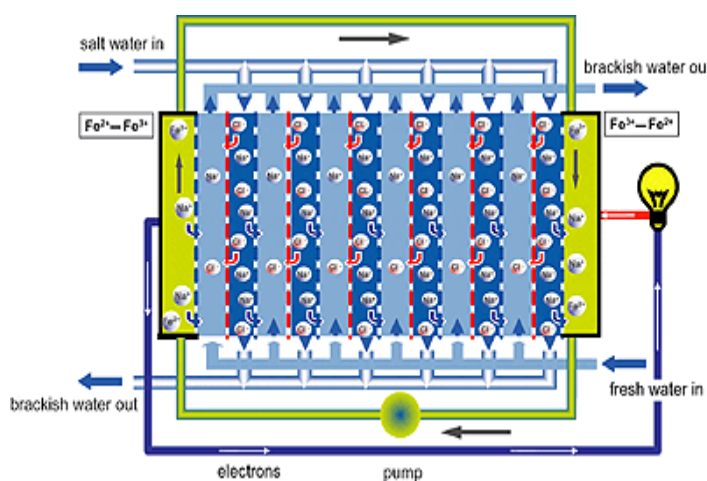
11 Blue energy (RED)

11.1 Korte beschrijving technologie

Het opwekken van energie met behulp van osmose is een vorm van duurzame energie die gebaseerd is op het verschil in zoutconcentratie van (zout) zeewater en (zoet) rivierwater.

Het concentratieverschil tussen zoet en zoutwater kan op twee manieren gebruikt worden: door PRO (Pressure Retarded Osmosis) en door RED (Reverse ElectroDialysis).

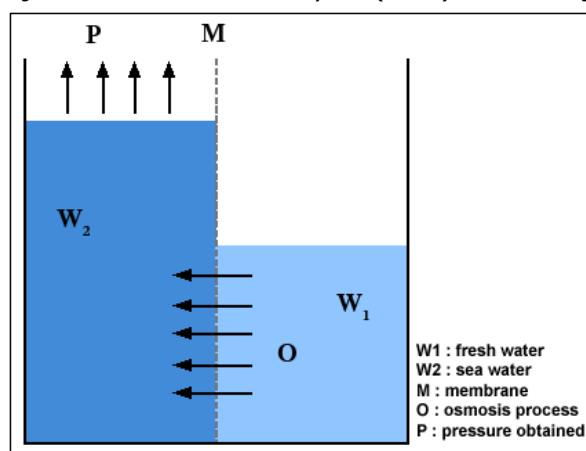
Door het plaatsen van een semipermeabel membraan tussen een reservoir met zoet en



zoutwater zal een netto stroom van water naar de zoutwaterkant op gang komen. Om een evenwicht in het reservoir te bereiken zal de druk aan de zoutwaterkant toenemen. Door de druk op ongeveer de helft van de maximale druk te handhaven en zoet en zout water constant aan te voeren kan aan de zoutwaterkant met de druktoename een turbine aangedreven worden. Dit proces wordt Pressure Retarded Osmosis genoemd (PRO).

Figuur 13: Osmose-energie met behulp van RED⁵⁴

Bij Reverse Electro Dialysis (RED) stromen juist de ionen door het membraan in plaats



van het water zoals bij PRO. Het water aan de ene kant van het filter is positief geladen, dat aan de andere kant negatief. Ionen diffunderen door het membraan met als drijvende kracht het concentratieverschil tussen zoet en zout water. Door stapeling van deze membranen kan voldoende spanning worden verkregen en werkt het systeem als een accu. Er is geen andere energiebron nodig dan zoet en zout water.

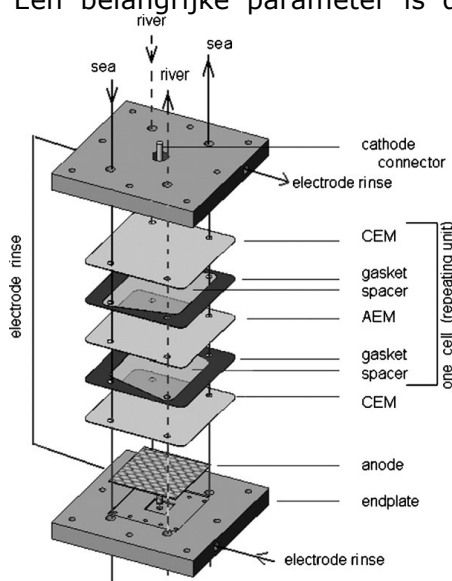
Figuur 14: Osmose-energie met behulp van PRO⁵⁵

11.2 Energiebalans

Met osmose energie wordt zowel Reverse Electrodialyses (RED) als Pressure Retarded Osmosis (PRO) aangeduid. Vanwege de grotere beschikbaarheid van data is in dit rapport gekozen om de ETVT van RED te onderzoeken. In Nederland (en de rest van de wereld) is er alleen nog op laboratorium schaal geëxperimenteerd. De joint venture REDstack heeft een demonstratieproject lopen in Harlingen waarbij op kW schaal wordt getest. In de komende jaren wordt er gewerkt aan een 10-50 kW proefproject, als tussenstap naar een beoogde opschaling naar uiteindelijk 200 MW op de Afsluitdijk⁵⁶. Voor de berekening van de ETVT is een installatie met een vermogen van 10 MW onderzocht, gebaseerd op de huidige stand van de technologie. Omdat Osmose Energy nog volop in ontwikkeling is, geeft extrapolatie van laboratorium resultaten niet meer dan een eerste indicatie voor de ETVT. Opschaling zal niet plaatsvinden alvorens bepaalde energie efficiëntie standaarden bereikt zijn. De resultaten zouden wel gebruikt kunnen worden als basis voor een voorwaardelijke benadering van de energie prestaties. Zo kan bijvoorbeeld gekeken worden welke energiekosten maximaal aan een onderdeel (bijvoorbeeld de membranen) verbonden kunnen worden om een bepaalde ETVT te halen.

11.2.1 Energie-input

Een belangrijke parameter is de energie opbrengst van het membraan. Hierbij is uitgegaan van de op laboratorium schaal behaalde netto vermogensdichtheid van 0,6 Watt/m² membraan⁵⁷. De hypothetische RED-centrale met een vermogen van 10 MW (zonder verliezen) is opgebouwd uit ruim 16 miljoen stacks. Elke stack is opgebouwd uit 50 cellen (bestaande uit een kation membraan, een anion membraan en 2 spacers elk) die liggen ingesloten tussen 2 titanium elektroden en polyethyleen tereftalaat endplates.



Figuur 15 Schematische weergave van een RED stack⁵⁸

De onderdelen waar het uiteindelijk om draait zijn de membranen. Voor RED gaat het om cation exchange membranes (CEM) en anion exchange membranes (AEM). Materiaalspecificaties van deze membranen zijn niet achterhaald maar uit de literatuur wordt duidelijk dat meerdere alternatieven onderzocht worden⁵⁹. In de meest recente osmose energiepublicatie (Veerman 2009⁶⁰), wordt gebruik gemaakt van CEM en AEM membranen van het Duitse Fumatech. De afmetingen zijn gegeven en verder is

bekend dat ze deels zijn gemaakt van polyetherketone, een materiaal waarvan geen energetische kentallen bekend zijn. Andere materialen die genoemd worden als basis voor RED membranen zijn polyethyleen, nylon en polyamide⁶¹. De waarde die gehanteerd is als indicatie voor het energieverbruik voor de productie van de membranen is het gemiddelde van polyethyleen, nylon en polyamide (115 MJ/kg). De verwachting is dat de nu beschikbare membranen een hoger energieverbruik hebben (zeker als het om geassembleerde materialen gaat) maar dat door opschaling en technologisch ontwikkeling een lagere waarde te verwachten is.

Een nadeel van membranen is de beperkte levensduur. In de berekening is uitgegaan van de verwachting dat, onder andere door (Bio)fouling, de membranen na 5 jaar vervangen moeten worden. Voor de overige onderdelen van de RED installatie is een levensduur van 30 jaar in ogenschouw genomen.

Spacers worden gebruikt om de zoet- en zoutwater compartimenten te scheiden. Het materiaal is poreus waardoor uiteindelijk brak water de stacks verlaat. Er is gerekend met spacers van PET (PA zou ook kunnen maar scheelt vanuit energetisch oogpunt weinig). De frames (gasket) waar deze spacers inzitten zijn niet meegenomen in de berekening. In plaats daarvan is aangenomen dat de hele breedte van de stacks (spacer + gasket) bestaat uit PET met een dikte van 500 μm . Ook stacks met polyamide spacers van 200 μm zijn in proefopstellingen toegepast maar zijn hier buiten beschouwing gelaten⁶².

Aan de hand van Veerman 2009⁶³ is voor de anode en kathode uitgegaan van een 10 cm x 10 cm titanium plaatje. De ruthenium - iridium coating en benodigde chemische oplossing zijn buiten beschouwing gelaten. De dikte is geschat op 0,5 mm, de laagste gerapporteerde waarde die is gevonden voor commercieel beschikbaar titanium elektroden⁶⁴.

De 50 cellen liggen ingebed tussen 2 plaatjes (endplates) van versterkt phenol formaldehyde met een geschatte dikte van 5 mm. Voor de benodigde energie-input voor de endplates is gebruik gemaakt van de waarde van alleen formaldehyde, het meest overeenkomstige product waar wel energetische kentallen voor beschikbaar zijn.

De vier hier boven beschreven onderdelen worden gezien als de belangrijkste onderdelen van de RED stacks. Andere onderdelen waaronder de behuizing van de stacks en de bekabeling om de opgewekte elektriciteit naar de AC/DC schakelaar te leiden zijn buiten beschouwing gelaten. Een overzicht van de kenmerken van de membranen, spacers, elektroden en endplates is te vinden in Tabel 11 - 1. Wat het meest opvalt, is de verdeling van de 57 MJ per stack over de vier onderdelen. Niet de membranen maar de elektroden en de spacers nemen het grootste deel voor hun rekening. Ondanks dat er maar twee elektroden in een stack zitten (in vergelijking met 100 membranen en spacers), is vanwege de hoge energie-input voor titanium en

de relatief dikke elektroden, bijna 50% van de stack-energiekosten nodig voor de productie van de elektroden.

Tabel 11 - 1 Materiaal kenmerken RED stacks en bijbehorende energie-input.

| Overzicht 1 stack | Oppervlak (m ² /stack) | Dikte (mm) | Materiaal | Dichtheid (kg/m ³) | kg/m ² | Energie-input (MJ/kg) | MJ per stack |
|-------------------|-----------------------------------|------------|--------------|--------------------------------|-------------------|-----------------------|--------------|
| Membranen (100) | 1,00 | 0,082 | PE/PA | 900 | 0,049 | 115,1 | 8 |
| Spacers (100) | 1,00 | 0,485 | PET | 1.400 | 0,14 | 108,7 | 15 |
| Elektroden (2) | 0,01 | 0,500 | Titanium | 4.500 | 2,25 | 593,8 | 27 |
| Endplates (2) | 0,01 | 5,0 | Formaldehyde | 1.300 | 6,5 | 47,4 | 6 |
| Totaal | | | | | | | 57 |

Los van de stacks zal nog een groot aantal andere materialen nodig zijn voor een 10 MW RED centrale. In deze studie is rekening gehouden met de benodigde energie voor de volgende materialen en onderdelen:

- Polyethyleen pijpen voor transport van het zoete, zoute en brakke water. De berekening is gebaseerd op een eerdere studie van Ecofys naar energie uit zoet en zout water met osmose. In totaal is uitgegaan van 460 meter pijp met een gewicht van 809 ton HDPE;
- De gebouwen om de stacks en de voorzuivering onder te brengen. Een 200 kW centrale is ontworpen voor een container met een inhoud van 48 m³. Voor de voorzuivering is een ruimte met ongeveer dezelfde afmetingen nodig⁶⁵. Een 10 MW centrale zou daarmee een ruimte van 48.000 m³ in beslag nemen.
- Trommelzeven voor de voorzuivering van het zoete en zoute water. De menging van de verschillende concentraties vindt plaats op een 1:1 basis. Hierdoor moet evenveel zoet als zout water gefilterd worden. Omdat er geen specifieke informatie voor de trommelzeven is achterhaald, is het energieverbruik benodigd voor de productie van het filtersysteem geschat op 20% van de energie productiekosten van de stacks;
- De pompen om het zoete en zoute water door de centrale te pompen en de druk optimaal te houden en een omvormer om de gelijkstroom om te zetten in wisselstroom. Ook hier is geen specifieke informatie over beschikbaar en is uitgegaan van een (gezamenlijk) productie energieverbruik dat gelijk staat aan 10% van de energie productiekosten van de stacks;

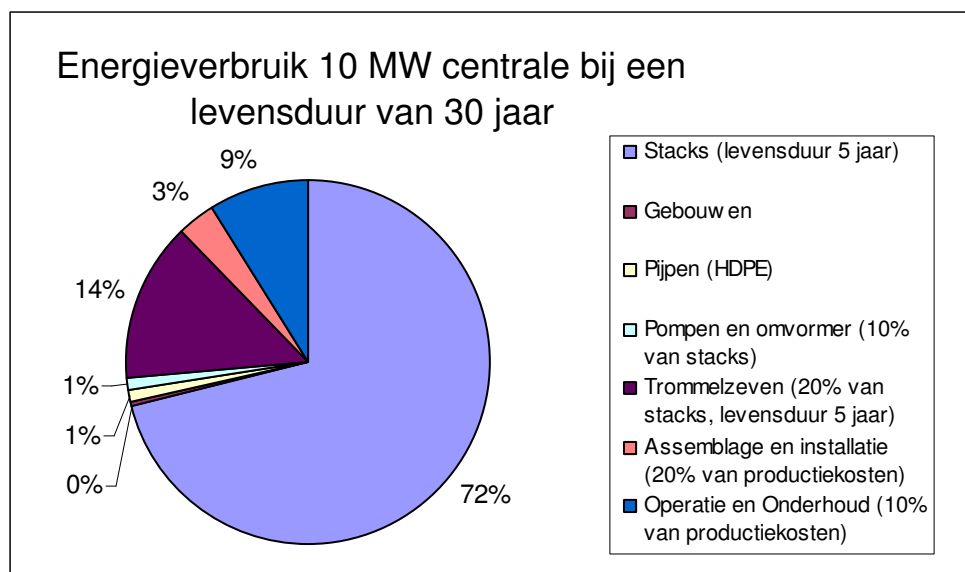
Naast de energie voor de productie van de basismaterialen zijn er ook nog energiekosten verbonden aan de assemblage van onder andere de stacks en de installatie van de gehele centrale. Over het energieverbruik ten tijde van de installatie

van de centrale is geen informatie gevonden. Omdat het hier toch om een aanzienlijke operatie gaat, is voor de assemblage en installatie een energieverbruik van 20% van het materiaalproductie- energieverbruik gerekend.

Tabel 11 - 2 Overzicht energiekosten per onderdeel van 10 MW RED centrale

| Productiekosten | Waarde | Eenheid | Waarde | Eenheid | Per 30 jr | Eenheid |
|--|--------|---------|--------|---------|------------|---------|
| Aantal stacks (levensduur 5 jaar) | | | | | 75.000.000 | |
| Stacks | 4.860 | ton | 146 | GJ/ton | 4.244.784 | GJ |
| Gebouwen | 4.800 | m3 | 1.509 | MJ/m3 | 7.245 | GJ |
| Pijpen (HDPE) | 809 | ton | 84 | GJ/ton | 68.191 | GJ |
| Pompen en omvormer (10% van stacks) | | | | | 70.746 | GJ |
| Trommelzeven (20% van stacks, levensduur 5 jaar) | | | | | 848.957 | GJ |
| Assemblage en installatie (20% van productiekosten) | | | | | 199.028 | GJ |
| Operatie en Onderhoud (10% van productiekosten) | | | | | 523.992 | GJ |
| Totaal | | | | | 5.962.945 | GJ |

In Tabel 11 - 2 is een overzicht te vinden van alle berekende energie-input voor de productie en installatie van een 10 MW RED centrale. In Figuur 16 is het energieverbruik over de hele levensduur van de centrale (30 jaar) uitgesplitst naar elk onderdeel. In deze berekening worden de stacks na 5 jaar in hun geheel vervangen, dus niet alleen de membranen.



Figuur 16 Verdeling van energieverbruik op basis van 30 jarige levensduur

11.2.2 Opbrengsten

Bij het 1 op 1 mengen van zoet met zout water is het theoretisch maximum van potentiële energie 176 MJ/m^3 en bij 1 op oneindig $2,55 \text{ MJ/m}^3$ zoet water (onder de aanname dat zeewater $30 \text{ kg NaCl per m}^3$ bevat en zoetwater 0 kg NaCl)⁶⁶. Een meer concrete manier om de opbrengst van osmose energie inzichtelijk te maken is het vermogen per vierkante meter membraan. De in het laboratorium behaalde maximum energie opbrengst voor een stack met 50 cellen, is $0,8 \text{ W/m}^2$ effectief membraan bij een stroomsnelheid van 700 ml/min ⁶⁷. Deze hoge stroomsnelheid levert een relatief hoge energie-output (het verschil tussen de zoete en zoute concentratie blijft immers hoog), maar het kost ook veel energie om deze druk met pompen te genereren. Bij een lagere stroomsnelheid treden minder pomp verliezen op maar is de energie-output lager (het concentratie verschil loopt terug). Het optimum ligt bij een stroomsnelheid van 400 ml/min wat resulteert in een netto vermogensdichtheid van 0.6 Watt/m^2 membraan (inclusief pompverlies van 25%).

Voor een 10 MW RED centrale is bij 90% vollast en bovenstaande vermogensdichtheid de jaarlijkse elektriciteitsproductie (inclusief 5% wisselstroom conversieverlies) $6.066.738 \text{ GJ}$. Genoeg voor ongeveer 16.000 huishoudens.

11.2.3 Resultaten en gevoeligheid

Als de energie-input voor de gehele levensduur van 30 jaar (productie & installatie en operatie & onderhoud) wordt afgetrokken van de energieproductie over 30 jaar, dan blijft er een netto levenscyclusenergieproductie van 103.793 GJ over. De ETVT voor de in deze studie beschreven 10 MW RED centrale komt daarmee op 29,5 jaar.

De lijst van gevoeligheden behorend bij de berekening van de ETVT van RED is groot. Er zijn aannames gemaakt voor opschaling op basis van de huidige stand van de techniek (zoals die in de literatuur wordt beschreven). Wanneer de gevoeligheid van de ETVT wordt gekwantificeerd aan de hand van variaties met enkele onderdelen (bijvoorbeeld de voorzuivering of de stacks) blijven teveel aspecten van de opgeschaalde RED installatie onzeker om hier conclusies uit te trekken. Een voorwaardelijke benadering, waarbij gekeken wordt naar de maximale energie-input die geoorloofd is om op basis van de energie output een bepaalde ETVT te halen, is in deze interessanter. Een 10 MW centrale levert ongeveer $6.066.738 \text{ GJ}$ per jaar, oftewel 182 PJ gedurende 30 jaar. Onder de voorwaarde dat de ETVT maximaal 3 jaar mag bedragen, moeten de energie-input van productie & installatie en operatie & onderhoud onder de $18,2 \text{ PJ}$ blijven (een verlaging van 90% ten opzichte van de hier berekend energie-input).

Gezien de nog vroege fase van technologische ontwikkeling zal opschaling naar centrales met een vermogen van 10 MW of hoger pas gerealiseerd worden als de prestaties van kleinere proefprojecten toereikend zijn. Een hoopvol resultaat is dat de energie-input voor de productie van de membranen niet groot is (slechts 14% van de stacks). De spacers en elektroden hebben een veel groter aandeel in het productie

energieverbruik van de stacks. Beide onderdelen worden ontworpen voor optimale operationele eigenschappen, waarbij ook winst geboekt zal worden op de materiaal efficiëntie.

Voor de spacers zouden dunnere exemplaren (150 μm in plaats van de 500 μm waarmee gerekend is) zelfs tot een hogere vermogensdichtheid van de membranen leiden. Te dunne spacers leiden echter weer tot een hoger pomp energieverbruik vanwege drukverlies en stellen hogere eisen aan de eigenschappen van de membranen⁶⁸. Voor de elektroden zijn er wellicht alternatieven voor titanium, dat een hoog productie energieverbruik kent.

Een grote besparing zou ook bereikt kunnen worden wanneer niet al het materiaal van de stacks na 5 jaar vervangen moet worden maar alleen de membranen. Hier tegenover staat dan weer een hoger energieverbruik voor onderhoud. Het spreekt voor zich dat een toename in de behaalde vermogensdichtheid van de membranen (bij een gelijkblijvende energie-input voor de productie van de membranen) tot een snelle afname van de energiekosten voor een 10 MW centrale zullen leiden, er zijn immers minder membranen nodig voor dezelfde elektriciteitsproductie. De nu behaalde 0,8 W/m^2 membraan ligt nog ver onder het theoretisch maximum dat voor sommige membranen rond de 5 W/m^2 ligt⁶⁹. De voorzuivering, die in deze studie onderbelicht is gebleven, zal ook een belangrijke rol vervullen als het gaat om de energetische haalbaarheid van grootschalige opwekking met RED. Wanneer het water niet schoon genoeg, is zal de efficiëntie van de membranen om laag gaan en zullen ze sneller aan vervanging toe zijn.

Tabel 11 - 3 Resultaten osmose energie

| | Eenheid | Waarde | Opmerkingen |
|--------------------------------|---------|-----------|--------------------------------|
| Energie input over levensduur | GJ | 5.962.945 | Bij een levensduur van 30 jaar |
| Energie output over levensduur | GJ | 6.066.738 | |
| ETVT | jaar | 29.5 | |
| EPR | getal | 1 | |
| CO ₂ intensiteit | g/kWh | 42 | |

11.3 Conclusies en aanbevelingen

Voor blue energy kent Nederland gunstige omstandigheden. De technologie is volop in ontwikkeling en energetisch gezien nog niet rendabel. Opschaling naar een 10 MW RED-centrale van de in 2008 behaalde resultaten met proefinstallaties zou nu gepaard gaan met een ETVT van 29,5 jaar. Gezien het theoretisch potentieel is een verlaging van de ETVT naar 3 jaar niet ondenkbaar. Hiervoor is het van belang dat naast de benodigde technologische doorbraken voor een hoge energie opbrengst per m^2 membraan (nu 0.8 Watt en 2 Watt beoogd) ook materialen worden gebruikt die niet

energie intensief zijn. Het grootste energieverbruik voor productie zit momenteel in de productie van de membranen en de titanium elektroden.

Aanbevolen wordt voor de verdere ontwikkelingen van blue energy (RED) veel te investeren in R&D. Vooral de efficiëntie van de membranen moet omhoog alvorens opschaling naar een grote installatie (van bijvoorbeeld 10 MW in de afsluitdijk) vruchtbaar kan worden. De benodigde tijd voordat grootschalige implementatie mogelijk wordt moet niet onderschat worden. Ook is het van belang een realistische inschatting te maken van het potentieel in Nederland en de geografische inpasbaarheid. Niettemin is het belangrijk om door te gaan op de ingeslagen weg en te streven naar een financieel en energetisch rendabel concept (de ontwikkeling van PRO, waar vooral Noorwegen op inzet, is een alternatief dat in de gaten gehouden moet worden). Nederland loopt voorop in de ontwikkeling van RED en het wereldwijde potentieel is enorm. Terugkijkend op de ontwikkeling die PV de afgelopen 30 jaar heeft doorgemaakt (mede dankzij enorme investeringen) ligt de toekomst voor PRO nog helemaal open.

Bijlage

Materiaalspecificaties WKO installatie

| Materiaal (aantal) | Staal (non alloyed) | Staal (low alloyed) | RVS 316 | RVS | Koper | Gietijzer | Aluminium | Polyethyleen | Pur schuim | Polybuteen | Koelingvloeistof | Totaal |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------|------|--------|-----------|-----------|--------------|------------|------------|------------------|-----------------------|
| Brondoublet | | | | | | | | 1.312 | | | | 1.312 |
| Bron pomp (2) | | | | 26 | | | | | | | | 26 |
| Circulatie pomp (4) | | | | | | 240 | | | | | | 240 |
| Vlinderklep (8) | 200 | | | | | | | | | | | 200 |
| Klepafsluiter (8) | 200 | | | | | | | | | | | 200 |
| Collectieve warmtepomp | | 2.978 | | 38 | 314 | 1132 | 38 | | | | 107 | 4.607 |
| Warmte-wisselaar | | | 750 | | | | | | | | | 750 |
| Collectieve gasketel | | 1.138 | | 15 | 120 | 433 | 15 | | | | | 1.720 |
| Droge koeler | | 1.522 | | 19 | 160 | 579 | 19 | | | | | 2.300 |
| Warmwater boiler | 205 | | | | | | | | | | | 205 |
| Leidingen naar technische ruimte | | | | | | | | 3.592 | | 1.238 | | 4.830 |
| Distributienet | 30379 | | | | 3100 | | | 15.745 | 738 | | | 49.961 |
| Installatie | | | | | | | | | | | | 20% |
| Totaal (kg) | 30.984 | 5.638 | 750 | 98 | 3.694 | 2.384 | 72 | 20.649 | 738 | 1.238 | 107 | 66.351 |
| Productie Data: | | | | | | | | | | | | |
| MJ/kg | 22,6 | 29,9 | 53,4 | 76,6 | 91,6 | 45,6 | 134,9 | 84,2 | 101,5 | 106,7 | 127,5 | |
| GJ | 701 | 169 | 40 | 8 | 338 | 109 | 10 | 1740 | 75 | 132 | 14 | 4.001 ¹⁰ |
| kg CO ₂ /kg | 1.17 | 1.60 | 4.05 | 4.57 | 7.51 | 2.66 | 11.99 | 2.14 | 4.20 | 3.40 | 42.34 | |
| kg CO ₂ | 36.145 | 9.036 | 3.035 | 448 | 27.753 | 6.333 | 864 | 44.202 | 3.101 | 4.208 | 4.530 | 167.585 ¹¹ |

¹⁰ Inclusief 20% (van het materiaal gerelateerde energieverbruik) voor installatie

¹¹ Inclusief 20% (van de materiaal gerelateerde emissies) voor installatie

Referenties

¹ M. Raugei, S. Bargigli, S. Ulgiati, Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si. Energy 32 (2007) p.1310–1318

² Raugei, M.; Alsema, E.A.; Wild - Scholten, M.J. de; Frankl, P.; Fthenakis, V.M.; Kim, H.C., Life cycle assessment of present and future photovoltaic systems, ECN-M--07-109, 2007.

³ M. Raugei, S. Bargigli, S. Ulgiati, Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si. Energy 32 (2007) p.1310–1318

⁴ M. Raugei, S. Bargigli, S. Ulgiati, Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si. Energy 32 (2007) p.1310–1318

⁵ E. Martínez, F. Sanz, S. Pellegrini, E. Jiménez en J. Blanco (2008). Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. Int J Life Cycle Assess (2009) 14:52–63

⁶ Vestas Wind Systems A/S, Life Cycle assessment of offshore and onshore sited wind power plants based on Vestas V90-3.0MW turbines, www.vestas.com, 2006

⁷ B. Tremac, F. Meunier, Life cycle analysis of 4.5 MW and 250W wind turbines, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) p.2104-2110.

⁸ Vestas Wind Systems A/S, Life Cycle assessment of offshore and onshore sited wind power plants based on Vestas V90-3.0MW turbines, www.vestas.com, 2006

⁹ J. Weinzettel, M Reenaas, C. Solli en E.C. Herwich, Life cycle assessment of floating offshore wind turbine, Renewable Energy 34 (2009) p.742-747

¹⁰ De wereld achter... De kracht van Water, online-folder (via: groetenuitbeuningen.nl/Essent%20Linne.pdf, geraadpleegd november 2009)

¹¹ Waterloopkundig onderzoek waterkrachtcentrale Linne, november 1986, Waterloopkundig laboratorium.

¹² Low-head 11 MW Hydro Plant in the Netherlands, Technical Brochure NO 19. Caddet-IEA/OECD, 1995 (via microhydropower.net/nl/Caddett_brochure_19_Linne.pdf, geraadpleegd november 2009)

¹³ Waterkrachtcentrale Linne, website (via microhydropower.net/nl/linne.php, geraadpleegd november 2009)

¹⁴ Website Essent (via www.essent.eu/content/about_essent/contact/power_stations/hydro.jsp, geraadpleegd november 2009)

¹⁵ Archief Royal Haskoning, met medewerking van Leo Korving en Tom Van Den Noortgaete

¹⁶ Heikkila K. 2006 Environmental evaluation of an air-conditioning system supplied by cooling energy from a bore-hole based heat pump system. Building and Environment 43 (2008) 51–61

- ¹⁷ ECN 2009, Kentallen warmtevraag woningen
- ¹⁸ Ecofys, Energiewinning uit getijstroom energie in de Oosterschelde, E 45074.1, 2004
- ¹⁹ www.C-energy.nl
- ²⁰ Marine Current Turbines Ltd, Impressie van Seagen, <http://www.seageneration.co.uk>
- ²¹ HC Soerensen, LK Hansen & R Hansen Environmental Impact, WP 3.3 Final Report, 2003, European Thematic Network on Wave Energy, NNE5-1999-00438 (p 26), 2003
- ²² CA Douglas, GP Harrison and JP Chick, Life cycle assessment of the Seagen Marine Current Turbine, Department of Engineering and Electronics, University of Edinburgh, UK. Proc. IMechE Vol. 222 Part M: J. Engineering for the Maritime Environment, 2007.
- ²³ HC Soerensen, LK Hansen & R Hansen Environmental Impact, WP 3.3 Final Report, 2003, European Thematic Network on Wave Energy, NNE5-1999-00438 (p 26), 2003
- ²⁴ CA Douglas, GP Harrison and JP Chick, Life cycle assessment of the Seagen Marine Current Turbine, Department of Engineering and Electronics, University of Edinburgh, UK. Proc. IMechE Vol. 222 Part M: J. Engineering for the Maritime Environment, 2007.
- ²⁵ <http://www.reuk.co.uk/La-Rance-Tidal-Power-Plant.htm>
- ²⁶ <http://sharon.esrac.ele.tue.nl/pub/aprs/maps/en>
<http://library.thinkquest.org/19846/data/ne/delta/brouw/brouw.htm>
- ²⁷ Rijkswaterstaat 2008, Zwemwaterprofiel Brouwersdam
- ²⁸ <http://www.deltawerken.com/De-caissons/197.html>
- ²⁹ Toelichting inzending Δ Synergie prijsvraag "Waterland van de toekomst"
- ³⁰ Reinforced concrete, EcoInvent database
- ³¹ <http://www.reuk.co.uk/La-Rance-Tidal-Power-Plant.htm>
- ³² RVS 316, EcoInvent Database
- ³³ Contact nr 3, 2008 TU Delft
- ³⁴ IEA 2006
- ³⁵ Wavedragen.net (bezoekt op 5 oktober 2009)
- ³⁶ HC Soerensen, LK Hansen & R Hansen Environmental Impact, WP 3.3 Final Report, 2003, European Thematic Network on Wave Energy, NNE5-1999-00438 (p 26), 2003
- ³⁷ R P M Parker, G P Harrison, J P Chick, Energy and carbon audit of an offshore wave energy opwekker, School of Engineering and Electronics, University of Edinburgh, Edinburgh, UK. Proc. IMechE Vol. 221 Part A: J. Power and Energy, 2007.
- ³⁸ Carbon Trust, Future marine energy, London, UK, 2006. Beschikbaar via <http://www.carbontrust.co.uk>. Geraadpleegd februari 2009.
- ³⁹ Carlsson, A., Beilen van, J., Möller, R., Clayton, D. and Bowles, D. e. (2007). Micro and macroalgae - utility for industrial applications Bioproducts, E. R. t. E. P. o. S. R.-. and Crops, f. N.-f., CNAP, University of York: 86
- ⁴⁰ Chisti, Y. (2007). "Biodiesel from microalgae." Biotechnol. Adv. 25(3): 294-306.
- ⁴¹ Pulz, O. (2001). "Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms." Appl. Microbiol. Biotechnol. 57(3): 287-293
- ⁴² Rodolfi, L., Zittelli, G. C., Bassi, N., Padovani, G., Biondi, N., Bonini, G. and Tredici, M. R. (2009). "Microalgae for Oil: Strain Selection, Induction of Lipid Synthesis and

Outdoor Mass Cultivation in a Low-Cost Photobioreactor." *Biotechnol. Bioeng.* 102(1): 100-112

⁴³ Wikipedia. (2007). "Algaculture." Retrieved 1 April 2007, from

<http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Algaculture&oldid=119402781>

⁴⁴ BEAM. "Biotechnological and Environmental Applications of Microalgae." Retrieved 17-05-2007, from <http://wwwscieng.murdoch.edu.au/centres/algae/BEAM-Net/BEAM-Net.htm>

⁴⁵ Spirulina.org.uk. Retrieved 17-05-2007, from

<http://spirulina.org.uk/images/spirulinaponds.jpg>

⁴⁶ NMSU. "Scientists research best ways algae can fuel biodiesel production." Retrieved 17-05-2007, from

http://www.nmsu.edu/~ucomm/Releases/2007/january/algae_biodiesel.htm

⁴⁷ Chynoweth, D. P. (2002). Review of biomethane from marine biomass Gainesville, Florida, USA, Department of Agricultural and Biological Engineering, University of Florida

⁴⁸ Buck, B. H. and Buchholz, C. M. (2004). "The offshore-ring: A new system design for the open ocean aquaculture of macroalgae." *Journal of Applied Phycology* 16(5): 355-368

⁴⁹ Reith, J. H., Deurwaarder, E. P., Hemmes, K., Curvers, A. P. W. M., Kamermans, P., Brandenburg, W. and Zeeman, G. (2005). Bio-offshore : grootschalige teelt van zeeieren in combinatie met offshore windparken in de Noordzee. Petten, Energieonderzoek Centrum Nederland

⁵⁰ Persoonlijke communicatie, F. Gabriel Ación Fernández

Dpto. Ingeniería Química, Universidad de Almería, Spanje

⁵¹ Frischknecht R. et al. (2007) The Ecoinvent 2 database. ESU-services, environmental consultancy for business and authorities. Uster, Switzerland

⁵² R. Wijffels. Microalgae for production of energy. Agrotechnology & food sciences group WUR. Available at

http://www.biosynergy.eu/fileadmin/biosynergy/user/docs/Wijffels_Microalgae.pdf

⁵³ El Paso Times (innovatieve algen bioreactors van Valcent Products Inc en Global Green Solutions)

⁵⁴ Redstack, www.redstack.nl

⁵⁵ Statkraft Osmotic Power, www.statkraft.com

⁵⁶ Persoonlijke communicatie met Jan Post (Wetsus), 11 februari 2009

⁵⁷ J. Veerman, M. Saakes, S.J. Metz, G.J. Harmsen (2009). Reverse electrodialysis: Performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water. *Journal of Membrane Science* 327 (2009) 136-144

⁵⁸ J. Veerman, M. Saakes, S.J. Metz, G.J. Harmsen (2009). Reverse electrodialysis: Performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water. *Journal of Membrane Science* 327 (2009) 136-144

⁵⁹ N.P. Berezina, N.A. Kononenko, O.A. Dyomina, N.P. Gnusin (2008).

Characterization of ion-exchange membrane materials. *Advances in Colloid and Interface Science* 139 (2008) 3-28

- ⁶⁰ J. Veerman, M. Saakes, S.J. Metz, G.J. Harmsen (2009). Reverse electrodialysis: Performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water. *Journal of Membrane Science* 327 (2009) 136–144
- ⁶¹ N.P. Berezina , N.A. Kononenko, O.A. Dyomina, N.P. Gnusin (2008). Characterization of ion-exchange membrane materials. *Advances in Colloid and Interface Science* 139 (2008) 3–28
- ⁶² J. Post, H. Hamelers and C. Buisman (2008). Energy recovery from controlled mixing salt and fresh water with a reverse electrodialysis system. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42 (15), 5785-5790
- ⁶³ J. Veerman, M. Saakes, S.J. Metz, G.J. Harmsen (2009). Reverse electrodialysis: Performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water. *Journal of Membrane Science* 327 (2009) 136–144
- ⁶⁴ http://www.biztrademarket.com/transfersell_titanium%20anode_1115412.htm
- ⁶⁵ Persoonlijke communicatie met Jan Post (Wetsus), 11 februari 2009
- ⁶⁶ J. Veerman, M. Saakes, S.J. Metz, G.J. Harmsen (2009). Reverse electrodialysis: Performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water. *Journal of Membrane Science* 327 (2009) 136–144
- ⁶⁷ J. Veerman, M. Saakes, S.J. Metz, G.J. Harmsen (2009). Reverse electrodialysis: Performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water. *Journal of Membrane Science* 327 (2009) 136–144
- ⁶⁸ P. Długoł_ecki, K. Nymeijer, S. Metz, M. Wessling (2008). Current status of ion exchange membranes for power generation from salinity gradients. *Journal of Membrane Science* 319 (2008) 214–222
- ⁶⁹ P. Długoł_ecki, K. Nymeijer, S. Metz, M. Wessling (2008). Current status of ion exchange membranes for power generation from salinity gradients. *Journal of Membrane Science* 319 (2008) 214–222