

Masterassignment voor de postdoctorale opleiding:

**Master of Business in Energy systems (Mbe)**

# **Duurzame energie in combinatie met een vliegveldeiland**

Ch. W. van Heel

versie 8 maart 2000

Masterassignment voor de postdoctorale opleiding:

**Master of Business in Energy systems (Mbe)**

# **Duurzame energie in combinatie met een vliegveldeiland**

Ch. W. van Heel

versie 8 maart 2000

**Bouwdienst Rijkswaterstaat**

afd. Installatietechniek  
Postbus 59  
2700 AB Zoetermeer

Tel. 079-3292348



BIBLIOTHEEK  
Bouwdienst Rijkswaterstaat  
Postbus 20.000  
3502 LA Utrecht

## Inhoudsopgave

Samenvatting.....	1
Inleiding.....	4
Luchthaven op een eiland in de Noordzee.....	7
Benodigde hoeveelheid energie.....	8
Energie uit waterkracht .....	11
Thermische energie uit zeewater .....	21
Windenergie .....	27
Fotovoltaïsche zonne-energie.....	32
Aansluiting op het elektriciteitsnet.....	34
Economie .....	37
Beleid en Milieudoelstellingen .....	40
Scenario-analyse .....	42
Conclusie en aanbevelingen .....	44
Epiloog.....	46
Literatuur en informatiebronnen .....	47

Bijlage 1:	Energie uit waterkracht
Bijlage 2:	Windenergie
Bijlage 3:	Economie



## 1. Samenvatting

Eind 1998 heeft de Nederlandse regering besloten nader onderzoek te doen naar de mogelijkheden voor een vliegveld op een eiland in de Noordzee. Om het regeringsbesluit verder uit te werken naar operationele plannen is de programmadirectie ONL (Onderzoek Nationale Luchtvaart) opgericht, waarin verschillende specialistische diensten van de overheid samenwerken.

De haalbaarheid van de luchthavenvarianten wordt thans onderzocht. De variant "luchthaven op een eiland in de Noordzee" kent verschillende alternatieven. Een alternatief betreft een eiland in zee welke middels een 20 kilometer lange verbindingsdam, tunnel en/of brug bereikbaar is. Dit rapport zal zoveel mogelijk aansluiten bij dit alternatief.

De overheid heeft zich ten doel gesteld dat in 2020 minimaal 10% van het totale energieverbruik dient te bestaan uit duurzaam opgewekte energie. Daarnaast is in Europees verband afgesproken dat een reductie van minimaal 8% broeikasgassen gerealiseerd zal worden in de periode tot 2012.

De huidige voortgang om deze doelstelling te verwezenlijken is zorgelijk. Een actievere rol van de overheid lijkt gewenst voor het behalen van de doelstellingen.

Bij het ontwerpen en het realiseren van een vliegveldeiland in de Noordzee dienen de mogelijkheden van het gebruik van duurzame energie zoveel mogelijk te worden overwogen en gestimuleerd. In het kader hiervan is deze verkennende studie (beschouwing van concepten) uitgevoerd, waarbij de mogelijkheid van het toepassen van een aantal vormen van duurzame energievormen in combinatie met het vliegveldeiland is onderzocht.

### Energie uit waterkracht

Bij energie uit waterkracht zijn twee vormen onderzocht.

1. Energie welke gewonnen kan worden uit de stroming van het zeewater tussen het eiland en het vasteland. Hierbij is ervan uitgegaan dat het eiland met een brugconstructie verbonden is met het vasteland. Tussen de brugpijlers worden 810 stromingsturbinen geplaatst welke een gezamenlijk vermogen hebben van ongeveer 4 MW. De totale opbrengst aan elektrische energie is 5,6 GWh per jaar. De stroomsnelheden van het zeewater zijn hier te laag om op een efficiënte wijze energie te winnen. De berekende prijs voor een kilowattuur komt voornamelijk als gevolg hiervan op ongeveer fl. 1,18. Als het rendement en de kostprijs van de turbines in de nabije toekomst verbeterd zal deze optie nog geen succes worden in de geschetste toepassing.

2. Indien het vliegveldeiland middels een dam verbonden wordt met het vasteland zal ten gevolge van de weerstand, die de dam veroorzaakt in de waterstroming, een waterverval ontstaan over de dam. Als in de verbindingsdam laagvervalturbinen worden geplaatst kan energie worden gewonnen uit het waterdebiet dat ontstaat ten gevolge van de potentiële energie van het verval. Het totale elektrische vermogen van 52 stuks laagvervalturbinen is ongeveer 312 MW. De totale opbrengst aan elektrische energie is 120 GWh per jaar en de kostprijs van een kilowattuur komt op



ongeveer 12 cent. Hiermee is deze duurzame energievorm economisch aantrekkelijk.

### **Thermische energie uit zeewater**

Het zeewater nabij het vliegveldeiland heeft op een diepte van ongeveer 4 meter een temperatuur variërend van ongeveer 5 tot 19°C en vertegenwoordigt hiermee een hoeveelheid energie. Als het zeewater door een warmtewisselaar wordt gepompt kan thermische energie aan het zeewater worden onttrokken of aan het zeewater worden toegevoegd. De temperatuur van het zeewater is in de winter onvoldoende hoog en in de zomer onvoldoende laag om direct te kunnen worden gebruikt voor het verwarmen en koelen van de gebouwen op de luchthaven. Door de toepassing van een warmtepomp en een koelmachine kunnen temperaturen bereikt worden waarmee de gebouwen verwarmd en gekoeld kunnen worden. Voor het aandrijven hiervan en het aandrijven van diverse pompen is een hoeveelheid elektrische energie nodig van 38 GWh per jaar, terwijl de hoeveelheid thermische energie welke geleverd wordt voor het verwarmen en koelen van de gebouwen 180 GWh bedraagt. De kostprijs van een kilowattuur thermisch komt in deze optie op ongeveer 6 cent (hierbij zijn de kosten voor de benodigde hoeveelheid elektriciteit, welke nodig is voor het aandrijven van de diverse machines, inbegrepen) Deze optie is zeker interessant genoeg om nader te onderzoeken.

### **Windenergie**

Op de verbindingsdam of op de brugconstructie naar het vliegveldeiland worden windmolens geplaatst. Een bouwhoogte beperking, in verband met de veiligheid voor vliegtuigen, laat windmolens met een maximale rotordiameter van 43 meter toe. Er kunnen 30 windmolens geplaatst worden met een vermogen van elk ongeveer 680 kW en een gezamenlijke jaaropbrengst van 61 GWh. De kostprijs van een kilowattuur is 12 cent indien de windmolens geplaatst worden op een brugverbinding en 11 cent bij plaatsing op een dam. Bij windenergie spreekt men hierbij van een zeer goede prijs.

### **Fotovoltaïsche zonne-energie**

Indien alle daken van de gebouwen op de luchthaven voorzien worden van fotovoltaïsche zonnecellen is het mogelijk om met een beschikbaar oppervlak van 15 ha. ongeveer 9 GWh elektrische energie per jaar op te wekken. De kostprijs van fotovoltaïsche zonnecellen is thans te hoog om economisch rendabel te zijn. Te verwachten is dat, ten gevolge van technologische verbeteringen en schaalvergroting, de kostprijs de komende decennia aanzienlijk zal dalen. In hoeverre deze vorm van energiewinning op termijn kan concurreren met fossiele energie zal sterk afhangen van de waarde die wordt toegekend aan duurzaamheid. Ter ondersteuning van het overheidsbeleid, met betrekking tot het bevorderen van duurzaam energiegebruik, kunnen de terminalgebouwen van de luchthaven voorzien worden van fotovoltaïsche zonnecellen.



De totale hoeveelheid duurzame energie welke in combinatie met het vliegveld eiland gewonnen kan worden is het grootst in de optie waarbij het eiland middels een dam verbonden wordt met het vasteland. De totale hoeveelheid duurzaam opgewekte elektrische energie kan dan 190 GWh per jaar bedragen en de hoeveelheid thermische energie 126 GWh per jaar.

Om inzicht te krijgen in de energiebehoefte van het vliegveld eiland is gekeken naar het energieverbruik van Schiphol. Er is een vergelijking gemaakt tussen de aanwezige faciliteiten, activiteiten en de omvang van Schiphol en het vliegveld eiland.

Op basis hiervan is ingeschat dat de totale benodigde hoeveelheid energie voor het vliegveld eiland 2.06 PJ (Peta Joule) per jaar is, hiervan is 1,34 PJ nodig voor de luchthaven.

Indien het vliegveld eiland wordt aangesloten op het landelijke elektriciteitsnet is een aansluiting met een vermogen van 200 MVA nodig. De dichtstbijzijnde aansluitmogelijkheid, op het 150 kV elektriciteitsnet, is in de buurt van Leiden. Of dit aansluitpunt direct geschikt is voor het aansluiten van 200 MVA dient nader onderzocht te worden alsook de wijze van transport van de elektrische energie naar en van het eiland.

Indien het vliegveld eiland middels een dam verbonden wordt met het vasteland en alle duurzame energie opties uit dit onderzoek worden benut kan duurzame energie voor 85% bijdragen in de energiebehoefte van de luchthaven. Indien extra windmolens parallel aan de dam geplaatst worden is een geheel energieneutrale luchthaven mogelijk.

Zelfs een geheel energieneutraal vliegveld eiland lijkt mogelijk. Extra windmolens en een uitbreiding van de optie thermische energie uit zeewater kunnen voldoende zijn om dit te realiseren.

In een vervolgstudie dient de mogelijkheid van duurzame energie in combinatie met decentraal opgewekte elektriciteit onderzocht te worden.



## 2. Inleiding

### 2.1 Algemeen

In Nederland is de luchtvaart de afgelopen jaren sterker gegroeid dan werd voorzien. Recente prognoses van het Centraal planbureau geven aan dat deze groei zich de komende jaren zal voortzetten. Economische studies laten bovendien zien dat 'Mainport Schiphol' een strategische betekenis heeft voor de Nederlandse economie.

Het tweede paarse kabinet heeft eind 1998 besloten om de luchtvaart in Nederland ruimte te geven voor geconcentreerde groei op één locatie: Schiphol of een vliegveld op een eiland in de Noordzee, onder voorwaarde dat er sprake is van een balans tussen milieu en economie en een aanvaardbaar beslag op de beschikbare ruimte.

De projectgroep TNLI (Toekomstige Nederlandse Luchtvaart Infrastructuur), welke een gezamenlijk initiatief is van de ministeries: Volksgezondheid Ruimtelijke Ordening en Milieu, Economische Zaken en Verkeer en Waterstaat, heeft in 1998 diverse onderzoeken gedaan naar de toekomst van de luchtvaart in Nederland. Op basis van deze onderzoeken heeft de regering haar principebesluit genomen. Dit besluit is in een beleidsnota met als titel "Strategische beleidskeuze toekomst luchtvaart" is vastgelegd.

Een volgende stap in de besluitvorming is gericht op het reserveren van ruimte voor de ontwikkeling van een nieuwe nationale luchthaven en het kiezen van ontsluiting van deze luchthaven. Er dienen maatregelen te worden getroffen om een balans te garanderen tussen een beheerste groei van de luchthaven, de kwaliteit van de leefomgeving, vermindering van de milieudruk en zorgvuldig gebruik van de schaarse ruimte. De besluitvorming zal worden vastgelegd in een Planologische Kernbeslissing (PKB).

Om het regeringsbesluit verder uit te werken naar operationele plannen, welke als voorbereiding kunnen dienen voor een nader uit te voeren MER (Milieu Effecten Rapportage, onderdeel van de PKB), is de programmadirectie ONL (Ontwikkeling Nationale Luchthaven) opgericht. ONL, maakt deel uit van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat en is in maart 1999 van start gegaan, als opvolger van TNLI. De Bouwdienst van Rijkswaterstaat (de Bouwdienst is een intern ingenieursbureau van de Rijksoverheid) is hierin actief waar het gaat om scope-definities, civiele constructie, waterbouwkunde, infrastructuur, het schrijven van startnotitie en management.

De haalbaarheid van de luchthavenvarianten wordt thans nader onderzocht. De variant "luchthaven op een eiland in de Noordzee" kent verschillende alternatieven. Een alternatief betreft een eiland in zee welke middels een 20 kilometer lange verbindingsdam, tunnel en/of brug bereikbaar is. In het kader van dit alternatief is deze verkennende studie (beschouwing van concepten) uitgevoerd waarbij naar een beperkt aantal duurzame energievormen met bijbehorende infrastructuur en de aansluiting hiervan op het bestaande elektriciteitsnet is gekeken.



## 2.2 Doelstelling

Met de Derde Energienota, verschenen in 1996, heeft de overheid zich ten doel gesteld in 2020 een verbeterde energie-efficiency van tenminste 30% te realiseren. Minimaal 10% van het totale energieverbruik dient dan te bestaan uit duurzame opgewekte energie.

In de Milieuconferentie, die in 1997 plaatsvond in het Japanse Kyoto, is tevens afgesproken dat de Europese Unie een reductie van minimaal 8% broeikasgassen zal realiseren in de periode tot 2012.

De huidige voortgang om deze doelstelling te verwezenlijken is zorgelijk. Een actievare rol van de overheid lijkt gewenst voor het behalen van de doelstellingen.

Bij het ontwerpen en het realiseren van een vliegveldeiland in de Noordzee dienen de mogelijkheden van het gebruik van duurzame energie zoveel mogelijk te worden overwogen en gestimuleerd. Bij de formulering van eisen en randvoorwaarden van het ontwerp zal hier in belangrijke mate rekening mee worden gehouden.

De doelstelling van deze verkennende studie is: informatie verschaffen over een aantal mogelijkheden van duurzame energiewinning, in combinatie met de aanwezigheid van een vliegveldeiland in de Noordzee, die bovengenoemde doelstelling van de overheid ondersteunen.

## 2.3 Studie

### 2.3.1 Kader

Het resultaat van deze studie: een verkenning naar de haalbaarheid van een aantal duurzame energievormen, in combinatie met de aanwezigheid van een vliegveldeiland, welke een bijdrage kunnen leveren aan de verdere operationalisering van de luchthavenvarianten. Er wordt aangegeven welke mogelijkheden er op conceptueel niveau zijn om duurzame energie in samenhang met de infrastructuur op te wekken.

De studie zal zoveel mogelijk aansluiten bij de uitgangspunten en randvoorwaarden welke door de programmadirectie ONL zijn gedefinieerd.

### 2.3.2 Werkwijze en structuur

De volgende werkwijze is gevolgd:

1. Allereerst zijn de thans voorliggende varianten van een vliegveld op een eiland in de Noordzee bestudeerd.
2. Vervolgens hebben interviews plaatsgevonden met o.a. het Rijksinstituut Kust en Zee, Schiphol, Rijksluchtvaartdienst, ONL en de Bouwdienst om inzicht te krijgen in de achtergronden en beweegredenen van de voor mijn onderzoek relevante informatie.
3. Daarna is informatie verzameld en diverse literatuur geraadpleegd betreffende: de te onderzoeken duurzame energievormen, de energievoorziening, toekomstverwachtingen, economische aspecten en het overheidsbeleid.
4. Tenslotte zijn conclusies getrokken en aanbevelingen geformuleerd.



### 2.3.3 Resultaten

Deze verkennende studie is er met name op gericht inzicht te verschaffen in de hoeveelheid energie welke opgewekt kan worden middels onderstaande duurzame energievormen. De techniek wordt globaal beschreven en de investeringskosten worden aangegeven. Van de verschillende varianten zal de prijs van een kilowattuur worden berekend.

Deze verkennende studie beoogt antwoord te geven op de volgende vragen:

- Hoeveel elektrische energie kan worden opgewekt uit de waterstroming ter plaatse van het vliegveldeiland ?
- Hoeveel elektrische energie kan worden opgewekt uit het waterverval dat over de verbindingdam naar het vliegveldeiland ontstaat ?
- Is de thermische energie dat gewonnen kan worden uit het zeewater bruikbaar voor het verwarmen en koelen van de op de luchthaven aanwezige gebouwen ?
- Hoeveel elektrische energie kan worden opgewekt door op een vaste brugverbinding, of op een verbindingdam naar het vliegveldeiland ?
- Hoeveel bedraagt de benodigde energie van het vliegveldeiland ?
- Welke mogelijkheden zijn er voor transport en aansluiting van elektriciteit op het bestaande elektriciteitsnet ?

### 2.3.4 Afbakening

Deze studie zal zich met betrekking tot de aansluiting op het elektriciteitsnet beperken tot de energiebehoefte van het vliegveldeiland, dit is exclusief de eventuele behoefte aan elektriciteit voor trein, tram en shuttle verbindingen tussen het eiland en het vasteland.

Het vliegveldeiland wordt aangesloten op het landelijke elektriciteitsnet, back-up energie, welke nodig is in de periode dat de duurzame energievormen onvoldoende energie leveren, wordt in dit onderzoek als niet noodzakelijk verondersteld.

Voorzieningen voor gas, water en telecom zijn in deze studie niet meegenomen.

Bij de mogelijkheden van fotovoltaïsche zonne-energie is enkel gekeken naar de toepassing ervan in combinatie met de luchthavengebouwen.

Bij de mogelijkheden van thermische energie uit het zeewater is enkel gekeken naar de voorzieningen welke nodig zijn om de luchthavengebouwen te verwarmen en te koelen.



### 3. Luchthaven op een eiland in de Noordzee

#### 3.1 Inleiding

In deze verkennende studie is uitgegaan van het alternatief waarbij het volledige luchthavenbedrijf naar een eiland in de Noordzee wordt verplaatst. Dit houdt onder meer in dat passagiers op het eiland inchecken en de douane passeren. Op het eiland zijn winkels, hotels, restaurants, cateringbedrijven en dergelijke gevestigd. Ook de afhandeling van vracht vindt hier plaats. Eén of meer verbindingen tussen eiland en Schiphol zijn nodig voor reizigers, werknemers, vracht en voor het uitzwaaien van bezoekers op de luchthaven [1].

De totale doorlooptijd van het project wordt momenteel geschat op 10 tot 12 jaar. Hiervan is tenminste 5 jaar nodig voor het doorlopen van de benodigde formele besluitvormingsprocedures. De huidige planning geeft aan dat gebruik van de luchthaven na 2012, al dan niet gefaseerd, kan plaatsvinden.

#### 3.2 Gegevens

Voor dit onderzoek zijn een aantal relevante gegevens geïnventariseerd dan wel verondersteld. In overleg met medewerkers van de programmadirectie ONL, en op basis van de huidige stand van zaken, is een inschatting gemaakt van de meeste uitgangspunten. Onder voorbehoud volgen enkele projectgegevens.

- Capaciteit Luchthaven : 100 miljoen passagiers per jaar.
- Aantal banen : 6 start- en landingsbanen met een lengte van elk 3900 m.
- Afmeting eiland : een oppervlak van circa 4000 ha.;
- Ruimtebeslag : een oppervlak van circa 1100 ha. bebouwd;
- Ondergrond : een met zand opgespoten eiland;
- Bereikbaarheid : middels een 20 Km. lange verbindingssdam, een tunnel en/of brug. Er zullen aanlegplaatsen zijn voor bevoorradingschepen.
- Geschatte kosten : 50 tot 100 miljard gulden.

#### 3.3 Locatie

De locatie van het vliegveld eiland in de Noordzee is 20 kilometer uit de kust (tegen de 12-mijlszone), ter hoogte van de lijn Katwijk- Noordwijk.





## 4. Benodigde hoeveelheid energie

### 4.1 Inleiding

Om een inschatting te kunnen maken van het energieverbruik op het vliegvelddeiland is in eerste instantie gekeken naar het energieverbruik van Schiphol. Gegevens van, en interviews met, medewerkers van de Schiphol Group [2] liggen hieraan ten grondslag.

Vervolgens is een onderverdeling gemaakt in aanwezige faciliteiten en activiteiten op het vliegvelddeiland, waarna een globale inschatting is gemaakt in het te verwachten totale energieverbruik op het vliegvelddeiland.

Er is een duidelijk onderscheid gemaakt tussen de benodigde energie voor de luchthaven waaronder: terminals, platformverlichting, start- en landingsbaan en openbare verlichting en de benodigde energie voor overige gebouwen (hotels, restaurants, winkels en bedrijven). Dit onderscheid is nodig omdat de zeggenschap van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat groter is over de luchthaven.

Energie ten behoeve van vervoer, transport etc. en de kerosine voor de vliegtuigen is buiten beschouwing gelaten.

### 4.2 Energieverbruik Schiphol

#### 4.2.1 Elektriciteitsverbruik

Het totale elektriciteitsverbruik van Schiphol bedroeg in 1998 circa 270.E6 kWh. Voor de luchthaven bedroeg dit circa 130.E6 kWh, verdeeld over:

- |  |                    |
|--|--------------------|
| • terminalcomplex:                               | 90.E6 kWh per jaar |
| • banen en platforms:                            | 6.E6 kWh per jaar  |
| • parkeergelegenheid en wegen:                   | 10.E6 kWh per jaar |
| • kantoren, loodsen en bedrijfsverzamelgebouwen: | 21.E6 kWh per jaar |
| • overige:                                       | 3.E6 kWh per jaar  |

#### 4.2.2 Gasverbruik

Het totale verbruik van aardgas van Schiphol bedroeg in 1998 circa 37.E6 m<sup>3</sup>. Voor de luchthaven bedroeg dit circa 12.E6 m<sup>3</sup> aardgas, verdeeld over:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| • terminalcomplex:                               | 8.E6 m <sup>3</sup> per jaar |
| • kantoren, loodsen en bedrijfsverzamelgebouwen: | 4.E6 m <sup>3</sup> per jaar |

#### 4.2.3 Energieverbruik

Het totale energieverbruik van Schiphol bedroeg in 1998 circa 2,3 Peta Joule (PJ), waarvan 1 PJ aan elektriciteit en 1,3 PJ aan aardgas (1m<sup>3</sup> aardgas = 35 MJ).

Het totale energieverbruik van de luchthaven bedroeg in 1998 circa 0,89 PJ, waarvan 0,47 PJ aan elektriciteit en 0,42 PJ aan aardgas.



De elektrische energie wordt voornamelijk gebruikt door gebouwinstallaties en door verlichting. Het aardgas wordt voornamelijk gebruikt voor de klimaatbeheersing (koeling- en verwarmingsinstallaties) van de gebouwen (thermische energie).

4.3 Energieverbruik vliegveldeiland

4.3.1 Luchthaven activiteiten

De capaciteit van de luchthaven op zee zal ongeveer 3 maal groter zijn dan de capaciteit van het huidige Schiphol, dat 33 miljoen passagiers per jaar accommodeert [3]. Het aantal start- en landingsbanen gaat van vier naar zes. Omdat er minder geluidsoverlast zal zijn bij omwonenden is te verwachten dat de nachtvluchten zullen toenemen, waardoor de luchthaven meer een continubedrijf wordt. vliegveldeiland

Naast bovengenoemde verschillen tussen het vliegveldeiland en Schiphol zijn de volgende randvoorwaarden geconstateerd, die in belangrijke mate invloed hebben op de benodigde hoeveelheid energie voor het vliegveldeiland:

- het eiland zal voornamelijk bereikbaar zijn met het openbaar vervoer;
- een aantal hotels en restaurants zijn nodig op het eiland;
- het belangrijkste instappunt voor de verbinding met het eiland blijft Schiphol;
- er zijn zowel winkels op de locatie Schiphol als op het vliegveldeiland;
- de distributie van de vracht vindt op Schiphol plaats;
- de vestiging van de luchtvaartmaatschappijen en overige bedrijven zal voor een belangrijk deel op Schiphol blijven.

4.3.2 Benodigde hoeveelheid elektrische energie

Item	Schiphol ** kWh/ jaar	Correctie	vliegveldeiland kWh/ jaar
terminalcomplexen *	90.E6	+ 30 %	117.E6
banen en platforms *	6.E6	+ 50 %	9.E6
parkeergelegenheid en wegen *	10.E6	-40 %	6.E6
kantoren, loodsen en bedrijven zoals winkels *	21.E6	+30 %	27,3.E6
bedrijven en hangars (50% luchthaven) *	130.E6	-50 %	65.E6
hotels en restaurants [4]	geen		5.E6
overige	3.E6	+50 %	4,5.E6
<b>totaal</b>	<b>270.E6</b>		<b>233,8.E6</b>

\* direct aan de luchthaven gerelateerde gebouwen en activiteiten  
\*\* verbruikcijfers 1998

4.3.3 Benodigde hoeveelheid thermische energie

Bij de berekening van de benodigde hoeveelheid aan thermische energie is ervan uit gegaan dat de omzetting van aardgas naar thermische energie, in de vorm van warmte en koude, met een rendement van 85 % plaatsvindt.



Item	Schiphol ** PJ/ jaar	Correctie	vliegveld eiland PJ/ jaar
terminalcomplexen *	0,24	+ 30%	0,31
kantoren, loodsen en bedrijven zoals winkels *	0,12	+30%	0,16
bedrijven en hangars (50% luchthaven) *	0,7	-50%	0,35
hotels en restaurants [4]	0		0,4
<b>totaal</b>	<b>1,06</b>		<b>1,22</b>

\* direct aan de luchthaven gerelateerde gebouwen en activiteiten  
\*\* verbruikcijfers 1998

4.3.4 Totale hoeveelheid energie voor het eiland

De totale hoeveelheid benodigde energie voor het vliegveld eiland is ongeveer 2,06 PJ per jaar. Hiervan is 1,34 PJ nodig voor de luchthaven.

## 5. Energie uit waterkracht

### 5.1 Inleiding

Door de Bouwdienst is onderzoek gedaan naar de mogelijkheid van energieopwekking uit de Noordzee in combinatie met een vliegveldeiland. In dit onderzoek [5] is berekend hoeveel potentie aan energie er ter plaatse van het vliegveldeiland is. De vormen van energie die bij waterkracht van belang zijn, zijn de kinetische energie en de potentiële energie (thermische energie wordt in deze beschouwing verwaarloosd).

De formuleringen van de energievormen zijn verwerkt in een programma Mathcad. Dit programma maakt het mogelijk om, bij het verschil in waterniveau (verval), welke ontstaat over een verbindingsdam, alsook bij de stroomsnelheden van het zeewater gedurende het dood- en springtij, de totale opbrengst aan energie per vierkante meter te berekenen. Dit is gedaan op basis van werkelijke of voorspelbare data. De bron voor deze informatie is het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ).

De gegevens uit bovengenoemd onderzoek zijn gebruikt bij het berekenen van de hoeveelheid elektrische energie welke gewonnen kan worden bij de volgende twee opties:

- energie uit waterstroming: hierbij is het vliegveldeiland verbonden met een 20 kilometer lange brug naar het vasteland;
- energie uit verval: hierbij wordt gebruik gemaakt van het verschil in waterniveau welke ontstaat wanneer het vliegveldeiland met een 20 kilometer lange dam verbonden wordt met het vasteland.

Uitgangspunt bij deze vormen van energie is dat de brug en de verbindingsdam loodrecht op de kust zijn geplaatst en dat de gegevens uit de bovengenoemde onderzoeken, waar is uitgegaan van een V-vormig eiland op 10 kilometer voor de kust van Noordwijk en een gesloten dam van 30 kilometer zonder eiland, bruikbaar zijn.

### 5.2 Energie uit stroming

#### 5.2.1 Inleiding

De plaatsing van een vliegveldeiland in de Noordzee zal de stroomsnelheid van het zeewater doen toenemen. De maximale stroomsnelheid tussen het eiland en het vasteland is ongeveer 1 m/sec. Aan deze berekening is een meteorologisch effect toegevoegd in de vorm van een constante windsnelheid van 8 m/sec uit het zuidwesten. Het resultaat van deze simulatie geeft een stroomsnelheidtoename van 0,3 m/sec ten opzichte van de situatie zonder eiland. Dit effect is zichtbaar gemaakt in bijlage 1. Aan het snelheidsverloop op jaarbasis, volgens de stroomatlas, is deze stroomsnelheidtoename toegevoegd.

De kinetische energie van het water nabij het eiland kan benut worden voor het aandrijven van stroomturbines, welke geplaatst kunnen worden aan een brugconstructie tussen het vliegveldeiland en het vasteland.



### 5.2.2 Beschikbare hoeveelheid energie

De kinetische energie is de belangrijkste vorm van energie in deze toepassing.

De kinetische energie van een deeltje water met afmetingen  $dx, dy, dz$  en snelheid  $v$  bedraagt:

$$dE_{kin} = \frac{1}{2} * \rho * v(t)^2 * dx * dy * dz$$

met:

$\rho$  = soortelijke massa water;

Wordt nu een stationaire stroming beschouwd met doorstroomoppervlak  $A$  en stroomsnelheid  $v$ , dan is de kinetische energie van het water dat per tijdsdeel  $dt$  door doorsnede  $A$  stroomt gelijk aan:

$$dE_{kin} = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A * v(t) * dt = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * A * dt$$

De hierboven afgeleide uitdrukking is niet compleet, omdat ze alleen op kinetische energie is gebaseerd. Niettemin is deze uitdrukking bruikbaar wanneer het gaat om een vaste doorsnede in een stationaire stroming.

Bij het berekenen van de hoeveelheid kinetische energie van het water is zowel de getijdenstroming van noord naar zuid als van zuid naar noord beschouwd en opgeteld.

De resultaten van deze berekeningen geven aan dat de totale theoretische hoeveelheid kinetische energie van het water per jaar ongeveer 3,6.E9 Nm per vierkante meter doorsnede bedraagt, verticaal en loodrecht op de stroom gemeten [5].

Factoren die in belangrijke mate invloed hebben op de berekening van de hoeveelheid bruikbare elektrische energie zijn:

- de mogelijkheid om de theoretische hoeveelheid kinetische energie uit de waterstroming om te zetten in mechanische energie, niet alle kinetische energie kan worden omgezet;
- het aantal te plaatsen turbines, de afmetingen en de beschikbare hoeveelheid ruimte om turbines te kunnen plaatsen;
- de verliezen die optreden in de turbines en tandwielkasten;
- de verliezen die optreden bij de conversie van mechanische energie naar een bruikbare vorm van elektrische energie.

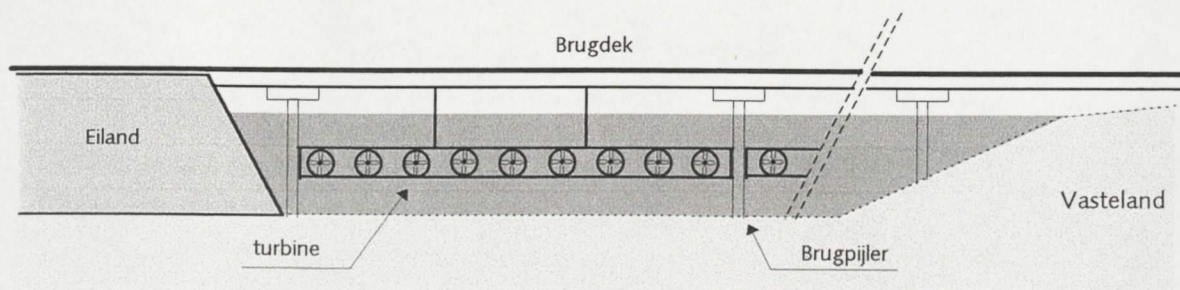
### 5.2.3 Plaatsing en aantal turbines

De totale afstand van het vliegveldeiland naar het vasteland is 20 km. De gemiddelde waterdiepte ligt tussen de 15 en 20 meter (zie bijlage 1). Op basis van

deze gegevens is gekozen voor stroomturbines met een rotordiameter van 7 meter (met een bruto doorstroom oppervlakte van  $38,5 \text{ m}^2$ ) en een onderlinge afstand van ongeveer 11 meter (vuistregel: 1,5 tot 2 maal de rotordiameter [6] ).

Over een lengte van 15 kilometer is de zee diep genoeg om 810 stroomturbines te plaatsen.

Het vliegveldeiland is met een brugconstructie verbonden met het vasteland. De stroomturbines kunnen tussen de pijlers van de brug worden geplaatst. De turbines dienen tijdens de wisselingen van het tij, middels een draaiconstructie, van richting te worden veranderd.



Doorsnede overbrugging en plaatsing turbines

#### 5.2.4 Energieberekening

De totale hoeveelheid beschikbare kinetische energie is  $3,577 \cdot 10^9 \text{ Nm}$  per jaar per vierkante doorstroomoppervlakte [5].

De berekende hoeveelheid kinetische energie wordt omgezet in mechanische energie en vervolgens in elektrische energie volgens onderstaand principieschema.

De totale hoeveelheid elektrische energie per jaar is:

$$E_{el.} = \frac{E_{kin.} * C_p * \eta * A}{t}$$

$$= \frac{3,577 \cdot 10^9 * 0,2 * (0,95 * 0,98 * 0,97 * 0,998) * \left( \frac{1}{4} * \pi * 7^2 * 810 \right)}{3600}$$

$$= 5,58 \text{ GWh per jaar}$$

met:

$A$  = totale oppervlakte van de 810 turbines.



$C_p$  = (vermogenscoëfficiënt) van 20% [6] is opgebouwd uit:

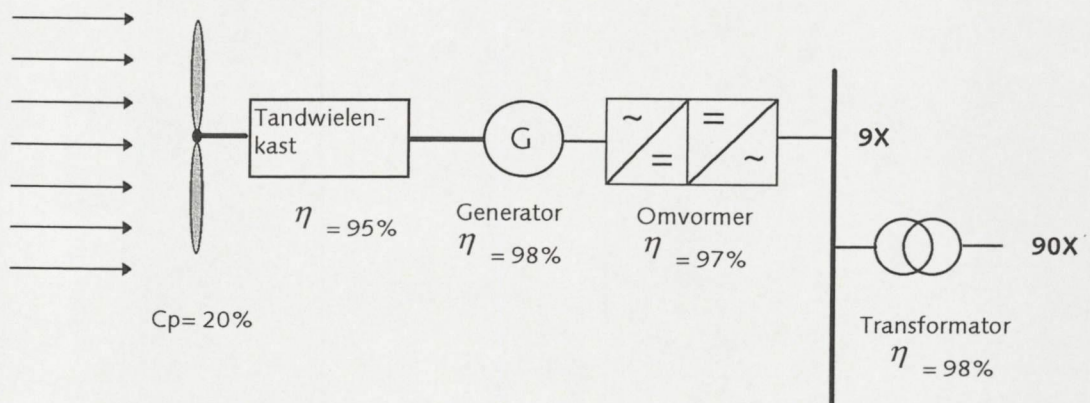
- reductie van de bruto turbine oppervlakte naar de netto oppervlakte (netto = bruto - oppervlakte naaf - oppervlakte rotorbladen);
- weerstandcoëfficiënt om van rechtlijnige (translatie) beweging over te gaan naar een roterende beweging;
- optimum tussen de aanstroomsnelheid van het water en de rotatiesnelheid van de rotorbladen.

Het gemiddelde vermogen per turbine is:

$$P = \frac{E_{\text{totaal}}}{\text{Aantal turbines} * t} = \frac{5,58 \cdot 10^9}{810 * 8760} = 786 \text{ W}$$

Op basis van het piekvermogen, dat ontstaat tijdens springtij, wordt geschat dat een turbinevermogen van ongeveer 5 kW nodig is [5].

Totaal aan kinetische  
energie per jaar



## 5.3 Energie uit verval

### 5.3.1 Inleiding

De verbindingsdam naar het vliegveldeiland zal de getijdengolf merkbaar beïnvloeden.

De effecten van de aanwezigheid van een 30 km gesloten dam, zonder eiland, voor de kust van Noordwijk op vervallen en snelheden zijn zichtbaar gemaakt. Op de vervallen is het getijdenverloop op jaarbasis toegevoegd. Over de dam zal een waterstandverschil ontstaan variërend van 0,75 meter tijdens doortij tot 1,22 meter tijdens springtij [7].

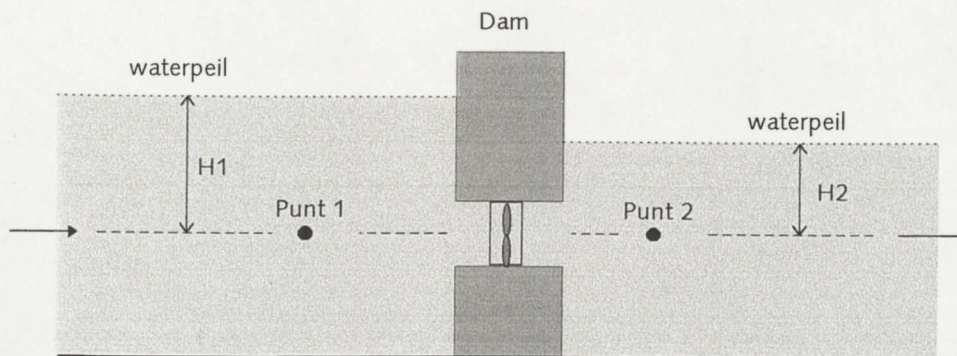


Indien in de verbindingsdam turbines worden geplaatst zal een debiet ontstaan ten gevolge van de opening in de dam. Afhankelijk van het getij zal het water door de turbine afwisselend van noord naar zuid stromen. Door de wisselende richting van de waterstroom dienen de turbines geschikt te zijn voor het draaien in twee richtingen (bijvoorbeeld Bulbturbines met verstelbare schoepen zoals toegepast in de getijdencentrale in La Roche sur Yon bij St. Malo te Frankrijk)

### 5.3.2 Beschikbare hoeveelheid energie

Het verval over de verbindingsdam vertegenwoordigt een hoeveelheid potentiële energie welke benut kan worden voor het opwekken van elektrische energie.

Wanneer in de verbindingsdam laagverval turbines worden geplaatst, waardoor openingen in de dam ontstaan, zal door de aanwezigheid van een verval (potentiële energie) een waterstroom ontstaan door de turbines in de dam. Deze waterstroom bevat een hoeveelheid potentiële energie (de waterdeeltjes worden ter plaatse van de openingen in de dam versneld door de potentiële energie) die gebruikt kan worden om turbines aan te drijven.



Figuur 1: doorsnede opstelling laagverval turbine

Omdat we hier te maken hebben met een relatief gering waterstandverschil over de verbindingsdam spreken we over laagverval turbines.

Wanneer het verschil in energie tussen twee achtereenvolgende doorsneden wordt bepaald, moet ook de potentiële energie in de beschouwing betrokken worden. Dit zal uiteengezet worden in het volgende voorbeeld.

Stel gegeven een stationaire stroming met geen verlies tussen punt 1 en punt 2 (figuur 1). De stroomsnelheid heeft in elk punt de waarde  $v$ . Punten 1 en punt 2 staan op eenzelfde stroomlijn en hebben dezelfde snelheid (de snelheden worden gelijk gekozen omdat er watertransport dient plaats te vinden door de turbine en om de kustmorfologische gevolgen te beperken).

In punt 1 is de kinetische energie van het water per eenheid van doorstroomoppervlakte gelijk aan:

$$d E_{kin1} = \frac{1}{2} * \rho * v_1^3 * dt$$

Voor punt 2 geldt eveneens:

$$d E_{kin2} = \frac{1}{2} * \rho * v_2^3 * dt$$

Wordt nu de potentiële energie in beschouwing genomen, dan is de potentiële energie van het water in punt 1 gelijk aan:

$$E_{pot1} = \rho * g * H_1 * dt$$

Voor punt 2 geldt eveneens:

$$E_{pot2} = \rho * g * H_2 * dt$$

Het verlies aan potentiële energie is het verschil in energie tussen punt 1 en 2:

$$E_{pot1} - E_{pot2} = \rho * g * (H_1 - H_2) * v * dt = \rho * g * \Delta H * dt$$

Het verlies aan energie (potentiële en kinetisch) ten gevolge van de doorstroomopening is, in het geval dat de snelheid  $v_1 = v_2$  en de waterhoogte  $H_1 \neq H_2$  is dus:

$$\Delta E = \rho * g * \Delta H * v * dt$$

met:

$\rho$  = de dichtheid van het zeewater is 1025 kg/m<sup>3</sup>

$g$  = de zwaartekrachtversnelling van 10 m/sec<sup>2</sup>

De grootte van het doorstroomprofiel (het totaal aan turbines oppervlakte) en de weerstand die de waterstroom ondervindt in de opening, hebben direct o.a. invloed op de grootte van het waterstandverschil tussen H1 en H2. Er moet een juiste balans gevonden worden tussen doorstroomopening en debiet.

In een model is met behulp van het rekenprogramma Mathcad [5] uitgerekend dat bij een totale doorstroomopening van ongeveer 3250 m<sup>2</sup> een hoeveelheid energie van 168.E9 Nm/m<sup>2</sup> per jaar aanwezig is, welke benut kan worden om de laagvervaltturbines aan te drijven.

Factoren die in belangrijke mate van invloed zijn op het berekenen van de hoeveelheid bruikbare elektrische energie zijn:





- de mogelijkheid om de hoeveelheid kinetische energie om te zetten in mechanische energie;
- het aantal te plaatsen laagvervaltturbines, de afmetingen en de beschikbare hoeveelheid ruimte om turbines te kunnen plaatsen;
- verliezen die optreden in de turbines en tandwielkasten;
- de verliezen welke optreden bij de conversie van mechanische energie naar een bruikbare vorm van elektrische energie.

### 5.3.3 Plaatsing en aantal laagvervaltturbines

De turbines kunnen in de verbindingsdam naar het vliegvelddeiland geplaatst worden. De turbines kunnen bijvoorbeeld gemonteerd worden in afzinkbare caissons.

De opening in de dam mag, na berekeningen en simulaties van vervallen, ongeveer 3250 m<sup>2</sup> zijn [5].

Bij een waterdiepte van 20 meter (zie bijlage 1) kunnen turbines toegepast worden met een rotordiameter van ongeveer 10 meter.

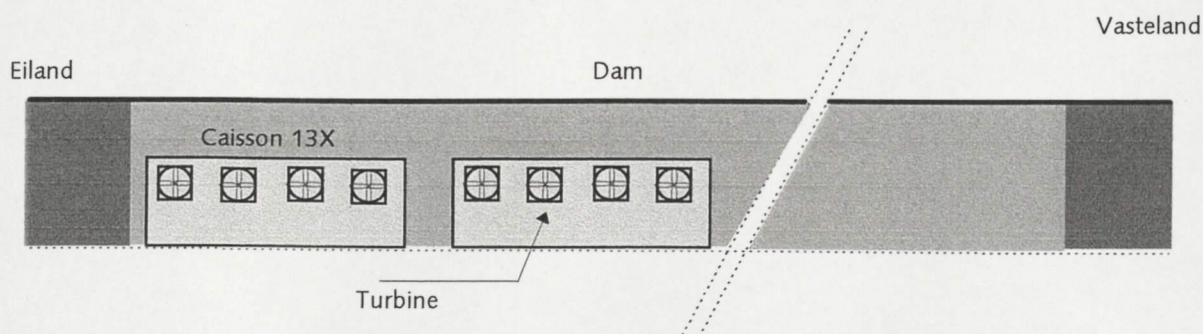
Uitgangspunt bij de berekenen van het aantal turbines is dat de netto oppervlakte van de turbine 80 % bedraagt van de bruto oppervlakte. Deze oppervlaktevermindering bestaat uit 10% voor de rotorbladen en 10% voor de rotornaaf.

Een turbine met een bruto doorsnede van 10 meter heeft een netto oppervlakte van:

$$A = 0,8 * \left( \frac{1}{4} * \pi * D^2 \right) = 62,8 \text{ m}^2$$

Het aantal turbines is  $\frac{3250}{62,8} = 52 \text{ stuks}$

Doorsnede plaatsing turbines in verbindingsdam



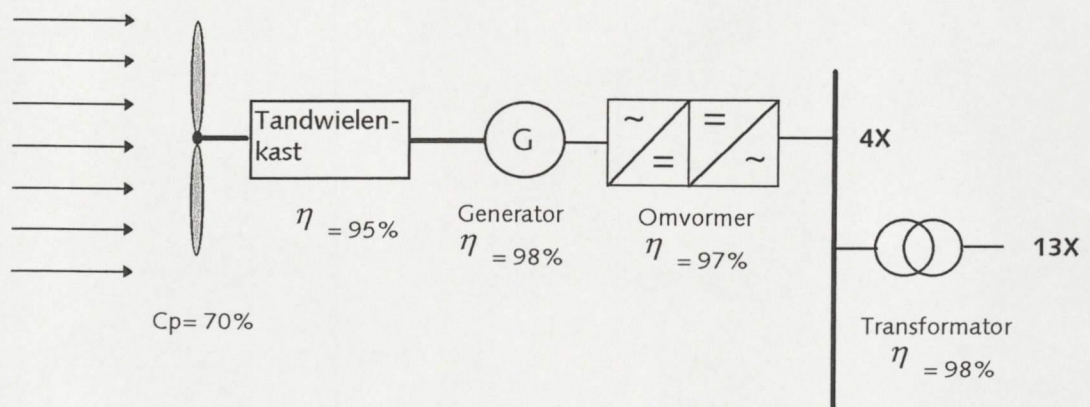


### 5.3.4 Energieberekening

De totale hoeveelheid beschikbare potentiële energie is 168.E9 Nm per jaar per vierkante meter doorstroomoppervlakte [5].

De hoeveelheid potentiële energie moet omgezet worden naar een bruikbare vorm van elektrische energie volgens onderstaand principieschema.

Totale hoeveelheid  
energie per jaar



Configuratieschema laagvervaltturbines

De totale hoeveelheid elektrische energie per jaar is:

$$\begin{aligned}
 E_{el.} &= \frac{E_{kin.} * Cp * \eta * A}{t} \\
 &= \frac{168 \cdot 10^9 * 0,7 * (0,95 * 0,98 * 0,97 * 0,995) * \left(\frac{1}{4} * \pi * 10^2 * 52\right)}{3600} \\
 &= 120 \text{ GWh per jaar}
 \end{aligned}$$

met:

$A$  = totale oppervlakte van de 52 turbines.

$Cp$  = (vermogenscoëfficiënt) van 70% [6] ontstaat uit:

- reductie van de bruto turbine oppervlakte naar de netto oppervlakte (netto = bruto - oppervlakte naaf - oppervlakte rotorbladen);
- weerstandcoëfficiënt om van rechtlijnige (translatie) beweging over te gaan naar een roterende beweging;
- optimum tussen de aanstroomsnelheid van het water en de rotatiesnelheid van de rotorbladen.

Het gemiddelde vermogen per turbine is:

$$P = \frac{E_{\text{totaal}}}{\text{Aantal turbines} * t} = \frac{120 \cdot 10^9}{52 * 8760} = 263 \text{ kW}$$

Op basis van het piekvermogen, dat ontstaat tijdens springtij, wordt geschat dat een turbinevermogen van ongeveer 600 kW nodig is [5].

## 5.4 Aandachtspunten

Bij de berekeningen is er vanuit gegaan dat de stroomturbines en de laagvervaltturbines zullen draaien bij alle stroomsnelheden gedurende dood en springtij. Indien de turbines bij zeer lage snelheden niet meer kunnen draaien (bijvoorbeeld bij snelheden lager dan 0,5 m/sec en vervallen kleiner dan 0,5 meter), dient een correctie op de berekeningen plaats te vinden, waardoor de energieopbrengst iets lager zal zijn.

Bij het berekenen van de totale hoeveelheid opgewekte energie is uitgegaan van 100% beschikbaarheid van de turbines met bijbehorende installaties.

De kennis op het gebied van stromingsturbines is nog in ontwikkeling, er worden thans in Europa prototypen stroomgeneratoren gebouwd en beproefd (b.v. door het Britse IT-Power, voor de kust van Schotland). De verwachting is dat in de omzetting van kinetische energie naar uiteindelijk elektrische energie op termijn een totaal rendement van 30 tot 40%, bereikt kan worden.

De benodigde laagvervaltturbines en de civiele constructies ten behoeve van de turbines zullen specifiek voor de geschetste toepassing ontwikkeld moeten worden.

## 5.5 Kosten

Bij de kostenraming zijn de kosten bekeken om energie te winnen uit de waterstroming en uit het waterverval (de dam en de elektriciteitskabel naar het eiland zijn niet meegenomen in de kosten).

Onderstaande kostenraming is exclusief btw en gebaseerd op het prijspeil van 2000. De onnauwkeurigheidsmarge is plus of min 25%.

Energie uit waterstroming		
Post	Kosten totaal kfl.	Opmerking/ bron
810 turbines van 5 kW	32.400	40 kfl. per turbine
Civiele constructie	22.500	Bouwdienst
Aansluiting op net	2.000	
Installatie	12.100	
Engineering	6.900	10%
<b>Totaal</b>	<b>75.900</b>	



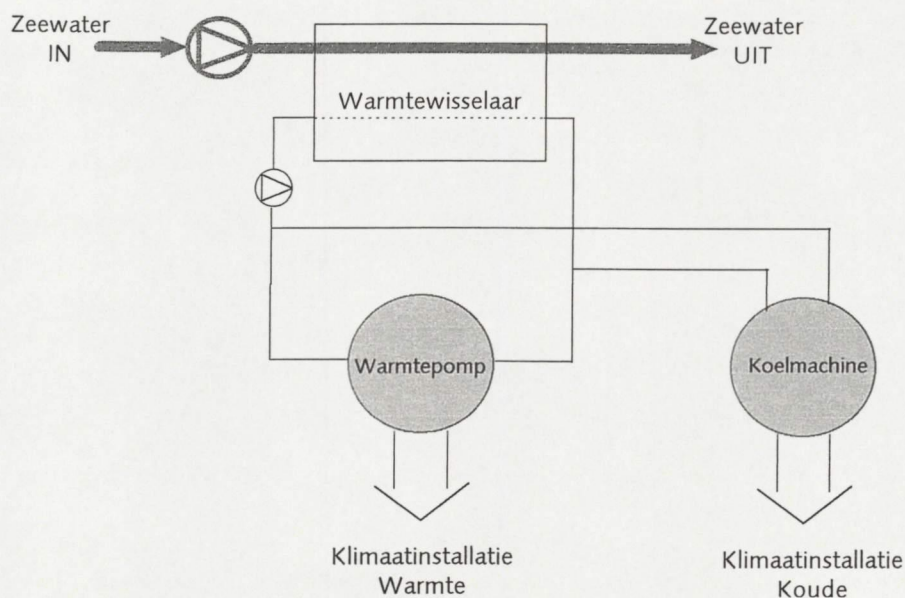
Energie uit waterverval		
Post	Kosten totaal kfl.	Opmerking/ bron
52 laagvervalturbinen van 600 kW	93.600	3 kfl./kW
Bodembescherming	17.200	Bouwdienst
Civiele constructie	35.750	Bouwdienst
Aansluiting op net	1.000	
Installatie	7.800	
Engineering	15.535	10%
Totaal	170.885	

## 6. Thermische energie uit zeewater

### 6.1 Inleiding

Het zeewater op een diepte van ongeveer -4 meter NAP, nabij het vliegveldeiland, heeft een temperatuur variërend van ongeveer 5 tot 19°C [8] en vertegenwoordigt hiermee een hoeveelheid energie. Als deze energie gewonnen en bruikbaar gemaakt kan worden voor de klimaatbeheersing (koeling- en verwarmingsinstallaties) van de op de luchthaven aanwezige gebouwen, kan gesproken worden van een relatief gezien onuitputtelijke energiebron.

Als op het vliegveldeiland een leidingstelsel wordt aangebracht waarin het zeewater wordt rondgepompt kan uit dit systeem naar behoeven warmte worden onttrokken of worden afgestaan, volgens onderstaand prinsipeschema.



De temperatuur van het zeewater is in de winter onvoldoende hoog en in de zomer onvoldoende laag om direct te kunnen gebruiken voor het verwarmen en koelen van de gebouwen op de luchthaven. Door gebruik te maken van een warmtepomp en een koelmachine kunnen temperaturen bereikt worden waarmee de gebouwen verwarmd en gekoeld kunnen worden.

### 6.2 Benodigde hoeveelheid warmte en koude

#### 6.2.1 Thermische energie

Uit het onderzoek naar de energiebehoefte voor het vliegveldeiland, zie hoofdstuk 4, kan worden afgeleid dat de benodigde hoeveelheid thermische energie, voor het verwarmen en het koelen van de gebouwen op de luchthaven 0,65 PJ bedraagt. Voor het verwarmen van de gebouwen wordt 60% (0,39 PJ) gebruikt en voor het



koelen van de gebouwen wordt 30% (0,195 PJ) gebruikt. 10% van de energie is bestemd voor warm tapwater en voor diverse keukenapparaten, welke in dit onderzoek buiten beschouwing is gelaten.

### 6.2.2 Temperatuur

De voor het verwarmen van de gebouwen benodigde temperatuur welke, in een lagetemperatuurverwarmingsysteem, bedraagt ongeveer 45°C [9]. Deze temperatuur kan gebruikt worden in bijvoorbeeld vloer- en/of luchtverwarmingsystemen of bij klimaatplafonds.

Een temperatuur van ongeveer 10°C is bruikbaar om verder te kunnen verwerken in een koelinstallatie voor het koelen van de gebouwen.

## 6.3 Warmtepomp en koelmachine

### 6.3.1 Algemeen

In het winterseizoen varieert de temperatuur van het zeewater van 5°C (278 K) tot 16°C (289 K). Met een warmtepomp kan deze temperatuur worden verhoogd worden naar de gewenste temperatuur van ongeveer 45°C (318 K). De warmtepomp onttrekt warmte uit het zeewater en verhoogt dit met behulp van mechanische energie naar een hogere temperatuur.

### 6.3.2 Rendement van de warmtepomp en koelmachine

De theoretische maximale warmtefactor en koudefactor, ook wel COP (Coëfficiënt Of Performance) genoemd van de warmtepomp en koelmachine, volgens Carnot, aangegeven in onderstaand formules. Carnot is hierbij uitgegaan van ideale gassen en vloeistoffen en heeft wrijvingsverliezen buiten beschouwing gelaten [10].

#### Warmtepomp

Uitgangspunten bij verwarmen:

Temperatuur zeewater ligt tussen 278 K en 289 K

Temperatuur naar verwarmingsinstallatie is 45°C, circa 318 K

$$COP = \frac{T_{\max}}{T_{\max} - T_{\min}} = \frac{318}{318 - 278} = 7,95$$

Praktisch gezien is, bij de gegeven temperaturen, een COP van 5 haalbaar [11].

#### Koelmachine

Uitgangspunten bij koelen:

Temperatuur zeewater ligt tussen 284 K en 292 K

Temperatuur naar de luchtbehandelinginstallatie is 10°C, circa 283 K

$$COP = \frac{T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} = \frac{283}{292 - 283} = 31,44$$

Praktisch gezien is, bij de gegeven temperaturen, een COP van 6 haalbaar [11].





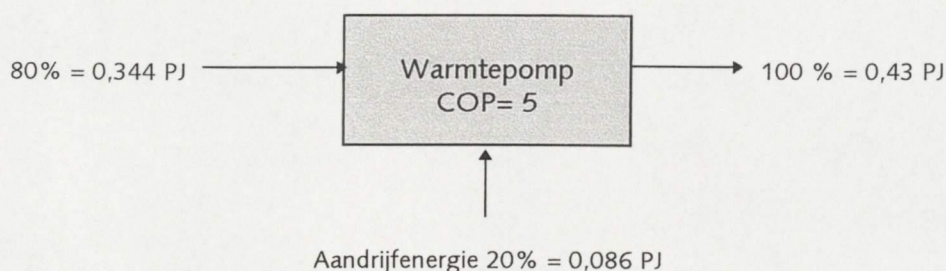
### Jaarrendement

Om de maximale COP te kunnen bereiken dienen warmtepompen en koelmachines zoveel mogelijk in continu bedrijf te werken tegen vollast [12]. Om een hoge SPF (Season Performance Factor) te bereiken kan in de situatie van de luchthaven, waarbij een relatief grote installatie nodig is, gekozen worden voor een aantal warmtepompen en koelmachines, welke afhankelijk van het seizoen aangezet of uitgezet worden. Zo zal de installatie een optimaal rendement hebben.

#### 6.3.3 Energie en warmtepomp

De totale benodigde hoeveelheid warmte voor de gebouwen van de luchthaven bedraagt 0,39 PJ per jaar. Gaan we uit van een systeemverlies (na de warmtepomp) van totaal 10% dan moet er ongeveer 0,43 PJ per jaar door de warmtepomp geleverd worden.

De COP waarde is de verhouding tussen de geleverde energie (in de vorm van warmte) en de aandrijfenergie welke nodig is om de temperatuurverhoging teweeg te brengen.

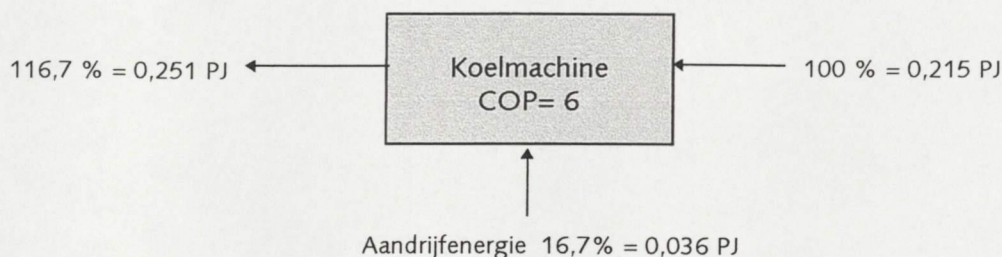


Om de warmtepomp aan te drijven is 20% van de totale afgegeven energie nodig. Uitgaande van een elektrische warmtepomp is de benodigde hoeveelheid aandrijfenergie 0,086 PJ per jaar (wat gelijk is aan circa 23,89 GWh per jaar). De totale hoeveelheid energie uit het zeewater bedraagt circa 0,344 PJ

#### 6.3.4 Energie en koelmachine

De totale benodigde hoeveelheid warmte welke aan de gebouwen van de luchthaven onttrokken moet worden bedraagt 0,195 PJ per jaar. Gaan we uit van een systeemverlies (na de koelmachine) van totaal 10% dan moet er ongeveer 0,215 PJ per jaar aan warmte onttrokken worden.

De COP waarde is de verhouding tussen de hoeveelheid energie welke aan de ruimte onttrokken wordt en de aandrijfenergie welke hiervoor nodig is.





Om warmte te onttrekken dient, met een COP van 6, aandrijfenergie toegevoerd te worden met een hoeveelheid welke minimaal een zesde deel is van de hoeveelheid onttrokken energie. Uitgaande van een elektrische koelmachine bedraagt de benodigde aandrijfenergie 0,036 PJ per jaar (wat gelijk is aan circa 10 GWh per jaar).

## 6.4 Benodigde hoeveelheid water en pomp energie

### 6.4.1 Uitgangspunten

De hoeveelheid zeewater welke rondgepompt moet worden in het systeem is sterk afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de hoeveelheid water dat het systeem in en de hoeveelheid water welke het systeem uit gaat.

Omdat het bij de berekeningen gaat om 'orde grootte' is uitgegaan van gemiddelde temperaturen en gemiddelde drukken, te weten:

- een maximaal gemiddelde temperatuurverhoging van het zeewater tijdens het koelen van 4°C.;
- een maximaal gemiddelde temperatuurverlaging van het water tijdens het verwarmen van 4°C.;
- geen thermische verliezen in leidingen en warmtewisselaar e.d.;
- het totaal gemiddelde drukverlies over de leidingen tussen de warmtewisselaar, warmtepomp en koelmachine bedraagt 1 bar (leidingwater);
- het totaal gemiddelde drukverlies over de leidingen waar het zeewater door gepompt wordt bedraagt 1,5 bar.

### 6.4.2 Benodigde hoeveelheid water primaire (zeewater)

De totale hoeveelheid energie welke aan het zeewater wordt onttrokken en welke aan het zeewater wordt afgegeven is 0,595 PJ (0,344 + 0,215).

De benodigde hoeveelheid zeewater welke per jaar nodig is om energie aan af te staan of te onttrekken bedraagt:

$$m = \frac{E_{\text{totaal}}}{c * \Delta t} = \frac{595 \cdot 10^{12}}{3930 * 4} = 37,85 \cdot 10^9 \text{ kg} \quad V = \frac{m}{\rho} = \frac{37,85 \cdot 10^9}{1025} = 36,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

met:

$m$  = massa

$c$  = soortelijke warmte zeewater (1 liter = 3930 J/kg.K)

$V$  = volume in m<sup>3</sup>

$\rho$  = dichtheid van zeewater is 1025 kg/m<sup>3</sup>

$\Delta t$  = maximum temperatuur welke de warmtewisselaar onttrekt aan het zeewater.

### 6.4.3 Benodigde hoeveelheid water secundaire (zoetwater)

Uitgaande van een warmtewisselaar zonder thermische verliezen is de overdracht van energie aan beide zijden van de warmtewisselaar even groot. Als er 0,595 PJ energie overdracht plaatsvindt aan de primaire kant van de warmtewisselaar, dan





zal er aan de secundaire kant van de warmtewisselaar ook 0,595 PJ overgedragen worden.

Uitgaande van leidingwater als vloeistof, dan dient de totale hoeveelheid water, welke per jaar de warmtewisselaar passeert om energie aan af te staan of in op te slaan, te zijn:

$$m = \frac{E_{\text{totaal}}}{c * \Delta t} = \frac{595 \cdot 10^{12}}{4180 * 4} = 35,6 \cdot 10^9 \text{ kg} \quad V = \frac{m}{\rho} = \frac{35,6 \cdot 10^9}{998} = 35,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

met:

$c$  = soortelijke warmte zeewater (1 liter = 4180 J/kg.K)

$\rho$  = dichtheid van water is 998 kg/m<sup>3</sup>

#### 6.4.4 Pompenergie

Aan de primaire kant van de warmtewisselaar:

Per jaar dient minimaal 36,5 miljoen kubieke meter zeewater rondgepompt te worden. Voor het aandrijven van de pompen is een hoeveelheid elektrische energie nodig van ongeveer [13]:

$$E_{\text{el.}} = \frac{\rho * g * V * \Delta H}{\eta_{\text{pomp}} * t} = \frac{1025 * 10 * 36,5 \cdot 10^6 * 15}{0,7 * 3600} = 2,25 \text{ GWh/jaar.}$$

met:

$g$  = de zwaartekracht van 10 m/sec<sup>2</sup>

$\Delta H$  = opvoerhoogte van de pomp (drukverlies in meters waterkolom)

Het benodigde pompvermogen is afhankelijk van het maximum waterdebiet en wordt op 650 KW geschat (het piekvermogen welke in de winter zal voorkomen is bepalend voor de grootte van het pompvermogen).

Aan de Secundaire kant van de warmtewisselaar:

Per jaar dient minimaal 35,7 miljoen kubieke meter leidingwater rondgepompt te worden. Voor het aandrijven van de pompen is een hoeveelheid aan elektrische energie nodig van ongeveer [5]:

$$E_{\text{el.}} = \frac{\rho * g * V * \Delta H}{\eta_{\text{pomp}} * t} = \frac{998 * 10 * 35,7 \cdot 10^6 * 10}{0,7 * 3600} = 1,41 \text{ GWh/jaar.}$$

Het benodigde pompvermogen wordt geschat op 450 kW (piekvermogen).



## 6.5 Totale benodigde hoeveelheid primaire energie

De totale hoeveelheid elektrische energie welke nodig is om de warmtepompen en koelmachines aan te drijven bedraagt 33,89 GWh per jaar (23,89 GWh voor verwarmen en 10 GWh voor koelen).

De totale hoeveelheid elektrische energie welke nodig is om de pompen aan te drijven bedraagt 3,13 GWh per jaar (2,25 GWh primaire en 1,41 GWh secundaire).

Om een hoeveelheid thermische energie van 179 GWh per jaar te kunnen leveren, in de vorm van warmte en koude, is een hoeveelheid elektrische energie van 37,55 GWh nodig.

## 6.6 Aandachtspunten

Het zeewater bevat voldoende energie om te kunnen gebruiken voor het verwarmen en koelen van alle op het vliegveldeiland aanwezig zijnde gebouwen. In eventueel verder onderzoek dient hier rekening mee gehouden te worden.

Als het zeewater tevens voor de verwarming van tapwater, van ongeveer 65°C, wordt gebruikt dient een extra warmtepomp opgenomen te worden of dient de watertemperatuur te worden verhoogd met behulp van bijvoorbeeld een boiler.

De mogelijkheid om de warmtewisselaar in zee te plaatsen dient nader onderzocht te worden. Dit levert een besparing op van een pompinstallatie plus de benodigde energie die nodig is om de pomp aan te drijven.

## 6.7 Kosten

De kosten van de installaties welke nodig zijn om energie uit zeewater te winnen, voor het verwarmen en het koelen van de gebouwen op de luchthaven, zijn aangegeven in onderstaande raming. De raming is gebaseerd op de kosten tot en met de warmtepomp- en koelmachine installatie, vanaf hier worden de installaties geacht te zijn inbegrepen in de kostprijs van de gebouwen. De verwarmingsinstallaties dienen te worden uitgevoerd als lage temperatuurverwarming, dit zal extra kosten met zich meebrengen. Deze kosten worden voor een groot deel gecompenseerd omdat geen ketelinstallatie nodig is.

Onderstaande kostenraming is exclusief btw en gebaseerd op het prijspeil van 2000. De onnauwkeurigheidsmarge is plus of min 25%.

Energie uit zeewater		
Post	Kosten totaal kfl.	Opmerking/ bron
Warmtewisselaar (titanium) 40 MWth.	1.400	0,07 kfl./kWth./°C
Pomp + motor 650 kW	780	1,2 kfl./kW, Misset
Pomp + motor 450 kW	540	1,2 kfl./kW, Misset
Leidingen zeewater 4km.	2.000	Bouwdienst
Warmtepompen (50 MWth. piek)	20.000	0,40 kfl./kWth.
Koelmachines (25 MWth. piek)	8.750	0,35 kfl./kWth.
Installatie	1.000	
Engineering	3.447	10%
<b>Totaal</b>	<b>37.917</b>	



## 7. Windenergie

### 7.1 Inleiding

De plaatsing van windturbines op de wegverbinding naar het vliegvelddeiland neemt een aantal belangrijke nadelen weg welke er doorgaans kleven aan offshore windenergie, te weten:

- hoge kosten voor de aansluiting op het elektriciteitsnet;
- slecht bereikbaar (kostbaar onderhoud en extra aandacht aan beschikbaarheid);
- hoge aanlegkosten (installatiekosten);
- kostbare fundatie.

De combinatie windmolens en een luchthaven introduceert daarentegen een belangrijke beperking met betrekking tot de bouwhoogte van de windmolens. De ICAO (International Civil Aviation Organisation) heeft met betrekking tot de veiligheid van vliegtuigen maximale obstakelhoogten aangegeven voor de omgeving nabij start- en landingsbanen. De maximale bouwhoogte (obstakel limitatie vlakken) is sterk gerelateerd aan de ligging van de start- en landingsbanen. Na interpretatie van deze eisen lijkt een maximale bouwhoogte van 60 meter boven het maaiveld buiten een straal van 5 kilometer van de start- en landingsbanen reëel.

Bij de toepassing van windenergie is gekeken naar twee mogelijkheden t.w.:

1. Plaatsing van windmolens op de vaste brugverbinding naar het vliegvelddeiland.
2. Plaatsing van windmolens op de verbindingsdam naar het vliegvelddeiland.

De bovengenoemde opties zullen slechts in kosten met elkaar verschillen.

### 7.2 Plaatsing

#### 7.2.1 Beschikbare ruimte

Het vliegvelddeiland heeft een maaiveldhoogte van NAP +5 meter. De kruinhoogte van de dijk rondom het eiland zal op circa NAP +16 meter gelegd worden om de overslag van golven beperkt te houden [15]. De kruinhoogte van de dijk wordt verondersteld een gelijke hoogte te hebben als de hoogte van de bovenkant van de vaste brugverbinding of verbindingsdam.

Als er van uitgegaan wordt dat de toe te passen windmolens alle dezelfde hoogte krijgen, wat op basis van vormgeving en economie te veronderstellen is, geeft dit bij een maximale bouwhoogte van 60 meter windmolens met een maximale tiphoogte van 49 meter.

De verbinding naar het vliegvelddeiland is ongeveer 20 kilometer lang. De eerste 4 kilometer dient vrij gehouden te worden van windmolens i.v.m. eventuele vogelhinder, geluidsoverlast en met het oog op visuele en landschappelijke aspecten. Dit in combinatie met de hoogtebeperking, voor bouwen in de nabijheid



van een luchthaven, geeft een netto ruimte van ongeveer 12 strekkende kilometer om windmolens te plaatsen.

### 7.2.2 Aantal windmolens

Voor het bepalen van het aantal te plaatsen windmolens is de onderlinge afstand tussen de windmolens en de beschikbare ruimte van belang.

De minimale afstand tussen de windturbines is afhankelijk van de mate waarin de windturbines elkaar onderling beïnvloeden (met betrekking tot elkaars windvang). Mede op basis van de wijze van opstellen van de windmolens en de overheersende windrichting wordt voor offshore windmolens een onderlinge afstand van 7 tot 9 maal de rotordiameter aangehouden [16]. Door de Noordwestelijke ligging van de verbinding naar het vliegveld eiland wordt in dit geval een factor van minimaal 9 aangehouden.

Indien we uitgaan van een minimale vrije ruimte tussen de rotor en het maaiveld (bovenkant wegdek) van 6 meter dan kan er een rotordiameter van maximaal 43 meter gekozen worden. Bij een totale beschikbare ruimte van 12 strekkende kilometer geeft dit 30 windmolens.

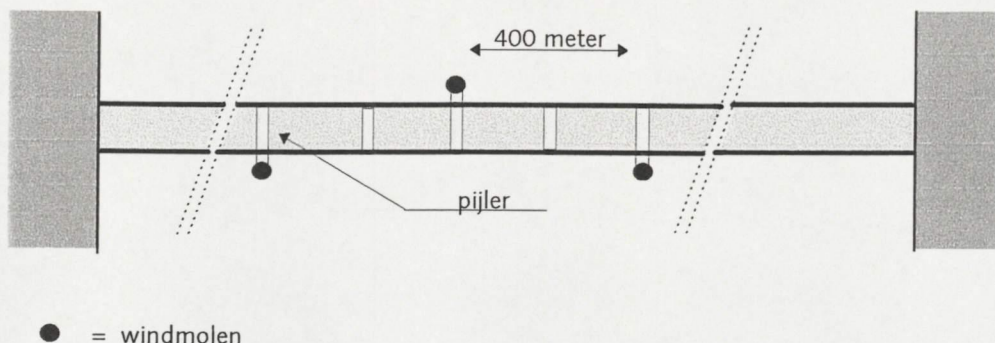
### 7.2.3 Opstelling en fundatie

De windmolens kunnen worden geplaatst op de vaste brugverbinding of op de verbindingsdam.

#### Vaste brugverbinding

Bij plaatsing van de windmolens op de vaste brugverbinding zal zoveel mogelijk gebruik worden gemaakt van de civiele constructie van de brug. Indien we uitgaan van een betonnen brug (een uitbouwbrug), dienen de windmolens op de pijlers van de brug geplaatst te worden. De krachten welke door de windmolens veroorzaakt worden kunnen direct worden afgevoerd naar de pijlers. Wanneer de pijlers een onderlinge afstand hebben van 200 meter zullen de windmolens om de 400 meter geplaatst worden.

Boven-aanzicht brugverbinding





Indien de windmolens geplaatst worden op de betonnen uitbouwen van de brugpijlers is het van belang dat de krachten die op de fundatie worden uitgeoefend niet te groot worden. Indien de krachten, in verhouding tot de bouwconstructie, een dominante rol gaan spelen zal dit leiden tot aanzienlijke extra kosten.

Gezien de betrekkelijk kleine rotordiameter van de windmolen, waardoor de masthoogte beperkt kan blijven, zijn de ontwerpkrachten enigszins beperkt gebleven t.w. [16]: horizontaal 300 kN, verticaal 2000 kN en het moment op de fundatie is 10 MNm.

### Verbindingsdam

Bij de verbindingsdam kunnen de windmolens een zelfde opstelling krijgen als bij de vaste brugverbinding. De fundatie zal hier bestaan uit een met beton verzwaarde constructie welke in de dam opgenomen wordt.

## 7.3 Windenergie en windaanbod

Windturbines maken gebruik van horizontale luchtstromingen. Als een constante windsnelheid wordt beschouwd door een vaste doorstroomoppervlakte, dan is het vermogen van de wind:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * A$$

met:

- $P_{wind}$  = vermogen in de wind (W)
- $\rho$  = de dichtheid van de lucht (1,225 kg/m<sup>3</sup>)
- $v$  = de windsnelheid (m/sec)
- $A$  = horizontaal oppervlak (m<sup>2</sup>)

Het vermogen in de wind is dus evenredig met de door het oppervlak gevangen hoeveelheid wind en evenredig met de derde macht van de windsnelheid.

Op de locatie van de windmolens heerst een gemiddelde windsnelheid van ongeveer 8 m/sec op ashoogte (ashoogte ligt op NAP +43,5 meter) [17].

Voor de windsnelheid van 8 m/sec betekent dit een energiedichtheid van 314 W/m<sup>2</sup>.

## 7.4 Bepalen vermogen van de windturbine

Niet alle energie die aanwezig is in de wind kan worden omgezet in mechanische energie. Het conversieredement van windvermogen naar mechanische energie, de  $C_p$ -waarde, is in de praktijk niet groter dan 0,5 [16].

Op basis van bovengenoemde gegevens is uitgerekend dat bij de gemiddelde windsnelheid het asvermogen van een windturbine 230 kW is.

Bij het bepalen van het vermogen van de generator van de windmolen is het van belang te weten welk maximaal vermogen geleverd wordt. Als een windturbine



goed is aangepast aan het windregiem waarin deze wordt geplaatst geldt bij benadering dat de turbine pas gestopt wordt bij 3 maal de gemiddelde windsnelheid. Bij offshore toepassing zal deze waarde iets lager zijn (vanwege de hogere ontwerpsnelheid). Afhankelijk van het ontwerp van de rotorbladen wordt de windturbine zo geregeld dat bij het nominale vermogen van de turbine de energie uit de wind nagenoeg constant blijft, op dit punt zal ook de  $C_p$ -waarde maximaal zijn.

Uitgaande dat bij het ontwerp van de windmolen een nominale windsnelheid van 1,5 maal de gemiddelde windsnelheid wordt aangehouden en de verliezen in een eventuele tandwielenkast zijn 5%, dan is asvermogen van de generator ongeveer 730 kW.

## 7.5 Energie opbrengst

De energieopbrengst van de windturbine is sterk afhankelijk van het windaanbod. Bij opstelling van windturbines op zee wordt doorgaans uitgegaan van een equivalent aan opbrengst welk gelijk is aan 3000 vollast uren (het aantal uren dat de windturbine draait zal ongeveer 6000 zijn).

Uitgaande van 30 windmolens geeft dit een jaaropbrengst van ongeveer 61 GWh.

De uitgebreide berekening is te zien in bijlage 2: Windenergie.

## 7.6 Aandachtspunten

### 7.6.1 Geluid

Wat betreft het aspect geluid geldt als uitgangspunt dat windturbines niet méér geluid mogen produceren dan het aanwezige achtergrondgeluidsniveau [18]. In hoeverre er geluidsoverlast kan ontstaan op het strand of op de boulevard dient nader onderzocht te worden.

### 7.6.2 Veiligheid

Naast de in de inleiding genoemde veiligheid voor vliegtuigen dient nader onderzoek gedaan te worden naar de invloeden van de windturbines op het overige verkeer, aspecten zoals bladbreuk, ijsafwerping, schittering van draaiende bladen, hinderlijke schaduwen en windverstoring dienen hierin meegenomen te worden. Tevens behoeft de eventuele schadelijke invloed van de windmolens op vogels nader bekeken te worden.

### 7.6.3 Extra windmolens

Als bijvoorbeeld aan weerszijden, parallel aan de verbindingdam of brugconstructie, windmolens in zee geplaatst worden, kan worden geprofiteerd van de aanwezige infrastructuur. De windmolens zijn relatief eenvoudig bereikbaar zijn en kunnen worden aangesloten op de elektriciteitskabel naar het vliegveld eiland. Deze optie dient nader onderzocht te worden.

### 7.6.4 Beleid

In de nota 'Duurzame energie in opmars; Actieprogramma 1997-2000' van het Ministerie van Economische Zaken wordt voor 2020 een bijdrage van 10% duurzame energie voorzien. Windenergie is daarbij een optie, waarvan een belangrijke bijdrage wordt verwacht. Om deze bijdrage te kunnen realiseren zal, het geïnstalleerde vermogen aan windturbines op moeten lopen tot 2750 MW in 2020. Parallel aan de uitbreiding van het vermogen op land, wordt uitgegaan van geleidelijke ontwikkeling van plaatsing op zee [19].

### 7.7 Kosten

Windmolens op vaste brugverbinding		
Post	Kosten totaal kfl.	Opmerking/ bron
30 windmolens van 680 kW	48.960	2,4 kfl./kW
Fundatie	15.000	Bouwdienst
Aansluiting op net	600	
Installatie	300	
Engineering	3.234	5%
<b>Totaal</b>	<b>68.103</b>	

Windmolens op verbindingsdam		
Post	Kosten totaal kfl.	Opmerking/ bron
30 windmolens van 680 kW	48.960	2,4 kfl./kW
Fundatie	6.000	Bouwdienst
Aansluiting op net	600	
Installatie	300	
Engineering	2.793	5%
<b>Totaal</b>	<b>58.653</b>	

Bovenstaande kostenraming is exclusief btw en gebaseerd op het prijspeil van 2000. De onnauwkeurigheidsmarge is plus of min 25%.



## 8. Fotovoltaïsche zonne-energie

### 8.1 Inleiding

Met behulp van fotovoltaïsche (PV) systemen wordt zonlicht direct omgezet in elektriciteit. Het potentieel van PV hangt sterk af van het aantal beschikbare zonnuren en de beschikbare ruimte om deze systemen te kunnen toepassen. Het totale technische potentieel aan elektrisch vermogen door PV wordt voor Nederland geschat op 110 GW-piek [20].

### 8.2 Beschikbare ruimte

Op het vliegvelddeiland is 1100 ha. bebouwing aanwezig, dit is inclusief wegen, start- en landingsbanen, parkeergelegenheid etc. Bij de inschatting naar de totale hoeveelheid gebouwen welke nodig is voor de luchthaven op het eiland, is gekeken naar de infrastructuur van het huidige Schiphol in combinatie met de geplande activiteiten op het vliegvelddeiland. Geschat wordt dat 30 ha. ruimte nodig is voor de gebouwen van de luchthaven (terminalcomplexen, kantoren, loodsen en bedrijfsverzamelgebouwen). Indien 50% van de daken, van de gebouwen, geschikt gemaakt worden om te kunnen voorzien worden van fotovoltaïsche zonnecellen is een oppervlakte van  $15 \cdot 10^4 \text{ m}^2$  beschikbaar. Van deze oppervlakte kan constructief gezien ongeveer 70% ( $10,5 \cdot 10^4 \text{ m}^2$ ) effectief benut worden voor het winnen van zonne-energie.

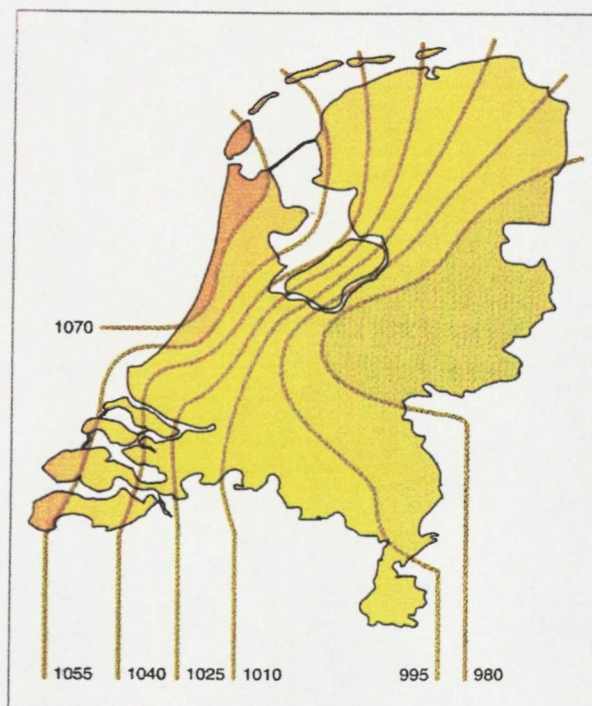
### 8.3 Energieopbrengst

De opbrengst van een vierkante meter zonnepaneel is in Nederland momenteel ongeveer 100 kWh per jaar. Dit is circa 10% van de totale aangeboden hoeveelheid zonne-energie.

Door de gunstige ligging van het vliegvelddeiland is de gemiddelde opbrengst per vierkante meter zonnepaneel ongeveer 110 kWh per jaar [21].

De omzetting van de opgewekte elektrische spanning naar een bruikbaar spanningsniveau geeft een verlies van 20% waardoor de effectieve opbrengst per vierkante meter zonnecel ongeveer 86 kWh per jaar is [22].

Indien de totale beschikbare oppervlakte voorzien wordt van fotovoltaïsche zonnecellen dan is de totale jaaropbrengst aan bruikbare elektrische energie ongeveer 9 GWh en het piekvermogen 16 MW [21].



Zonaanbod in kWh/m<sup>2</sup> per jaar



## 8.4 Aandachtspunten

De prijs van fotovoltaïsche zonne-energie is in belangrijke mate afhankelijk van de volgende factoren:

- de combinatie van de zonnecellen en de dakconstructie;
- de kostprijs van de zonnecellen;
- de opbrengst (het rendement) van de zonnecellen.

Door verbeterde zonneceltechnologie, verbeterde productieprocessen en schaalvergroting is verwachtingen dat de prijs van fotovoltaïsche zonne-energie de komende jaren aanzienlijk zal dalen, een factor 4 medio 2010 wordt als haalbaar gezien [23].

In deze studie is de mogelijkheid voor het plaatsen van zonnecellen in combinatie met de gebouwen voor de luchthaven bekeken. Als bij het ontwerpen van de gebouwen direct rekening gehouden wordt met de toepassing van zonnecellen (b.v. in de dakconstructie) is het mogelijk de zonnecellen te gebruiken als bouw materiaal waardoor kosten bespaard kunnen worden. Transparante (deels luchtdoorlatende) zonnecellen komen hier zeker voor in aanmerking.

Nader onderzoek zal gedaan moeten worden naar de vraag in hoeverre reflectie van het licht door de zonnecellen nadelige invloeden kan hebben op de veiligheid van het vliegverkeer.

## 8.5 Kosten

De kosten voor fotovoltaïsche zonne-energie zijn momenteel 1100,- per vierkante meter voor ondoorzichtige cellen. Transparante cellen kosten ongeveer 1400,- per vierkante meter. Dit zijn bedragen welke gelden voor volledig geïnstalleerde panelen. Als de panelen als bouw materiaal opgenomen worden in de dakconstructie zal ongeveer 50,- per vierkante meter worden bespaart aan bouwkosten.

De totale kosten voor 105.E3 vierkante meter aan zonnecellen bedragen ongeveer 140 Miljoen gulden (prijspeil 2000, exclusief btw, plus of min 25%).



## 9. Aansluiting op het elektriciteitsnet

### 9.1 Inleiding

Indien het vliegveldeiland wordt aangesloten op het landelijke elektriciteitsnet zijn de volgende items in belangrijke mate bepalend voor de soort aansluiting:

- Aansluitvermogen;
- Lengte van de verbinding tussen het net en de verbruikers/ opwekkers;
- Spanningsniveau;
- Gewenste betrouwbaarheid van de verbinding;
- De mogelijkheid om aan te sluiten op het landelijke elektriciteitsnet.

### 9.2 Vermogen

Bij het bepalen van het aansluitvermogen is het maximale elektrische vermogen van belang, dit geldt zowel voor het vermogen ten behoeve van verbruikers, als het gezamenlijke maximale vermogen van onderstaande opwekkers:

1. 30 windmolens van elk 680 kW = 20.400 kW.
2. 810 stromingsturbines van elk 5 kW = 4.050 kW.
3. 52 vervalsturbines van elk 600 kW = 31.200 kW.
4. Fotovoltaïsche. = 16.000 kW. (piekvermogen, indien alle daken van de luchthavengebouwen voorzien worden van PV)

Combinatie 1, 3 en 4 leveren het grootste gelijktijdige vermogen van circa 68 MW.

Het jaarlijkse elektriciteitsverbruik (zie hoofdstuk 4 par. 4.3.2) van het totale vliegveldeiland, ervan uitgaande dat de optie energie uit zeewater (hoofdstuk 6) in het ontwerp wordt meegenomen, is ongeveer 270.E6 kWh.

Het gemiddelde elektrische vermogen is dan ongeveer 30 MW (E/t).

Het piekvermogen zal voorkomen in de winter en wordt geschat op 4 maal [24] het gemiddelde vermogen, wat neer komt op 120 MW.

Een aansluiting met een vermogen van 200 MVA is nodig.

### 9.3 Transport

De transportkabel naar het vliegveldeiland kan, afhankelijk van het soort verbinding tussen het eiland en het vasteland, door de verbindingsdam of door de brugconstructie aangebracht worden. Het aanbrengen van kabels via de zeebodem is duurder en de kabels zijn kwetsbaarder. Het plaatsen van hoogspanningsmasten, op zee, lijkt niet reëel, de kosten hiervan zullen erg hoog zijn en nabij het eiland geldt een beperking met betrekking tot de bouwhoogte.

Bij het dimensioneren van de voedingskabel is de stroom (en de relatie met de spanning) door de geleiders bepalend voor de diameter van de aders. Voor het bepalen van het spanningsniveau voor de voedingskabel dient inzicht verkregen te worden in de stroom door de aders.



Indien een wisselspanning van 3\*150 kV gevoerd wordt is de stroom door de aders:

$$I = \frac{P}{V * \sqrt{3} * \cos\phi} = \frac{120.10^6}{150.000 * \sqrt{3} * 0,8} = 577 A$$

Met:

$I$  = stroom in ampère  
 $P$  = maximale vermogen welke kan optreden in watts  
 $V$  = spanning tussen de geleider in volts  
 $\cos\phi$  = arbeidsfactor

De locatie waar de brugverbinding of dam naar het vliegveldeiland aansluit op het vasteland ligt tussen Katwijk en Noordwijk. De dichtstbijzijnde aansluitmogelijkheid, op het 150 kV elektriciteitsnet, is in de buurt van Leiden. In het station Leiden komen 3 lijnen van 150 kV bij elkaar en in Leiden is opwekking aanwezig van 81 MW [25] zodat voldoende betrouwbaar vermogen aanwezig lijkt. Of het eventuele aansluitpunt in Leiden direct geschikt is voor een aansluiting van 200 MVA dient nader te worden onderzocht.

Als op basis van het maximale spanningsverlies en warmteontwikkeling in de kabel de diameter van de aders bepaald wordt, zijn aders nodig met een diameter van ongeveer 400 mm<sup>2</sup> [26].

Gezien de lengte van de verbinding en het gegeven dat een groot deel van de verbinding in kabel uitgevoerd dient te worden, waardoor een aanzienlijke blindstroom zal ontstaan (ten gevolge van de condensatorwerking van de kabel) is het efficiënt transporteren van het vermogen niet mogelijk en zal de benodigde kabel i.v.m. het blindvermogen, welke ontstaat door de aanwezige blindstroom, aanzienlijk zwaarder uitgevoerd dienen te worden. Extra transportcapaciteit moet worden ingekocht om de kabel op spanning te houden. Tevens is door het wisselende vermogende stabiliteitsproblematiek te voorzien.

Er dient nader onderzoek te worden gedaan naar de mogelijkheid om de verbinding zo effectief mogelijk tot stand te laten komen, een combinatie van bovengrondse lijnen en kabels kan een mogelijkheid zijn indien we uitgaan van een AC-verbinding.

Een z.g.n. HVDC- verbinding (High Voltage Direct Current) dient in dit nadere onderzoek te worden meegenomen. Hierbij wordt middels vermogenselektronica de wisselspanning omgevormd naar een gelijkspanning van b.v. 400 kV= waarmee het vermogen getransporteerd wordt. Op het vliegveldeiland wordt de spanning weer naar een bruikbaar spanningsniveau teruggebracht.

De investeringen voor de benodigde HDVC-converters zijn relatief hoog. Een HVDC- verbinding biedt echter belangrijke voordelen t.w.:

- geen blindstroom;



- geen sinusvormige spanning, de kabel wordt hierdoor optimaal gebruikt , waardoor de capaciteit  $\sqrt{2}$  maal groter wordt [27];
- er kan een hogere spanning wordt gevoerd waardoor de stroom lager is.

## 9.4 Aandachtspunten

In deze studie is voornamelijk gekeken naar een aantal mogelijkheden van duurzame energiewinning in combinatie met het vliegveldeiland. Een aansluiting op het landelijke elektriciteitsnet is hierbij als vanzelfsprekend aangenomen.

Bij de definitieve inrichting van de infrastructuur voor het vliegveldeiland dient de mogelijkheid van bijvoorbeeld een gasgestookte elektriciteitscentrale (WKK) op het eiland zeker onderzocht te worden. Naast deze centrale kan een aansluiting, met een beperkt vermogen, op het openbare elektriciteitsnet gemaakt worden waarmee de overschotten aan elektriciteit aan het net geleverd kunnen worden. Deze verbinding kan tevens als back-up voorziening dienen om de betrouwbaarheid en de beschikbaarheid van vitale onderdelen op de luchthaven te vergroten.

De kosten voor het aansluiten van het vliegveldeiland op het openbare elektriciteitsnet zijn gezien de geschetste problemen en onzekerheden zonder nader onderzoek nauwelijks in te schatten, deze kunnen variëren van enkele tot tientallen miljoenen guldens.





## 10. Economie

### 10.1 Uitgangspunten

Bij het berekenen van de kostprijs van de verschillende energie opties is er vanuit gegaan dat:

- de verbindingdam en de brugconstructie tussen het Vlieveldeiland en het vasteland zijn inbegrepen in de kosten voor het aanleggen van het eiland: alleen de meerkosten van de installaties, benodigd voor de verschillende energieopties, zijn hier inbegrepen;
- een elektriciteitskabel naar het openbare elektriciteitsnet nodig is voor het vliegvelddeiland en dat deze voldoende capaciteit heeft om de verschillende energieopwekkers er op aan te sluiten: alleen de aansluitkosten op deze verbinding zijn inbegrepen in de kostenramingen;
- de kostenopstelling exclusief btw is, gebaseerd op prijspeil 2000 en een onnauwkeurigheidsmarge heeft van plus of min 25%.

### 10.2 Investering

#### 10.2.1 Investeringskosten

De totale bouwkosten (incl. engineering) zijn in de betreffende hoofdstukken aangegeven, de z.g.n. directe kosten. Om de totale investeringskosten te kunnen bepalen dienen ook de indirecte kosten welke gepaard gaan met de voorbereidingen van het project (projectontwikkeling, beleidsstudies, MER-rapportage etc.) te worden meegenomen, deze worden geschat op 6% van de bouwkosten.

Energievorm	directe kosten in kfl.	indirecte kosten in kfl.	Investeringskosten in kfl.
waterkracht, stroming	75.900	4.554	80.454
waterkracht, verval	170.885	10.253	181.885
energie uit zeewater	37.917	2.275	40.192
windenergie, molens op brug	68.103	4.086	72.190
windenergie, molens op dijk	58.653	3.519	62.172
fotovoltaïsche	140.000	8.400	148.400

#### 10.2.2 Financiering

Bij de investering is uitgegaan dat de gelden die nodig zijn om de 'Duurzame energie projecten' te financieren geleend worden. Er is een rentepercentage van 5% aangehouden.

### 10.3 Exploitatielasten

De jaarlijkse bedrijfskosten, de kosten voor onderhoud en beheer, worden geraamd op ongeveer 2% van de totale bouwkosten, dit is een gemiddeld percentage welke gedurende de gehele economische levensduur wordt gehanteerd.

Bij de optie thermische energie uit zeewater is de elektrische energie, die nodig is om de diverse machines aan te drijven, als bedrijfskosten opgevoerd.



## 10.4 Afschrijving

### 10.4.1 Afschrijvingskosten

Bij de afschrijvingskosten is uitgegaan van de totale investeringskosten minus de restwaarde, welke bestaat nadat de betreffende installaties, inclusief de civiele voorzieningen, economisch zijn afgeschreven. De afschrijving is gebaseerd op het annuïteitensysteem, een jaarlijks gelijkblijvend bedrag aan afschrijving en intrest.

### 10.4.2 Afschrijvingstermijn

Bij het bepalen van de afschrijvingstermijn is een inschatting gemaakt van de economische levensduur (economische veroudering) in combinatie met de technische levensduur. Het aandeel elektrotechnische en werktuigkundige installatie (bewegende delen), waarvoor doorgaans een levensduur van 10 tot 15 jaar wordt gehanteerd, in relatie tot de civiele constructies (voor statische onderdelen zoals beton en staalconstructies wordt vaak 60 jaar of langer aangehouden) van het project zijn hierbij bepalend geweest.

De volgende afschrijvingstermijnen zijn gehanteerd:

- energie uit waterkracht, stroming : 25 jaar;
- energie uit waterkracht, verval : 25 jaar;
- energie uit zeewater : 12 jaar;
- windenergie : 15 jaar;
- fotovoltaïsche zonne-energie : 15 jaar.

## 10.5 Kostprijs per kilowattuur

Er is uitgegaan van de bovengenoemde uitgangspunten, waarbij geen enkele vorm van subsidie is meegenomen. In hoeverre subsidies een rol kunnen spelen bij de ontwikkeling van de duurzame energievormen zal sterk afhangen van de wijze waarop de overheid het gehele project in de markt zet.

Energievorm	kostprijs per kilowattuur in guldens
waterkracht, stroming	1,18
waterkracht, verval	0,12
energie uit zeewater *	0,06
windenergie, molens op brug	0,12
windenergie, molens op dijk	0,11
fotovoltaïsche	1,79

\* inclusief het aandeel elektriciteit, waarvoor 14 cent is aangehouden

De uitgebreide berekening is te zien in bijlage 3: Economie.

## 10.6 Energieprijzen

De huidige energieprijzen zijn sterk afhankelijk van vraag en aanbod op de markt. De gemiddelde productiekosten (brandstofkosten inclusief afschrijving) van fossiele- en kernenergie, welke sterk gekoppeld zijn aan de olieprijs, bedragen ongeveer 6 tot 8 cent.



Om een economische vergelijking te maken moeten bij deze kosten de Regulerende Energiebelasting van circa 3 cent en de waarde van Groenlabels van ongeveer 4 cent bij opgeteld worden. Het equivalent van de kosten voor fossiele energie komt dan op ongeveer 14 cent per kilowattuur.

De door windturbines en fotovoltaïsche zonnecellen opgewekte elektriciteit zal, bij teruglevering aan het net, op de markt minder opbrengen dan elektriciteit waarbij van tevoren nauwkeurig ingeschat kan worden wat de productie zal zijn gedurende een bepaalde periode. Juiste voorspellingen in combinatie met bilaterale contracten, met bijvoorbeeld regelbare conventionele eenheden, zijn nodig om boetes te voorkomen wanneer er op onverhoopt onvoldoende duurzame energie kan worden geleverd, terwijl dit wel gecontracteerd is.

## 11. Beleid en Milieudoelstellingen

### 11.1 Europees beleid

Mede door het Europese beleid wordt de Nederlandse energiesector thans ingrijpend geliberaliseerd. De overheid is hierdoor tot een grondige herziening van haar positie in deze markt genoodzaakt, dit heeft inmiddels geleid tot een aantal wetswijzigingen en beleidsaanpassingen.

### 11.2 Elektriciteit- en gaswet

Inmiddels is in Nederland de nieuwe Elektriciteitswet vastgesteld. De Elektriciteitswet heeft als belangrijkste uitgangspunten marktgerichtheid, vrije toegang en toezicht op de tarieven en het elektriciteitsnetwerk.

In de notitie "Gasstromen" heeft het Ministerie van Economische Zaken in hoofdlijnen het Gasbeleid van de Rijksoverheid uiteengezet. De notitie moet uiteindelijk leiden tot een nieuwe Gaswet, waarbij de uitgangspunten nagenoeg gelijk zullen zijn aan die van de Elektriciteitswet.

De belangrijkste punten uit de nieuwe wetgeving zijn, dat elektriciteit en gas uiterlijk in 2007 gewone producten zijn die iedereen van een aanbieder naar keuze betreft en waarmee, onder bepaalde voorwaarden, vrij gehandeld kan worden. De Elektriciteitswet voorziet tevens in een strikte scheiding tussen infrastructuur en exploitatie van producten en diensten.

### 11.3 Duurzame energie

De Nederlandse overheid streeft naar een toenemende duurzaamheid met betrekking tot het energiegebruik. Die ontwikkeling moet plaatsvinden in combinatie met de hierboven geschetste veranderingen in de markt. Gezien de voortgang, en de prognoses met betrekking tot deze doelstelling is het niet reëel te veronderstellen dat dit gerealiseerd zal worden zonder instrumenten als: heffingen, het opleggen van een verplichte hoeveelheid energie uit duurzame bronnen, subsidies en het stimuleren van R&D. Daarbij komt nog dat marktwerking op zich de ondernemers niet zal uitnodigen om extra inspanningen te leveren voor het behalen van de gestelde doelen, concurrentie speelt hier immers een te dominante rol.

Naast de Regulerende Energie Belasting, diverse convenanten en subsidies ontwikkelt het Ministerie van Economische Zaken momenteel een systeem van groencertificaten. Het systeem splitst de waarde van duurzame energie in twee componenten, geproduceerde energie en de meerwaarde van duurzaamheid uitgedrukt in groencertificaten. Een producent van duurzame energie ontvangt groencertificaten. Tussen de overheid en de energiesector kunnen afspraken worden gemaakt over een verplicht aandeel in duurzame energie, terwijl de afnemers kunnen kiezen tussen fossiele en duurzame energie. Het groencertificaat is het bewijs dat er een hoeveelheid energie is geleverd welke overeenkomt met de hoeveelheid ingekochte duurzame energie. Er kan vrij gehandeld worden in groencertificaten.



11.4 Milieudoelstellingen

De belangrijkste milieudoelstellingen welke betrekking hebben op de in dit rapport aangegeven duurzame energievormen zijn: de reductie van minimaal 8% CO<sub>2</sub> (afhankelijk van de scenario's), gemiddeld circa 40 Mton [30] in 2012 en de hieronder aangegeven minimale bijdragen van de verschillende duurzame energievormen [14].

Doelstelling minimale bijdrage duurzame energie:

Energiebron	2007	2020
Waterkracht	3 PJ	3 PJ
Warmtepomp	50 PJ	65 PJ
Windenergie	33 PJ	45 PJ
Fotovoltaïsche	2 PJ	10 PJ

De bijdrage aan CO<sub>2</sub> reductie is bij de onderzochte energie opties:

Energiebron	Energieopbrengst (equivalent)	Realiseerbare CO <sub>2</sub> reductie (0,63 kg/kWh)	
	GWh per jaar	Mton	‰ doelstelling
Waterkracht, stroming	5,6	0,0035	0,09
Waterkracht, verval	120	0,076	1,9
Warmtepomp en koelmachine	124	0,078	1,95
Windenergie	61	0,038	0,95
Fotovoltaïsche	9	0,0057	0,14

De doelstelling met betrekking tot het terugdringen van emissies als NOX en SO2 lijken met het huidige beleid gehaald te worden [29].



## 12. Scenario-analyse

### 12.1 Inleiding

Aan de ontwikkeling van grote infrastructurele projecten zoals het vliegvelddeiland gaan beleidsstudies, MER-rapportages, schetsontwerpen en politieke besluitvorming vooraf. De doorlooptijd van het project vliegvelddeiland in de Noordzee bestrijkt minimaal 10 jaar. Bij voldoende politiek en maatschappelijk draagvlak wordt geschat dat de luchthaven niet eerder dan na het jaar 2012 in gebruik genomen kan worden.

In bovengenoemde voorbereidingen met betrekking tot de realisatie van het project worden de kaders, waarbinnen het project vorm moet krijgen, vastgelegd en de techniek op hoofdlijnen wordt bepaald. Hierbij dient voldoende inzicht verkregen te worden in de eventuele toe te passen duurzame energievormen om integratie hiervan mogelijk te maken bij de aanleg van het vliegvelddeiland.

Besluitvorming over het toepassen van de duurzame energievormen zal ruimschoots vóór realisatie (daadwerkelijke bouwactiviteiten) plaatsvinden, waarbij een inschatting gemaakt moet worden naar toekomstige technologie, de kostenontwikkeling en het beleid ten aanzien van duurzame energie. Om deze inschatting op een verantwoorde wijze te doen wordt gebruik gemaakt van een scenario-analyse.

De gebruikte scenario's zijn gebaseerd op gegevens van het Centraal Planbureau (CPB- boek Economie en fysieke omgeving). Deze geven een beschrijving van een te verwachten toekomst en beschrijven de omgeving en de mate van economische groei.

### 12.2 Scenario's

Het CPB beschrijft drie scenario's welke de periode tussen 1995 en 2020 bestrijken. Bij de scenario-analyse is de relevante informatie beoordeeld welke nodig is om op een effectieve manier om te kunnen gaan met toekomstgerichte informatie. Deze informatie kan bijdragen bij de besluitvorming met betrekking tot de deze studie aangegeven duurzame energievormen, de scenario's zijn:

#### **Divided Europe (DE):**

Beschrijft de situatie waarbij er vanuit wordt gegaan dat er een relatief lage economische groei is in Nederland (circa. 1,5% per jaar), de nationalistische belangen beperken de economische groei binnen Europa. Dit zal gekenmerkt zal worden door : een slecht werkende marktmechanisme en regelgeving. Er is een zwakke groei van de particuliere consumptie te verwachten. Het milieubewustzijn is beperkt. Met betrekking tot technologische ontwikkelingen is een trage groei van het kennispotentieel te verwachten waarbij de ontwikkelingen voornamelijk traditioneel gericht zullen zijn.



**European Coordination (EC):**

In EC komt de Europese integratie goed op gang wat tot een sterke economische groei leidt (circa. 2,75% per jaar in Nederland). De internationale economisch-politieke ontwikkeling zal gekenmerkt worden door; een dynamisch Europa wat zich als een blok zal opstellen tegen de niet-Europese concurrenten. Met betrekking tot technologische ontwikkelingen is een snelle groei van het kennispotentieel te verwachten waarbij de ontwikkelingen meer maatschappijgericht zullen zijn. De leefstijl zal meer immaterieel zijn en milieuvriendelijk georiënteerd.

**Global Competition (GC):**

Beschrijft de situatie waarbij er vanuit wordt gegaan dat er een wereldwijde een sterke economische groei is (circa. 3,25% per jaar in Nederland). De internationale economisch-politieke ontwikkeling zal gekenmerkt worden door een dominant marktmechanisme en sterke internationale concurrentie waarbij de nadruk ligt op efficiëntie. Met betrekking tot technologische ontwikkelingen is een snelle groei van het kennispotentieel te verwachten, waarbij de nadruk zal liggen op kennisdifferentiatie en marktgerichtheid. De leefstijl zal sterk materieel gericht zijn.

Item	DE	EC	GC
stijgend energieverbruik per jaar	0,3%	1%	1,4%
technologische ontwikkelingen	traag	snel	snel
energieheffingen (relatief)	weinig	midden	hoog
energieprijs	laag	midden	hoog
verbeterde energie-efficiënte	1%	1,5%	1,6%
beschikbare energietechnologie	matig	veel	veel
CO <sub>2</sub> -productie (2020 t.o.v. 1995)	+2%	+20%	+30%
CO <sub>2</sub> -heffingen	laag	hoog	hoog
subsidies mbt. energiebesparende investeringen	weinig	matig	weinig
energievraag	laag	midden	hoog
energiebesparing	laag	midden	hoog
energiebesparingsdoelstellingen	laag	midden	midden

**12.3 Scenario benadering**

Bij de beoordeling van de verschillende duurzame energievormen is de mate van succes met betrekking tot de geschetste scenario's bekeken. Onder succes wordt hier zowel de technische mogelijkheden als de economische aspecten verstaan terwijl de mate waarin de beleidsdoelstellingen van de overheid worden ondersteunt zijn meegewogen.

2010			
Energievorm	EC	DE	GC
energie uit waterkracht, stroming	----	---	----
energie uit waterkracht, verval	++	+++	+++
energie uit zeewater	++++	++++	++++
windenergie	++	+++	+++
fotovoltaïsche zonne-energie	---	-/+	--

(mate van succes: + = gunstig effect, - = ongunstig)



2020			
Energievorm	EC	DE	GC
energie uit waterkracht, stroming	- - -	- -	- -
energie uit waterkracht, verval	+ + +	+ + + +	+ + + +
energie uit zeewater	+ + + +	+ + + +	+ + + +
windenergie	+ + +	+ + + +	+ + + +
fotovoltaïsche zonne-energie	-	+	-/+

(mate van succes: + = gunstig effect, - = ongunstig)

## 13. Conclusie en aanbevelingen

### 13.1 Conclusie

Als bij de ontwikkeling van het vliegveldeiland, in een vroegtijdig stadium, rekening gehouden wordt met het toepassen van duurzame opties, wordt hiermee niet alleen het overheidsbeleid ondersteund maar kunnen deze opties economisch ook zeer interessant zijn. Niet alle onderzochte duurzame energievormen zijn economisch en technisch gezien interessant.

Het zeewater tussen het eiland en het vasteland heeft onvoldoende snelheid om op een efficiënte wijze stromingsturbines mee aan te drijven, welke voldoende elektrische energie opwekken om economisch rendabel te zijn. Te verwachten is dat het rendement van stromingsturbines de komende decennia verbeterd zal worden, toch zal dit in deze toepassing onvoldoende zijn. Stromingsturbines kunnen interessant zijn indien de stroomsnelheid van het water minimaal 1,5 m/sec is.

Als het vliegveldeiland middels een dam verbonden wordt met het vasteland kan uit het verval welke ontstaat over deze dam energie gewonnen worden. De laagverval turbines, welke in de dam zijn aangebracht kunnen gezamenlijk een hoeveelheid elektrische energie van 120 GWh per jaar produceren. De kostprijs van een kilowattuur is hierbij ongeveer 12 cent. Voor duurzaam opgewekte elektriciteit is dit economisch gezien aantrekkelijk.

Bij de optie waarbij het zeewater gebruikt wordt om er thermische energie aan te onttrekken of aan af te staan, warmtepompen en koelmachines zorgen voor de juiste temperatuur; is het mogelijk de luchthavengebouwen te verwarmen en te koelen tegen een zeer aantrekkelijke kostprijs van 6 cent per kWh thermisch. Voor het aandrijven van de diverse machines is ongeveer 25% primaire energie nodig in de vorm van elektriciteit, welke in deze berekening is meegenomen. De efficiëntie en de kostprijs van warmtepompen zullen de komende jaren verbeteren.

De kostprijs van een kilowattuur opgewekt door windmolens profiteert duidelijk van de aanwezige infrastructuur waaronder: de verbindingsdam, de brugconstructie en de aanwezigheid van een elektriciteitskabel naar het vliegveldeiland. De windmolens produceren jaarlijks een hoeveelheid elektrische energie van 61 GWh. De kostprijs van een geproduceerde kilowattuur is, indien de



windmolens op een brugconstructie geplaatst worden 12 cent en indien de windmolens op de verbindingsdam geplaatst worden 11 cent per jaar, dit is voor windenergie zeer gunstig te noemen. Offshore windmolens zullen de komende jaren verder ontwikkeld worden waardoor het rendement en de kostprijs verbetert. Deze ontwikkelingen zijn vooral gericht op de betrouwbaarheid van de machines en het ontwikkelen van machines met grotere vermogens. Door de hoogtebeperking, met betrekking tot bouwen in de omgeving van vliegvelden, zal van de ontwikkelingen in deze optie maar gering geprofiteerd worden.

Als de daken van de luchthavengebouwen voorzien worden van fotovoltaïsche zonnecellen kan hiermee 9 GWh elektrische energie opgewekt worden, tegen een kostprijs van ongeveer fl. 1,79 per kWh. De kostprijs van de zonnecellen is bepalend in de berekening voor de kostprijs van een kilowattuur. Deze optie is economisch thans niet interessant. De komende decennia zullen de opbrengst en de kostprijs van de zonnecellen aanzienlijk verbeteren. In het scenario European Coordination (EC), waarbij er een sterke economische groei te verwachte is, in combinatie met een milieuvriendelijke leefstijl, is te verwachte dat medio 2020 de opgewekte energie door fotovoltaïsche zonnecellen, uitgaande dat duurzaamheid een extra waarde heeft, in de buurt kan komen van de prijs van fossiele energie.

Indien het vliegvelddeiland middels een dam verbonden wordt met het vasteland en alle duurzame energie opties uit dit onderzoek worden benut kan duurzame energie voor 85% bijdragen in de energiebehoefte van de luchthaven.

### 13.2 Aanbevelingen

Vanuit het oogpunt duurzaamheid bestaat er een duidelijke voorkeur voor een verbindingsdam i.p.v. een brugconstructie naar het eiland. Laagverval turbines in deze dam kunnen elektriciteit opwekken welke qua kostprijs kan concurreren met fossiele energie.

Het toepassen van windenergie en de optie thermische energie uit zeewater zijn beiden economisch zeer rendabel en aan te bevelen.

De optie voor het toepassen van fotovoltaïsche zonnecellen op alle daken van de luchthavengebouwen is niet aan te bevelen, de kosten hiervan zijn te hoog. Ter ondersteuning van het overheidsbeleid (imago), met betrekking tot het bevorderen van duurzame energie en de promotie van zonnecellen, is het te overwegen de terminal gebouwen op de luchthaven te voorzien van (lichtdoorlatende) zonnecellen.

De mogelijkheid is aanwezig om met de bovengenoemde duurzame energievormen in combinatie met het vliegvelddeiland, aangevuld met 30 windmolens parallel aan de verbindingsdam, een energie neutrale luchthaven te realiseren.

De mogelijkheid van een geheel energie neutraal vliegvelddeiland lijkt tevens mogelijk. Extra windmolens en een uitbreiding van de optie thermische energie uit zeewater zullen voldoende zijn om dit te realiseren. Als van deze mogelijkheid gebruik gemaakt wordt zal dit het vliegvelddeiland nationaal en internationaal extra aanzien geven, een voorbeeld dat mogelijk gevolgd zal worden.



Het verdient aanbeveling de volgende punten nader te onderzoeken:

- efficiënte manier om het vliegveldeiland aan te sluiten op het openbare elektriciteitsnet;
- de mogelijkheid, decentrale opwekking van elektriciteit, in combinatie met de duurzame energievormen op het vliegveldeiland te realiseren;
- de opties thermische energie uit zeewater, met name de aspecten corrosie, warmtewisselaar, en ruimtebeslag.

## 14. Epiloog

Ten tijde van het onderzoeksvoorstel stond de optie van een vliegveld op een eiland in de Noordzee open. Nog voor het beëindigen van mijn onderzoek heeft de politiek besloten dat een vliegveldeiland in zee het komende decennium niet gerealiseerd zal worden. Desondanks kunnen veel aspecten uit dit onderzoek gebruikt worden, wanneer de aanleg van een vliegveldeiland, of soortgelijke infrastructurele bouwwerken (opnieuw) actueel wordt.

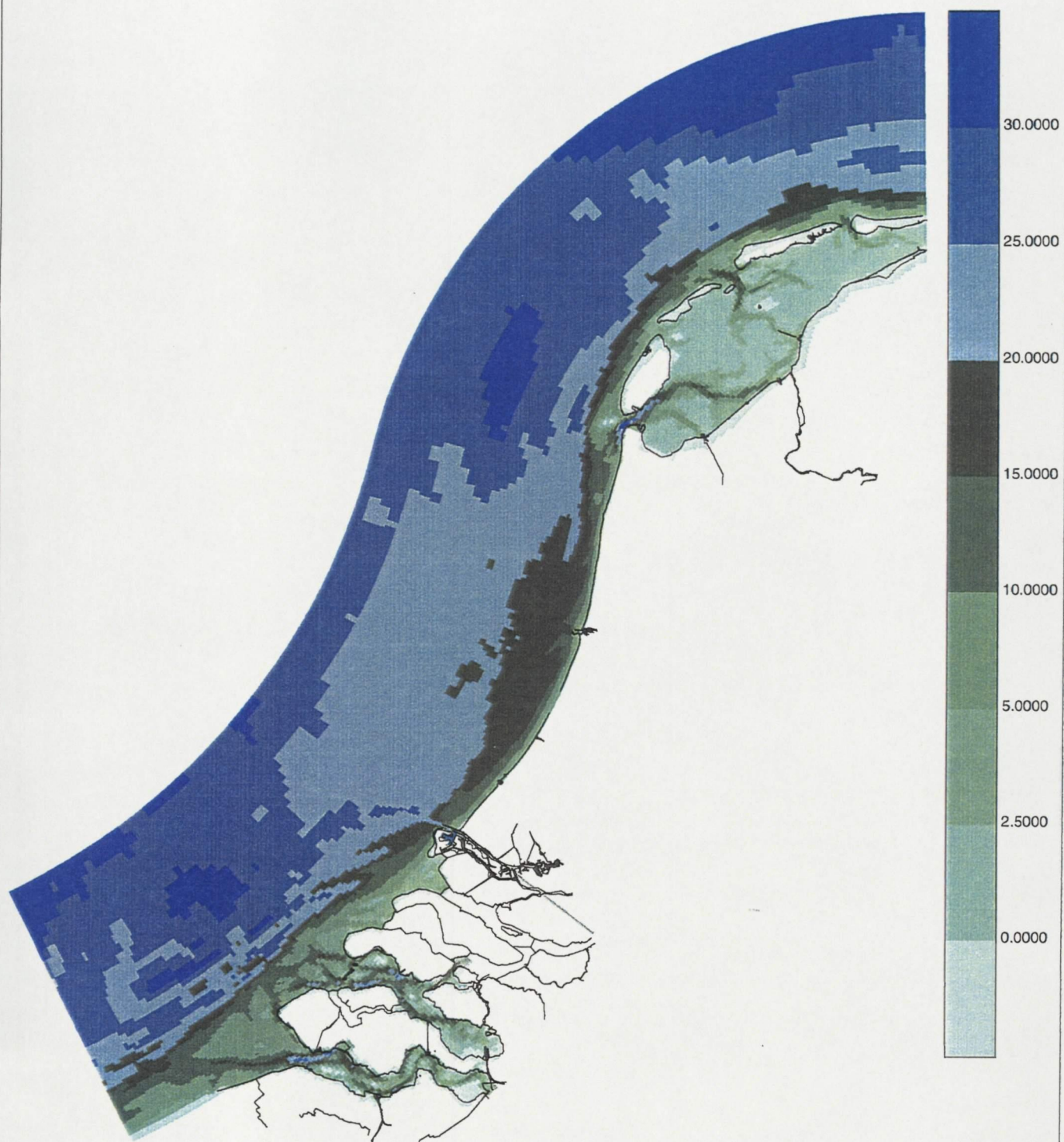


## Literatuur en informatiebronnen

1. Ministerie van Verkeer en Waterstaat; Startnotitie MER, Ontwikkeling Nationale Luchthaven Lange termijn.
2. Interview; Ir. A.Vonk, energieconsulent, afdeling Support Services, Schiphol Group.
3. Schiphol Group; Halfjaarbericht 1999.
4. Ecofys; Warmtapwaterverbruik in de dienstensector deel 1: Restaurants, deel 2: Hotels.
5. Bouwdienst Rijkswaterstaat; Energieberekeningen uit de Noordzee in combinatie met een Vliegvelddeiland, Ir. L.M.A. Claes.
6. Basic principles for the design of centrifugal pumpinstallations, SIHI Halberg.
7. Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ; Eiland in zee, een onderzoek naar effecten op waterstanden en stroomsnelheden (RIKZ/AB-98.123X).
8. Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ; temperatuurgegevens '98, Meetpost Noordwijk.
9. Novem; Brochure: Op weg naar energieneutraal bouwen.
10. Toegepaste thermodynamica, Ir. G.van der Linden en Ir. P. van Loon.
11. Interview; Ir. A.W.M. van Wunnik en Ir. B.F. Jeroense, Projectenbureau Duurzame Energie.
12. Ecofys; Warmtepomppotentieel bedieningsgebouwen GWW-sector (9/99, E517)
13. Toegepaste vloeistofmechanica, hydraulica voor waterbouwkundigen, Ir. I.W. Nortier en Ir. P de Koning.
14. Derde Energienota 1996.
15. Waterloopkundig lab.; Eiland in zee en veerkracht van de kust: locatie en ontwerp.
16. Interview; Dr. G.J.W. van Bussel, TU-Delft Institute for Wind Energy.
17. Rijkswaterstaat Deltadienst; Windklimaat van Nederland.
18. Handboek Milieuvergunningen.
19. Novem; Studie: 'Plaatsingsplan Wind Buitengaats' Ontwikkeling van technologie.
20. Het potentieel van PV op daken en gevels in Nederland, F.G.P. Corten en G.C. Bergsma
21. Novem; Brochure: Zelf zonnestroom opwekken.
22. Novem; Brochure: Elektriciteit uit zonlicht, PV-almanak
23. PV-convenant; Introductie PV in de Nederlandse energievoorziening.
24. EnergieNed; Elektriciteitsdistributienetten.
25. Sep; Elektriciteitsplan 1997-2006.
26. PBNA; Poly-technisch zakboekje.
27. Stroomversnelling, De volgende elektrische innovatiegolf STT61.
28. Bedrijfseconomie, economisch handelen in bedrijfskundig perspectief: drs. J.T.H.M. Blox, Prof. drs. C. van der Enden, Prof. dr. H.W.C. van der Hart.
29. RIVM, Milieu en economie, ontwikkelingen in het milieubeleid (Internet)
30. ECN, Energieverslag Nederland 1998.

**Bijlage 1:**  
**Energie uit waterkracht**



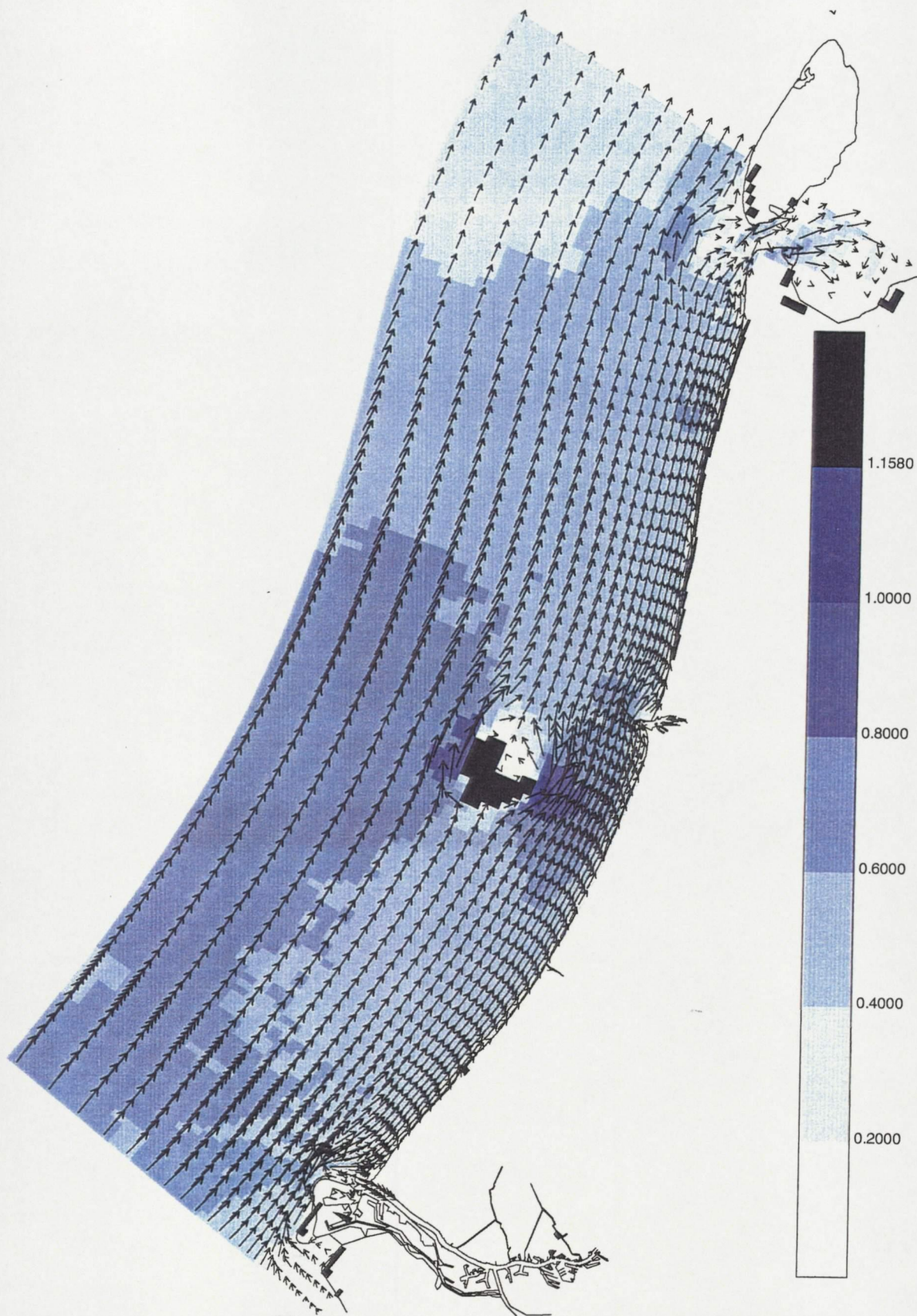


Diepteschematisatie [m]

RIJKSWATERSTAAT/RKZ

FIG. 2





Maximale vloed-snelheden [m/s]

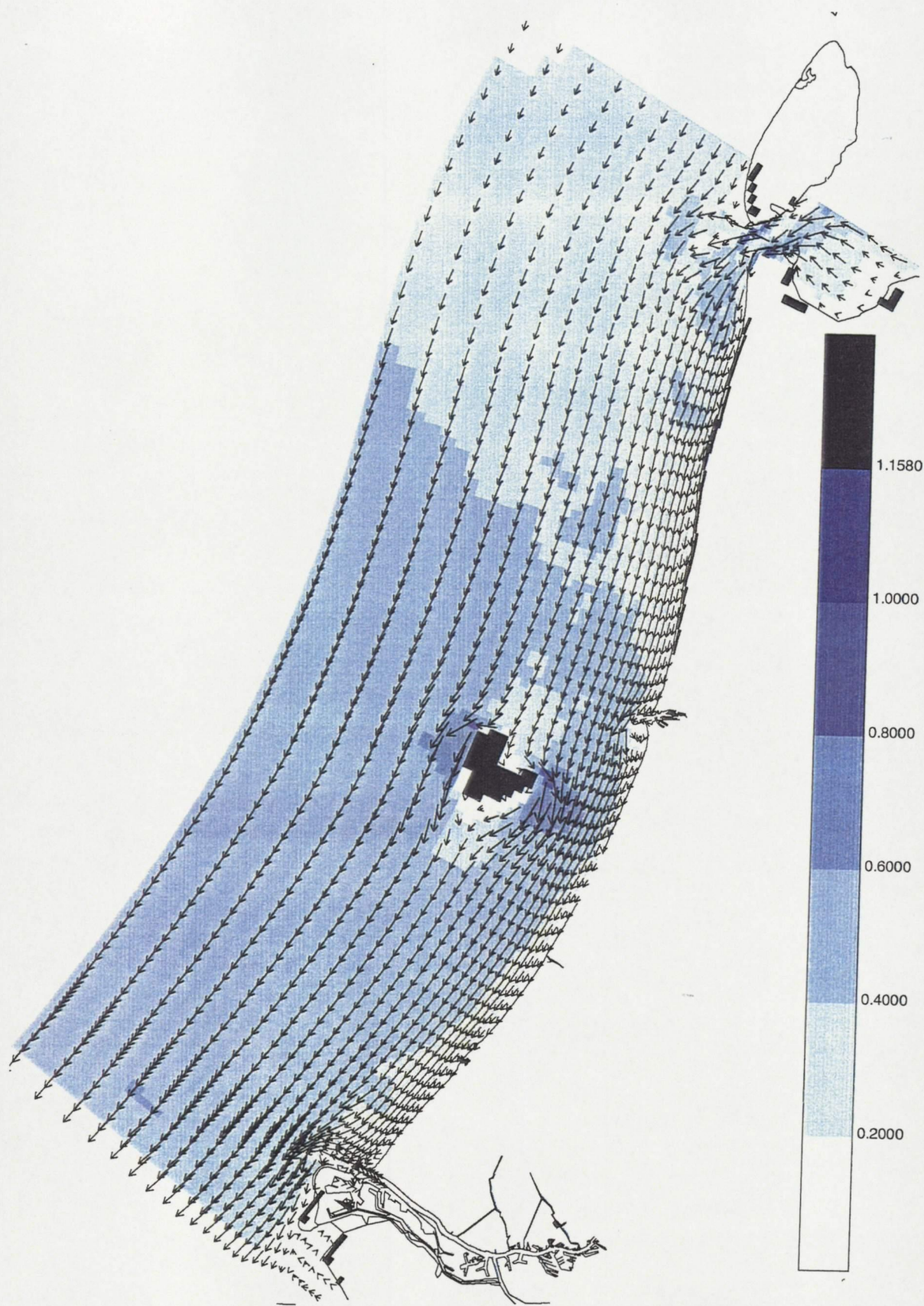
Eiland : V-vorm

Datum : 940223 Tijd : 00.00

RIJSWATERSTAAT/RKZ

FIG. 7





Maximale eb-snelheden [m/s]

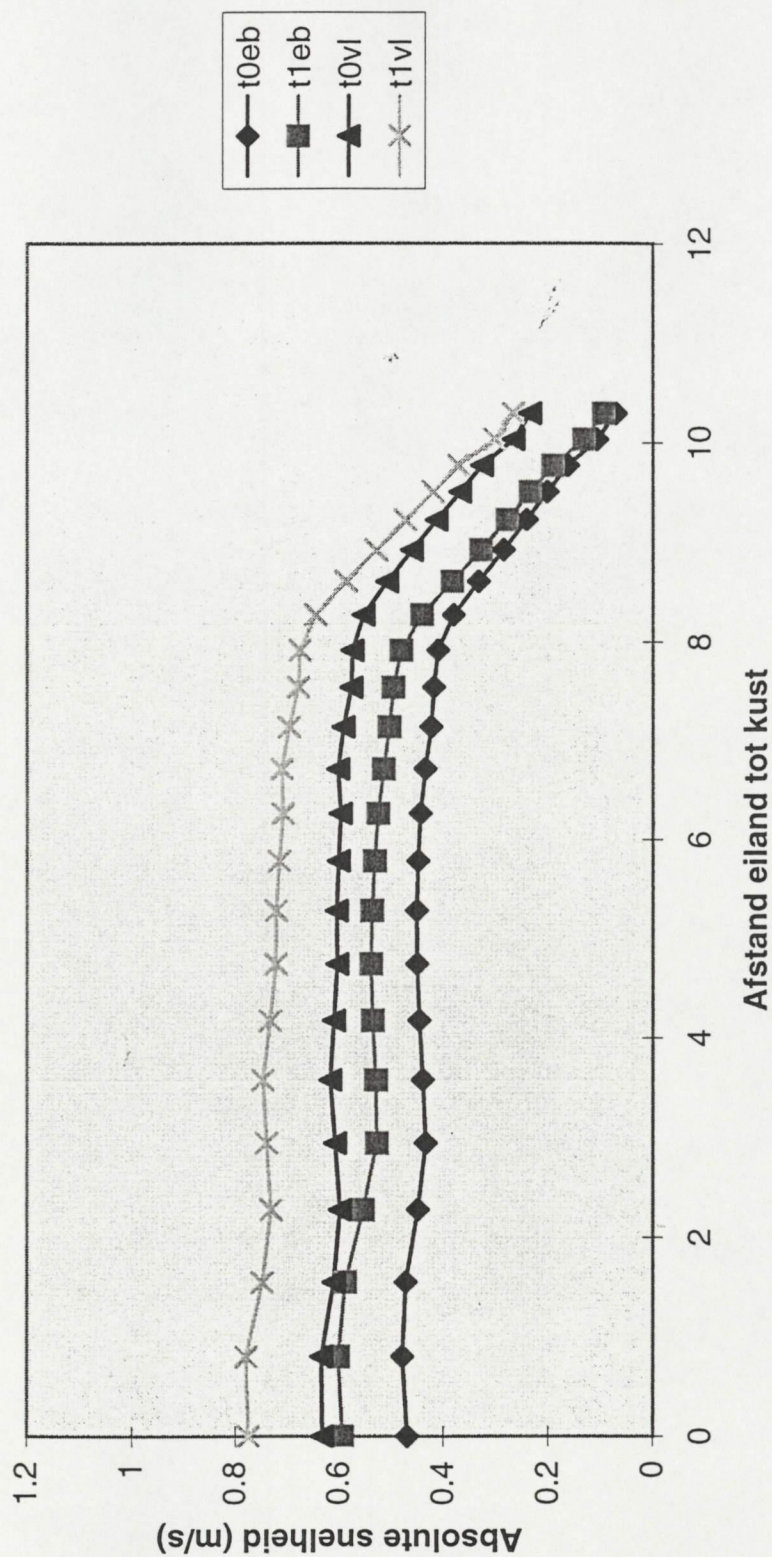
Eiland : V-vorm  
 Datum : 940222 Tijd : 18.00

RIJSWATERSTAAT/RIKZ

FIG. 8



Snelheidsverdeling over raai tussen eiland(WL ontwerp) en kust



Stroomsnelheidsverdeling [m/s] tussen eiland(0 km) en kust(10 km)

t0eb = ebstroom, nul-variant  
t1eb = ebstroom, V-variant  
t0vl = vloedstroom, nul-variant  
t1vl = vloedstroom, V-variant



**Bijlage 2:**  
**Windenergie**

# Windenergie

## Energieberekening

Bij het berekenen van de hoeveelheid elektrische energie welke geleverd kan worden door de windmolens zijn de volgende factoren van belang:

- aantal windmolens;
- grootte van de windmolens (vermogen);
- windaanbod;
- het totale rendement om de energie van de wind, via roteren delen om te zetten naar bruikbare elektrische energie.

Het totale elektrische vermogen van de windturbines is:

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

De  $C_p$  waarde bestaat uit:

- Omdat de wind door de windturbine afgeremd wordt ontstaat een gedeeltelijke blokkering van de wind, de aankomende lucht zal trachten deze blokkering te ontwijken, waardoor niet alle energie benut kan worden, Betz heeft in 1926 reeds afgeleid dat maximaal  $16/27$  van de energie benut kan worden [16].
- Reductie van de bruto turbine oppervlakte naar de netto oppervlakte (netto = bruto - oppervlakte naaf - oppervlakte rotorbladen);
- weerstandscoefficiënt om van rechtlijnige (translatie) beweging over te gaan naar een roterende beweging;
- optimum tussen de aanstroomsnelheid van de wind en de rotatiesnelheid van de bladen.

Omdat de opbrengst van een windturbine evenredig is met de derde macht van de windsnelheid zal de windturbine in verhouding de meeste energie leveren bij windsnelheden die boven de gemiddelde windsnelheid van 8 m/s liggen. Bij het ontwerpen van de windturbines wordt hier rekening mee gehouden.

Uitgangspunt is dat bij het ontwerp van de windmolens een nominale windsnelheid van 1,5 maal de gemiddelde windsnelheid wordt aangehouden, volgens figuur 1.

Het totale elektrische vermogen is nu:

$$P = \frac{1}{2} * 1,225 * (1,5 * 8)^3 * \left( \frac{1}{4} * \pi * 43^2 * 30 \right) * 0,5 * 0,885 = 20,4 \text{ MWel.}$$

Per windmolen is dit 680 kW.

met:

$P$  = totale elektrische vermogen van de windmolens (W);

$\rho$  = de dichtheid van de lucht (1,225 kg/m<sup>3</sup>);



$v$  = de nominale windsnelheid op ashoogte (m/s);  
 $A$  = totale horizontaal oppervlak van de rotors van alle windturbines (m<sup>2</sup>);  
 $C_p$  = vermogenscoëfficiënt;  
 $\eta$  = totale rendement bestaande uit verliezen in tandwielenkast, generator, opzetter en transformator.

De energieopbrengst van de windturbine is sterk afhankelijk van het windaanbod. Bij opstelling van windturbines op zee wordt doorgaans uitgegaan van een equivalent aan opbrengst welke gelijk is aan 3000 vollast uren (het aantal uren dat de windturbine draait zal ongeveer 6000 zijn).

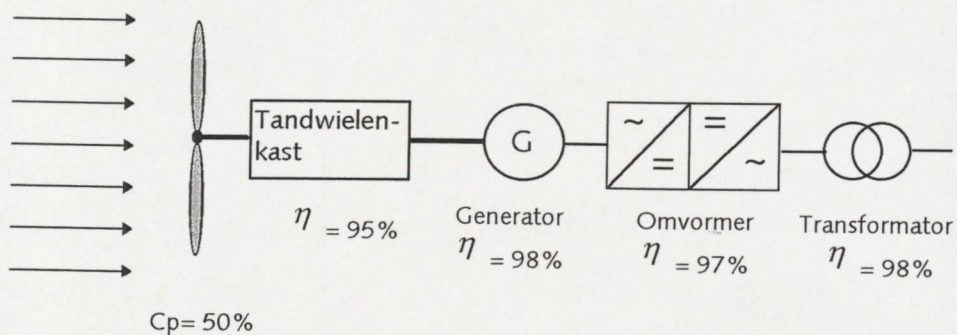
Uitgaande van 30 windmolens geeft dit een totale jaaropbrengst van:

$$E_{el.} = P * t$$

$$E_{el.} = 3000 * 20,4 \cdot 10^6 = 61,2 \cdot 10^9 \text{ Wh} \approx 61 \text{ GWh per jaar}.$$

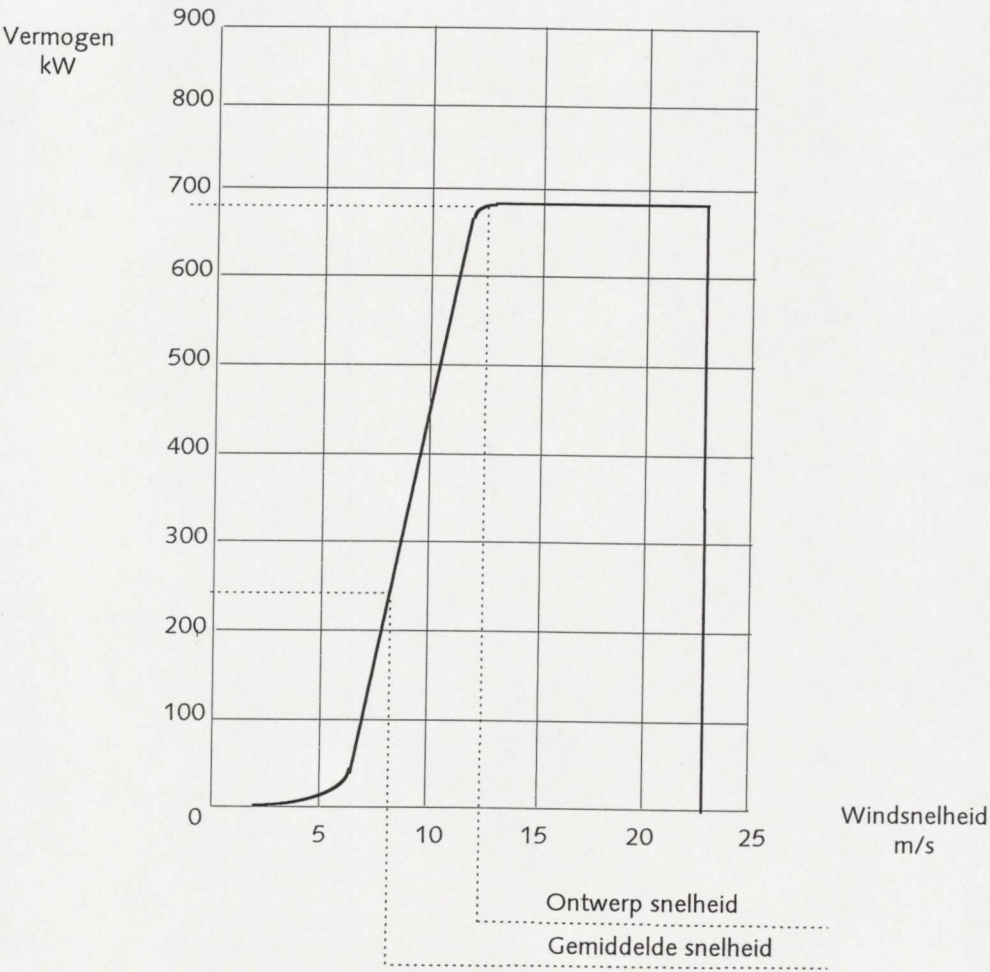
### Configuratieschema windturbine

energie aanbod



Er zijn ook windturbines verkrijgbaar welke geen tandwielenkast hebben, deze maken gebruik van een ringgenerator.

P-V Curve



Figuur 1



**Bijlage 3:**  
**Economie**

## Economie

### Energie uit waterkracht, stroming:

#### Uitgangspunten:

• dk, directe kosten (totale bouwkosten):	75.900 kfl.
• Ik, totale investeringskosten:	80.454 kfl.
• Bk, gemiddelde bedrijfskosten (2% van dk):	1.518 kfl.
• Gd, gebruiksduur (economische levensduur):	25 jaar.
• Rw, restwaarde:	15.000 kfl.
• r, rente 5%:	0,05
• Ej, jaar opbrengst in kWh:	5.600.000

#### Kostprijsberekening van een kilowattuur [27]:

De annuïteitsfactor is :

$$a = \frac{1 - (1 - r)^{-Gd}}{r} = \frac{1 - (1 + 0,05)^{-25}}{0,05} = 14,09$$

Kostprijs per kWh:  $C = \frac{Ik}{a * Ej} + \frac{Bk}{Ej} - \frac{Rw}{Gd * Ej}$

$$C = \frac{80.454 \cdot 10^3}{14,09 * 5,6 \cdot 10^6} + \frac{1.518 \cdot 10^3}{5,6 \cdot 10^6} - \frac{15 \cdot 10^6}{25 * 5,6 \cdot 10^6} = Fl. 1,18 \text{ per kWh.}$$

### Energie uit waterkracht, verval:

#### Uitgangspunten:

• dk, directe kosten (totale bouwkosten):	170.885 kfl.
• Ik, totale investeringskosten:	181.138 kfl.
• Bk, gemiddelde bedrijfskosten (2% van dk):	3.418 kfl.
• Gd, gebruiksduur (economische levensduur):	25 jaar.
• Rw, restwaarde:	35.300 kfl.
• r, rente 5%:	0,05
• Ej, jaar opbrengst in kWh:	120.000.000

#### Kostprijsberekening van een kilowattuur [27]:

De annuïteitsfactor is :

$$a = \frac{1 - (1 - r)^{-Gd}}{r} = \frac{1 - (1 + 0,05)^{-25}}{0,05} = 14,09$$



$$\text{Kostprijs per kWh: } C = \frac{Ik}{a * Ej} + \frac{Bk}{Ej} - \frac{Rw}{Gd * Ej}$$

$$C = \frac{181.136.10^3}{14,09 * 120.10^6} + \frac{3.418.10^3}{120.10^6} - \frac{35.300.10^3}{25 * 120.10^6} = Fl. 0,12 \text{ per kWh.}$$

## Thermische energie uit zeewater

### Uitgangspunten:

- dk, directe kosten (totale bouwkosten): 37.917 kfl.
- Ik, totale investeringskosten: 40.192 kfl.
- Bk, gemiddelde bedrijfskosten (2% van dk + benodigde hoeveelheid elektriciteit) 6.015 kfl.
- Gd, gebruiksduur (economische levensduur): 12 jaar.
- Rw, restwaarde: 4.000 kfl.
- r, rente 5%: 0,05
- Ej, jaar opbrengst thermische energie in kWh: 179.000.000
- Elektriciteitsprijs per kWh 14 cent
- Benodigde hoeveelheid elektriciteit per jaar (zie Bk) 37,55 GWh

### Kostprijsberekening van een kilowattuur [27]:

$$\text{De annuïteitsfactor is : } a = \frac{1 - (1 - r)^{-Gd}}{r} = \frac{1 - (1 + 0,05)^{-12}}{0,05} = 8,86$$

$$\text{Kostprijs per kWh: } C = \frac{Ik}{a * Ej} + \frac{Bk}{Ej} - \frac{Rw}{Gd * Ej}$$

$$C = \frac{40.192.10^3}{8,86 * 179.10^9} + \frac{6.015.10^3}{179.10^9} - \frac{4.10^3}{12 * 179.10^9} = Fl. 0,06 \text{ per kWh}_{therm.}$$

In de berekening van de kostprijs van een kilowattuur thermische energie zijn de benodigde kosten voor de elektrische energie, welke nodig is om koelmachine, warmtepomp en waterpompen aan te drijven, inbegrepen.

**Windenergie, windmolens op de brug:****Uitgangspunten:**

• dk, directe kosten (totale bouwkosten):	68.103 kfl.
• Ik, totale investeringskosten:	72.190 kfl.
• Bk, gemiddelde bedrijfskosten (2% van dk):	1.362 kfl.
• Gd, gebruiksduur (economische levensduur):	15 jaar.
• Rw, restwaarde:	14.000 kfl.
• r, rente 5%:	0,05
• Ej, jaar opbrengst in kWh:	61.000.000

**Kostprijsberekening van een kilowattuur [27]:**

De annuïteitsfactor is :

$$a = \frac{1 - (1 - r)^{-Gd}}{r} = \frac{1 - (1 + 0,05)^{-15}}{0,05} = 10,38$$

Kostprijs per kWh: 
$$C = \frac{Ik}{a * Ej} + \frac{Bk}{Ej} - \frac{Rw}{Gd * Ej}$$

$$C = \frac{72.190.10^3}{10,38 * 61.10^9} + \frac{1.362.10^3}{61.10^9} - \frac{14.10^6}{15 * 61.10^9} = Fl. 0,12 \text{ per kWh.}$$

**Windenergie, windmolens op de dijk:****Uitgangspunten:**

• dk, directe kosten (totale bouwkosten):	58.653 kfl.
• Ik, totale investeringskosten:	62.172 kfl.
• Bk, gemiddelde bedrijfskosten (2% van dk):	1.173 kfl.
• Gd, gebruiksduur (economische levensduur):	15 jaar.
• Rw, restwaarde:	8.000 kfl.
• r, rente 5%:	0,05
• Ej, jaar opbrengst in kWh:	61.000.000

**Kostprijsberekening van een kilowattuur [27]:**

De annuïteitsfactor is :

$$a = \frac{1 - (1 - r)^{-Gd}}{r} = \frac{1 - (1 + 0,05)^{-15}}{0,05} = 10,38$$



$$\text{Kostprijs per kWh: } C = \frac{Ik}{a * Ej} + \frac{Bk}{Ej} - \frac{Rw}{Gd * Ej}$$

$$C = \frac{62.172.10^3}{10,38 * 61.10^9} + \frac{1.173.10^3}{61.10^9} - \frac{8.10^6}{15 * 61.10^9} = Fl. 0,11 \text{ per kWh.}$$

## Fotovoltaïsche zonne-energie

### Uitgangspunten:

- |  |              |
|--|--------------|
| • dk, directe kosten (totale bouwkosten):    | 140.000 kfl. |
| • Ik, totale investeringskosten:             | 148.400 kfl. |
| • Bk, gemiddelde bedrijfskosten (2% van dk): | 2.800 kfl.   |
| • Gd, gebruiksduur (economische levensduur): | 15 jaar.     |
| • Rw, restwaarde:                            | 14.000 kfl.  |
| • r, rente 5%:                               | 0,05         |
| • Ej, jaar opbrengst in kWh:                 | 9.000.000    |

### Kostprijsberekening van een kilowattuur [27]:

$$\text{De annuïteitsfactor is : } a = \frac{1 - (1 - r)^{-Gd}}{r} = \frac{1 - (1 + 0,05)^{-15}}{0,05} = 10,38$$

$$\text{Kostprijs per kWh: } C = \frac{Ik}{a * Ej} + \frac{Bk}{Ej} - \frac{Rw}{Gd * Ej}$$

$$C = \frac{148,4.10^6}{10,38 * 9.10^6} + \frac{2,8.10^6}{9.10^6} - \frac{14.10^6}{15 * 9.10^6} = Fl. 1,79 \text{ per kWh.}$$