

## HET ENERGIEKE WEGDEK

### Verkenning van de mogelijkheden tot duurzame energieopwekking langs de snelweg

E.P. Weijers  
A. Hensen  
J.W. Erisman  
H.P.J. de Wilde  
P.A.J.P. Cnubben

Revisies		
A		
B		
Opgesteld door: E.P. Weijers	Goedgekeurd door:	ECN-Schoon Fossiel  Luchtonderzoek & Technologie
Geverifieerd door:	Vrijgegeven door:	

## Verantwoording

Dit werk is uitgevoerd in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat onder opdrachtnummer 6100.1121 en projectnaam 'Energiek Wegdek'. Het ECN projectnummer was 8.27201. Dank is verschuldigd aan de leden van het projectteam voor hun inspirerende inbreng en discussies tijdens het wekelijks overleg, en aan dhr. F. de Witte (ECN) voor zijn zorgvuldige en enthousiaste uitvoering van het literatuur- en octrooionderzoek.

## Trefwoorden

Energieopwekking, snelweg, wegdek, duurzame energie, foto-voltaïsche systemen, PV-systemen, geluidsschermen, warmtewisselaars, biomassa, windenergie, piëzo-elektriciteit, Peltier.

## Lijst met afkortingen

DWW	Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Rijkswaterstaat
ECN	Energieonderzoek Centrum Nederland
GJ	GigaJoule= $10^9$ Joule
GWh	GigaWattuur
kWh	kiloWattuur (=0,0036 GJ)
MW	MegaWatt= $10^6$ Watt
PV	Photo-Voltaic (foto-voltaïsch)
RWS	Rijkswaterstaat
W	J/s
$W_p$	Watts aan opgesteld piekvermogen
WnT	Wegen naar de Toekomst

## INHOUD

SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	9
1.1 Aanleiding definitiestudie	9
1.2 Doelstelling en afbakening	9
2. FOTO-VOLTAÏSCHE SYSTEMEN	12
2.1 Algemeen	12
2.2 Inventarisatie bestaande systemen	12
2.2.1 Autonome PV-systemen	12
2.2.2 Netgekoppelde PV-systemen	14
2.3 Toepassingen netgekoppelde PV-systemen in Nederland	15
2.4 Energieopbrengst	16
2.5 Kosten	16
3. WARMTEWISSELAARS	18
3.1 Algemeen	18
3.2 Inventarisatie van warmtewisselaar systemen	18
3.3 Overzicht pilot projecten in Nederland	19
3.4 Opslag van warmte of koude in de bodem	20
3.5 Rendementen	20
3.6 Kosten	21
3.7 Mogelijkheden voor innovatie	21
4. BIOMASSA	24
4.1 Algemeen	24
4.2 Inventarisatie literatuur	26
4.3 Andere producten uit biomassa	26
4.4 Opbrengst en kosten	27
5. WINDTURBINES	28
5.1 Algemeen	28
5.2 Inventarisatie literatuur	29
5.3 Opbrengst	30
5.4 Kosten	31
5.5 Innovatie en haalbaarheid	33
5.6 Windenergie geïnduceerd door voertuigen rijdende op de snelweg	34
5.6.1 Inventarisatie literatuur	34
5.6.2 Opbrengst en kosten	35
5.7 Innovatie en haalbaarheid	36
6. PIËZO-ELEKTRICITEIT EN PELTIER ELEMENTEN	37
6.1 Algemeen	37
6.1.1 Piëzo-elektriciteit	37
6.1.2 Peltier	37
6.2 Literatuur	37
6.2.1 Piëzo-elektriciteit	37
6.2.2 Peltier	38
6.3 Opbrengst en kosten	38
6.3.1 Piëzo-elektriciteit	38
6.3.2 Peltier	38
7. TOETSING AAN CRITERIA EN SLOTOPMERKINGEN	39
7.1 Criteria	39
7.2 Foto-voltaïsche systemen	41
7.3 Warmtewisselaars	42

7.4	Biomassa	43
7.5	Windenergie	44
7.6	Piëzo-elektriciteit en Peltier elementen	44
	<b>REFERENTIES</b>	<b>45</b>
	<b>BIJLAGE A</b>	<b>49</b>
	Inleiding	49
	Overkappen of niet overkappen	49
	Optimaliseren van verschillende energiestromen.	52
	Combinatiemogelijkheden	54

## SAMENVATTING

Autowegen en spoorlijnen nemen ongeveer drie procent van de ruimte buiten de bebouwde kom in beslag. Slechts een deel van deze ruimte wordt door het verkeer gebruikt. De vraag rijst of deze niet benutte ruimte (bermen, taluds) voor andere doeleinden gebruikt zou kunnen worden zoals het opwekken van (duurzame) energie. In opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW) van Rijkswaterstaat (beheerder van het terrein op en rond de snelweg) is een verkennende studie uitgevoerd met als doel bestaande en nog in ontwikkeling zijnde energiewinningstechnologieën te identificeren in de beschikbare literatuur en te beoordelen in hoeverre deze toegepast kunnen worden langs een snelweg. De weerslag van deze studie is terug te vinden in dit rapport. Hierbij dient bedacht te worden dat het gaat om een eerste inschatting van een mogelijke toepassing langs een snelweg; rekenexercities als bijvoorbeeld terugverdiëntijden horen thuis in de volgende fase van dit project.

Deze studie dient als discussiestuk voor het in 2001 uit te voeren pilot project 'Energiek Wegdek', onderdeel van het Thema Wegdek naar de Toekomst, dat gericht is op innovaties in en rond de wegeninfrastructuur. Voor de Europese aanbesteding van het pilot project kunnen consortia ontwerpen indienen voor een innovatieve en duurzame toepassing van energiewinning rondom de snelweg; het winnende idee zal nog in 2001 worden gerealiseerd langs een snelweg in het oosten van Nederland. Met dit demonstratieproject wil DWW een impuls geven aan het innovatieve en toepassingsgerichte denken en ontwerpen bij duurzaam winnen van energie langs de snelweg.

De volgende energiewintechnieken komen hier aan de orde:

- Foto-voltaïsche systemen
- Warmtewisselaars
- Biomassa
- Windturbines
- Piëzo- en Peltier elementen

Tevens worden in een bijlage nog enkele innovatieve ideeën gedemonstreerd die betrekking hebben op de besproken energiewintechnieken.

In dit rapport wordt een aantal van de huidige en toekomstige toepassingen met deze energiewintechnieken rondom een snelweg beschreven. Er is gekeken naar kosten van productie en aanleg (voor zover bekend), duurzame opbrengst, de mogelijkheden voor innovaties ingeval van plaatsing langs een snelweg, een eventuele beïnvloeding van de verkeersveiligheid en verstoring van het landschap.

### *Windturbines*

Uit de vergelijking tussen de energiewintechnieken indien deze geplaatst worden langs een referentiesnelweg van 1 kilometer blijkt dat *windturbines* de meest kosteneffectieve wijze van duurzame energieopwekking zijn in deze situatie; de prijs per GJ is geschat op 10-12 EURO, inclusief aanleg, plaatsing en netkoppeling. De techniek zelf is niet (meer) als innovatief te bestempelen en biedt daartoe, voor zover nu kan worden overzien, ook weinig mogelijkheden. De opbrengst is dermate hoog dat in het vervolgtraject windturbines niet kunnen ontbreken alleen al vanwege de inzet van andere (duurdere) wintechnieken financieel mogelijk te maken. Serieus genomen moet worden de zorg van Rijkswaterstaat in deze met betrekking tot de verkeersveiligheid: automobilisten zouden afgeleid kunnen raken door de beweging van ronddraaiende rotoren. In de literatuur is over dit aspect niets terug te vinden. Ook de landschappelijke verstoring is een probleem maar niet specifiek voor deze context; men kan

stellen dat dit deels wordt opgeheven door de plaatsing nabij een al evenmin fraai ogende snelweg. Toch zal in een ontwerp voor het vervolgproject hieraan aandacht moeten worden besteed.

Zo bestaan er windmolens waarvan de draaiende onderdelen niet meer zichtbaar zijn; deze zijn kleiner van afmeting. Deze constructie is ontwikkeld om een veilige plaatsing nabij of op woningen mogelijk te maken en de geluidsoverlast te verminderen. Geschat is dat 1 GJ opgewekt in deze configuratie 19-34 EURO gaat kosten; dit is exclusief de kosten voor installatie, onderhoud en verdere koppeling. Of dit type turbines indien geplaatst langs een snelweg op de lange termijn een rendabele vorm van energiewinning zou kunnen zijn, moet nader worden uitgewerkt.

Een andere toepassing die gebruikt maakt van de wind is de inzet van *windmolentjes* of *trommelmolentjes* in de middenberm met relatief geringe afmetingen (in de orde van 30-50 cm). Deze optie is innovatief maar naar schatting wel kostbaar (95-350 EURO/GJ, exclusief verdere benodigde infrastructuur), d.w.z. ruwweg een factor 10 duurder. Het idee keert enkele malen terug in de literatuur en mogelijke ontwerpen zijn gepatenteerd (in de USA en Groot-Brittannië). Er zijn echter (nog) geen concrete toepassingen; de relatief hoge kosten lijken grootschalige plaatsing in de weg te staan.

#### *Foto-voltaïsche systemen*

De inzet van *foto-voltaïsche systemen* langs snelwegen is niet nieuw; er lopen diverse projecten in binnen- en buitenland. In de literatuur worden vele autonome PV-systemen beschreven met allerlei doeleinden, vaak in combinatie met een dieselgenerator, soms gekoppeld aan andere duurzame wintechnieken. Dergelijke systemen zijn relatief duur en aanschaf is alleen acceptabel in situaties waar geen netstroom voorhanden is.

Nogal op de toekomst gericht én innovatief is het idee van het opzetten van een elektriciteitstankstation alwaar elektrisch aangedreven voertuigen hun 'brandstof' kunnen 'tanken'. Concrete toepassing van dit idee is te vinden in Californië (USA). Theoretisch kan het aanbod van elektriciteit geregeld worden via een combinatie van PV-systemen, windenergie en (wellicht) biomassa zodat pieken en dalen in de productie en afname kunnen worden opgevangen.

Innovatie met betrekking tot netgekoppelde systemen rondom de snelweg lijkt alleen te liggen in nieuwe of verbeterde ontwerpen geschikt voor toepassing langs de snelweg. Deze optie is duurder dan windenergie (55-80 EURO/GJ). Voorbeelden zijn (geluid)schermen met dubbelwerkende panelen, een systeem met meedraaiende zonnepanelen, het combineren van zonnepanelen met spiegels, het aanbrengen van een afkoelend medium zodat niet alleen een hogere lichtopbrengst ontstaat maar ook thermische energie, en het aanbrengen van zonnepanelen op bruggen en overkappingen.

#### *Biomassa*

Energieteelt langs de snelweg is innovatief omdat deze opzet, voor zover te achterhalen, nog niet in Nederland of daarbuiten wordt toegepast. Het meest rendabel is om de geproduceerde *biomassa* aan te leveren aan bestaande installaties (bijv. vergassingsinstallaties en elektriciteitcentrales). Ten opzichte van de reeds besproken technieken heeft dit als groot voordeel dat alleen de verwerkingskosten (zaaien, onderhoud, oogsten, transport) die gemaakt worden tot aan de aflevering de kostprijs bepaalt. Dit maakt deze techniek aanzienlijk goedkoper (2-7 EURO/GJ) dan de inzet van windturbines. Echter, dit is de prijs bij een voldoende grote aan te bieden hoeveelheid. De geteelde hoeveelheid biomassa dient namelijk meer te zijn dan op een strook langs van 1 kilometer snelweg geproduceerd kan worden;

noodzakelijk is dan de wegberm te benutten langs vele honderden kilometers snelweg. Dit maakt een praktische toepassing in deze opzet vrijwel onmogelijk.

Een ander probleem is de veiligheid voor weggebruiker (en dier): activiteiten als zaaien en oogsten moeten aan het zicht onttrokken dienen te worden. Ook worden dieren aangetrokken die ongelukken kunnen veroorzaken. De optredende emissies bij het verbranden dient vóór een project nauwkeurig in kaart te worden gebracht en afgezet tegen de vermeden CO<sub>2</sub>-emissie in de verwerkende eenheid. Door het maskeren van de snelweg door de aanplant wordt het milieubewuste imago overigens wel versterkt.

#### *Warmtewisselaars*

Een aantal proefexperimenten loopt er op het gebied van *warmtewisselaars* geplaatst in het asfalt; toch biedt de stand der techniek nog mogelijkheden tot verdere vernieuwing. Voor wat betreft de energiewinning (buizen of vloeistof in asfalt, diepte) en de combinatie met andere technieken (Organic Rankine Cycles of warmtepompen voor transport) lijken verdere technische ontwikkelingen mogelijk (en zelfs dringend gewenst). Essentieel in de toepassing van deze techniek is de beschikbaarheid van een nabijgelegen warmteopslagmogelijkheid en een nuttig gebruik van de opgewekte energie; het blijkt dat alleen als aan deze randvoorwaarden voldaan is, de opgezette projecten rendabel zijn. In de context van deze studie zijn de mogelijkheden van inzet van deze techniek op 1 kilometer snelweg daarom nogal begrensd. Qua kosten (40-120 EURO/GJ) zijn dergelijke systemen duurder dan de PV-systemen.

#### *Piëzo-elektriciteit en Peltier elementen*

Ofschoon de technieken piëzo-elektriciteit en Peltier elementen zeer innovatief zouden zijn wanneer toegepast op en rond de snelweg is inzet bij de gegeven stand der techniek onhaalbaar. De plaatsing langs 1 kilometer snelweg is zeer kostbaar (100 à 1000 maal duurder dan inzet van de overige hier beschreven technieken).

De belangrijkste conclusies ten aanzien van de verschillende technieken zijn:

1. Windenergie biedt de grootste energieopbrengst gemiddeld over een jaar. Deze mag in een proefproject niet ontbreken omdat het de economische rentabiliteit sterk verhoogt.
2. Negatieve effecten van windmolens op verkeersveiligheid kunnen verkleind worden door gebruik te maken van overkappingen. Dit levert tevens extra ruimte voor de inzet van zonnepanelen.
3. Overkappingen dragen ook op andere manieren bij aan de verkeersveiligheid: verminderd onderhoud, beter zicht tijdens neerslag, geen dieren op rijbaan.
4. Biomassa heeft niet een enorm potentieel aan capaciteit maar lage investeringskosten en biedt een landschappelijke voordeel.
5. Combinatie van verschillende technieken kan gebruikt worden om continuïteit in de energieopbrengst te verbeteren.
6. Warmtewisselaars bieden alleen in nabijheid met een bebouwde omgeving perspectief. In overige situaties is koppeling met ORC of warmtepompsystemen een mogelijkheid.
7. De Peltier techniek en de inzet van piëzo-elementen is economisch niet haalbaar.





# 1. INLEIDING

## 1.1 Aanleiding definitiestudie

Binnen het Thema Wegdek van de Toekomst, onderdeel van het innovatieprogramma Wegen naar de Toekomst (WnT) van RWS, wordt een zoektocht uitgevoerd naar innovaties in en rond de weginfrastructuur. Dit thema hanteert een aantal zoekrichtingen. Voor de zoekrichting Energie- en Emissiearme weg is het (verre) toekomstbeeld geformuleerd van een weg die (duurzaam) in zijn eigen energiebehoefte voorziet, wellicht energie genereert voor andere toepassingen, en ook anderszins geen hinder oplevert voor omgeving en maatschappij. Naast dit ‘denkwerk’ voor de lange termijn zal op korte termijn (eind 2001) het pilotproject Energiek Wegdek ten uitvoer worden gebracht, als eerste stap op het pad naar de toekomst van 2030.

De winning van duurzame energie op en langs de snelweg staat centraal in dit pilotproject. Autowegen (en spoorlijnen) nemen ongeveer drie procent van de ruimte buiten de bebouwde kom in beslag. Slechts een deel van deze ruimte wordt daadwerkelijk door het verkeer gebruikt. De overige ruimte betreft indirect ruimtebeslag; dit is de zone langs de weg (bermen en taluds) die vanwege (veiligheids)voorschriften en verkeersemisies verder onbenut blijft. In principe kunnen (delen van) zowel het directe als het indirecte ruimtebeslag voor de opwekking van duurzame energie gebruikt worden.

Eind vorig jaar is op verzoek van DWW door ECN [1] een essay geschreven ten behoeve van het thema WnT. In dit essay is een aantal mogelijk geschikte energiewinningstechnieken geïdentificeerd. In de discussies die op het essay volgden, bleek de wens te bestaan bestaande technieken te inventariseren én te beoordelen, alsmede te bezien of er nieuwe concepten aan kunnen worden toegevoegd. In opdracht van DWW zijn daartoe in de onderhavige definitiestudie bestaande en ontluikende technologieën beschreven en beoordeeld naar de huidige stand van kennis. Gekeken is naar technieken die voor combinatie met de verkeersinfrastructuur relevant kunnen zijn m.a.w. technieken die in potentie (zoveel mogelijk) energie uit de snelweg en directe omgeving kunnen genereren.

Het resultaat van de definitiestudie dient niet alleen als uitgangspunt maar ook als inspiratiebron voor het uit te voeren pilotproject Energiek Wegdek<sup>1</sup>. Hierin zal de meest vernieuwende en kansrijke wintechniek (of combinatie van verschillende wintechnieken) worden toegepast in de dagelijkse praktijk van de snelweg. Met deze demonstratie wil DWW een impuls geven aan de ontwikkeling van innovatieve technieken en toepassingen die het duurzame winnen van energie combineren met verkeersinfrastructuur.

## 1.2 Doelstelling en afbakening

Deze definitiestudie kent drie doelen:

1. Het in kaart brengen van bestaande technieken van duurzame energieopwekking, en van lopend binnen- en buitenlands onderzoek en mogelijke ontwikkelingen op dit gebied waarvoor geldt dat er op enigerlei wijze een zinvolle toepassing te bedenken is, of in de toekomst zou kunnen zijn, binnen de infrastructuur van de Nederlandse snelweg.
2. Het toetsen van de geïnventariseerde technieken aan de in de pilotstudie gedefinieerde criteria. Het resultaat van deze toetsing vormt de basis voor de aanbesteding van het proefproject.

---

<sup>1</sup> Onder de term ‘wegdek’ wordt in dit verband dus meer verstaan dan alleen de rijlaag; ook de directe omgeving, berm, wegmeubilair etc. worden beschouwd.

3. Het aanbieden van enkele innovatieve concepten die mogelijk ingezet kunnen worden binnen in het pilotproject Energiek Wegdek (ontworpen op basis van het resultaat van de onderdelen 1. en 2.).

De inventarisatie richt zich zowel op reeds toegepaste technieken van energieopwekking als technieken die op dit moment (verder) ontwikkeld worden. Ook wordt gekeken naar de toepasbaarheid van andere (wellicht minder bekende) technieken. Onderzoek in binnen- als buitenland is bestudeerd. Het overzicht werd verkregen door octrooionderzoek, databaseonderzoek en gerichte vragen aan onderzoeksinstituten en vakgroepen die werkzaam zijn op dit terrein. Ook wordt een uitspraak gedaan of en in hoeverre het mogelijk is bepaalde technieken te veranderen zodat deze (beter) passen in de doelstelling van het proefproject Energiek Wegdek.

Door de begeleidende projectgroep zijn vier criteria opgesteld waarop de energie-wintechnieken in en rond de (rijks)infrastructuur in eerste instantie dienen te worden getoetst:

- I) *Innovatie*  
De energie-wintechniek is innovatief of kan op innovatieve wijze gecombineerd worden met bestaande infrastructuur en/of voegt door de wijze waarop ze wordt toegepast iets toe aan bestaande kennis.
- II) *Betaalbaarheid*  
Het dient bij voorbaat niet uitgesloten te worden dat tegen economisch aanvaardbare kosten de energie gewonnen kan worden, nu of in de toekomst.
- III) *Duurzaamheid*  
De winmethode heeft betrekking op een in principe onuitputtelijke energiebron en de winning is niet (of nauwelijks) milieubelastend.
- IV) *Veiligheid*  
De aan te leggen energie-wintechniek (of combinatie van verschillende wintechnieken) mag op geen enkele wijze de verkeersveiligheid ter plaatse negatief beïnvloeden.

Ook wordt, voor zover relevant, gelet op aspecten als maatschappelijke acceptatie en praktische uitvoerbaarheid.

De volgende energie-wintechnieken komen achtereenvolgens aan de orde:

- Foto-voltaïsche systemen
- Warmtewisselaars
- Windenergie
- Biomassa
- Piëzo-elektricititeit en Peltier elementen

In het afsluitende hoofdstuk worden de technieken beoordeeld aan de hand van bovengenoemde criteria. In de berekeningen wordt gebruik gemaakt van het volgende profiel van een snelweg (tabel 1.1).

Tabel 1.1 *Specificaties referentienelweg.*

<i>Lengte</i>	<i>l</i>	<i>km</i>
<i>Aantal rijbanen</i>	<i>2 x 2</i>	
<i>Breedte rijbaan</i>	<i>3</i>	<i>m</i>
<i>Oppervlakte asfalt</i>	<i>1.8</i>	<i>ha.</i>
<i>Breedte berm</i>	<i>5</i>	<i>m</i>
<i>Oppervlakte berm</i>	<i>l</i>	<i>ha.</i>
<i>Vervoersintensiteit</i>	<i>75.000</i>	<i>voertuigen/dag</i>
<i>Personenvoertuigen</i>	<i>75</i>	<i>%</i>
<i>Vrachtvoertuigen</i>	<i>25</i>	<i>%</i>

## 2. FOTO-VOLTAÏSCHE SYSTEMEN

### 2.1 Algemeen

De toepassing van zonnecellen, de zgn. foto-voltaïsche (PV) systemen, is ook op gematigde breedtes een perspectiefrijke techniek om elektriciteit uit zonnestraling op te wekken. In potentie is er sprake van grootschalige opwekking. Probleem is echter het vinden van geschikte locaties. De techniek zelf is relatief ver ontwikkeld; revolutionaire doorbraken in technisch opzicht zijn dan ook niet te verwachten. De huidige kostprijs bedraagt ca. 10-15 NLG (4,5-6,8 EURO) per  $W_p$ . Een voorspelling omtrent prijsontwikkeling op korte termijn is moeilijk te geven: vermoedelijk blijft de kostprijs de komende jaren gelijk. Ondanks de verwachting dat de productiekosten van zonnecellen verder omlaag zullen gaan, zal de aanschafprijs hoog blijven door een relatief gelijkblijvende productie en de verwachte grotere vraag (marktwerking!) [2]. Het subsidiëren van overheidswege van aanschaf en plaatsing van zonnecellen in nieuwbouw werkt deze ontwikkeling vermoedelijk verder in de hand. Op de lange termijn wordt wel een daling voorspeld. In [67] is aangegeven dat de verwachte kostprijs van PV-systemen na 2015 minder dan 3 NLG per Watt zal bedragen wat neer komt op ca. 25% van de huidige kostprijs; dit komt neer op 14-21 EURO/GJ.

Het opgewekte elektrische vermogen ligt in de schaalgrootte van GigaWatts indien PV-systemen op de 'traditionele' wijze worden geïntegreerd in bestaande bebouwing, d.w.z. op daken van huizen en andere gebouwen. Schaalvergroting voor de inzet van energieopwekking middels PV-systemen kan bereikt worden door nieuwe toepassingsmogelijkheden. Het heersende zonneregime ter plaatse, het ruimtebeslag en de landschapsvervuiling door de installatie en de mogelijkheid tot afdracht van de opgewekte elektriciteit aan het bestaande net zijn (mede)bepalend voor een succesvolle inzet van de techniek. In de zoektocht naar nieuwe toepassingen en geschikte locaties ligt het idee dan ook voor de hand om die ruimte te gaan benutten die al op andere wijze in gebruik is, zoals langs snelwegen, spoorlijnen of vaarwegen of locaties die uit het zicht liggen zoals op zee.

### 2.2 Inventarisatie bestaande systemen

De toepassingen van de PV-techniek zijn te onderscheiden in:

1. *Autonome systemen*; deze systemen leveren stroom aan 'stand-alone' apparatuur (direct en/of via opslag in accu's) op locaties waar netvoorziening niet voorhanden is of aankoppeling aan het net te duur geacht wordt.
2. *Netgekoppelde systemen*; de opgewekte energie (of het surplus daaraan) van deze systemen wordt toegevoerd aan het reeds bestaande elektriciteitsnet.

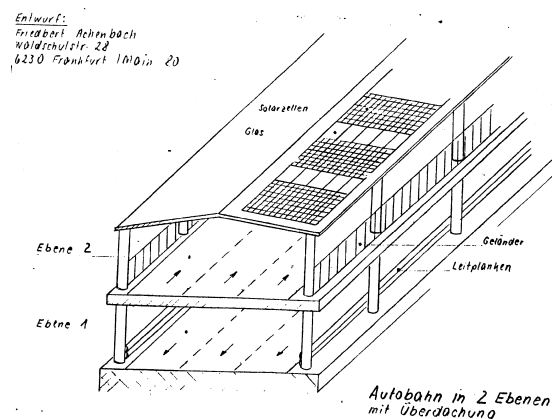
Van beide systemen zijn diverse voorbeelden te vinden in de literatuur dan wel in de vorm van (nog niet toegepaste) octrooien. Ook zijn gecombineerde systemen beschreven.

#### 2.2.1 Autonome PV-systemen

In de literatuur is een aanzienlijk aantal voorbeelden terug te vinden voor de energie opgewekt met een autonoom PV-systeem. De voordelen zijn: het PV-systeem transformeert zonne-energie in elektrische energie, het is een stille, schone en onuitputtelijke energiebron op een plek waar

het direct nodig is met doorgaans gering onderhoud en ruimtebeslag. In deze toepassingen is het kostenaspect minder van belang: de noodzaak ervan weegt voldoende op tegen een betrekkelijk hoge prijs van aanschaf en aanleg. Het nadeel van dergelijke systemen kan zijn de afhankelijkheid van de heersende weersgesteldheid waardoor beperkingen kunnen optreden aan de hoeveelheid opgewekte elektriciteit. Een algemene beschouwing aangaande autonome PV-systemen is te vinden in [3]. Hieronder volgt een selectie van voor de Nederlandse snelweg mogelijk interessante toepassingen (over kosten van aanschaf en aanleg vermelden de bronnen vrijwel niets):

- *Reflectoren of lichtindicatoren* in wegdek of op paaltjes langs de weg uitgerust met een lichtbron en een accu. Het licht wordt in de richting van het verkeer uitgezonden door middel van een speciaal ontworpen optisch systeem [4].
- *Verkeersgeleidingssysteem* boven de weg [5].
- *Smeltsysteem* gebaseerd op elektrische verwarming van het wegdek [6].
- *Verlichting in tunnels*. Overdag is in tunnels een sterkere verlichting nodig dan 's nachts om het lichtovergang m.n. bij de tunnelmond te verkleinen. Het gebruik van zonne-energie (met immers de hoogste opbrengst overdag) is hiervoor bij uitstek geschikt [7,8]. Een beschrijving van een idee waarbij PV panelen worden geplaatst op het dak van een gestapelde autoweg (zie figuur ??) is te vinden in [68].



- *Energievoorziening wegonderhoud* (gebouwen, apparatuur) [9,10].
- Voedingsbron van 'tankstations' voor door elektriciteit aangedreven wagens. Elektrische auto's worden gevoed door cellen die zich op (het dak van) de auto bevinden, maar daarnaast bestaan er met zonnepanelen uitgeruste 'pompen' waar elektriciteit 'getankt' kan worden [3].
- *Waarschuwingssysteem voor mistbanken in combinatie met rijbaan lichtindicatoren* [11].
- *Mobiel verwarmingssysteem voor wegwerkers* [12].

Autonome systemen zijn vrijwel altijd systemen met relatief geringe opbrengst. Bij systemen met een groter vermogen zal, vanwege de fijnmazigheid van het elektriciteitsnet in Nederland, al snel een koppeling met dit net gelegd worden. De inzet van autonome systemen kan echter wel degelijk zinvol zijn. Kandidaten zijn alle configuraties waarbij nu een aggregaat wordt

ingezet, alsmede applicaties waarbij slechts een klein vermogen noodzakelijk is. De lijst van voorbeelden met autonome systemen zal blijven groeien in de toekomst.

### 2.2.2 Netgekoppelde PV-systemen

Bij grootschalige energieopwekking rondom de Nederlandse verkeersinfrastructuur zullen vrijwel zeker netgekoppelde PV-systemen ingezet worden. In een recent afgeronde studie voor de EU [13] zijn de mogelijkheden verkend van *foto-voltaïsche energieopwekking op bestaande en nog aan te leggen (geluids-)schermen* langs snelwegen en rails in Duitsland, Frankrijk, Zwitserland, Groot-Brittannië en Nederland. Voor Nederland is de Universiteit van Utrecht deelnemer [14]. Men beschouwt dit als één van in potentie meest economische toepassingen van een netgekoppeld systeem. De voordelen zijn een flink vermogen (meer dan 100 kW<sub>p</sub>), geen verder ruimtebeslag of horizonvervuiling, en de mogelijkheid van standaardisering van techniek en aanleg wat naar verwachting zal leiden tot lagere kosten.

De mogelijke opbrengst van een PV-systeem langs een snelweg wordt bepaald door het beschikbare oppervlak en de oriëntatie van de (bestaande en geplande) schermen alsmede de hoeveelheid inkomende zonnestraling en het effect van eventueel aanwezige schaduw ter plaatse. Er zijn diverse configuraties te onderscheiden [13]:

- i) 'top mounted', plaatsing onder een hoek op de bovenkant van het scherm,
- ii) 'shingles', plaatsing onder een hoek op diverse hoogtes langs het scherm,
- iii) 'O-W vertical', aangebracht op het scherm langs een oost-west lopende snelweg (scherm gericht naar het zuiden), en
- iv) 'N-S vertical bifacial', dubbel werkende zonnepanelen (doorzichtige basis zodat het zonlicht van beide kanten de cellen kan bereiken) rechtop geplaatst langs een snelweg die noord-zuid loopt.

De energie-opbrengst per oppervlakte eenheid van de laatste configuratie blijkt ruwweg minimaal gelijk te zijn als die van een scherm in de optimale positie d.w.z. een scherm dat georiënteerd is op het zuiden onder een hoek van ca. 30°. De meest efficiënte zijde van het dubbelzijdige paneel is altijd naar het westen georiënteerd omdat aan die zijde de opbrengst hoger is. Deze toepassing wordt in Europees verband als veelbelovend beschouwd [13]; voor Nederland is deze toepassing een noviteit.

In de studie van Goetzberger [13] wordt voor PV-systemen een theoretisch, technisch en korte-termijn potentieel van de opbrengst gehanteerd:

- *Theoretisch potentieel* duidt op het maximaal haalbare, d.w.z. de opbrengst in het geval dat langs *alle* geschikte snelwegen schermen met (verder ontwikkelde) PV-systemen zouden worden aangebracht; de panelen hebben voor elke locatie de meest optimale hoek.
- *Technisch haalbaar* is de opbrengst die wordt verkregen als *alle bestaande en geplande* geluidsschermen zouden zijn voorzien van bestaande PV technologie; er wordt rekening gehouden met een schaduweffect.
- Met *korte-termijn potentieel* wordt bedoeld dat alleen de *geplande* geluidsschermen met state-of-the-art PV-systemen zouden worden uitgerust terwijl rekening wordt gehouden met schaduw. Termijn is hier 5 jaar.

Voor Nederland zijn de belangrijkste resultaten in onderstaande tabel 2.1 worden samengevat:

Tabel 2.1 *Theoretisch, technisch en korte-termijn potentieel voor PV-systemen aangebracht op geluidsschermen langs Nederlandse snelwegen (uit [13]).*

Potentieel	Weglengthe [km <sup>a</sup> ]	Opgesteld vermogen [MW <sub>p</sub> ]	Verwachte productie [GWh/jaar]	Verwachte opbrengst [GJ/jaar km]
Theoretisch	2.701	3.233	2.590	3.452
Technisch	456	115	92	726
Korte termijn	210	51	41	703

<sup>a</sup>km snelweg

(verwachte opbrengst = verwachte productie\*3.600/weglengthe)

Enkele conclusies naar aanleiding van deze tabel:

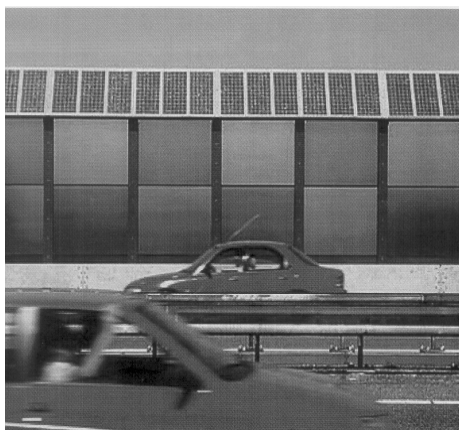
- Er bestaat in Nederland een hoog theoretisch potentieel. Dit wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van een relatief uitgebreid snelwegennet. Met name in de Randstad ten zuiden en oosten van Amsterdam zijn in de literatuur mogelijkheden geïdentificeerd.
- De meeste geluidsschermen worden gebouwd met het doel de overschrijding van wettelijk toelaatbare geluidsniveaus te elimineren op een specifieke locatie. Bij de bouw wordt dan ook geen rekening gehouden met energiewinning via PV-systemen. Het is derhalve zinvol om in de constructie van geluidsschermen alvast rekening te houden met de mogelijkheid van het aanbrengen van PV-systemen onder zo gunstig mogelijke condities.
- Interessant is de mogelijkheid om PV-systemen aan te brengen op schermen die het geluid onvoldoende terugbrengen als gevolg van de toename in het verkeer om zodoende wel aan de normen te voldoen. Bijvoorbeeld in de provincie Zuid-Holland voldoet 30% van alle bestaande geluidsschermen niet meer aan de eisen.
- Vermeldenswaard is dat in stedelijke gebieden schermen dikwijls moeilijk bereikbaar zijn voor technisch onderhoud.
- Zoals af te lezen valt in tabel 2.1 is het potentieel aan PV toepassing op geluidsschermen voor ca. 50 MW<sub>p</sub> voor de korte termijn. Hiervan is ca. 20-25% afkomstig van dubbelzijdige PV panelen.

### 2.3 Toepassingen netgekoppelde PV-systemen in Nederland

In Nederland bestaat een tweetal voorbeelden van netgekoppelde PV-projecten langs een snelweg:

- Langs de A9 bij Ouderkerk aan de Amstel zijn 2.160 panelen met zonnecellen geplaatst in het bovenste gedeelte van de geluidsscherminconstructie [15,16,17]. Het betreft 360 paneelsegmenten met 6 zonnepanelen. Samen hebben ze een vermogen van 220 kW<sub>p</sub> en produceren jaarlijks 634 GJ (176.000 kWh) aan elektrische energie. Het project (gestart in december 1998) is geëindigd in december 2000. De totale kosten van het PV-project bedraagt bijna 2,4 MEURO; het PV-systeem alleen kostte 1,9 MEURO. De oriëntatie van het scherm is zuid-zuid-west. De hellingshoek t.o.v. de horizontaal is 50°; dit is tamelijk recht op en gedaan om het vuil worden te voorkomen. Aan onderhoud en schoonmaken is niets gedaan, geschat wordt dat dit na een jaar 10% verlies aan opbrengst oplevert. De gelijkstroom van alle zonnepanelen tezamen wordt via een stroomomvormer aan het net aangeboden. Bij het begin van dit project was de AC-module een redelijk nieuw product.

Omdat gebruik is gemaakt van verschillende soorten omvormers, kunnen de prestaties daarvan onderling vergeleken worden.



- In opdracht van RWS, directie Utrecht is een geluidsscherm met zonnestroom aangelegd langs de A27 ter hoogte van De Bilt. Het scherm heeft een lengte van 550 m met daarin een netgekoppeld systeem van 55 kW<sub>p</sub>. De zonnepanelen zijn bovenop het scherm aangebracht, zodanig dat ze ook een bijdrage leveren aan de geluidsbeperking. In totaal zijn 1.116 zonnepanelen gebruikt. De oriëntatie van de panelen is West-Zuid-West. De zonnestroom wordt direct aan het net geleverd via een omvormer. De productie is ongeveer 119 GJ (33.000 kWh) per jaar. Het systeem is in 1995 in gebruik genomen. De totale kosten van aanschaf en aanleg bedroegen 1,1 MEURO; de productie van het PV-systeem kostte 544 kEURO [15].

Het aanbrengen van PV-systemen op geluidsschermen vindt in diverse Europese landen plaats; interessante projecten zijn te vinden in Zwitserland [18,19], Oostenrijk [20] en Duitsland [21].

## 2.4 Energieopbrengst

Voor een scherm van 1 km lengte, een hoogte van 2 m en een gebruikelijk piekvermogen van het PV-paneel van 95 W<sub>p</sub>/m<sup>2</sup> is het opgestelde vermogen 190 kW<sub>p</sub>. De opbrengst per jaar, indien gericht op het zuiden, is gesteld op 800 Wh/W<sub>p</sub> [1,17,22,23], ofwel 0,27 GJ/m<sup>2</sup>jaar (76 kWh/m<sup>2</sup>.jaar). De jaarlijkse opbrengst per kilometer snelweg is dan 540 GJ<sup>2</sup>.

Dit geldt alleen voor zonnepanelen die precies op het zuiden gericht staan (oost-west wegen). Schermen die hiervan afwijken brengen minder op maar het verlies is gering. Bijv. een scherm dat op het zuidoosten gericht wordt en onder een hoek van 50° wordt geplaatst ontvangt nog steeds ca. 90% van de maximaal mogelijke instraling [22]. M.b.t. tot dubbelwerkende zonnepanelen wordt in [22] een opbrengst mogelijk geacht die op kan lopen tot 115%.

## 2.5 Kosten

Anno 2000 bedragen de kosten van een PV-systeem van 1 km lengte, een hoogte van 2 m, een piekvermogen van 95 W<sub>p</sub>/m<sup>2</sup>, en productiekosten per W<sub>p</sub> van 10-15 NLG/W<sub>p</sub> tussen de 1,9 en 2,9 MNLG (0,9-1,3 MEURO)<sup>3</sup>; dit is in dezelfde orde van grootte als de vermelde bedragen

<sup>2</sup> Opbrengst in 1 jaar = 1000[m] x 2[m] x 800 Wh/W<sub>p</sub> = 2000[m<sup>2</sup>]x 0,27[GJ/m<sup>2</sup>] = 540 GJ.

<sup>3</sup> Kosten scherm langs snelweg bij 10 NLG/W<sub>p</sub> = 1000[m] x 2[m] x 95[W<sub>p</sub>/m<sup>2</sup>] x 10[NLG/W<sub>p</sub>] = 1.805 kNLG.



voor de PV-systemen langs de A9 en A27 indien vermogen, afmetingen en tijdstip in aanmerking worden genomen.

Bij een jaarlijkse productie langs één kilometer snelweg van 540 GJ (zie par. 2.2.3) en een levensduur van 30 jaar bedragen de kosten per GJ 120 à 180 NLG (50-80 EURO)<sup>4</sup>; hier is geen rekening gehouden met kosten van aanleg, onderhoud en reparatie. De kosten van aanleg van het systeem worden sterk bepaald door de omstandigheden ter plaatse. Deze kosten bedragen 30% voor het scherm langs de A9 en 100% voor de A27 van de PV-systeemkosten op deze locaties.

---

<sup>4</sup> Kosten per GJ (bij 10 NLG/W<sub>p</sub>) = 1900[kNLG] : (30[jaar]x 540[GJ/jaar]) = 117 NLG.

### 3. WARMTEWISSELAARS

#### 3.1 Algemeen

Asfalt wordt heet in de zomer doordat zonnewarmte accumuleert als gevolg van het grote donkergekleurde oppervlak. Deze warmte kan aan het asfalt worden onttrokken door een vloeistof te pompen door het wegdek. Momenteel staat deze techniek zowel nationaal als internationaal ruim in de belangstelling. Met name op energetisch gebied is hier al behoorlijk wat onderzoek aan gedaan (o.a. [24]).

De mogelijkheden van deze techniek zijn in beginsel driedig:

- 1) In de zomer kan de temperatuur in het asfalt in Nederland oplopen tot 50 à 60 °C. Als deze warmte met een redelijk rendement zou kunnen worden onttrokken en opgeslagen, zou dit vooral in de winter een interessante energiebron voor verwarming in de woning- en utiliteitsbouw vormen.
- 2) Warmte kan ook aangewend worden voor het verwarmen van het wegdek in de winter en zo een aandeel leveren in de gladheidbestrijding. Hiervoor kan eventueel ook restwarmte uit industriële processen gebruikt worden. Toepassing van wegdekverwarming uit duurzame bronnen draagt niet alleen bij aan een hogere verkeersveiligheid, maar is ook goed voor het milieu: er is minder strooizout nodig. In extreme situaties kan de combinatie van verwarmen en strooien het wegdek mogelijk ijsvrij houden, onder de condities waar één van beide mogelijkheden afzonderlijk niet afdoende zou zijn.
- 3) Door het onttrekken van warmte in de zomer wordt de temperatuur in het asfalt verlaagd. Dit kan winst voor de constructie opleveren omdat daardoor minder spoorvorming optreedt [24]. De levensduur van verkeerswerken kan hierdoor toenemen (minder uitzet- en krimpschade), waardoor ook minder onderhoud nodig is. Minder onderhoud veroorzaakt minder verlies aan energie alsmede minder verkeershinder (files), waardoor de uitstoot van CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en roet zal afnemen. Overigens, het inbrengen van een warmtecollectoren in een weg brengt ook constructieve risico's met zich mee die mogelijk juist een negatief effect kunnen hebben op levensduur en onderhoud van het wegdek.

#### 3.2 Inventarisatie van warmtewisselaar systemen

Er bestaat op dit moment in Nederland een viertal systemen die gebaseerd zijn op warmtewinning uit asfalt door middel van watervoerende buizen in het wegdek [25]:

- WinnerWay-systeem op basis van 25 mm. Crosslinked Polyethyleenbuizen (Van den Boom Wegbouwkundig Bureau BV, ARCADIS Bouw/Infra BV, IF Technology BV en Velta BV).
- Road Energy Systems op basis van polyethyleen buizen in het wegdek (Ooms Avenhorn Holding bv, WTH Vloerverwarming BV).
- Jansen de Jong groep. Dit systeem is gebaseerd op drielaagse PE-aluminium-kunststof buizen in het wegdek.
- Als alternatief voor warmtewisseling via buizen in het wegdek heeft KEMA een systeem ontwikkeld waarbij water stroomt door een poreuze laag ZOAB die boven en onder is

afgesloten door een laag dicht asfalt (Het 'Zonneweg' concept). Volgens KEMA is het rendement van deze systemen vergelijkbaar met een conventionele zonnecollector [26]. Een belangrijk voordeel is verder dat een watervoerende asfalt zonnecollector in het wegdek uit één materiaal is opgebouwd en daardoor gemakkelijk te recyclen is. Volgens de uitvinders is de constructieve sterkte van de watervoerende asfalt constructie (ZOWAB) vrijwel gelijk aan normaal asfalt [27]. Deze visie over de sterkte van het asfalt wordt overigens niet onderschreven door Moolenaars [28].

In Nederland bestaan op dit moment dus vier systemen die al dan niet voor een kortere of langere tijd zijn of worden getest. Technisch lijken de systemen haalbaar. Nader onderzoek is echter gewenst, onder andere omdat de omstandigheden bij de testvakken - zoals ondergrond, verkeersintensiteit en aslasten - afwijken van die bij auto(snel)wegen.

### 3.3 Overzicht pilot projecten in Nederland

- In Nederland is een test uitgevoerd bij de Haringvlietsluizen. Zomers wordt het wegdek gekoeld met een collector systeem en 's winters verwarmd om schade door krimpen en uitzetten te voorkomen. Dit geeft minder spoorvorming en slijtage aan het wegdek en dus een langere levensduur. Dit project is beëindigd.
- DWW heeft een asfaltproefvak gerealiseerd in de N34 bij Zuidlaren, waarin ten behoeve van de temperatuurregulering buizen zijn ingebouwd.
- KEMA heeft in samenwerking met KWS een zestal proefvlakken gerealiseerd op het Business Park Arnhem. Dit betreft het op ZOWAB gebaseerde 'Zonneweg' concept.
- In Scharwoude is een proefproject met een commerciële asfaltcollector (zie inzet). Het betreft een samenwerking tussen de gemeente Westerkoggenland en Ooms Avenhorn Holding. De energie wordt gebruikt ten behoeve van koeling en verwarming van een kantoorgebouw en een laboratorium te Scharwoude.

#### Warmtecollector in Scharwoude

In Scharwoude is de eerste commerciële asfaltcollector aangebracht. Door een samenwerking tussen de gemeente Westerkoggenland (als eigenaar van de weg) en Ooms Avenhorn Holding (aannemer in de bouwnijverheid) is het eerste project in Nederland uitgevoerd om de openbare weg te gebruiken als asfaltcollector voor het opvangen van energie ten behoeve van koeling en verwarming van een kantoorgebouw en een laboratorium te Scharwoude. Het concept is een asfaltlaag en een versterkend rooster waar een watervoerend register (van buizen) in opgenomen is. Het bijzondere van dit systeem is dat het watervoerend register (de buizen) hoog in het asfalt ligt zodat het grootste rendement behaald kan worden. Door toepassing van een versterkend rooster worden de negatieve effecten die de buizen in het asfalt zouden hebben opgeheven. Het systeem is zowel aan te brengen in bestaande als wel in nieuw aan te leggen wegen. Tevens bestaat de mogelijkheid om het versterkend rooster te gebruiken voor detectiekabels waarmee een slim wegdek geconstrueerd kan worden.

Bron [www.ooms.nl](http://www.ooms.nl):

Naast de hierboven genoemde projecten wordt op dit moment voor een 14-tal locaties overwogen of onderzocht of warmtewinning uit asfalt een optie is [24].

### 3.4 Opslag van warmte of koude in de bodem

Warmtewisselaars in het wegdek leveren de meeste warmte in de zomer, terwijl deze warmte vooral 's winters nodig is voor het verwarmen van het asfalt. Daarom is het gewenst om de warmte zomers in de bodem op te slaan waarna deze warmte 's winters weer kan worden aangesproken. Omgekeerd kan met koude hetzelfde worden gedaan (opslag in winter, aanspraak in zomer). Aquifers bieden een geschikte mogelijkheid voor opslag van warmte of koude. Nederland bestaat - geologisch gesproken - uit een grote 'wafel' van zand- en kleilagen. Bijna overal zijn aquifers van voldoende capaciteit voor seizoensopslag van warmte en koude aanwezig. Op sommige plaatsen in het uiterste zuiden en oosten is warmteopslag in aquifers niet mogelijk omdat afsluitende kleilagen ontbreken. De aquifers bevinden zich veelal op een diepte van 60 tot 120 meter onder het maaiveld. Doordat het water in deze zandlagen zich nauwelijks verplaatst (slechts 1 meter in 10 jaar) is het mogelijk om op deze plaatsen warmte c.q. koude op te slaan. Pompinstallaties zorgen voor de circulatie van de systeemvloeistof en het onttrekken en injecteren van het grondwater. De overdracht van warmte/koude vindt plaats in warmtewisselaars zodat de systeemvloeistof en het grondwater niet worden vermengd. Als vuistregel mag men van een opslagrendement van circa 70 % uitgaan [24].

### 3.5 Rendementen

De gekozen intreettemperatuur (of uitreettemperatuur) en het debiet hebben een grote invloed op het rendement van de warmtewisselaars in het wegdek. Hoe lager de temperatuur van de koelvloeistof, en hoe groter het debiet, des te meer energie er aan de weg wordt onttrokken. Verder geldt dat hoe hoger de uitreettemperatuur van de koelvloeistof is, des te groter de optredende verliezen tijdens het transport naar de aquifer. Er geldt dus: hoe hoogwaardiger de warmte, hoe lager het rendement. De keuze voor deze variabelen hangt mede af van de functie van de warmtewisselaar (gladheidbestrijding, onderhoudsreductie of warmtewinning). Het is overigens niet zinvol om de warmte in een zeer hoogwaardige vorm op te slaan in aquifers: door warmte-uitwisseling in de bodem zal dan sowieso temperatuursvereffening (daling) optreden. Bij temperaturen boven ca. 30 °C wordt de dichtheid van de opgeslagen warme watermassa zo laag dat er convectiestromingen in de aquifer gaan optreden, waardoor de warmte-uitwisseling met de omgeving toeneemt [29]. De meeste ontwikkelaars van systemen lijken daarom te streven naar een uitree-temperatuur tussen 20 en 25°C [24].

De Sectie Verkeerskunde van de TU-Delft heeft op basis van berekeningen en simulaties een schatting gemaakt van de energieopbrengst van het DWW asfaltproefvak met buizen in de N34 bij Zuidlaren. Hieruit volgt dat per m<sup>2</sup> asfalt ca. 0,6 GJ op jaarbasis kan worden onttrokken. Dit is iets meer dan 20% van de opbrengst van een conventionele zonnecollector met een zelfde oppervlakte [23]. Modelberekeningen t.a.v. de energieopbrengst van het 'Zonneweg' concept wijzen op een jaaropbrengst van ongeveer 1,5 GJ/m<sup>2</sup>, bij een intredende water temperatuur van 10°C en een uitredende water temperatuur van 20°C. Deze gemodelleerde opbrengstwaarde wordt ondersteund door voorlopige experimenten aan een proefvlak [30]. Bovengenoemde opbrengstgetallen zijn nog niet gecorrigeerd voor transport- en opslagverliezen en het verbruik van elektrische energie voor pompen, etc..

In tabel 3.1 staat een overzicht van de opbrengst van verschillende wegdekcollectoren [24]. Vetgedrukte waarden geven bruto-opbrengsten aan, hierbij is rekening gehouden met transport- en opslagverliezen en het verbruik van elektrische energie voor de warmtepompen; bij de overige (niet-vetgedrukte) waarden is dat niet het geval. De verschillende genoemde rendementen zijn onderling moeilijk vergelijkbaar omdat de randvoorwaarden en uitgangspunten verschillen (meting, modellering, bruto, netto etc).

Tabel 3.1 *Opbrengst wegdekcollectoren zoals toegepast in verschillende projecten*

<b>Bron</b>	<b>Status</b>	<b>Energieopbrengst in MJ/m<sup>2</sup> per jaar</b>
Tussenrapportage Haringvlietsluizen	Berekening (analytisch)	1916
Tussenrapportage Haringvlietsluizen	Berekening (analytisch)	<b>950</b>
Berekening IF-Technology	Berekening (numeriek)	850
Fin.-econ. Vergelijking Bennebroekerweg	Aanname	<b>1044</b>
Haalbaarheidsnotitie Rijksweg A5 Zuid	Aanname	<b>800</b>
Haalbaarheid A4 als Zonnecollector	Aanname	<b>700</b>
Energie uit Asfalt?	Berekening (numeriek) op basis van experimentele gegevens.	612 <sup>1)</sup>
De Asfaltcollector	Berekening (numeriek)	640 <sup>2)</sup>
De Asfaltcollector	Correctie op basis van experimentele gegevens.	320 <sup>2)</sup>
Spinoza-onderzoek (niet gepubliceerd)	Berekening (analytisch) op basis van experimentele gegevens	896 <sup>3)</sup>
Spinoza-onderzoek	Berekening (analytisch) op basis van experimentele gegevens	<b>131</b> <sup>4)</sup>

- 1) Geen rekening gehouden met bewolking en neerslag.
- 2) Volgens de auteurs van het rapport worden de prestaties van het numeriek gesimuleerde systeem met minstens een factor 2 overschat.
- 3) Betreft bruto-warmtecollector in zonnecollector. Geen rekening gehouden met transport- en opslagverliezen. Op basis van 12 experimenten (september '99) onder vrij zonnige omstandigheden. Bij de berekening van opslag- en transportverliezen is gebruikgemaakt van de tussenrapportage Haringvlietsluizen.

De gemiddelde jaar opbrengst berekend over de 11 projecten genoemd in de tabel is (afgerond) 0,8 GJ/m<sup>2</sup>. In het geval dat een wegvak van 1 km lengte (18.000 m<sup>2</sup>) voorzien wordt van warmtewisselaars en een benutting van 70% dan bedraagt de gemiddelde opbrengst 10.000 GJ per jaar en per km.

### 3.6 Kosten

De aanleg van een buizensysteem kost momenteel 23,- à 70,- EURO/m<sup>2</sup> [24], exclusief het besturingssysteem en verdere opslag. Als uitgegaan wordt van een wegvak van 1 km lengte (18.000 m<sup>2</sup>) dan liggen de kosten voor de aanleg van een proefvak van 1 kilometer lengte tussen 410 kEURO en 1.300 kEURO.

### 3.7 Mogelijkheden voor innovatie

Het toepassen van warmtewinning uit asfalt, gekoppeld aan opslag in aquifers en distributie naar woningen, is met name innovatief in combinatie met nieuwbouwprojecten. Voor bestaande woningen is deze optie niet interessant, vanwege de noodzakelijke kostbare aanpassingen. Er staan enkele nieuwbouwprojecten op stapel [24], waarvan onder meer een project bij Heteren veelbelovend lijkt. Dit betreft een nieuwbouwproject van 370 woningen waarvan ruimten en tapwatervoorzieningen verwarmd gaan worden met gebruikmaking van warmte uit asfaltcollectoren.

Andere mogelijkheden voor (meer technische) innovatie liggen op het terrein van de opwaardering van de relatief laagwaardige energie die uit de collectoren komt door middel van warmtepompen al dan niet gecombineerd met de inzet van Organic Rankine Cycle techniek (zie box: CO<sub>2</sub> in de weg).

#### *Opwaarderen laagwaardige warmte*

Het warme water dat in de collectoren wordt gegenereerd kan op sommige delen van de snelweg direct geleverd worden aan aangrenzende bebouwing of industrie. Niet altijd is het warme water van 20-30°C bruikbaar. Water met een hogere temperatuur kan soms wel gebruikt worden. Indien in de buurt van de snelweg helemaal geen afzetmogelijkheid is voor warm is het nog mogelijk de warmte naar bijvoorbeeld elektriciteit om te zetten. Deze omzetting kan tot nu toe alleen met hele lage rendementen. Is de elektriciteit beschikbaar dan kan dit kan zonder veel verlies verder getransporteerd worden.

Water met relatief lage temperatuur kan gebruikt worden om water met een hogere temperatuur te produceren door gebruik te maken van een warmtepomp. Indien water van 20°C beschikbaar is dan kan dat gebruikt worden om water te maken van 40-70°C te maken. Hoe groter het te overbruggen temperatuurverschil, hoe meer energie er nodig is. Als er water van 20°C beschikbaar is en er is water van 40°C nodig dan kan ongeveer 80% van hiervoor benodigde energie aan de voorraad van 20 graden worden onttrokken. De overige 20% is nodig in de vorm van elektriciteit, voor het aandrijven van pompen etc. [31]. Overigens is het energetisch gunstiger om water bij 20 graden te winnen, te transporteren en met een warmtepomp om te zetten naar water van 40 graden dan water van 40 graden te willen winnen en dat transporteren. De voor de pompenergie noodzakelijke elektriciteit is een hoogwaardiger vorm van energie dan de gegenereerde warmte.

Op delen van het wegennet is ook de beschikbaarheid van water van hogere temperatuur niet zinnig. Bij die locaties zou warmte dus nog verder opgewaardeerd moeten worden, bijvoorbeeld tot elektriciteit. Hier liggen mogelijkheden voor innovatie rendementen liggen echter in de orde van enkele procenten.

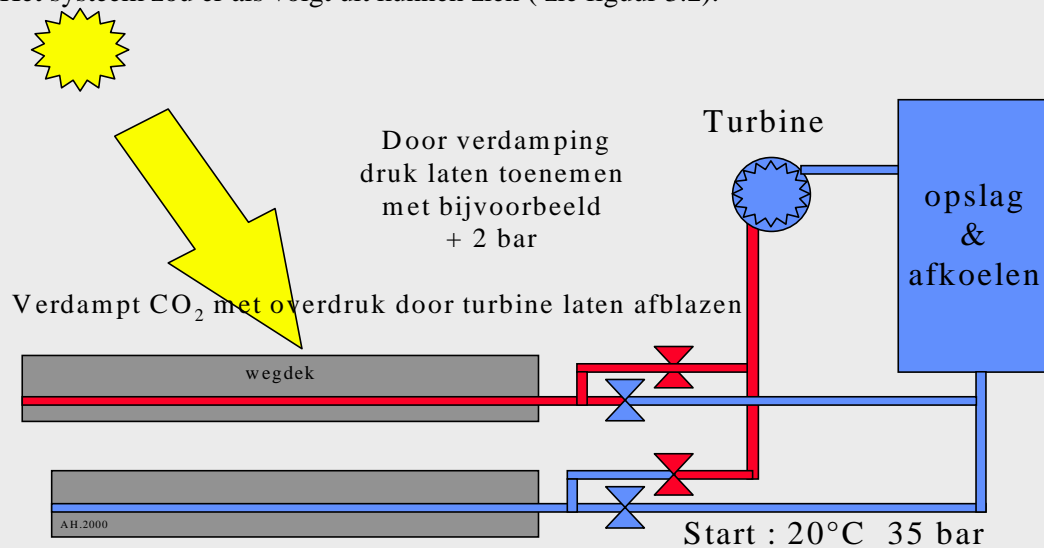
*Innovatief idee : CO<sub>2</sub> in de weg*

Een heel ander idee is het inzetten van een ander medium in de zonne collectoren, in plaats van water. Het grote probleem bij de toepassing van zonnecollectoren in het wegdek is immers dat deze laagwaardige energie (warm water van 20-25 ) soms moeilijk bruikbaar is. Bij grootschalige inzet van collectoren zijn er grote oppervlakken waar de warmte niet echt nuttig gebruikt kan worden. Het zou mooi zijn als we een methode kunnen vinden op hoogwaardige energie op te wekken.

Een mogelijke oplossing ligt in het gebruik van een ander medium in de collectoren. Indien we een gas of vloeistof kunnen vinden die een voldoende groot drukverschil opbouwt bij een verschil in temperatuur van 20 graden tussen omgeving en collector, dan komen we daarmee wellicht verder.

We kunnen dan zoeken naar een stof die vloeibaar is bij 20 °C en een kookpunt heeft bij 30 of 40°C Of we gebruiken een gas. CO<sub>2</sub> zou een optie zijn. Een CO<sub>2</sub> cylinder met gas/vloeistof heeft bij 20 °C een druk van ± 33 bar. Bij 25°C is deze druk opgelopen tot ±35 bar. Met dit verschil in druk kan een turbine aangedreven worden die vervolgens elektriciteit kan leveren.

Het systeem zou er als volgt uit kunnen zien ( zie figuur 3.2):



Bij vullen met 'koud' gas/vloeistof

Figuur 3.2

*Een set buizen in het wegdek wordt met CO<sub>2</sub> gevuld. Dit compartiment wordt afgesloten en warmt op: de druk neemt toe en bij een druk die voldoende hoog is voor gebruik in de turbine wordt het compartiment afgeblazen door de turbine. Bij de decompressie koelt het CO<sub>2</sub> weer af. Verder afkoelen kan in een opslag tank waar vanuit de compartimenten steeds weer gevuld worden.*

Kwantitatief hebben we aan dit systeem nog niet kunnen rekenen, het valt dus voornamelijk in de categorie Willie Wortel ideeën. Voor een echte proef zullen dimensies van de verschillende delen nog uitgerekend moeten worden ook zijn er meerdere technische varianten voor de collector-turbine combinatie te bedenken. Tenslotte kan de installatie ook met andere gasen bedreven worden, wellicht is CO<sub>2</sub> niet de beste optie.

Naar aanleiding van dit idee werd op het world-wide web gezocht en er is een techniek die inderdaad gebruik maakt van warmte collectoren om energie te genereren. Het gaat dan om gebruik van Organic Rankine Cycle. Eigenlijk een omgekeerde koelkast. Freon of ammoniak wordt gebruikt omdat dat al bij relatief lage temperaturen verdampt. De damp werkt als stoom en drijft een turbine aan.

## 4. BIOMASSA

### 4.1 Algemeen

Biomassa neemt een unieke plaats in tussen de duurzame energiebronnen. Biomassa is als enige een echte brandstof ('energiegewas') en bovendien (olievervangende) grondstof voor allerlei producten. De overheidsdoelstelling van 10% duurzaam opgewekte energie uiterlijk in 2020, waarvan 50% uit biomassa zal leiden tot een forse groei (tot 120 PJ) van het aandeel biomassa bij de opwekking van energie. De doelstelling van duurzame energie voor 2000 (3%) is echter maar voor minder dan de helft gerealiseerd. Hierbij lijkt de beperkte beschikbaarheid van bruikbare biomassa voor een redelijke prijs een belangrijke rol te spelen. Overigens is naast de winning van energie ook het voorkomen van CO<sub>2</sub>-emissies een belangrijk oogmerk. Introductie van biomassa op grote schaal lijkt mogelijk in deze eeuw. De brandstof is concurrerend met steenkool [68]. De ontwikkeling van een "schone" en "goedkope" omzetting van biomassa in elektriciteit, vloeibare en gasvormige energiedragers, verkeert echter nog in een beginstadium

Van de beoogde 120 PJ is thans ca. 40 PJ beschikbaar, die momenteel wordt ingezet in AVI's (ca 25 PJ), in een aantal kleinschalige houtstook installaties (ca. 3 PJ) en in enkele wat grotere installaties (ca. 5 PJ). Daarnaast wordt ca. 8 PJ als bijstook ingezet in kolengestookte centrales. Analyse van het ontwikkelingspotentieel wijst uit dat bijstook veruit het meest rendabel is, onder meer omdat gebruik gemaakt wordt van bestaande installaties.

Aan conversietechnieken zijn op dit moment toepasbaar: mee- of bijstoken, stortgas en vergisting. Voor de komende 10 jaar zijn de vooruitzichten gunstig voor vergassing, fermentatie en vergisting. Tijdige aandacht is nodig voor de milieugevolgen van een mogelijk groei in de toepassing. Als dit niet gebeurt kan dit leiden tot milieuhygiënische knelpunten die dan weer tot sanering achteraf leiden. Als voorbeeld geldt hierbij de warmtekracht koppeling die een positief effect had op de energie-efficiency maar tevens een toename van de NO<sub>x</sub> emissies veroorzaakte wat weer tot aanvullende regelgeving achteraf leidde. Pas als de inzet van biomassa milieuhygiënisch acceptabel is kan er sprake zijn van duurzaamheid [69].

Voor een directe conversie (verbranden, vergassen) worden snelgroeïende houtachtige gewassen gebruikt die een hoge opbrengst per hectare geven, zoals olifantsgras of wilg. Daarnaast worden energiegewassen gebruikt om bio-ethanol of biodiesel te maken (extractie). Een derde mogelijkheid is uit te gaan van biomassa als grondstof. De biomassa wordt dan niet gebruikt als brandstof, maar om er producten van te maken. Afhankelijk van het doel moet een conversietechniek worden gekozen. Dat kan een biologisch proces zijn waarbij micro-organismen slib of andere (natte) biomassa omzetten in biogas of bioalcohol (vergisten, fermentatie). Het alternatief is een thermisch proces: verbranding, vergassing of pyrolyse. In alle gevallen zijn de eindproducten water, CO<sub>2</sub> en energie. Van de thermische processen wordt verbranding op dit moment het meest toegepast. In het ideale geval gebeurt dat in een zogenaamde wervelbed-oven waarin een gelijkmatige en beheersbare verbranding mogelijk is met een hoog rendement.

Een oude bekende is vergassing, oorspronkelijk ontwikkeld voor de productie van stadsgas uit steenkool, maar nu als hightech techniek gebruikt om gas te maken voor elektriciteitsproductie (zie inzet Biomassa vergassingsinstallatie). Dit is veel goedkoper dan verbranding omdat het reinigen van de stookgassen veel eenvoudiger is. Tenslotte is er de pyrolyse waarbij biomassa wordt verhit zonder zuurstof. De biomassa wordt dan niet verbrand maar ontleed in olie, gas en houtskool.



Door ECN is een studie verricht naar de bijdrage die energieteelt kan leveren aan het aandeel duurzame energie in 2020. Berekend is dat uiteindelijk maximaal ca. 7 procent van het huidige primaire energiegebruik door binnenlandse energieteelt gedekt kan worden. Dit is ca. 200 PJ primaire energie uit biomassa. Verwacht wordt dat de prijzen voor import van biomassa lager zullen zijn en wordt aangenomen dat tot 2020 vooral de import van biomassa uit energieteelt een optie is. Prijzen voor de biomassa uit bijv. de Baltische staten liggen tussen de 1 tot 3 EURO/GJ. Op termijn wordt echter aangenomen dat door toenemende vraag er een schaarste aan biomassa uit deze staten zal ontstaan. De prijs van biomassa zal dan oplopen naar ca. 5 EURO/GJ. De prijzen die gerekend worden voor de teelt van binnenlandse biomassa (2,5-6 EURO/GJ) zijn dan concurrerend en verwacht wordt dan op langere termijn een stimulans ontstaat voor de binnenlandse teelt.

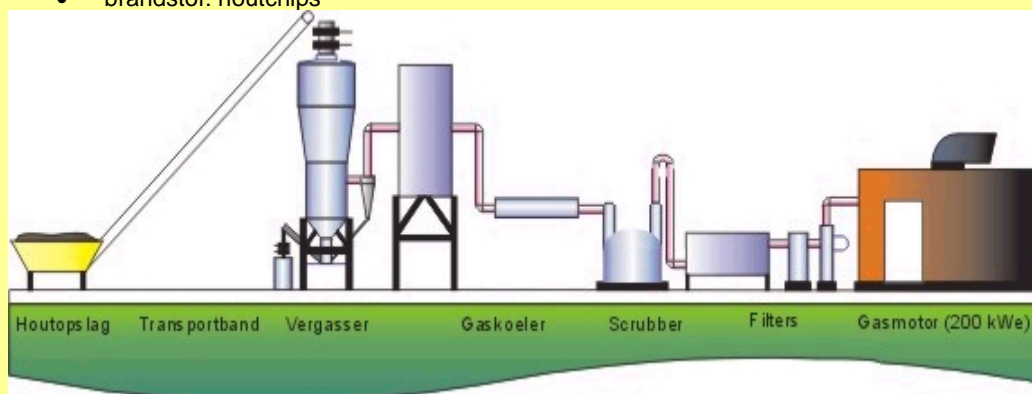
Het benutten van het potentieel in de vorm van energieteelt in bermen en groenstroken langs snelwegen draagt niet “direct” bij aan de energieopwekking van een weg zoals zonnepanelen en windturbines dat wel doen. De biomassa moet eerst geteeld worden en vervolgens verwerkt om de energie-inhoud vrij te maken en te benutten. Zaagsel, dunningshout, plantsoenafval, GFT, agrarisch afval zijn vormen van biomassa. Door zulke afvalstromen te verwerken in wervelbedovens en biomassavergassers kan warmte en elektriciteit worden geproduceerd met een zeer hoog rendement. Bovendien blijven bij een goedgekozen proces bruikbare residuen over, bijvoorbeeld mineralen die weer gebruikt kunnen worden als dooizout of bemesting.

#### Biomassa vergassingsinstallatie

Kleinschalige biomassa vergassingsinstallaties kunnen met een hoog rendement energie opwekken. De hoeveelheid materiaal die nodig is voor het bedrijven van een dergelijke installatie is echter groot, vergeleken met de schaal van een mogelijk proefproject. Waarschijnlijk is het aanleveren van de biomassa voor een bestaande centrale voor het proefproject een betere optie. Een installatie zoals hieronder weergegeven heeft per jaar ongeveer 1.500 ton droge stof nodig. Bij biomassa productie van 5-6 ton droge stof per kilometer wegtraject (1 ha per km) betekent dit dat een traject van 300 km nodig is. Stellen we een vergasser op bij een klaverblad, dan kunnen we in alle 4 de richtingen een traject van 75-100 km voor de bevoorrading gebruiken.

#### Voorbeeld

- vermogen gasmotor: 200 kW (elektrisch)
- vermogen vergasser: 950 kW thermisch)
- brandstof: houtchips



Bron : ( [www.host.nl](http://www.host.nl) )

Identificatie en specificatie van kritische factoren bij de ontwikkeling en introductie van biomassaconversie-systemen voor de productie van elektriciteit, warmte, en gasvormige of vloeibare secundaire energiedragers zijn belangrijk voor het succes van een biomassa project [38]. Succes of mislukking van een dergelijk project is afhankelijk aan een veelvoud van parameters. Doorgaans concentreert men zich alleen op de kostprijs die vooral bepaald wordt door kosten van productie (planten, onderhoud, oogsten) en vervoer [39,40], nog los van de bouwkosten. Andere belangrijke factoren die ook bepalend kunnen zijn voor het welslagen zijn: korte en lange termijn beschikbaarheid aan biomassa voor energieopwekking, toelaatbaarheid van emissies, onbekendheid van het publiek met bio-energie, nieuwe richtlijnen ten aanzien van emissies, concurrentie van biomassa met andere duurzame energiedragers, en de ontwikkeling van de technologie.

## 4.2 Inventarisatie literatuur

In het literatuuronderzoek zijn maar twee referenties gevonden die handelen over een energieproductie uit “snelweg biomassa”. De volgende twee verwijzingen hebben betrekking op het ijsvrij houden van het wegdek:

- Het gebruik van “wegbermgras” (roadgrass) tezamen met dierlijke mest en klei in een fermentor. De vrijgekomen warmte wordt gebruikt middels een antivriesvloeistof (warmtewisselaar) in sneeuwsmeltbuizen geleid om de weg ijs- en sneeuwvrij te maken en geen zout hoeft te worden gestrooid [33], eventueel in combinatie met windturbine [34].
- ECN voert in samenwerking met DLO een onderzoek uit naar de mogelijkheden om energie te winnen uit maaisel van wegbermen en deze in te zetten als biobrandstof. Maaisel wordt in een extrusiepers bewerkt (verpulverd en geperst). Het gevolg is dat het water eruit wordt geperst, samen met een deel van de eiwitten en mineralen. De eiwitfractie is weer opnieuw te gebruiken. De overblijvende biobrandstof is veel droger en door de geringere zoutlast treedt minder agglomeratie op bij thermische conversie.

Twee referenties die niet specifiek betrekking hebben op energiewinning langs de weg maar wel relevant geacht worden voor thermische en elektrische toepassing van energiewinning langs een snelweg:

- Een drietal referenties behandelt de winning van strooizout uit biomassa door bioconversie [35,36] of door pyrolyse [37]. De voordelen zijn dat deze strooizouten minder schadelijk zijn voor betonstructuren en metaaloppervlakken (niet corroderend) en biosfeer. Niet vermeld wordt wat de herkomst is van de gebruikte biomassastromen.
- Bouma [41] vermeldt dat het opzetten van relatief kleine biomassa centrales met een opbrengst aan elektriciteit in de orde van 20-50 MW economisch haalbaar is in Nederland. De gemiddelde teeltopbrengst wordt geschat op ca. 10-13 ton droge stof per jaar en per hectare voor een cyclus van 6-7 jaar en 15-20 ton voor een 10 jarige cyclus. De meest belovende techniek voor dergelijke centrales is biomassavergassing in combinatie met gas- en stoomturbines.

## 4.3 Andere producten uit biomassa

Reeds in de inleiding werd de mogelijkheid genoemd van de productie van vloeibare en/of gasvormige brandstoffen uit biomassa. Bijvoorbeeld door vergassing van biomassa en vervolgens de conversie van het vrijkomende (CO/H<sub>2</sub>) mengsel in methanol of in H<sub>2</sub>. Met

behulp van deze brandstoffen kunnen voertuigen worden aangedreven middels brandstofceltechnieken [42]. Een andere mogelijkheid is de productie van ethanol uit biomassa stromen. De biomassa wordt hierbij gefermenteerd uiteindelijk resulterend in de productie van ethanol. Ethanol wordt weer gebruikt worden in vloeibare brandstoffen als benzine (zie inzet Bio-ethanol).

#### **Bio-ethanol**

Alcohol producent Nedalco wil een proeffabriek bouwen voor productie van bio-ethanol. Het plan voorziet in een tienjarig onderzoeksproject dat moet uitmonden in een jaarlijkse capaciteit van dertig miljoen liter bio-ethanol. Als grondstof wil het bedrijf gebruik maken van geselecteerde bieten en zetmeel- en cellulosehoudende gewassen zoals tarwe en gras. Nedalco wil met het project aantonen dat grootschalige productie van bio-ethanol mogelijk is en dat met behulp van nieuwe technieken circa 45% minder energie nodig is voor het productieproces dan voorheen. Volgens Nedalco kan de kostprijs van bio-ethanol over tien jaar circa f. 0,40 tot f 0,60 per liter bedragen, als rekening wordt gehouden met de opbrengst van bijproducten. Nedalco wil de bio-ethanol opwerken tot ethyl tertiaire butyl ether (ETBE) dat aan benzine wordt toegevoegd als 'octaan-booster'. Om te bereiken dat het product op prijs kan concurreren met andere benzinetoevoegingen vraagt Nedalco bij het Ministerie van Financiën ontheffing van benzineaccijns aan.

Op basis van onderzoek van Shell in de tachtiger jaren is het HTU-proces ontwikkeld voor omzetting van biomassa in olie. Biomassa in de vorm van houtchips wordt op druk gebracht en op een temperatuur van 200-250°C met water uit het proces verweekt. Behalve houtchips is ook groente-, fruit- en tuinafval (GFT) een geschikte grondstof.

#### **4.4 Opbrengst en kosten**

De hoeveelheid droge stof (bijvoorbeeld uit wilgenteelt) die jaarlijks op 1 ha langs 1 kilometer snelweg geproduceerd kan worden [22,43] is ongeveer 6-10 ton<sup>5</sup>. De energie-inhoud van deze hoeveelheid biomassa is 16 GJ/ton. Dit is de verbrandingswaarde van biomassa die echter nooit voor 100% benut kan worden. Het meest efficiënt is om het hout te vergassen (vergassingsrendement 80%) en vervolgens het biogas mee te stoken in een grote elektriciteitscentrale. Het thermisch rendement is 45% (mits natuurlijk een nuttige toepassing voorhanden is) en een elektrisch rendement van 40%. Het totale omzettingsrendement is dan 68% (=80x85%). Per kilometer snelweg is de jaarlijkse potentiële energieopbrengst dan 65–110<sup>6</sup> GJ. Hiervan is aan elektriciteit beschikbaar tussen 31 en 51 GJ.

Voor de verwerkingskosten (dit zijn de kosten tot aan aflevering bij de installatie) wordt uitgegaan van 60-120 NLG (12-36 EURO) per ton biomassa in een jaar, ofwel met een productie van 6-10 ton langs een kilometer: 72-360 EURO. In het geval van elektriciteitsproductie zijn in deze opzet de kosten per GJ 1,4-12 EURO<sup>7</sup>.

---

<sup>5</sup> Voor de referentiesnelweg van 1 kilometer lengte wordt een beschikbaar teeltoppervlak van 1 ha aangehouden Met een totale snelwegenlengte in Nederland van 2.225 km is theoretisch een productie in de wegberm van 13.000 tot 22.000 ton droge biomassa mogelijk.

<sup>6</sup>  $P = 6[\text{ ton/ha}] \times 1[\text{ ha}] \times 16[\text{ GJ/ton}] \times 68\% = 65 \text{ GJ/jaar}$ .

<sup>7</sup> Ondergrens prijs per GJ elektrische energie = 72 EURO/ 51[GJ]= 1,4 EURO; bovengrens = 360 EURO/31[GJ] = 12 EURO

## 5. WINDTURBINES

### 5.1 Algemeen

De laatste 25 jaar is het aandeel van windenergie spectaculair gegroeid. Het totale geïnstalleerde vermogen op wereldschaal bedraagt nu meer dan 15.000 MW. De gemiddelde afmeting van de commerciële turbines nam evenzeer toe: van een rotordiameter van 5 meter (vermogen: 10 kW) tot ca. 70 meter (2.000 kW). Het totale vermogen van de 1.258 windturbines in Nederland anno 1999 was 409 MW en de hiermee geproduceerde elektriciteit voor dat jaar bedroeg 645 GWh.

Elektriciteit is voor vrijwel iedereen in Europa direct verkrijgbaar door de aanwezigheid van een uitgebreid elektriciteitsnet. In de (weinige) gebieden die niet aangesloten zijn omdat dat te duur is, kunnen zgn. autonome systemen een optie zijn voor de levering van elektriciteit mits het heersende wind- of zonnerégim voldoende gunstig is. Autonome systemen die hun voeding ontlenen aan windturbines zijn commercieel niet voorhanden. Hier zijn diverse redenen voor: de technische complexiteit van het totale systeem, de extra onderdelen die nodig zijn voor de systeemcontrole, de mogelijk optredende 'landschapsvervuiling' en de betrekkelijk geringe vraag. Ook zal het ontwerp specifiek moeten worden afgestemd op de locatie waar plaatsing is voorzien.

De verwachting is dat de markt voor autonome systemen zal groeien: de techniek is betrouwbaarder geworden en de kostprijs daalt. Een recente ontwikkeling is het combineren van windmolens met een gelijktijdige opwekking van zonne-energie (figuur 5.1).



Figuur 5.1 *Combineren van zonne- en wind energie op een locatie*

Zoals gesteld in de Inleiding (hoofdstuk 1) is de ruimte direct langs snelwegen niet geschikt voor recreatie of permanente bewoning. Een van de vragen hier is of deze ruimte wel gebruikt kan worden als locatie voor de plaatsing van windturbines. Op voorhand is duidelijk dat de verkeersveiligheid niet in het geding mag komen. Een belangrijke reden is tegen plaatsing is dat de automobilist door de bewegende rotorbladen kan worden afgeleid. RWS heeft dan ook een minimumafstand (hangt af van de grootte van de rotorbladen) gedefinieerd voor de afstand tussen de rand van de weg en een windmolen; dit maakt plaatsing van de gebruikelijke windturbines direct langs de snelweg niet mogelijk.

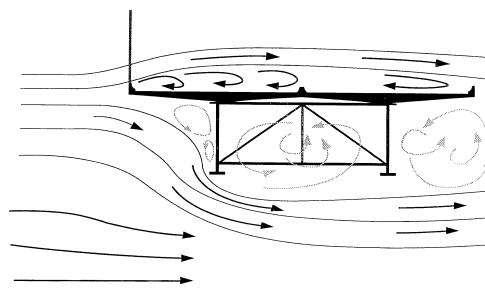
## 5.2 Inventarisatie literatuur

Het literatuuronderzoek naar de combinatie van windturbines ingepast in een verkeersinfrastructuur leverde vier interessante referenties op:

- *De plaatsing van windturbines in de nabijheid van snelwegen en op de waterkeringen Afsluitdijk en Houtribdijk (Markermeer) [44]*  
Deze nota gaat in op de mogelijkheid om wegbermen (en waterkeringen) te benutten als locatie van windmolens. Besproken worden de effecten op vogelstand en visuele invloed. T.a.v. de visuele invloed heeft men een aantal criteria opgesteld; enkele die van invloed zijn op de concentratie van de automobilist zijn: het draaibeeld van de windturbineopstelling (aantal turbines, omwentelingssnelheid, aantal rotorbladen, bewegingsindruk) en de vorm van de turbines (verhouding tussen mast (dikte, hoogte, contouren) en rotorbladen (lengte, breedte, aantal). Er wordt verder niet ingegaan op veiligheidsaspecten.
- *Windturbines onder een brug (Californië, USA).*  
Monitoring van het windveld rondom en onder de Antioch Highway Bridge in Californië liet zien dat de windstroming zich concentreert onder de brug. Hiervan kan gebruik gemaakt worden door betrekkelijk kleine windturbines (vermogen in de orde van 10 kW) vlak onder deze brug te hangen. Dit spaart kosten uit voor de bouw van een toren en wordt daardoor haalbaar. De opgewekte stroom dient als voeding voor de verlichting langs de snelweg [45].

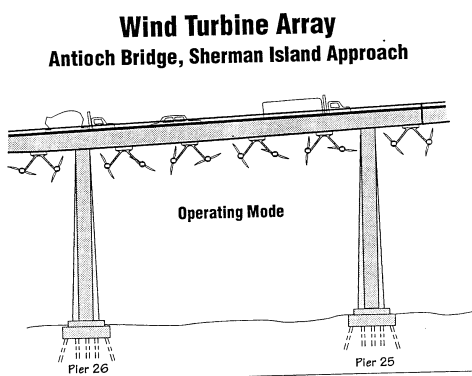


a)

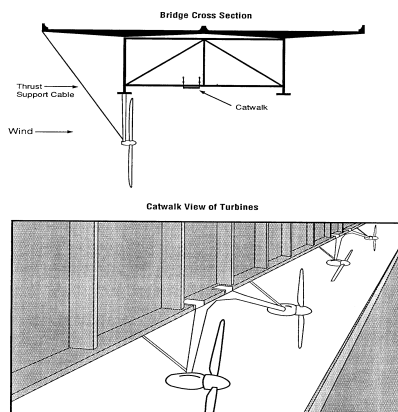


Bridge Cross Section and Air Flow at Pier 15

b)



b)



d)

Figuur 5.2 Windturbine array onder de Antioch Highway Bridge in Californië. a) foto van de brug; b) windveld direct onder de brug; c) de 'operating mode' en d) ophanging aan de brug.

- *Windmolens en veiligheid [46].*  
Deze studie (uit 1992) heeft als conclusie dat er voor het verkeer weinig gevaar ontstaat indien windturbineparken in de nabijheid van de snelweg worden gebouwd. Hinder is er wel door het optreden van lichtschaduw/flitsen en rukwinden geïnduceerd door de ronddraaiende rotorbladen. De effecten van een rij windturbines direct langs de snelweg zijn niet onderzocht.
- *Autonome toepassingen [47,48].*  
De gevonden toepassingen voor het gebruik van windenergie zijn vergelijkbaar met die van de foto-voltaïsche systemen: verlichting langs de snelweg, voeding voor waarschuwingssignalen, etc.. Een specifiek voordeel dat dergelijke installaties in het algemeen makkelijker dan PV-systemen op diverse locaties te plaatsen zijn. In de literatuur zijn ook (net als bij PV-systemen) netgekoppelde toepassingen bekend.

### 5.3 Opbrengst

Ofschoon in de praktijk niet toepasbaar direct langs de snelweg is het ter vergelijking met andere energiewinmogelijkheden zinvol een schatting te maken van opbrengst en kosten. De potentieelschatting voor geschikte windturbines geplaatst over een afstand van 1 kilometer gaat uit van een turbinevermogen tussen de 500 kW en 1 MW; de opbrengst is gesteld op 1.800

kWh/(kW jaar) voor beide molentypes. Bij gebruik van de kleinere windturbines van 500 kW kunnen er 5 worden geplaatst per kilometer. De potentiële opbrengst<sup>8</sup> wordt dan ca. 16.000 GJ/jaar [22].

In het geval van de grotere (1 MW) molens is het plaatsen van maximaal drie turbines mogelijk langs een kilometer snelweg; de potentiële opbrengst<sup>9</sup> is dan ongeveer ligt dan tussen 19.000 en 20.000 GJ/jaar<sup>10</sup>.

#### 5.4 Kosten

De kosten zijn opgebouwd uit kosten voor het ontwerp en bouw van de windturbine, voor het installeren langs de snelweg en voor het aankoppelen aan het vaste elektriciteitsnet. Voor een moderne turbine van 500 kW wordt ongeveer 2.200-2.800 NLG (1.000-1.300 EURO) per kW geïnstalleerd vermogen gerekend; dit is inclusief de fundatie en aansluiting wat sterk kan variëren door lokale omstandigheden. Voor de jaarlijkse onderhoudskosten wordt ca. 33 NLG (15 EURO) per kW aangehouden [49,50].

De kosten van aanleg, productie en netkoppeling van 5 windturbines van 500 kW bedragen dan tussen de 5,5 en 7 MNLG (2,5-3,2 MEURO). Met een levensduur van 20 jaar voor een gemiddelde windmolen komt dit neer op een jaarlijkse afschrijving tussen de 275 en 350 kNLG (125-160 kEURO); het onderhoud per jaar voor deze 5 turbines bedraagt 82,5 kNLG (37,5 kEURO). De totale kosten per jaar liggen dan tussen de 360 en 430 kNLG (165-195 kEURO). De prijs voor 1 GJ elektrische energie opgewekt door windturbines geplaatst in deze opzet ligt tussen de 23 en 27 NLG<sup>11</sup> (10-12 EURO). De opbrengst-kosten verhouding voor de configuratie van de drie grotere turbines is van dezelfde orde van grootte.

Uit de vergelijking (zie hoofdstuk 7) tussen de hier besproken energiewintechnieken geïnstalleerd langs een kilometer snelweg blijkt dat *windturbines* de meest kosteneffectieve wijze van duurzame energieopwekking zijn.

---

<sup>8</sup>  $P = 5 \times 500[\text{kW}] \times 1.800[\text{kWh/kW jaar}] = 4,5[\text{GWh/jaar}] = 16.200 \text{ GJ/jaar}$ .

<sup>9</sup>  $P = 3 \times 1.000[\text{kW}] \times 1.800[\text{kWh/kW jaar}] = 5,4[\text{GWh/jaar}] = 19.440 \text{ GJ/jaar}$ .

<sup>10</sup> Deze schattingen zijn berekend voor het westen van Nederland. Verder landinwaarts neemt de opbrengst af door de gemiddeld lagere windsnelheid.

<sup>11</sup> Prijs voor 1 GJ (jaarlijkse kosten 360 kNLG) =  $360[\text{kNLG}] : 16.000[\text{GJ/jaar}] = 22,5 \text{ NLG}$ .



Figuur 5.3 “Artists impression” van een ideale windmolen

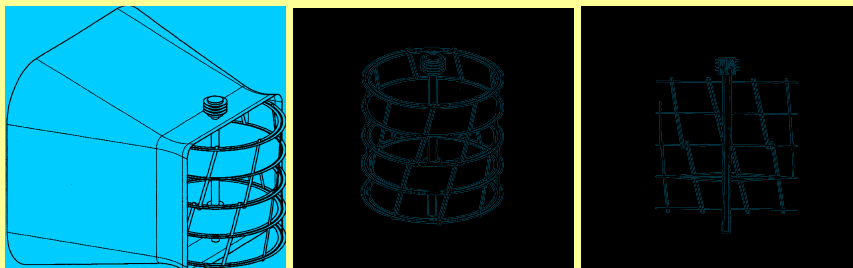


## 5.5 Innovatie en haalbaarheid

De techniek zelf is niet (meer) als vernieuwend te bestempelen en biedt weinig mogelijkheden tot innovatie. Een serieuze zorg van Rijkswaterstaat betreft de verkeersveiligheid: het risico van afgescheurde rotorbladen en het verlies van concentratie bij automobilisten door de beweging van de ronddraaiende rotoren. Ook is de landschappelijke verstoring een (bekend) probleem; dit wordt slechts ten dele opgeheven door plaatsing in de nabijheid van een evenmin fraai ogende snelweg. In het ontwerp voor het vervolgproject dient aan beide aspecten hieraan aandacht te worden besteed. Zo bestaan er (kleinere) windmolens waarvan de draaiende onderdelen niet meer zichtbaar zijn (zie inzet). Een dergelijke constructie is ontwikkeld om een veilige plaatsing op of nabij bewoning mogelijk te maken en de geluidsoverlast te verminderen. Of met dit type windmolens langs of op een snelweg voldoende energie opgewekt kan worden tegen een acceptabele kostprijs is onderwerp voor het vervolgproject (zie inzet).

### **Turby, een turbine voor in de achtertuin (én voor langs de snelweg?)**

De Turby is een windturbine bedoeld voor plaatsing in een bebouwde omgeving. Door de vele obstakels in de bebouwde omgeving neemt de windsnelheid af maar metingen wijzen uit dat om en boven hoge gebouwen juist sprake is van aantrekkelijke windsnelheden. Met de gangbare windturbines is dit potentieel niet te benutten: zij staan op torens van 50 - 70 m hoogte, vergen veel ruimte en moeten i.v.m. geluidsproductie en veiligheid op ruime afstand van gebouwen worden geplaatst. Turbines voor de bebouwde omgeving moeten geluidsarm zijn, op gebouwen kunnen worden geplaatst en geen storend element vormen. Dat betekent een klein vermogen, geen hoge mast, geen diepfundering, geen waarneembaar geluid en geen visuele hinder. Een ander uitgangspunt is een grote onderhoudsvrijheid. Bij de Turby heeft men gekozen voor een verticale as constructie (VAT). Bij een VAT vervalt de noodzaak voor een kruissysteem en voor een anti-kabeltwist voorziening en is geen gondel nodig. De masterugslag is afwezig en van visuele hinder van de draaiende rotorbladen is geen sprake. De huidige Turby is afgeleid van de Darrieus rotor met een maximaal theoretisch rendement van 59%. Deze heeft als nadeel het optreden van hinderlijke aërodynamische trillingen. De fabrikant claimt dat door een combinatie van bladprofiel en snellopendheid, een oneven aantal bladen en een afwijkende bladvorm de oorzaak van deze trillingen is weggenomen.



Turby op de tekentafel

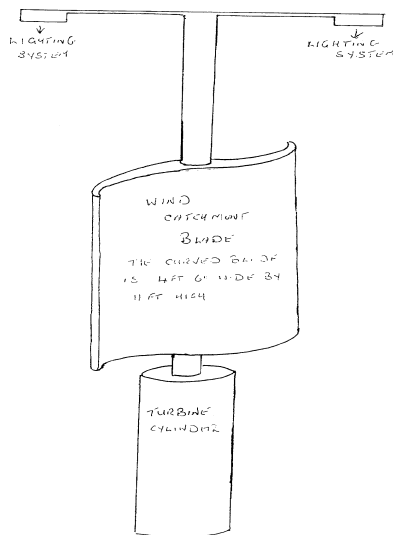
De Turby rotor heeft een diameter van 1,5 m en een hoogte van 2,4 m. Bij een gemiddelde windsnelheid van 6,5 m/s wordt door de fabrikant als jaaropbrengst 3.000-5.000 kWh (10-18 GJ/jaar) genoemd. De prijs bij serieproductie (te starten eind 2001) bedraagt 15.000 NLG. Over een lengte van 1 kilometer is een aantal van 100 exemplaren technisch haalbaar. Bij de gebruikelijke levensduur voor windturbines van 20 jaar gaat 1 GJ opgewekt in deze configuratie 42-75 NLG (19-34 EURO) kosten. Dit is exclusief de kosten voor installeren, onderhoud en verdere koppeling.

## 5.6 Windenergie geïnduceerd door voertuigen rijdende op de snelweg

### 5.6.1 Inventarisatie literatuur

Het gebruik maken van de turbulentie die wordt opgewekt door de voorbijrijdende voertuigen door middel van plaatsing van molens in de middenberm is geen nieuw idee: in de literatuur zijn diverse verwijzingen gevonden, meestal in de vorm van patenten. De diverse patenten zijn allen gebaseerd op het principe van omzetting van kinetische energie van de lucht in elektrische energie middels kleine windmolens of windtrommels geplaatst in de (midden)berm. De volgende referenties zijn in de literatuur beschreven:

- 'Curved blade' windmolens (zie figuur 5.4) geplaatst vlak naast de rijweg of spoorlijn waarbij de opgewekte energie wordt gebruikt voor wegverlichting, verdrijven van mist e.d. [51].



Figuur 5.4 Tekening in een Engels octrooiaanvraag van een zgn. 'curved blade' windmolen

- Het bedrijf Vehilectrical Power Systems (Detroit) heeft in samenwerking met Wayne State University een prototype ontwikkeld die geschikt is voor de plaatsing in de middenberm van de snelweg [52].
- In de New Scientist [53] is een Engels ontwerp beschreven (zie inzet).

Patenten van ontwerpen die lijken op het voorgaande zijn verder te vinden in [54-59].

## Turbines turn motorways into a source of power

A COMMON complaint against wind power turbines is that they are noisy and an eyesore, but an industrial design student at Coventry Polytechnic has proposed a solution: siting turbines in places that are already noisy and ugly—the central reservation of Britain's motorways. In this position natural wind will be supplemented by the draught produced by the large volumes of traffic passing by in both directions.

Raymond Livings's idea was inspired by the spinning signs outside petrol stations. His design for the turbines consists of two vertical aerofoils connected to a boom which rotates about its centre. So the turbine has a vertical axis and the power generator is situated on the ground underneath the rotating boom.

The device stands about 2 metres tall and has a maximum diameter of about 3 metres. As the central reservation of a motorway is 4 metres wide there is no danger of the rotor blades hitting passing traffic.

With a vertical axis the turbines can be powered by wind from any direction without having to reposition itself. Each turbine will take two thirds of its energy from the atmospheric wind that flows past it. The rest of

the energy comes from wind generated by the traffic.

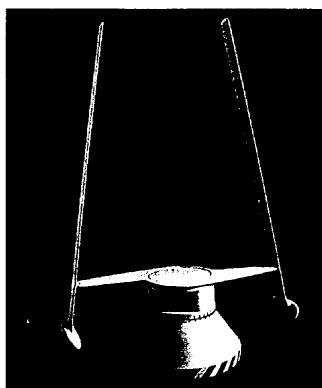
The closest that the turbines can be placed to each other safely and efficiently is 15 metres. With 2000 kilometres of motorway

in Britain, there would be space for about 130 000 wind turbines. The turbines would cost about £10 000 each to produce—comparable with the cost of a small conventional wind turbine.

Each turbine would produce about 3 kilowatts at maximum output—when the wind speed reaches approximately 50 kilometres per hour. At wind speeds above this, the rotor blades continue to spin at the same speed, producing energy at a uniform frequency which allows synchronisation with the National Grid.

The design also incorporates an inherent safety mechanism that causes it to stall when the wind speed reaches 105 kilometres per hour. The vertical aerofoil blades are pivoted at the point where they are connected to the boom. As the wind speed increases, centrifugal force makes counterweights at the base of the blades swing out, causing the blades to swing inwards.

This change in their orientation reduces efficiency, slowing the blades down. If the blades swing far enough in—to reach an angle of 22 degrees from horizontal—the turbine stalls. The counterweights then reset the blades to a vertical position, and the blades start to turn again. **Carina Norris**



*Harnessing the breeze of passing cars*

Coventry Polytechnic

### 5.6.2 Opbrengst en kosten

Bepalend voor de opbrengst is de te verwachten snelheden van de wind in de berm. In de literatuur worden windsnelheden in de middenberm genoemd van ca. 24 km/h [52]; dit is inclusief de bijdrage van de achtergrondwind. Het aantal draaiuren kan variëren: genoemd wordt ca. 5 draaiuren per dag [22] (dit is het aantal draaiuren van grote turbines), elders wordt met 18 uur/dag wordt gerekend [52]. Dit hangt samen met de verkeersintensiteit ter plaatse en of de aandrijving van één of twee weghelften afkomstig is.

De (maximale) opbrengst hangt uiteraard af van het aantal en vermogen (3 W tot 3 kW) van de geplaatste molens (langs een kilometer snelweg). In het geval van zeer simpele trommelmolentjes (met een typisch vermogen van 3 W) is plaatsing van 2000 exemplaren haalbaar. Als de variatie van het aantal draaiuren in rekening gebracht wordt, dan varieert de maximale potentiële opbrengst voor een kilometer berm tussen de 40 GJ/jaar<sup>12</sup> (5 uur/dag) tot 140 GJ/jaar<sup>13</sup> (18 uur/dag)<sup>14</sup>. Uitgaande van een kostprijs van ca. 150 NLG (70 EURO) per stuk en een levensduur van 10 jaar dan zijn de kosten per GJ tussen de 210<sup>15</sup> en 770 NLG (95-350 EURO);. Deze prijs kan naar beneden bij serieproductie en het onderhoud is betrekkelijk eenvoudig.

In het geval van meer geavanceerde molens (zoals in [53], potentieel vermogen is 3 kW) kunnen er ca. 65 geplaatst worden. Bij 5 draaiuren is de maximale opbrengst dan 1.280 GJ/jaar (bij 18 draaiuren 4.600 GJ/jaar); de prijs per GJ (bij gelijke levensduur) ligt tussen de 70-270 NLG, ruwweg een factor 3 lager, eveneens exclusief plaatsing en onderhoud.

<sup>12</sup> P (2000 trommelmolens; 5 uur/dag; 1 jaar) = 2000 x 3[W] x 5 x 365 x 3600[s] = 39,4 GJ/jaar

<sup>13</sup> P (2000 trommelmolens; 18 uur/dag; 1 jaar) = 18/5 x 39,4[GJ/jaar] = 141,9 GJ/jaar

<sup>14</sup> Verondersteld is dat de toename van de wrijving die voertuigen zullen ondervinden door het plaatsen van molens in de middenberm verwaarloosbaar is of hooguit in de orde van enkele procenten van de door voertuigen ondervonden luchtweerstand. Dit zou in een vervolgstudie nader bestudeerd moeten worden waarbij tevens het effect van plaatsing van een scherm in de middenberm moet worden beschouwd.

<sup>15</sup> kosten per GJ: (2000 x 150[NLG] / 10[jaar]) : 141,9[GJ/jaar] = 211 NLG/jaar

## 5.7 Innovatie en haalbaarheid

Indien trommelmolentjes zouden worden aangebracht in de middenberm is dit, qua toepassing, wel een noviteit. Echt haalbaar lijkt dit niet: de kosten zijn (te) hoog en de opbrengst is laag. De mogelijkheden van het opvoeren van het vermogen van molens in de berm, van plaatsing van (nog) grotere aantallen te plaatsen, van een plaatsing van een middenscherp dan wel van een speciale (autonome) toepassing die gekoppeld is aan het moment dat een auto voorbijrijdt (bijvoor voor een snelheidsmeting) zou in een vervolgstudie verkend kunnen worden.

## 6. PIËZO-ELEKTRICITEIT EN PELTIER ELEMENTEN

### 6.1 Algemeen

#### 6.1.1 Piëzo-elektriciteit

Piëzo-elektrisch materiaal levert een spanning op indien het belast of verbogen wordt. Het materiaal wordt gebruikt in allerlei sensoren, bijv. voor het aanschakelen van licht op donkere plaatsen zodra er druk wordt uitgeoefend. Auto's zijn gewichten van ongeveer 1.000 kg die zich over het wegdek verplaatsen. Dat betekent dat op een zeker stuk wegdek een druk wordt uitgeoefend in de frequentie van de voorbijkomende voertuigen.

Het gebruik van piëzo-elementen suggereert het opwekken van energie uit het niets. Dit is natuurlijk niet het geval. Een voertuig raakt extra energie kwijt aan het wegoppervlak. Dit extra verlies dat optreedt bij aanwezigheid van de piëzo-elementen in het asfalt moet dus vergeleken worden met de opgewekte hoeveelheid elektrische energie en de noodzaak van de toepassing.

Deze vorm van opwekking van elektrische energie kan zinvol zijn onder specifieke omstandigheden (bijv. als voeding van een lichtbron die alleen verlicht bij nadering van een voertuig). Voorts kunnen piëzo-elementen ingezet worden op delen van het traject waar toch afgeremd moet worden, bijvoorbeeld op afritten van de snelweg. Een grotere oppervlakteweerstand is daar geen probleem, soms zelfs een voordeel.

#### 6.1.2 Peltier

Peltier elementen worden veelal gebruikt voor koeling of verwarming. Door een stroom te sturen door een Peltier element koelt de ene zijde van het element af, de andere kant warmt op (een thermokoppel maakt gebruik van hetzelfde principe). Andersom kan ook een spanning gegenereerd worden door een temperatuur verschil op te leggen aan het element.

Warmtecollectoren maken gebruik van het opwarmen van een vloeistof of gas. Er ontstaat daarbij laagwaardige energie. Peltier elementen bieden de mogelijkheid direct elektriciteit op te wekken uit een verschil in temperatuur. De temperatuur van de bovenste laag van het aardoppervlak volgt de lucht temperatuur. Zeker op een zomerse dag zal er een significante temperatuur gradiënt ontstaan tussen het oppervlak van een weg en de daaronder liggende laag.

### 6.2 Literatuur

#### 6.2.1 Piëzo-elektriciteit

Er is in de literatuur slechts één serieuze referentie gevonden, en dan nog in combinatie met een andere technieken.

- Een piëzo-elektrische sensor array is in de grond aangebracht bedoeld als extra voeding voor een verkeerslicht dat tevens gevoed wordt door een zonnepaneel. De trillingsenergie die ontstaat als een auto nadert, wordt omgezet in elektrische energie. Het voordeel van deze combinatie is een stabiele licht output, dus ook als de zon minder schijnt [61]
- Een andere referentie maakt weliswaar niet gebruik maken van piëzo-elektriciteit, maar wel van het principe dat een voertuig een belasting uitoefent op de weg: het indrukken van een

piston in een vloeistofvat waardoor lucht verplaatst. De kinetische energie van deze luchtbeweging kan weer worden omgezet in elektrische energie [55]

### 6.2.2 Peltier

Over dit onderwerp is een relevante literatuurreferentie gevonden:

- In Japan is het zgn. ‘Road Electric Generation System (REGS)’ ontwikkeld dat gebruik maakt van het Seebeck principe [69]. Het systeem is toegepast in ‘gewoon’ en poreus asfalt. De maximale energieopbrengst is geschat op 0,24-0,27 W/m<sup>2</sup>, respectievelijk 0,52-0,72 W/m<sup>2</sup>.

## 6.3 Opbrengst en kosten

### 6.3.1 Piëzo-elektriciteit

Voor piëzo-elementen op deze grootte is geen kostenschatting gemaakt. De reden is dat deze elementen slechts een zeer kleine lengteschaal (in de orde van mm) worden toegepast.

### 6.3.2 Peltier

De opbrengsten voor een referentiesnelweg van 1 kilometer lengte op basis van de uitkomsten in [69] zijn 0,4 MW<sup>16</sup> voor dicht asfalt en 1 MW voor poreus asfalt. Als we aannemen dat de ideale meteorologische omstandigheden optreden gedurende een drietal maanden in het jaar gedurende 6 uur op een dag is de jaaropbrengst 73 MJ.

Prijzen voor de grootste Peltier elementen (25 cm<sup>2</sup>, verkrijgbaar bij producent Conrad, Duitsland) bedragen ca. 115 NLG (50 EURO) [62,63]. Als we 18.000 m<sup>2</sup> snelweg beleggen met dergelijke elementen dan bedragen de kosten meer dan 800 MNLG (ofwel 528 MEURO). Duidelijk is dat dit geen rendabele optie is voor plaatsing in het asfalt van een (referentie)snelweg van 1 kilometer lengte.

---

<sup>16</sup> P [jaar] = 0,62[W/m<sup>2</sup>] \* 18.000[m<sup>2</sup>] \* 3[maanden] \* 6[uur] \* 3600[s] = 72,3 MJ;

## 7. TOETSING AAN CRITERIA EN SLOTOPMERKINGEN

### 7.1 Criteria

In deze studie zijn de mogelijkheden voor duurzame energieopwekking langs snelwegen verkend. Beschreven zijn toepassingen van de meest bekende en toegepaste energiewintechnieken, te weten:

- *Foto-voltaïsche systemen*
- *Warmtewisselaars*
- *Biomassa*
- *Windenergie*
- *Piëzo-elektriciteit en Peltier elementen*

Elk van deze systemen is voor zover mogelijk en relevant, beoordeeld op factoren als innovatie, economische haalbaarheid, duurzaam karakter, invloed op de verkeersveiligheid en landschappelijke inpasbaarheid in geval van een toepassing op, in, onder, naast of boven het wegdek van een willekeurige snelweg. Het resultaat van deze toetsing is samengevat in tabel 7.1 en wordt hieronder nader toegelicht. De kwantificering in de tabel geeft een orde van grootte aan van de diverse opbrengsten en kosten teneinde een eerste vergelijking tussen de wintechnieken te vergemakkelijken.

Tabel 7.1 Toetsingsresultaten voor de verschillende energie-wintechnieken rondom de snelweg.

	<i>Opbrengst [GJ/km]</i>	<i>Investering [kEURO/km]</i>	<i>Kosten [EURO/GJ]</i>	<i>I</i>	<i>V</i>	<i>L</i>
<i>PV-systemen</i> <sup>1)</sup>	540	860-1.300	55-80	+	o	-
<i>Warmtewisselaars</i> <sup>2)</sup>	10.000	400-1.200	40-120	+	o	o
<i>Biomassa</i> <sup>3)</sup>	65-110	0,072-0,36	1-7	+	o	++
<i>Windturbines</i> <sup>4)</sup>	11.000-20.000	165-195	10-12	+	-	--
<i>Molens in berm</i> <sup>5)</sup>	40-140	13,6	95-350	++	o(?)	o
<i>Piëzo-elektriciteit</i>	gbi	gbi	gbi	++	o	o
<i>Peltier</i> <sup>6)</sup>	0,073	>50.000	-	++	o	o

I: Innovatief karakter; V: Verkeersveiligheid; L: landschappelijke verstoring; gbi: geen beschikbare informatie;  
 Waardering: ++: zeer positief; +: positief; o: onveranderd; -: negatief; --: zeer negatief.

Opmerkingen:

<sup>1)</sup> Uitgegaan wordt van een scherm van 1 km lengte, 2 m hoogte en een piekvermogen van 95 W<sub>p</sub>/m<sup>2</sup> en een levensduur van 30 jaar [65]; investeringskosten betreffen productie zonnepanelen, aanleg en netkoppeling.

<sup>2)</sup> Uitgegaan is van een levensduur van 10 jaar. De bedragen zijn *exclusief* de kosten voor bouw en aanleg besturingsysteem warmtetransport naar aquifer, opslag in aquifer en verdere benutting elders.

<sup>3)</sup> Kosten hebben alleen betrekking op de verwerking (d.w.z. zaaien, onderhoud, oogsten en transport) bij aflevering aan een *bestaande* installatie. De kosten zijn laag omdat geen nieuwe installatie gebouwd hoeft te worden. De aangeleverde hoeveelheid per kilometer is echter te gering om rendabel te zijn. Voor de kosten in GJ elektriciteit per jaar moeten de bedragen met 1,4 vermenigvuldigd worden (dit wordt dan: 1,4-10 EURO/GJ).

<sup>4)</sup> Dit zijn de totale kosten, d.w.z. de som van kosten voor ontwerp en bouw windturbine, installatie langs de snelweg en koppeling aan elektriciteitsnet.

<sup>5)</sup> Dit is *exclusief* aanleg, onderhoud en eventuele koppeling aan elektriciteitsnet.

<sup>6)</sup> Hierbij is uitgegaan van een levensduur van 10 jaar, geen onderhoud en geen kosten voor verdere benutting van de stroom.



Bij vergelijking van de hierboven vermelde kostprijzen per GJ voor de diverse technieken met de inkooprijzen van kolen, gas en olie (in 1999: 1,6 EURO/GJ, 2,7 EURO/GJ en 3,4 EURO/GJ) blijkt dat de duurzame energie-wintechnieken op dit moment niet concurrerend zijn; dit werd ook niet echt verwacht en is op zich minder relevant voor deze verkennende studie en het vervolg traject.

## 7.2 Foto-voltaïsche systemen

### *Innovatie*

De PV-techniek op zich is niet (meer) innovatief. Een vernieuwende toepassing in het proefproject zal derhalve gezocht moeten worden in het bedenken van nieuwe toepassingen. De techniek is duurzaam (de zon is de bron), 'nette' inpassing in het landschap zal niet altijd mogelijk zijn.

### *Autonome systemen*

In par. 2.2.1 is een overzicht gegeven van buitenlandse toepassingen van autonome PV-systemen. De meeste voorbeelden zijn niet of nauwelijks in Nederland te vinden en daarom als innovatief te kenmerken. Als meest innovatief in het oog springend is de toepassing van het "elektriciteitstankstation". Naar aanleiding van de onontkoombare verandering in het type brandstof van voertuigen zal in de toekomst de behoefte ontstaan van het omzetten van zonne-energie in elektriciteit en de levering van die elektriciteit langs de snelweg. Anticiperend op deze toekomstige ontwikkeling is de bouw van een zonne-energie "pomp" (gevoed door een PV-systeem) waar door elektriciteit aangedreven voertuigen kunnen "tanken". Dergelijke "pompen" bestaan reeds in de USA [3]. Onderzocht zou bijvoorbeeld kunnen worden of bestaande benzinstations kunnen worden uitgerust met een tappunt van elektriciteit op basis van een autonoom PV-systeem; ook netgekoppelde systemen komen in aanmerking. Overigens, omdat er nu nog zeer weinig van dergelijke voertuigen in Nederland rondrijden is de noodzaak (op de korte termijn) niet erg groot.

### *Netgekoppelde systemen*

Innovatie met betrekking tot netgekoppelde systemen rondom de snelweg lijkt vooral te liggen in het verder uitbreiden of verfijnen van reeds bestaande ontwerpen. De volgende voorbeelden van technische innovatie zijn gevonden in de literatuur of na gesprekken met deskundigen (ECN unit Zon):

- *Scherf met dubbel werkende zonnepanelen.*  
Hier is sprake van een technische innovatie die de bestaande toepassing uitbreidt: geluidsschermen die noord-zuid georiënteerd kunnen nu evenzeer benut worden. De opbrengst is ongeveer gelijk [13,22] aan de opbrengst van schermen georiënteerd op het zuiden. Er is slechts 1 project met deze zgn. 'bifacial' systemen uitgevoerd (Zwitserland). Berekend is dat van de ca. 51 MW<sub>p</sub> dat aan vermogen in Nederland kan worden opgesteld binnen een termijn van 5 jaar (tabel 2.1), ongeveer 25-30% geleverd kan worden door dubbel werkende PV-systemen [19]. Productiekosten van dergelijke schermen zijn niet bekend. De verwachting is dat de hogere opbrengst vermoedelijk nog niet zal opwegen tegen de meerprijs die de komende jaren nog betaald moet worden voor dit 'nieuwe product'. Echter, de vergroting van de opbrengst aan elektriciteitsopwekking langs de snelweg is aanzienlijk.
- *Systeem met meedraaiende zonnepanelen*  
Het is mogelijk om de panelen zoveel mogelijk op de zon te richten door middel van een of meerdere assen waarlangs het paneel kan draaien. In het Nederlandse klimaat is de meeropbrengst van een dergelijk systeem gering omdat een groot deel van het invallende licht diffuus is. De extra opbrengst weegt naar verluid niet op tegen de kosten van een betrouwbaar verstellingsmechanisme [2].

- Het combineren van zonnepanelen met zgn.'concentratoren': gebogen (bijv. parabolisch gevormde) spiegels die de lichtopbrengst verhogen. In Nederland is deze optie maar ten dele effectief omdat 60% van de inkomende straling diffuus is. Wel kunnen spiegelende oppervlakken onder en boven de zonnepanelen de opbrengst vergroten [2] en zou nader onderzocht kunnen worden.
- Het voorzien van PV-systemen met koeling; de collectoren produceren warme lucht of warm water zodat een extra rendement met 15% wordt verkregen. In een bebouwde omgeving wordt dit al een zinnige techniek beschouwd (te vergelijken met warmtewisselaars). Probleem is (net als bij warmte wisselaars) dat er een goede gebruiksmogelijkheid voor de warmte dient te zijn.
- Zonnepanelen op overkapping; een overkapt wegdek biedt een groot extra oppervlak waar zonnepanelen geplaatst kunnen worden die minder ruimte in beslag dan bij andere toepassingen. Per trajectdeel snelweg kan de potentiële opbrengst met een factor 2 à 5 toenemen.
- Aanbrengen van PV-systemen op terreinen rond verkeersknooppunten. Bij berekeningen wordt uitgegaan van een recht stuk weg en plaatsing in de berm. In klaverbladeren en bij andere knooppunten is echter vaak een aanzienlijk groter oppervlak beschikbaar. Bovendien liggen deze punten vaak nabij grotere steden of industrieterreinen zodat een direct gebruik van de opgewekte energie mogelijk is of een koppeling relatief lage kosten zal hebben.

### 7.3 Warmtewisselaars

#### *Innovatie*

Hoewel er reeds een aantal proefexperimenten loopt voor deze techniek kan een totaal operationeel systeem nog wel als innovatief worden aangemerkt. Binnen het totaal concept van gebruik van warmte uit het wegdek en het gebruik daarvan is innovatie mogelijk zowel voor wat betreft winning (buizen in het asfalt of een andere methode, materiaal, diepte etc.) als voor het transport, gebruik en de opwaardering van de energie. Voorbeelden van mogelijk vernieuwende systemen zijn het gebruik van warmtepompen voor transport en het combineren van warmtewisselaars met Organic Rankine Cycles systemen.

#### *Betaalbaarheid*

De proeven zoals die tot nu toe werden verricht geven aan dat deze techniek niet de duurste optie is. De betaalbaarheid hangt echter af van de gekozen locatie of, preciezer gezegd, van de mogelijkheid tot het benutten van de verkregen warmte. Bij een grootschalige inzet van warmtecollectoren zal een nuttig gebruik niet altijd gevonden kunnen worden. Als alternatief is dan de omzetting naar elektriciteit mogelijk wat echter het rendement van het toegepaste systeem een ordegrrootte kleiner maken.

#### *Duurzaamheid*

De gebruikte energiebron is duurzaam: zonnestraling. De collectoren koelen bovendien het asfalt en verlengen daardoor de levensduur van het wegdek; de aanwezigheid van de collector in het asfalt kan ook tot verzwakking van de constructie leiden waardoor vervanging eerder noodzakelijk is. Dit is een van de aandachtspunten bij de lopende projecten. Vooralsnog lijkt het reëel deze techniek als duurzaam te kwalificeren.

#### *Veiligheid*

De collectoren zullen een positieve invloed op de veiligheid van de weggebruiker indien de weg in de winter ijsvrij gehouden wordt met in de zomer opgeslagen warmte. De overgang van asfalt

in baanvakken met verwarming naar baanvakken zonder verwarming kan wél een risico opleveren voor het verkeer.

## 7.4 Biomassa

### *Innovatie*

Energieteelt langs de snelweg is zonder meer een innovatie in de zin dat dit niet of nauwelijks elders plaatsvindt. Voor de hand ligt het geproduceerde biomateriaal aan te leveren aan bestaande installaties met als eindproducten elektrische energie en warmte. De plaatsing van het gewas langs de snelweg biedt hierbij het voordeel dat de vervoersmogelijkheid over de weg van de biomassa naar de verwerkingsinstallatie zich in de onmiddellijke nabijheid bevindt.

Ofschoon kleinschalige biomassa vergassingsinstallaties met een hoog rendement energie kunnen opwekken is de hoeveelheid materiaal dat noodzakelijk is voor een gezonde bedrijfsvoering van een dergelijke installatie groot wanneer dit afgezet wordt met de schaal van een mogelijk proefproject. Een gemiddelde biomassa vergassingsinstallatie zoals hierboven weergegeven heeft per jaar ongeveer 1.500 ton droge stof nodig. Bij biomassa productie van 5-6 ton droge stof per kilometer wegtraject (1 ha/km) betekent dit dat een traject van 300 km noodzakelijk is. Stellen we een vergasser op bij een klaverblad, dan kunnen we in alle 4 de richtingen een traject van 75–100 km voor de bevoorrading gebruiken. 1 hectare aan teelt per kilometer snelweg betekent een strook van 5 m aan weerszijden van de weg. Als deze stroken verdubbeld worden, halveren de afstanden langs de snelweg waarover teelt (en transport) nodig is. Waarschijnlijk is in het kader van het proefproject het aanleveren van de biomassa aan een reeds bestaande centrale de beste optie.

De bijproducten van biomassa (methanol, ethanol, olie) bieden nog een innovatieve toepassing. Toekomstige voertuigen kunnen deze stoffen gebruiken als brandstof. Omdat de locaties van de productie de brandstof (langs de snelweg) en van het afnemen door voertuigen (op de snelweg) aangrenzend zijn, ligt het idee van het opzetten van een brandstofpomp op basis van biomassa voor de hand (eventueel in combinatie met andere technieken). Het produceren van brandstoffen voor voertuigen zo vlak bij de snelweg lijkt zeker de moeite van exploratie waard.

Samenvattend, de technische kant van het inzetten van biomassa als energiebron al dan niet in combinatie met de productie van grondstoffen is geen eenvoudige kwestie maar vormt wel een interessante uitdaging vanwege de innovatieve waarde en het huidige toekomstperspectief.

### *Haalbaarheid*

Indien de langs de snelweg gekweekte biomassa met voldoende oppervlak aangeleverd wordt aan een bestaande installaties is de verwachting dat dit kostendekkend en zelfs kostenbesparend kan zijn met betrekking tot de transportkosten. In hoeverre het opzetten van zelfstandige installaties langs de snelweg waar naast elektriciteit en warmte ook brandstoffen geproduceerd worden technisch en economisch haalbaar is, zal nader onderzocht moeten worden.

### *Duurzaamheid*

De gebruikte energietechniek is uiteraard als duurzaam te betitelen en niet milieuvriendelijk. De verwerking van biomassa middels verbranding/vergassing kan leiden tot luchtverontreiniging, bijvoorbeeld een extra CO<sub>2</sub> emissie. Dit zou bij toepassing nader onderzocht dienen te worden. Een ander milieuaspect is dat de te telen gewassen gebruikt kunnen worden ter aankleding en camouflage van de snelweg.

### *Veiligheid*

Vermeld moet worden dat activiteiten in de berm zoals nodig bij de toepassing van biomassa met activiteiten als zaaien, onderhoud en oogsten indruisen tegen het huidige beleid binnen RWS inzake de verkeersveiligheid. In deze zei ook vermeld dat dergelijke

‘energie-teeltbiotopen’ een aantrekkingskracht hebben op allerlei dieren: vogels, kleine zoogdieren, etc.. Zonder bijkomende maatregelen kan dit leiden tot meer verkeersongelukken met dieren. Bij inzet van biomassa moet dus rekening gehouden worden met de noodzaak tot het afschermen van de weg, bijv. door een adequate afrastering (eventueel met PV-systemen uitgerust).

## 7.5 Windenergie

### *Innovatie*

Een keuze voor windenergie kan niet als innovatief gezien vanuit technisch oogpunt; spectaculaire verhogingen in opbrengst zijn niet te verwachten. De innovatie ligt dan ook in de toepassing van een bekende techniek langs de snelweg. Uit de tabel is duidelijk dat deze techniek de meeste duurzame energie oplevert in vergelijking met de andere hier besproken technieken. De inzet van windmolentjes in de wegberm is een orde van grootte duurder; de innovatieve waarde van dit idee is echter hoog, vooral in combinatie met een direct gebruik van de opgewekte energie.

### *Haalbaarheid*

De inzet van windturbine(s) in een proefproject lijkt onvermijdelijk. De betrekkelijk goedkope energieopwekking legt de basis voor de economische haalbaarheid in de toekomst waardoor de inzet van andere (duurdere) wintechnieken binnen bereik komt. Men dient zich echter rekenschap te geven van een Concept Beleidsregel waarin de plaatsing van turbines langs Rijkswegen aan regels is gebonden: de breedte van de berm dat onder het beheer van RWS valt, is bepalend voor de grootte van de windmolens [66]. Bij plaatsing van een windmolenpark zijn tevens aanpassingen van het bestemmingsplan nodig. Een park met een capaciteit groter dan 10 MW moet aan het bevoegd gezag worden voorgelegd voor een MER beoordeling. Voor kleinere systemen is dit niet nodig.

### *Duurzaamheid*

Er is sprake van opwekking van duurzame energie.

### *Veiligheid*

Een belangrijk aspect in het geval van het toepassen van windmolens is de verkeersveiligheid. Bewegende rotorbladen, eventuele lichtflitsen en slagschaduwen kunnen de automobilist afleiden. Gevonden ‘oplossingen’ zijn niet echt bevredigend: drie rotorbladen blijken minder af te leiden dan twee, zeer hoge masten, rotorbladen die net boven de boomtoppen uitkomen maar zo wel onttrokken worden aan het gezicht van de automobilist.

In een proefproject zou derhalve is de toepassing van de afgeschermden turbines overwogen kunnen worden (voorbeeld: Turby, zie par. 4.5). Andere aspecten die bij eventuele plaatsing van windturbines belangrijk kunnen zijn geluidsoverlast en ongelukken met vogels.

## 7.6 Piëzo-elektriciteit en Peltier elementen

### *Innovatie*

De toepassing van het piëzo-principe en Peltier elementen in het asfalt van een snelweg is innovatief. Het lijkt een zinvolle toepassing te hebben op locaties waar zuinig met elektrische energie dient te worden omgegaan: alleen op het moment dat er een voertuig nadert zorgt deze techniek ervoor dat verlichting of anderszins wordt ingeschakeld en zorgt zo voor een efficiënt verbruik van energie.

### *Haalbaarheid*

Vanwege de (zeer) hoge kosten zijn beide technieken vanuit economisch oogpunt niet interessant.

## REFERENTIES

- [1] Hensen, A. en Erisman, J.W.: De weg met behoud van energie, de energie/energiearme weg, ECN, september 1999.
- [2] Persoonlijke communicatie P. Eikelboom en G.P. Wyers, Unit Zon, ECN, 2000.
- [3] Moore, T.: Emerging markets for photovoltaics, EPRI Journal October 1994, p7-15.
- [4] Roberts, J.C.: Solar-powered illuminated reflector, patent USA 1985.
- [5] Dunlop, J.P.: Design and operational performance of a photovoltaic-powered highway guide sign lighting system, Proceedings of the 1990 annual conference of the American Solar Energy, eds. Burley, S.M. en Coleman, M.J., 1990.
- [6] Sasaki, M., Fujita, S., Kaga, T. en Koyama, N.: Snow melting system with electric heating using photovoltaic power generation, Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference, 1996.
- [7] Meier, C., Alpha Real AG, Zurich (Zwitserland), rapport mei 1993., 88 p.
- [8] Petersen, W.: Pioneering photo-electric project at Rendsburg: Solar electricity for tunnel lighting, Windkraft Journal 11 (1991) 33.
- [9] Chuard, P., Chuard, D., Mercier, C., Gilst, J. van, Hadorn, J.C.: Solar energy installations of the motorway maintenance facilities in Vaulruz: Swiss project of IEA, Task VII. Research and development of solar energy in Switzerland, (1983) 147-159.
- [10] Hilton, M.H.: Evaluation of solar energy for heating a highway maintenance headquarters building. Final report, Virginia Highway and Transportation Research Council, Charlottesville (USA), 59 pp, maart 1985.
- [11] Basevi, F. and Bricca, E.: Photovoltaic system for fog-warning in the Milan-Venice motorway, in: Proceedings of the third Photovoltaic Contractors' Meeting, Commission of the European Communities, Directorate-General for Energy, held at the Joint Research Centre, Ispra (IT), 17-20 May 1988.
- [12] Shao Shu Ren, Hu Xian Yun en Xia Qing Wei in: Advances in solar energy technology. V. 2. Proceedings of the biennial congress of the International Solar Energy Society held at Hamburg, 13-18 September 1987, pp. 1441-1445.
- [13] Goetzberger, A.: Evaluation of the potential of PV noise barrier technology for electricity production and market share, Thermie B Project, final report, V1-2, juni 1999.
- [14] Persoonlijke communicatie V. Dijk en J. Betcke J., Univ. Utrecht, november 2000.
- [15] PV info NOVEM, 2000.
- [16] Persoonlijke communicatie Fransen, Shell Solar Energy, oktober 2000.
- [17] Persoonlijke communicatie van der Borg, Unit Zon, ECN, oktober 2000.
- [18] Nordmann, T.: In Verkehrsträger integrierte PV-Netzverbundanlagen - Fallbeispiele aus der Schweiz -, Energieanwendung + Energietechnik, 42 (1993) 325-328.

- [19] Nordmann, T., Frölich, A., Dürr, M en Goetzberger, A.: First experience with a bifacially PV noise barrier, paper presented at the 16<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1-5 May 2000, Glasgow, UK.
- [20] Waltner, H.: Operating experience with photo-electric plants on roads in Lower Austria. Betriebserfahrungen mit Photovoltaik-Anlagen der Strassenverwaltung in Nieder-Oesterreich, 8th national symposium on photovoltaic solar energy, Regensburg, Germany, 1993. p. 607-617.
- [21] Hille, G. en Reiche, K.: Potential of photo-electrics on noise protection walls on German roads. 11. symposium on photovoltaic solar energy., Regensburg (Germany), 1996. p. 527-532.
- [22] Ecofys: Commentaar op 'De weg met behoud van energie', oktober 2000.
- [23] Erisman, J.W. en Hensen, A.: Reactie op het commentaar van Ecofys op het ECN essay 'De weg met behoud van energie', ECN, november 2000.
- [24] Bijsterveld, W.T. van, Houben, L.J.M., Pietersen, H.S., Scarpas, A.: Energie uit asfalt? (2000). Een modelmatige beschouwing van constructieve en thermische aspecten. Afstudeerverslag TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Sectie Verkeersbouwkunde.
- [25] DWW: Warmtewinning uit asfalt; inventarisatie systemen, relevante aspecten en leemten in kennis. Documentnummer bouwdienst ENOP-T-00014, Conceptversie 5, 2000.
- [26] Rikken J. (2000), De Ingenieur, no. 3, februari 2000, blz. 14-15.
- [27] Rikken J. (2000) Van autoweg tot zonnweg. Diagonaal, KEMA Nieuwsbrief over Energie, Beleid en Klimaatverandering, October 2000, no. 10, blz. 18-19.
- [28] Persoonlijke communicatie Moolenaars, Civiele Techniek en Geowetenschappen, TU Delft, oktober 2000.
- [29] Persoonlijke communicatie J. Rikken, KEMA, oktober 2000.
- [30] Sloot, M. van der (1999): Tussenrapportage Monitoring Proefvakken Haringvlietsluizen, Rijkswaterstaat, Directie Zuid-Holland, Dienstkring Rhoon 252A020, 12 augustus 1999.
- [31] Persoonlijke communicatie Bach, werkgroep Restwarmtetechnologie, ECN, oktober 2000.
- [32] Derde Energienota van het Ministerie van Economische Zaken.
- [33] Japans patent: Fermenter for natural energy utilization for antifreeze material used in snowy, patent nummer: JP 11013009 A UPAB: 19990331.
- [34] Tezuka, N.: Snow-melting facilities capable multiple needs. Present state and future tasks in Tohoku district, Enerugi, 30 (1997) 82-84.

- [35] Cambridge Scientific Inc.: Converting biomass to calcium magnesium acetate (CMA) for roadway ice melting, Innovator's Digest, 1993.
- [36] Scientists see alternative to chloride salts in road deicing, Chemical Marketing Reporter (1984) 4.
- [37] Oehr, K.H. en Barrass, G.: Biomass derived alkaline carboxylate road de-icers, Biomass thermal processing. Proceedings British Columbia Research Council, Vancouver, BC, (Canada).
- [38] Ree, R. van.: Kritische succesfactoren biomassa, ECN rapport, ECN-C--99-061, 85p, j uni 2000.
- [39] Noon, C.E. en Daly, M.J.: Transportation and site location for regional integrated biomass assessment, in: Bioenergy '96: Partnerships to develop and apply biomass technologies, Vols. 1 en 2, 487-493.
- [40] Rose, D.W. en Husain, S.A.: Identifying potential sites for energy production from woody biomass, Report Minnesota University, Minneapolis, USA, 1997.
- [41] Bouma, J.W.J.: Energy production from biomass and waste in The Netherlands: a review and perspective, Energie en Milieu (Belgium), 9 (1993) p. 65-70.
- [42] Borgwardt, R.H.: Methanol production from biomass and natural gas as transportation fuel, Ind. Eng. Chem. Res., 37 (1998) 3760.
- [43] Persoonlijke communicatie J. van Doorn en H. Reith, Unit Biomassa, ECN, oktober 2000.
- [44] Johanson, J.C.P.: Wind turbines along highways and on the dikes Houtribdijk and Afsluitdijk in the Netherlands, rapport DWW: W-DWW--93-264, Ministerie van V&W, Delft.
- [45] Manalis., M. en Davidson, J.: Wind energy study for the California Department of Transportation (Caltrans), Environmental Studies Program at UCSB, USA.
- [46] Schreuder, D.A.: De invloed van windturbineparken op de verkeersveiligheid. Advies uitgebracht aan de Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu BV, NOVEM, rapport no. R-92-74, (1992), p. 62.
- [47] Japans patent: Electric generator whose driving is performed by revolving shaft rotated by wind energy, ASAHI DENKI SEISAKUSHO KK, Hiroshima.
- [48] Japans patent: Road marker using wind energy for e.g. displaying message about wind, HOKOKU KOGYO KK.
- [49] Persoonlijke communicatie D. Jansen, Unit Wind, ECN, november 2000.
- [50] Persoonlijke communicatie J. Ybema, Unit Wind, ECN, oktober 2000.
- [51] McShane, D.W., Wind energy from vehicles, Patent, GB 2278645 A 7, 1994, 10p. The Patent Office, Sales Branche, Newport, UK.
- [52] Wither, T.: Median Winds: Vehilectrical Power Systems, Discover, 1994, 72.

- [53] Coventry Polytechnic: Turbines turn motorways into a source of power, *New Scientist*, (1990) 33.
- [54] Gagliardi, J.: Kinetic energy converter for electricity generation – has vehicle slip stream or fluid flow stream used to drive electrical generator via turbine rotor, patent.
- [55] Antonios, B. E.: Electrical power generation from residual air created by passage of a vehicle on a road way, patent.
- [56] Sekisui, J.: Wind generator with glare protection device – has luminescence body in glare protection device which lights, patent 1995.
- [57] Graf, D.: Power generation system using vehicular traffic - comprises vertical-axis wind turbines at roadside and in centre with tips of vanes bent back at obtuse angle, patent.
- [58] Becker, W.: Wind energy - recovery system - uses drum-type windmill rotors along road in path of draught from vehicles, patent.
- [59] Betterman, S.: Wind power generator recovering energy from vehicular traffic - is set in rotation by gusts of wind generated by passage of fast high-sided vehicles, patent.
- [60] Wieringa, J. en Rijkoort, P.J.: *Windklimaat van Nederland*, KNMI, 1983.
- [61] Japans patent: Electrical energy supply system for illuminating traffic sign e.g. for railroad - obtains energy from the solar panel and uses piezoelectric element to convert oscillation energy to electric energy, patent JP 06141478, 1994.
- [62] Persoonlijke communicatie G. Kos, Unit Schoon Fossiel, ECN, oktober 2000.
- [63] Internetsite: [www.conrad.de](http://www.conrad.de), november 2000.
- [64] Persoonlijke communicatie P. French en Vellekoop, Technische Universiteit Delft, november 2000.
- [65] Ybema, J.R.: Prospects for energy technologies in the Netherlands, rapport ECN-C—95-039, 1995.
- [66] Persoonlijke communicatie R. Jutte, DWW/RWS, december 2000.
- [67] *World Energy Assessment: Energy and the challenge of sustainability* (2000), tabel blz. 240.
- [68] Achenbach, F.: *Autobahn in 2 Ebenen*, patent no. P3141486.1, 1983.
- [69] Meiarashi, S.: Road Electric System with use of solar power, *Proceedings of the American Power Conference*, vol.1, p265-270, April 1997.



## BIJLAGE A

### Inleiding

In de voorafgaande hoofdstukken is gekeken naar verschillende energiewintechnieken. Bij de bijbehorende projecten is steeds één van de technieken ingezet. Een optimalisatie van energieopwekking is te vinden in een goede combinatie van technieken.

### Overkappen of niet overkappen

Bij het komen tot een integraal concept moeten een aantal basiskeuzen gemaakt worden. Één van de meest belangrijke keuzes is het al dan niet overkappen van de rijbaan. Deze keus heeft invloed op verschillende aspecten van het ontwerp (Figuur A.1).

#### *Voordelen van een overkapping.*

Door overkapping van de rijbanen wordt ruimte gewonnen voor bijvoorbeeld zonnepanelen, collectoren of eventueel zelfs voor biomassa verbouw. Indien er vanuit gegaan wordt dat de constructie van een overkapping zo eenvoudig mogelijk moet zijn dan is de inzet van zonnepanelen op de overkapping de beste keus. Een overkapping neemt een gedeelte van de veiligheidsrisico's van windturbines nabij de rijbaan weg. Weggebruikers zullen niet afgeleid worden als de overkapping de molens deze aan het zicht onttrekt. Een overkapping is natuurlijk duur, maar levert ook een besparing op de kosten van wegonderhoud er hoeft bijvoorbeeld geen ZOAB gebruikt te worden. De veiligheid op de weg waar regen en gladheid geen rol van betekenis speelt is hoger. Bij regen is er evenmin een probleem met opspattend water. Run-off en verwaaiing zijn met een overkapping ook minder een probleem.

Een overkapping moet bij voorkeur grotendeels transparant zijn zodat daglicht beschikbaar is en de weggebruiker niet het idee heeft in een tunnel te rijden. Verlichting onder de overkapping zal eerder op de avond aan gaan en later uit gaan, daarentegen kan reflectie van het uitgezonden licht er voor zorgen dat er gedurende de nacht minder lampen hoeven te branden. Dieren die zich ophouden in de berm waar biomassa verbouwd kan worden zijn eenvoudig van de rijbaan te weren middels de overkapping.

Tabel A.1: *Mogelijke besparingen bij aanleg van een overkapping*

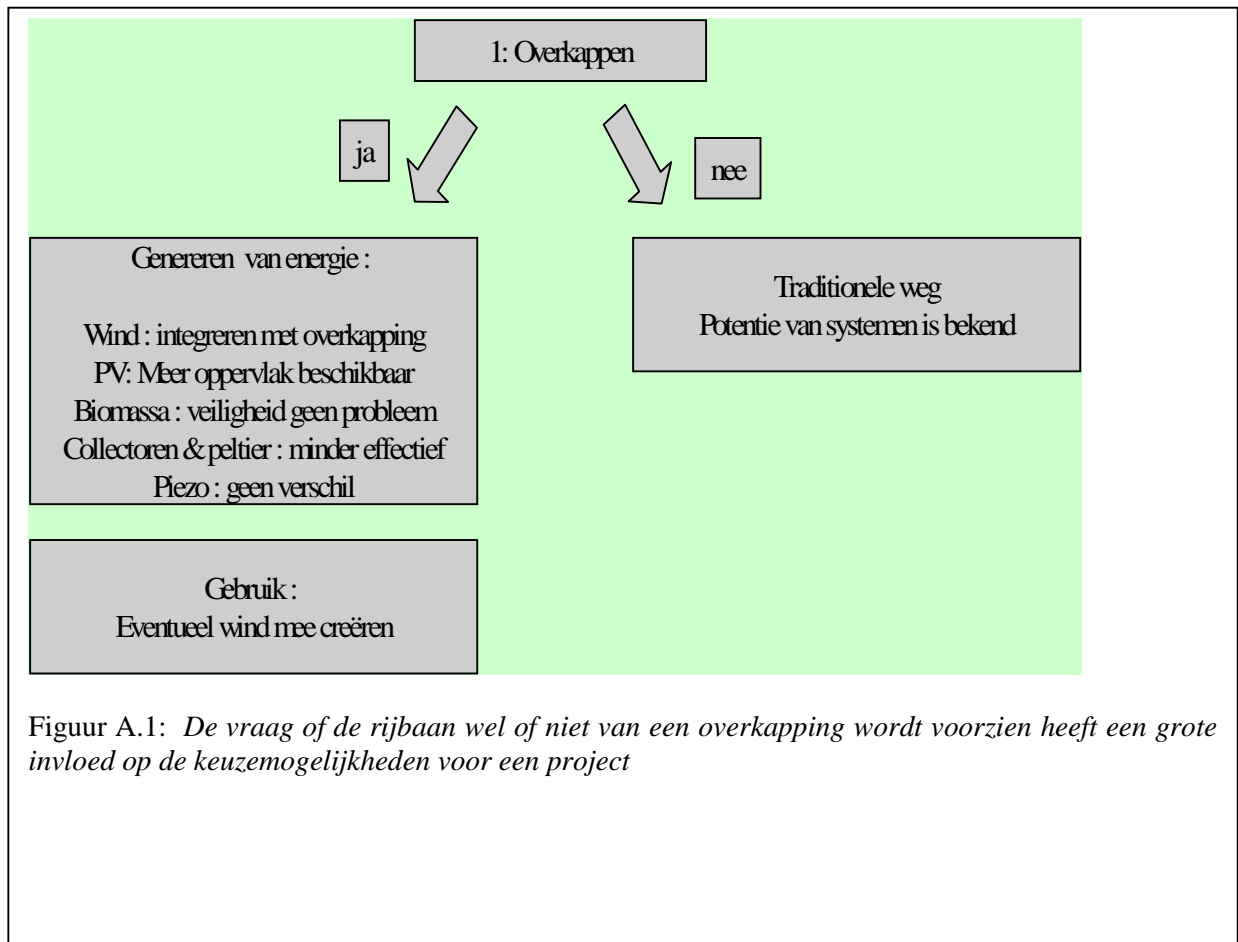
<b>Besparing</b>
Ruimtebesparing
Extra energie uit zonnecellen
D.A.B mogelijk in plaats van Z.O.A.B.
Besparing op verlichting
Besparing door wind mee effect.

#### *Continu wind mee situatie.*

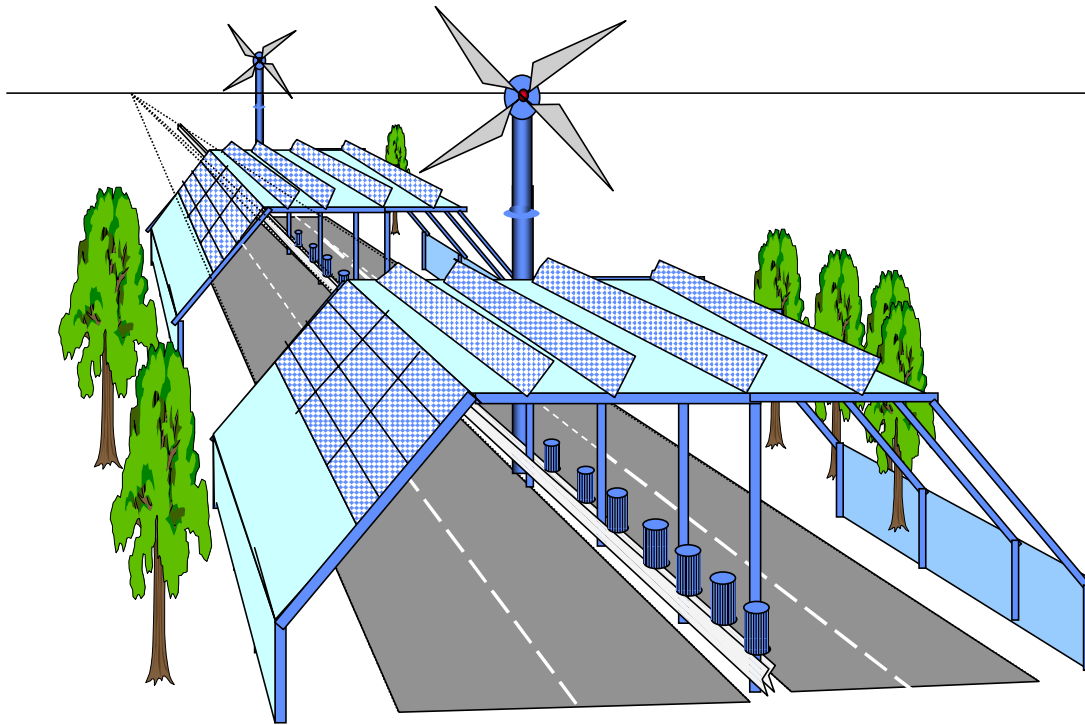
Indien de overkapping uitgevoerd wordt met twee gescheiden compartimenten voor de verschillende rijrichtingen zal er door het vervoer zelf een luchtstroom gegenereerd worden in de rijrichting. Deze luchtstroom kan nog versterkt worden door extra ventilatoren. In zo'n continu wind mee situatie zullen de voertuigen minder brandstof gebruiken. Een voorbeeld van een continu-wind mee concept is weergegeven in figuur 7.3.

Het verschil in energiegebruik tussen een auto die 80 km/uur rijdt (22 m/s) en een auto die 100 km/uur rijdt (27m/s) is 15-20 %. Dit extra energiegebruik komt grotendeels op rekening van de

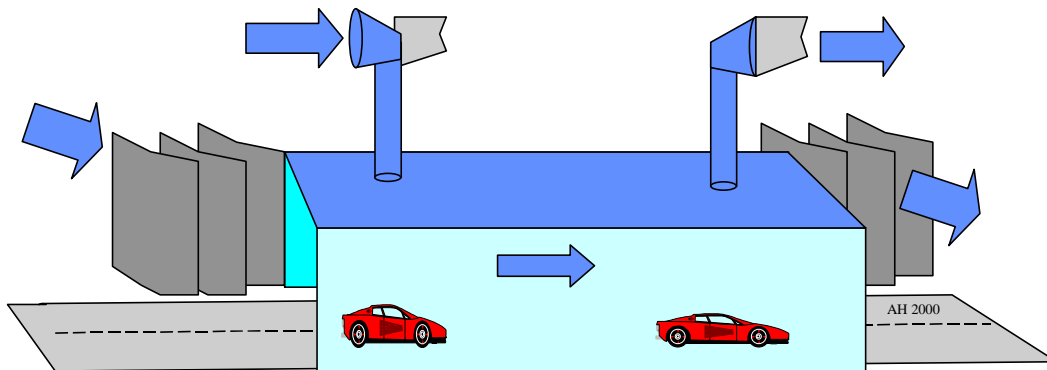
extra luchtweerstand. Indien we onder de overkapping 5 m/s wind mee kunnen creëren zal dit besparend werken.



Figuur A.1: De vraag of de rijbaan wel of niet van een overkapping wordt voorzien heeft een grote invloed op de keuzemogelijkheden voor een project



Figuur A.2: Een overkapte snelweg kan plaats bieden aan een groot oppervlak aan zonnecellen of eventueel zonnecollectoren. De overkapping dient tevens als geluidswal, voorkomt dat dieren uit de berm op de rijstrook belanden, en verhoogt de veiligheid van de weggebruiker.



Figuur A.3: Door aan de in- en uitgang van de tunnels panelen te plaatsen en door gebruik te maken van ventilatiekokers of ventilatoren kan een wind mee situatie onder de overkapping gerealiseerd worden.

Het idee van de getoonde kokers in figuur A.3 is als volgt: de linker koker richt zich altijd met de opening naar de wind, de rechter koker juist van de windrichting af. Daardoor is de tocht onder de overkapping altijd van links naar rechts.

## Optimaliseren van verschillende energiestromen.

De energie die opgewekt wordt op en om de infrastructuur van een snelweg kan ter plaatse gebruikt worden voor verlichting etc., of de kan via een koppeling aan het elektriciteitsnet elders gebruikt worden. Een ideaal systeem genereert die hoeveelheid energie die gevraagd wordt. Op nationale schaal gebeurt dit door grote centrales die aan de basisbehoefte aan elektriciteit voorzien en kleinere eenheden, die eenvoudig aan en uit te schakelen zijn, die een piek in de vraag kunnen verwerken.

Binnenkort wordt een systeem ingevoerd waarbij producenten een dag van tevoren moeten laten weten hoeveel energie er geleverd zal gaan worden. Deze afgesproken planning moet vervolgens ook gerealiseerd worden. Combinatie van verschillende duurzame concepten leidt tot een meer continue en beter voorspelbare levering aan het net.

Windenergie, zonenergie zijn niet continu in de tijd beschikbaar. In het algemeen is er overdag meer energie beschikbaar als 's nachts. In de zomer is er meer energie beschikbaar afkomstig van PV-systemen, in voorjaar en najaar meer wind. In een opzet waarbij verschillende wintechnieken gecombineerd worden, kunnen fluctuaties in het energieaanbod van de ene techniek opgevangen worden met de opbrengst van een andere techniek.

### ***Voorbeeld :***

Een simulatie van een systeem bestaande uit zonnepanelen en twee windturbines laat de variabiliteit van de beschikbare energie zien. De simulatie werd uitgevoerd met een set meetgegevens van instraling en windsnelheid. Voor elk half uur werd berekend wat de opbrengst is van de zonnepanelen en windmolens. Het getoonde voorbeeld is gebaseerd op de volgende condities:

#### *Zonnepanelen :*

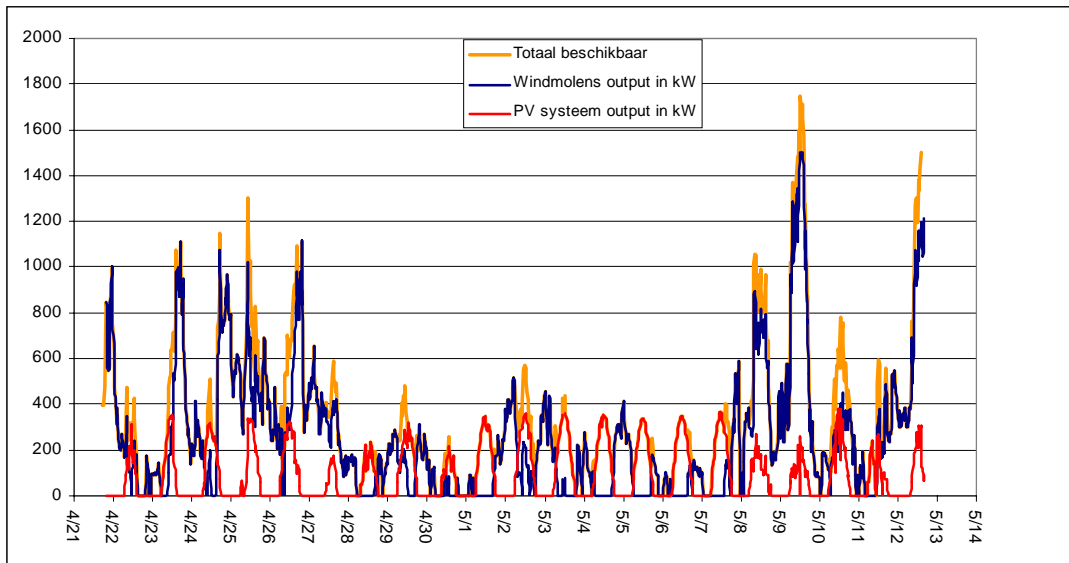
4.000 m<sup>2</sup> opgesteld zonneceloppervlak (2 m hoog scherm aan beide zijden van de weg). Met 95 W<sub>p</sub>/m<sup>2</sup> en een rendement van 10 % zodra de instraling boven de 100 W/m<sup>2</sup> komt.

#### *Windturbines:*

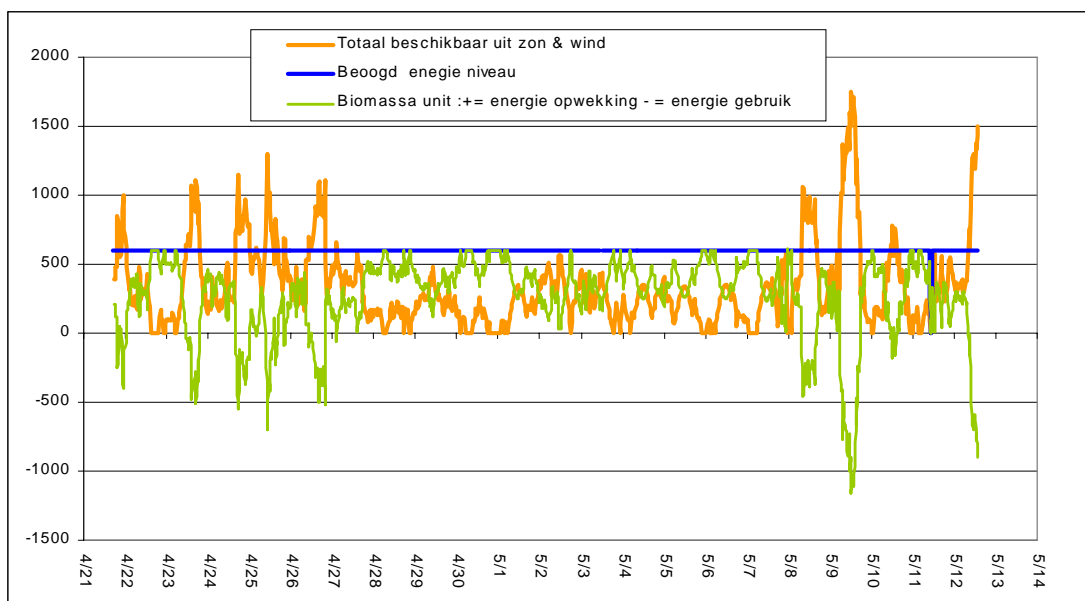
Opgesteld vermogen 1.500 kW<sub>e</sub> (2 molens van ongeveer 60 m hoog en een rotor van 50 m diameter). De windmolen start bij snelheden boven de 4 m/s, is ontworpen voor een snelheid van 11 m/s en schakelt af bij 25 m/s.

Het resultaat is weergegeven in figuur A.4. Om pieken en dalen in het energieaanbod op te vangen zijn er drie mogelijkheden.

1. Elders op het net wordt een gasturbine harder of zachter gezet.
2. Energie kan opgeslagen worden en is beschikbaar op het moment dat er geen aanbod is.
3. Energie wordt geleverd door een derde systeem dat bijspringt als zon en wind verstek laten gaan.



Figuur A.4: Simulatie van de energieopbrengst voor een periode uit het voorjaar. De opbrengst varieert sterk met maxima overdag. Om beschikbaarheid van energie te kunnen garanderen moet er een derde systeem parallel beschikbaar zijn.



Figuur A.5: De totaal beschikbare energie uit zon en wind is weergegeven met de oranje lijn. Stabilisatie van de energieproductie op het niveau aangegeven door de blauwe lijn kan bijvoorbeeld door inzet van biomassa of door energie aan bijvoorbeeld een aquifer te onttrekken. De groene lijn geeft het verschil aan. Is deze boven 0 dan is er extra energie nodig, bijvoorbeeld afkomstig van het biomassasysteem. Raakt de groene lijn onder nul dan is er energie beschikbaar bijvoorbeeld om de biomassa te drogen, te hakselen etc., of om energie toe te voegen aan een opslag.

In de simulatie is gekeken naar de derde optie. Voor een proefproject is het in ieder geval zinnig meerdere mogelijkheden voor energieopwekking mee te nemen. Als de verschillende technieken optimaal op elkaar afgestemd zijn, maakt dat de proef een uitgekiend geheel. Tevens wordt de voorspelbaarheid van de energieleverantie één dag vooruit beter.

Inzet van biomassa naast zon en wind zou een optie zijn. Een biomassa vergassingsinstallatie werkt optimaal bij continu bedrijf; dit gaat makkelijker bij een vergistinginstallatie waarin biogas wordt geproduceerd. Dit gas kan worden opgeslagen en is beschikbaar op momenten dat de andere bronnen minder produceren. Energie die over is op momenten dat de systemen zon en wind maximaal produceren kan gebruikt worden voor de biomassaverwerking als verhakselen, mengen etc..

Figuur A.5 laat zien hoe zoiets er in een simulatie uit ziet. De bijdrage van zon en wind is overgenomen uit figuur A.4. Indien een constant niveau voor energiegeneratie beoogd, zal een biomassa-installatie volgens de groene lijn in de figuur bedreven moeten worden. Op momenten dat de zon en wind systemen minder produceren, springt biomassaopwekking bij. Is er echter energie over dan wordt dat voor de bewerking van de biomassa ingezet.

In de simulatie is uitgegaan van een constant niveau. In de werkelijkheid zal natuurlijk variatie zijn. Het niveau kan ook afgesteld worden op het verwachte verbruik. Bij de opzet en beoordeling van een proefproject kan een simulatieprogramma zoals hier is getoond waardevol zijn om het totaal concept te optimaliseren.

## Combinatiemogelijkheden

Op basis van de opgedane kennis kunnen we een aantal potentiële concepten opstellen. Daarbij gaan we uit van de volgende randvoorwaarden.

1. Gezocht wordt een concept voor een proefproject
2. Het doel is ervaring op te doen met verschillende technieken
3. Een tweede doel is zo veel mogelijk energie op te wekken
4. Tevens dient de ruimte zo optimaal mogelijk benut te worden

Langs de snelweg geteelde biomassa is relatief goedkoop. Bij verbouw van energiegewassen bepaalt de grondprijs een belangrijk deel van de energieprijs. Omdat de grond langs de snelweg verbouwde biomassa toch geen ander gebruik van deze ruimte toelaat, zal dit de prijs drukken. Bij het opstellen van een integraal concept voor een proefproject is er echter het volgende probleem met de inzet van biomassa: voor een proefproject van 1 km is verwerking van de biomassa van 1 ha nooit rendabel. Alle andere delen van een proefproject kunnen wel degelijk worden getest binnen een referentievak van 1 km. Op dit punt zal een keus gemaakt dienen te worden:

- Beschouw biomassa langs 1 km weg.
- Beschouw biomassa voor een langer traject: bijvoorbeeld 10 km ofwel 5 km aan elke kant van 1 km proeftraject.

Bij het vergelijken van verschillende combinaties van technieken voor de laatste optie. De keuze voor een proeftraject lengte van 10 km is arbitrair. Deze afwegingen combinerend zijn we gekomen tot een viertal concepten:

### 1. *Windenergie concept*

In dit concept wordt dus ingezet op windenergie. De afstand die nodig is tussen de molens wordt opgevuld met zonnecellen en biomassa. Dit concept is zowel met als zonder overkapping mogelijk waarbij met overkapping meer ruimte is voor zonnecellen.

2. *Bewegingsloos concept*

Alles wat beweegt langs de snelweg leidt af en brengt risico met zich mee: derhalve geen inzet van windmolens. Er wordt maximaal ingezet op zonne-energie, collectoren en biomassa. Ook bij dit concept is wel of niet overkappen een keuzemogelijkheid.

3. *Bosconcept*

De snelweg wordt omgebouwd in een groene corridor en het oppervlak van de rijbanen wordt voor andere vormen van energieopwekking gebruikt. Geluidsschermen langs de weg zorgen ervoor dat er een optimale hoeveelheid biomassa verbouwd kan worden.

4. *Innovatieconcept*

Van wind en zon zijn al voorbeeldprojecten, dus wordt nu ingezet op alles wat tot nu toe niet werd gedaan: piëzo-elektriciteit, trommelmolens, collectoren eventueel uitgebreid met ORC en biomassa.

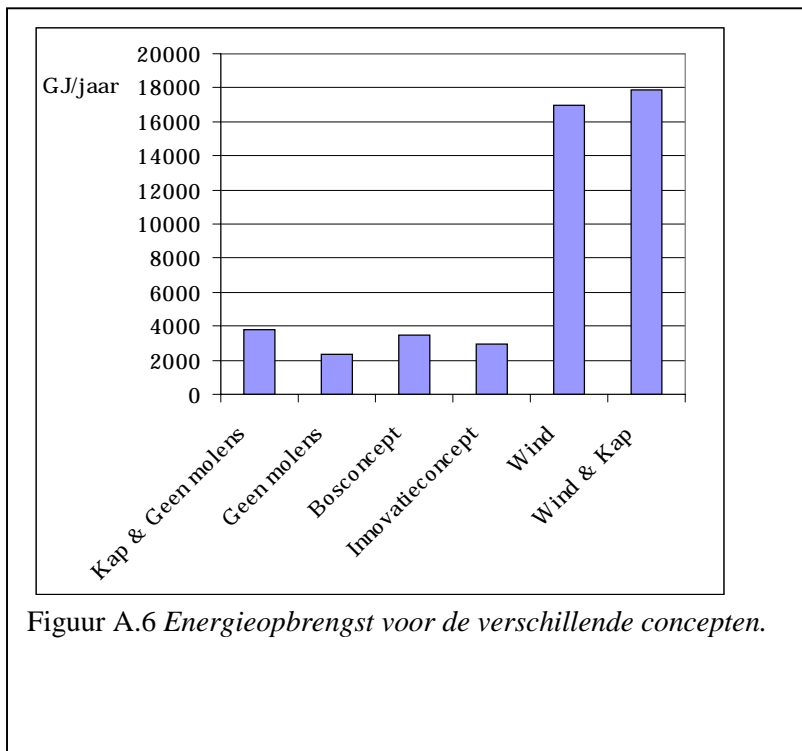
De resultaten in termen van energieopwekking zijn te zien in tabel A.2. De totale energie opbrengst per concept is weergegeven in figuur A.6.

Conclusie:

Bij inzet van windenergie is de opbrengst een factor 4 tot 6 hoger dan bij de andere concepten. Overkapping in deze concepten vergroot alleen de bijdrage van zonnepanelen. Bij de concepten met windmolens is het effect van een overkapping op de totale energieopbrengst relatief gering. Bij de concepten zonder windturbines is dit veel groter.

Tabel A.2

	Wind GJ/jaar	Wind & Kap	Geen molens	Geen molens & Kap	Bosconcept	Innovatieconcept
PV	540	2160 <sup>*4</sup>	540	2700 <sup>*5</sup>	540	0
Collector	756	0	756	0	756	756
Biomassa	1088	1088	1088	1088	2176 <sup>*2</sup>	2176
Turbines	14580	14580	0	0	0	0
Trommels	39	39	0	0	0	39
Piezo	0	0	0	0	0	1
	<b>TOTAL</b> 17003	<b>TOTAL</b> 17867	<b>TOTAL</b> 2384	<b>TOTAL</b> 3788	<b>TOTAL</b> 3472	<b>TOTAL</b> 2972



Figuur A.6 Energieopbrengst voor de verschillende concepten.



