

# Energiewinning uit weginfrastructuur

Inventarisatie in opdracht van

‘Wegen naar de Toekomst’

(Innovatieprogramma Rijkswaterstaat)

E.P. Weijers

G.J. de Groot

## Verantwoording

Dit werk is uitgevoerd in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat onder opdrachtnummer 4500084555 en projectnaam 'Energiewinning uit Weginfrastructuur'. Het ECN projectnummer was 8.27656.

Dank is verschuldigd aan J.W. Erisman en J. Beesteheerde (ECN Biomassa, Kolen en Milieu), en P. Wyers (ECN Zonne-energie) voor hun bijdragen, en aan mw. E. Bloemberg voor haar enthousiaste uitvoering van het literatuur- en octrooionderzoek.

Een aantal mensen zijn wij erkentelijk voor het aanleveren van nuttige informatie en/of het geduldig voeren van (lange) telefoongesprekken:

W.C. van den Boom (Wegbouwkundig bureau bv, Zwijndrecht)

H. Verkroost (ECN Beleidsstudies)

M. Londo (ECN Beleidsstudies)

H. de Wilde (ECN Beleidsstudies)

N. Lamerichs (BAM Techniek, Veenendaal)

A. Uiterweerd (BAM Techniek, Apeldoorn)

D. Sidler (Turby bv., C.O.R.E. International, Lochem)

R. Visscher (Rijkswaterstaat Bouwdienst, Utrecht)

M. Timmerman (Animal Science Group, WUR, Lelystad)

L. van Zaane (Ooms, Avenhorn)

E.J. Bakker (ECN Energie Gebouwde Omgeving & Netten)

K. Kwant (SenterNovem, Utrecht)

R. van Wordragen (SenterNovem, Utrecht)

J. Verhoef (ECN Windenergie)

J. de Wolf (KEMA, Arnhem)

L. Rabou (ECN Biomassa, Kolen en Milieu)

A. Hensen (ECN Biomassa, Kolen en Milieu)

## Abstract

In this inventory study the potential for generating sustainable energy along a motorway is discussed. Several technologies and possible applications are enumerated. This includes wind turbines, photo-voltaic systems, heat-collectors, biomass, piezo-electricity and Peltier elements. It is concluded (but not exclusively) that the application of smaller turbines, light and transparent amorphous solar cells as well as the growth of biomass bear an advantageous perspective for the (near) future. Attention should be paid to the potential of the 'integral concept' in which several techniques are combined.

## 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

Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren	5
Samenvatting	7
1. Inleiding	9
1.1 Aanleiding	9
1.2 Doelstelling en afbakening	9
2. Foto-voltaïsche systemen	11
2.1 Inleiding	11
2.2 Inventarisatie	11
2.2.1 Autonome PV-systemen	11
2.2.2 Netgekoppelde PV-systemen	12
2.3 Toepassingen netgekoppelde PV-systemen in Nederland	14
2.4 Opbrengst en kosten	16
2.5 Recente ontwikkelingen	16
2.5.1 Tweezijdige zonnepanelen	16
2.5.2 Ontwikkeling LED technologie	17
2.5.3 PV-tegel	17
2.5.4 Flexibele PV-cellen	18
3. Warmtecollectoren	19
3.1 Inleiding	19
3.2 Inventarisatie	19
3.3 Opbrengst en kosten	21
3.4 Recente ontwikkelingen	22
4. Biomassa	25
4.1 Inleiding	25
4.2 Inventarisatie	27
4.3 Opbrengst en kosten	28
4.4 Recente ontwikkelingen	28
5. Windenergie	30
5.1 Inleiding	30
5.2 Opbrengst en kosten grote windturbines	31
5.3 Overzicht kleine windturbines	32
5.4 Windenergie geïnduceerd door rijdende voertuigen	34
5.4.1 Inventarisatie	34
5.4.2 Opbrengst en kosten	36
6. Piëzo-elektriciteit en Peltier elementen	38
6.1 Inleiding	38
6.1.1 Piëzo-elektriciteit	38
6.1.2 Peltier	38
6.2 Toepassingen	38
6.2.1 Piëzo-elektriciteit	38
6.2.2 Peltier	39
6.3 Opbrengst en kosten	39
6.3.1 Piëzo-elektriciteit	39
6.3.2 Peltier	39
7. Integrale energiewinning	40
8. Conclusies	43

8.1	Criteria	43
8.2	Foto-voltaïsche systemen	45
8.3	Warmtecollectoren	46
8.4	Biomassa	47
8.5	Windenergie	48
8.6	Piëzo-elektriciteit en Peltier elementen	49
	Referenties	50

## Lijst van tabellen

Tabel 1.1	<i>Specificaties referentiesnelweg</i> .....	10
Tabel 2.1	<i>Theoretisch, technisch en korte-termijn potentieel voor PV-systemen aangebracht op geluidsschermen langs Nederlandse snelwegen (uit [14,16])</i> .....	13
Tabel 2.2	<i>Overzicht gegevens van projecten waar PV in geluidsschermen worden toegepast</i> .....	15
Tabel 3.1	<i>Voorbeelden van opbrengst wegdekcollectoren</i> .....	22
Tabel 7.1	<i>Mogelijke voordelen/besparingen bij aanleg van een overkapping</i> .....	40
Tabel 8.1	<i>Toetsingsresultaten voor de verschillende energiewintechnieken rondom de snelweg</i> .....	44

## Lijst van figuren

Figuur 2.1	<i>PV-geluidsschermen: Ontwerpen and realisatie-data [15]</i> .....	12
Figuur 2.2	<i>Zonnecellen geïntegreerd in geluidsschermen langs de A9</i> .....	14
Figuur 2.3	<i>Grootste project van geluidsschermen (499 kW) ligt langs de A92 bij Freising in Duitsland</i> .....	15
Figuur 2.4	<i>Toepassing van dubbelzijdige zonnecellen in middenberm</i> .....	16
Figuur 2.5	<i>Enkelzijdige zonnecellen in optimale 45° configuratie aan de A13 te Zwitserland</i> .....	17
Figuur 2.6	<i>Links de traditionele ‘kattenogen’ die alleen licht reflecteren; rechts de moderne LED indicator op PV (Smartstud, [24])</i> .....	17
Figuur 2.7	<i>Toepassing flexibele PV-panelen</i> .....	18
Figuur 3.1	<i>Energieopbrengst asfaltcollector (© WinnerWay); de opbrengst is bepaald bij een warmtegeleidingcoëfficiënt van 1,2 W/mK en een warmtecapaciteit van 800 J/kgK [25].</i> .....	20
Figuur 3.2	<i>Haringvlietsluis</i> .....	23
Figuur 4.1	<i>Ook langs de snelweg?</i> .....	25
Figuur 5.1	<i>Combineren van zonne- en windenergie</i> .....	30
Figuur 5.2	<i>Enige voorbeelden van kleine windturbines</i> .....	33
Figuur 5.3	<i>‘Curved blade’ wind turbine</i> .....	34
Figuur 5.4	<i>Afbeelding in een Amerikaans patent van een zgn. ‘cupanemometer’ windturbine met mogelijke toepassing</i> .....	35
Figuur 5.5	<i>Voorbeeld van een mogelijke toepassing langs snelwegen</i> .....	35
Figuur 7.1	<i>Maquettes gemaakt door KWS/DHV/ECN als voorbeelden van integrale energiewinning langs de snelweg</i> .....	41
Figuur 7.2	<i>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</i> .....	42
Figuur 7.3	<i>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</i> .....	42



## Samenvatting

Al langer is er nieuwsgierigheid naar een tweede functie van de weg. Natuurlijk is het in goede banen leiden van het verkeer het belangrijkste. Vanwege het grote ruimtebeslag en het zwarte oppervlak wordt echter ook gedacht aan de toepassing van (laagrenderende) energiewinning. Om hierop meer zicht te krijgen is in het kader van het programma 'Wegen naar de Toekomst' van Rijkswaterstaat een inventarisatie verricht naar (nieuwe) mogelijkheden (en beperkingen) voor het duurzaam opwekken van energie langs de snelweg. Dit rapport is deels een update op een soortgelijke rapportage die in 2000 is uitgebracht [1] als voorbereiding op de pilotstudie 'Energiek Wegdek' eveneens onderdeel van het programma 'Wegen naar de Toekomst'.

In zijn algemeenheid kan gesteld worden dat er in de afgelopen jaren geen opzienbarende innovaties hebben plaatsgevonden die een geheel nieuwe toepassing van energiewinning langs de snelweg mogelijk maken. Bestaande technieken zijn in meer of mindere mate verder ontwikkeld en verbeterd. Het innovatieve bestaat vooral in het anders toepassen en combineren van bekende (en verbeterde) technieken. Het is dan ook vooral dit gegeven waarop deze inventarisatie zich richt.

Per energiewintechniek worden hieronder de mogelijkheden beschreven.

### *Toepassing van PV systemen*

De ontwikkeling bij PV-systemen zit niet zozeer in nieuwe technische innovaties als wel in de mogelijke toepassingen ervan. Zo zijn zonnecellen met een tweezijdig collector oppervlak goed bruikbaar als energieopwekkingsystemen in een middenberm, m.n. in een Noord-Zuid configuratie. Ook werken deze systemen efficiënt als geluidsbarrières en zichtbeperking. Omdat er geen schuine ondersteuning nodig zijn leveren ze geen belemmering op voor het verkeer.

Door het beschikbaar komen van vermogensefficiënte LED's zijn er nieuwe toepassingsmogelijkheden voor autonome PV systemen zoals verlichting, verkeerreguleringsystemen en wegmarkeringen.

Verder is de ontwikkeling van zonnecellen op basis van amorf silicium nu zover gevorderd dat toepassing interessant is. Hiermee zijn flexibele, lichte en transparante PV cellen mogelijk die bij gebruik in overkappingen grote voordelen hebben.

### *Warmtecollectoren in asfalt*

De techniek is niet meer als 'innovatief' te beschouwen (daar deze al vrij lang bestaat). Op korte termijn zijn geen opvallende technische ontwikkelingen te verwachten. Gebruik van de (langs de snelweg verkregen) energie voor verwarming woongebieden blijkt in de praktijk niet succesvol om verschillende redenen. Toepassing met specifieke doelstellingen als verlenging levensduur asfalt en vorstvrij houden in de winter lijkt haalbaar en is nog steeds zinvol. Dit wordt met name gemotiveerd vanuit milieuoverwegingen (minder wegwerkzaamheden leidt tot minder files, verkeersemisies en brandstofverbruik; minder gebruik van zout) en verkeersveiligheid.

### *Biomassa in de berm*

In gesprekken met diverse betrokkenen (wetenschappers, SenterNovem) alsmede recente studies wordt 'energieteelt langs de (snel-)weg' als innovatief en zinnig bestempeld. Het is innovatief in de zin dat het nog niet gebeurt (langs snelwegen). Tevens maakt het werkgebied een sterke ontwikkeling door vanwege de toenemende vraag naar duurzame energie. Op dit moment zou bij en meestook in elektriciteitscentrales het meest kosteneffectief zijn. Een aansprekend perspectief is de omzetting van ("zelf geteeld") bermgras (of eventueel sneller groeiende soorten als olifantsgras) naar een biobrandstof met productiesite annex pompstation direct langs de snelweg.

De haalbaarheid hiervan moet eerst onderzocht worden. Belemmeringen zijn mogelijk het oogsten en de aantrekkingskracht op dieren.

#### *Windturbines*

De eerder uitgevoerde vergelijking tussen de verschillende energiewintechnieken liet zien dat grote windturbines geplaatst langs de snelweg de meest kosteneffectieve wijze van duurzame energieopwekking is. De techniek zelf is niet (meer) als innovatief te bestempelen daar op vele plaatsen in het land dergelijke turbines geïnstalleerd zijn.

De afgelopen jaren hebben kleine turbines een sterke ontwikkeling doorgemaakt. Er zijn tenminste 33 verschillende systemen in Europa op de markt waarvan diverse nieuw. De producenten geven aan dat er sprake zou zijn van hogere opbrengsten, een grotere stijfheid en (bij serieproductie) meer acceptabele prijzen. Voor zover valt na te gaan lijkt dit inderdaad het geval. Dit biedt perspectief voor een herhaling van het eerder uitgevoerde pilotexperiment langs de A18. Ondersteuning in de selectie van de meest geschikte turbines door een onafhankelijke ter zake kundige partij verdient hierbij aanbeveling.

Het gebruik van windenergie veroorzaakt door rijdende voertuigen is nog steeds onderwerp van discussie. Op zich is toepassing zeer innovatief (met een hoge nieuws waarde). Er zijn vele ontwerpen en octrooien maar opvallend is dat er geen resultaten van metingen gemeld worden. De opbrengst is naar onze verwachting niet zo groot. Kanttekening is dat door de windenergie af te 'vangen' de snelheid van de lucht boven de weg afneemt en de luchtweerstand toeneemt. Hoe dit netto uitvalt is onduidelijk. Het lijkt daarom zinvol om eerst een meetexperiment uit te voeren om antwoorden te vinden voor daadwerkelijke plaatsing van molens. Een proef met simpele windmeters is tamelijk eenvoudig te realiseren.

#### *Piëzo-elektriciteit en Peltier elementen in het asfalt*

Als zinvolle toepassing kan piëzo-elektriciteit gebruikt worden op locaties waar verlichting slechts tijdelijk nodig is. Voor energieproductie is dit systeem niet geschikt.

Het gebruik van Peltier elementen in asfalt is niet rendabel (zoals bleek tijdens het in 2005 uitgevoerde pilotexperiment). Betrokkenen geven aan dat het aanbrengen in het asfalt te arbeidsintensief is en de energieopbrengst van de elementen te gering. Op dit moment vindt er op dit terrein geen (fundamenteel) onderzoek in Nederland plaats met consequenties voor een mogelijke (nieuwe) toepassing langs de snelweg.

#### *Integraal concept*

In hoofdstuk 7 wordt een voorbeeld van een 'integraal concept' uitgewerkt. Het betreft het combineren van diverse technieken waardoor een groter potentieel voor winning ontstaat en tevens een verbeterde continuïteit in de energieopbrengst. Door de snelweg te overkappen kunnen windmolens gecombineerd worden met lichte zonnepanelen, biomassateelt en afvangst van uitlaatgassen en fijn stof. Door gebruik te maken van de inmiddels veel lichtere zonnecellen hoeven de overkappingconstructies minder zwaar te worden uitgevoerd. Deze transparante cellen laten tevens voldoende licht door voor het behouden van een goed zicht. Overkappingen kunnen ook bijdragen aan de verkeersveiligheid: er is minder onderhoud noodzakelijk, een beter zicht tijdens neerslag, en er kunnen geen dieren op de rijbaan komen. Een integrale benadering voor energiewinning heeft een hoge innovatieve waarde.



# 1. Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Autowegen (en spoorlijnen) nemen in Nederland ongeveer drie procent van de ruimte buiten de bebouwde kom in beslag. Slechts een deel van deze ruimte wordt daadwerkelijk door het verkeer gebruikt. Het overige deel betreft een indirect ruimtebeslag, de zones langs een weg (bermen en taluds) die vanwege (veiligheids-)voorschriften en (hoge) verkeersemissies onbenut moeten blijven. In theorie kunnen (delen van) het directe en indirecte ruimtebeslag voor een of andere vorm van duurzame energieopwekking benut worden.

Op verzoek van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat (contactpersoon: dhr. Aad de Winter) is een inventarisatie gemaakt van informatie en kennis aangaande mogelijke duurzame energiewinning rondom de weginfrastructuur. Dit geschiedt binnen het kader van het Thema 'Schone Mobiliteit' binnen het Programma 'Wegen naar de Toekomst (WnT)'. Het onderhavige rapport is een bewerking van een rapportage naar de mogelijkheden van schone energiewinning langs een snelweg uit 2000, genaamd 'Het Energieke Wegdek' [1], en onafhankelijk hiervan leesbaar. Deze studie is tevens bedoeld om vast te stellen of er zich sindsdien nieuwe ontwikkelingen hebben voorgedaan.

## 1.2 Doelstelling en afbakening

Het doel van deze studie is 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. Het overzicht werd verkregen door octrooionderzoek, databaseonderzoek en gerichte vragen aan onderzoeksinstituten en vakgroepen die werkzaam zijn op dit terrein. Ook worden suggesties gedaan voor vervolgwerk.

Er zijn vier criteria geformuleerd waaraan technieken zijn getoetst:

I. *Innovatief*

De energiewintechniek 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. *Betaalbaar*

Het dient aannemelijk te zijn dat tegen (economisch) aanvaardbare kosten de energie gewonnen kan worden, nu of in de toekomst.

III. *Duurzaam*

De winmethode heeft betrekking op een in principe onuitputtelijke energiebron en de is niet (of nauwelijks) milieubelastend.

IV. *Veilig*

De 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 energiewintechnieken komen achtereenvolgens aan de orde:

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

In het afsluitende hoofdstuk worden de technieken beoordeeld aan de hand van bovengenoemde criteria. In berekeningen wordt gebruik gemaakt van het volgende profiel van een 'referentiesnelweg'.

Tabel 1.1 *Specificaties referentiesnelweg*

Lengte	1	km
Aantal rijbanen	2 x 2	
Breedte rijbaan	3	m
Oppervlakte asfalt	1.8	ha.
Breedte berm	5	m
Oppervlakte berm	1	ha.
Vervoersintensiteit	75.000	voertuigen/dag
Personenvoertuigen	75	%
Vrachtvoertuigen	25	%

## 2. Foto-voltaïsche systemen

### 2.1 Inleiding

Het foto-voltaïsche systeem ("zonnecellen") is een perspectiefrijke techniek voor het opwekken van duurzame energie. Belemmeringen zijn vooral het vinden van geschikte locaties (zeker rondom de snelweg) en de kosten. Deze problemen bestaan nog steeds. Sinds 2000 is de kostprijs in eerste instantie gestabiliseerd door een tijdelijk tekort aan productiecapaciteit voor hoogzuiver silicium (basismateriaal voor PV-systemen). Inmiddels lijken de prijzen weer te dalen.

Tot oktober 2003 gold er in Nederland een zeer gunstige EPR-subsidie. Dankzij deze subsidie zijn behoorlijk wat zonnepanelen op daken geplaatst. Deze subsidie is echter afgeschaft en de verkoop aan particulieren is zeer sterk afgenomen. De aanschafprijs is te hoog geworden en daarmee de terugverdientijd te lang, langer dan de technische levensduur van 30 jaar van een PV paneel<sup>1</sup>. Op de lange termijn wordt wel een daling voorspeld. De verwachte prijs van PV-systemen in 2015 is ongeveer 2.5 €/Wp (ca. 50% van de huidige prijs); dit komt neer op 0.25 €/kWh [2].

De toepassingen van de PV-techniek zijn te onderscheiden in autonome en netgekoppelde systemen. Autonome systemen leveren stroom aan 'stand-alone' apparatuur op locaties waar netvoorziening niet voorhanden is of aankoppeling aan het net te duur wordt geacht. Illustratief (en recent) voorbeeld van toepassing langs de snelweg zijn de waarschuwborden waar kleine windmolens zijn gecombineerd met 4 panelen. Andere (nieuwe) voorbeelden zijn hieronder beschreven. Bij netgekoppelde systemen wordt de opgewekte energie toegevoerd aan het al bestaande elektriciteitsnet. Voorbeeld is het aanbrengen van PV-panelen in geluidsschermen.

### 2.2 Inventarisatie

#### 2.2.1 Autonome PV-systemen

In de literatuur is een aantal voorbeelden te vinden van een autonoom PV-systeem. In deze toepassingen is het kostenaspect minder van belang: de noodzaak van energievoorziening weegt op tegen een hoge kostprijs. Een algemene beschouwing over 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 het 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 auto-weg is te vinden in [9].
- *Energievoorziening wegonderhoud* (gebouwen, apparatuur) [10,11].

---

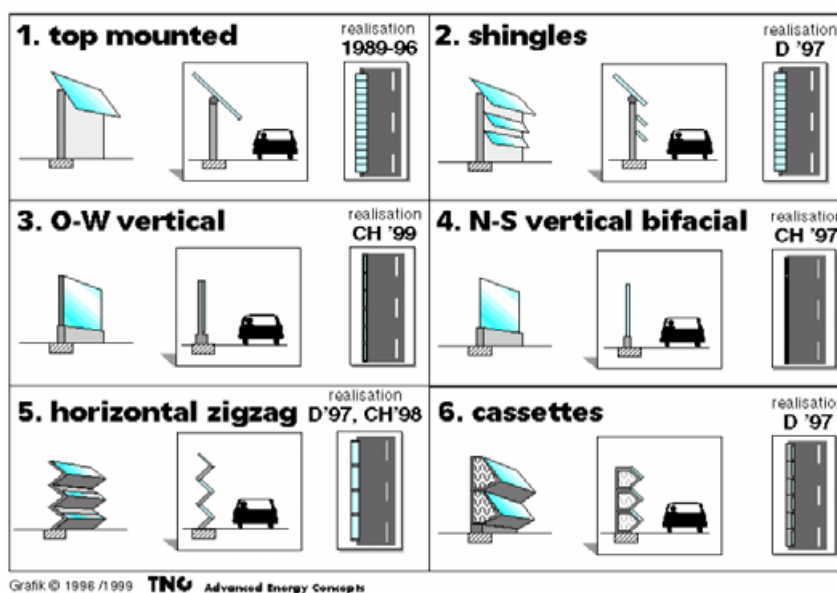
<sup>1</sup> Het financieringsklimaat is niet gunstig in vergelijking met de omliggende landen. In Duitsland, met een vergelijkbare intensiteit zonlicht worden veel meer PV-panelen geplaatst. Redenen hiervoor is de kostendekkende terugleververgoeding (20 jaar gegarandeerd).

- 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* [12].
- *Mobiel verwarmingssysteem voor wegwerkers* [13].

Autonome systemen zijn vrijwel altijd systemen met relatief gering vermogen. Bij systemen met een groter vermogen zal al snel een koppeling gelegd worden met het (fijnmazige) Nederlandse elektriciteitsnet. De inzet van autonome systemen kan echter wel degelijk zinvol zijn. Kandidaten zijn alle configuraties waarbij nu een aggregaat wordt ingezet, evenals applicaties waarvoor 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 [14] 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 (Universiteit van Utrecht). 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.



Figuur 2.1 *PV-geluidsschermen: Ontwerpen and realisatie-data* [15]

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 evenals de hoeveelheid inkomende zonnestraling en het effect van eventueel aanwezige schaduw ter plaatse. Er zijn diverse configuraties te onderscheiden [14,16]:

1. 'top mounted', plaatsing onder een hoek op de bovenkant van het scherm,
2. 'shingles', plaatsing onder een hoek op diverse hoogtes langs het scherm,
3. 'O-W vertical', aangebracht op het scherm langs een oost-west lopende snelweg (scherm gericht naar het zuiden), en

4. ‘N-S vertical bifacial’, dubbelzijdig werkende zonnepanelen (zodat het zonlicht van beide kanten de cellen kan bereiken) rechtop geplaatst langs een snel weg die noord-zuid loopt.

De energieopbrengst 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 [14,16]; voor Nederland is deze toepassing een noviteit.

In de studie van Goetzberger [14] 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 schaduw effect.
- 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 [14,16])*

Potentieel	Weglengthe [km <sup>a</sup> ]	Opgesteld gen [MW <sub>p</sub> ]	vermo-Verwachte productie [GWh/jaar]	Verwachte productie [GJ/(jaar km)]	op-
Theoretisch	2.701	3.233	2.590	3.452	
Technisch	476	115	92	726	
Korte termijn	210	51	41	703	

<sup>a</sup>km snelweg

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

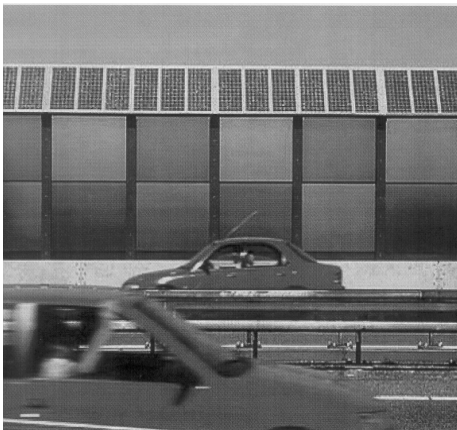
Enkele conclusies naar aanleiding van deze tabel:

- Er bestaat in Nederland een hoog theoretisch potentieel. Dit wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van een relatief uitgebreid snelwegennet (met name in de Randstad).
- Het is aan te bevelen dat bij de bouw van geluidsschermen al zoveel mogelijk rekening te houden met een combinatie met energiewinning via 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 geluidsschermconstructie [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 M€; het PV-systeem alleen kostte 1,9 M€. De oriëntatie van het scherm is zuidzuidwest. De hellingshoek t.o.v. de horizontaal is 50°; dit is tamelijk rechtop en gedaan om het vuil worden te voorkomen. Aan onderhoud en schoonmaken is niets gedaan, geschat wordt dat dit 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.



Figuur 2.2 *Zonnecellen geïntegreerd in geluidsschermen langs de A9*

- In opdracht van Rijkswaterstaat (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 geluidsbeperving. In totaal zijn 1.116 zonnepanelen gebruikt. De oriëntatie van de panelen is Westzuidwest. 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 M€; de productie van het PV-systeem kostte 544 k€ [17]. De performance van dit systeem is 2 jaar gemonitord en gerapporteerd in 2002 [18]. Daaruit blijkt dat per jaar 25,1 MWh aan het openbare net is geleverd waarbij een systeemrendement<sup>2</sup> van 8,2% is gehaald en het systeem 92% van de tijd operationeel is geweest.

---

<sup>2</sup> Het systeemrendement is het deel van de benutbare zonneinstraling dat door het systeem is geleverd (aan het net); hierbij dient rekening gehouden te worden met het eigen verbruik (hier ca. 1,5 MWh per jaar).



Figuur 2.3 Grootste project van geluidsschermen (499 kW) ligt langs de A92 bij Freising in Duitsland

Het aanbrengen van PV-systemen op geluidsschermen vindt in diverse Europese landen plaats; interessante projecten zijn te vinden in Zwitserland [19,20], Oostenrijk [21] en Duitsland [22]. Hieronder wordt een overzicht gegeven van projecten waar PV geluidsschermen worden toegepast die zijn gebouwd in Europa.

Tabel 2.2 Overzicht gegevens van projecten waar PV in geluidsschermen worden toegepast

Vermogen	Plaats	Toepassing	Bouwjaar	Opgesteld vermogen
499 kW	Duitsland , Freising	A92	2003	475 MWh
216 kW	Nederland, Amstelveen	A9	1998	
180 kW	Duitsland, Vaterstetten	400m langs spoorbaan	2004	
101 kW	Oostenrijk, Gleisdorf	A2	2001	80 MWh
100 kW	Duitsland, Sausenheim	A6	1999	
100 kW	Zwitserland, Domat/Ems	A13	1989	
100 kW	Zwitserland, Giebenaach	A2	1995	
80 kW	Zwitserland, Safenwil	A1	2001	
63 kW	Frankrijk, Foquiere	A21	1999	
60 kW	Duitsland, Saarbrücken	A620	1995	50 MWh
55 kW	Nederland, Utrecht	A27	1995	
53 kW	Duitsland, Emden	A31	2003	32 MWh
40 kW	Oostenrijk, Seewalchen	A1	1992	
30 kW	Duitsland, Ammersee	A96	1997	25 MWh
28 kW	Duitsland, Grossbettlingen	PV op geluidsscherm	2006	
24 kW	Australië, Melbourne	Weg langs vliegveld	2007	
10 kW	Zwitsersland, Zurich	A1, eerste bifacial	1997	

## 2.4 Opbrengst en kosten

Voor een scherm van 1 km lengte, een hoogte van 2 m en een gebruikelijk piekvermogen van het PV-paneel van  $95 \text{ W}_p/\text{m}^2$  is het opgestelde vermogen  $190 \text{ kW}_p$ . De opbrengst per jaar, indien gericht op het zuiden, is gesteld op  $800 \text{ Wh}/\text{W}_p$  [1,23], ofwel  $0,27 \text{ GJ}/\text{m}^2\text{jaar}$  ( $76 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{jaar}$ ). De jaarlijkse opbrengst per kilometer snelweg is dan  $540 \text{ GJ}$ <sup>3</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  $50^\circ$  wordt geplaatst ontvangt nog steeds ca. 90% van de maximaal mogelijke instraling [23]. M.b.t. tot dubbelwerkende zonnepanelen wordt in [23] een opbrengst mogelijk geacht die op kan lopen tot 115%.

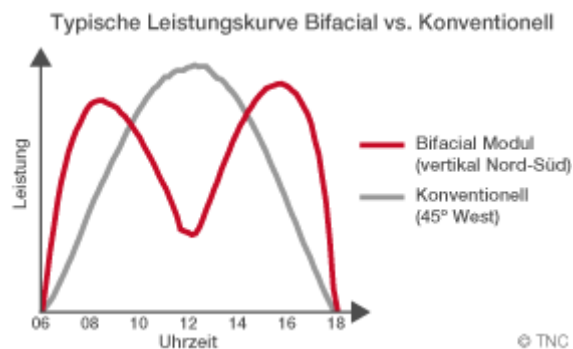
Anno 2000 bedragen de kosten van een PV-systeem van 1 km lengte, een hoogte van 2 m, een piekvermogen van  $95 \text{ W}_p/\text{m}^2$ , en productiekosten per  $\text{W}_p$  van  $4,5\text{-}7 \text{ €/W}_p$  tussen de  $0,9\text{-}1,3 \text{ M€}^4$ ; dit is in dezelfde orde van grootte als de vermelde bedragen 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  $540 \text{ GJ}$  en een levensduur van 30 jaar bedragen de kosten per  $\text{GJ}$   $50\text{-}80 \text{ €}^5$ ; 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.

## 2.5 Recente ontwikkelingen

### 2.5.1 Tweezijdige zonnepanelen

Een interessante optie is de toepassing van de ‘bifacial’ zonnecel. Deze cellen zijn tweezijdig lichtgevoelig die verticaal in een noord-zuid richting kunnen worden toegepast. Met deze module, die aan beide zijde een zelfde efficiency hebben, kan de energieopbrengst van zowel de oost als de west kant eenvoudig worden benut. In Zwitserland is dit type cel benut in een project in de middenberm langs de snelweg. (Figuur 2.1; Foto TNC consulting)



Figuur 2.4 Toepassing van dubbelzijdige zonnecellen in middenberm

Daarmee kan deze tweezijdige module nagenoeg dezelfde opbrengst halen als kan worden gerealiseerd met de standaard module in de best mogelijke zuid oriëntatie (zie Figuur 2.5).

<sup>3</sup> Opbrengst in 1 jaar =  $1000[\text{m}] \times 2[\text{m}] \times 800 \text{ Wh}/\text{W}_p = 2000[\text{m}^2] \times 0,27[\text{GJ}/\text{m}^2] = 540 \text{ GJ}$ .

<sup>4</sup> Kosten scherm langs snelweg bij  $5 \text{ €/W}_p = 1000[\text{m}] \times 2[\text{m}] \times 95[\text{W}_p/\text{m}^2] \times 5[\text{€/W}_p] = 950 \text{ k€}$ .

<sup>5</sup> Kosten per  $\text{GJ}$  (bij  $5 \text{ €/W}_p$ ) =  $950 \text{ [k€]} : (30[\text{jaar}] \times 540[\text{GJ}/\text{jaar}]) \approx 60 \text{ €}$ .





Figuur 2.5 Enkelzijdige zonnecellen in optimale 45° configuratie aan de A13 te Zwitserland

De tweezijdige modules zijn ook zeer geschikt als een geluidsbarrière.

## 2.5.2 Ontwikkeling LED technologie

De ontwikkelingen in de (goedkope) LED technologie scheppen nieuwe mogelijkheden voor de toepassing laag vermogen PV-cellen. De lichtopbrengsten van LED's zijn nu dusdanig dat langdurige voeding met relatief eenvoudige PV-systemen goed mogelijk is.

Er zijn twee toepassingen bekend:

- wegbewijzering systemen voor variabele strookbreedte. Deze systemen zijn commercieel beschikbaar [24].
- In tunnels voor verlichting met goedkope LED's en voeding met PV-panelen boven op de tunnel.

## 2.5.3 PV-tegel

Om de zichtbaarheid van verkeersgeleiders te verbeteren worden zogenaamde kattenogen gebruikt. Traditioneel zijn dit kleine glazen halve bollen die het licht van de autokoplampen sterk weerkaatsen. De verkeersgeleiders zijn zo in het donker goed te herkennen.

Met het beschikbaar komen van kleine PV-tegels die zelf licht kunnen produceren kan de zichtbaarheid van verkeersgeleiders worden verbeterd en ook ingezet worden op afgelegen plaatsten voor wegmarkeringen en verder in verkeerregulering-systemen.



Figuur 2.6 Links de traditionele 'kattenogen' die alleen licht reflecteren; rechts de moderne LED indicator op PV (Smartstud, [24])

### Toepassingen PV-tegels op zonnenergie

SmartSolar is een zelf lichtgevende wegmarkering/'tegel' die aangaat als het donker wordt. Elke markering of tegel bestaat uit een zonnecel en vier hoge intensiteit LED's. Deze markering kan worden gebruikt in zowel stedelijk als landelijk gebied voor de verlichting van toegangswegen, of afscheidingen van bedrijfterreinen. Ze kunnen kosteneffectief worden bevestigd op asphalt, beton en metalen en houten oppervlakken.



### 2.5.4 Flexibele PV-cellen

Door toepassing van 6% efficiënt amorf silicium i.p.v. kristallijn silicium cellen zijn dunne flexibele zonnepanelen te produceren die ook voor langs de snelweg grote voordelen hebben t.o.v. de conventionele panelen. Naast snellere en goedkopere productie zijn hiermee bijvoorbeeld ronde overkappingen te realiseren. De belangrijkste beperking is de relatief lage efficiëntie (t.o.v. de kristallijne versie).



Figuur 2.7 *Toepassing flexibele PV-panelen*

Deze cellen worden commercieel geproduceerd en bv. toegepast op bedrijfspanden. Een nieuwe ontwikkeling is de semi-transparante cel die voldoende licht doorlaat, waardoor bv. geen extra verlichting onder een overkapping nodig is.

## 3. Warmtecollectoren

### 3.1 Inleiding

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, gewoonlijk via een buizensysteem. Het water voert de zonnewarmte af en het wegdek koelt af. De afgevoerde warmte wordt via een warmtewisselaar afgegeven aan een bodemopslagsysteem om later benut te worden. Rond 2000 was de belangstelling groot en werden verschillende technieken ontwikkeld. Toch lijkt het aantal uitgevoerde projecten in relatie tot snelwegen gering.

### 3.2 Inventarisatie

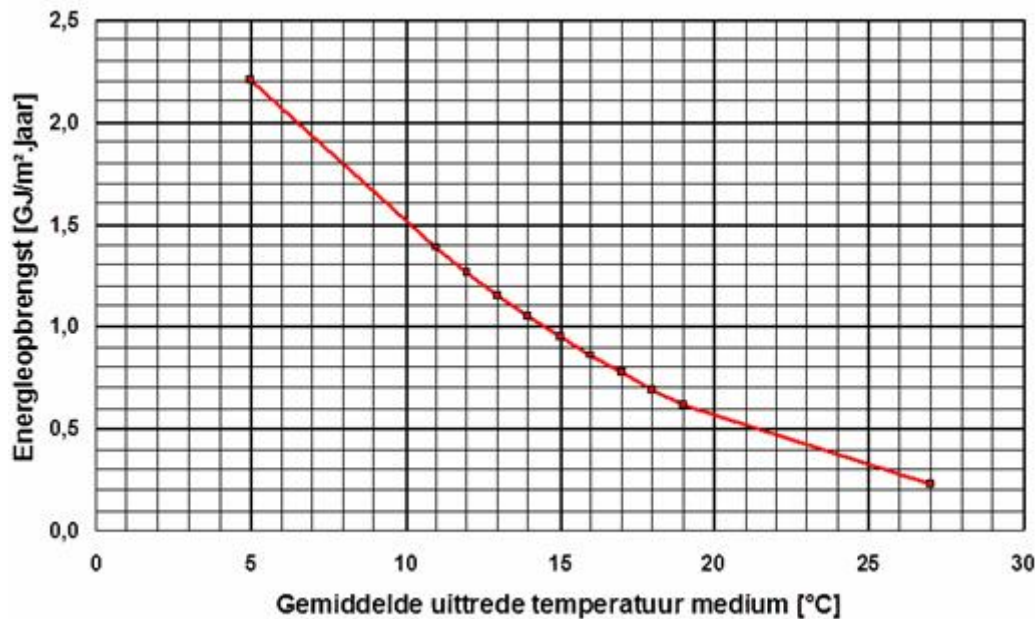
De afgelopen jaren zijn wegcollectoren ontwikkeld. Drie verschillende typen worden onderscheiden [<http://www.senternovem.nl/>]:

1. *BIB-collector*: Buizen In Beton. Het wegdek wordt voorzien van een tussenlaag van staalvezelbeton waarin een gesloten leidingensysteem wordt geïntegreerd. Het staalvezelbeton ligt tussen twee asfaltlagen op tenminste 13 cm diepte onder de top laag. Door de leidingen stroomt water dat de warmte uit het wegdek opneemt en afvoert.
2. *BIA-collector*: Buizen In Asfalt. Het leidingensysteem wordt direct onder de top laag in het asfalt geplaatst. De buizen liggen dus minder diep, maar voor het overige is de werking van dit systeem gelijk aan dat van de bib-collector.
3. *Zowab-collector*: watergeleiding in zeer open watervoerend asfalt (ook wel Zonneweg concept genoemd). Bij dit systeem worden geen buizen in de weg geplaatst. Tussen twee lagen dicht asfalt beton (dab) wordt een laag zeer open watervoerend asfalt beton ingesloten. Langs de weg lopen leidingen die grondwater door de open structuur van het zowab voeren. Aan de ene kant van de weg wordt koud water ingebracht, en aan de andere kant wordt het verwarmde grondwater opgevangen en afgevoerd. Een voordeel is dat een watervoerende asfaltcollector in het wegdek uit één materiaal is opgebouwd en daardoor gemakkelijk te recyclen is. Dit laatste systeem is de experimentele fase nog niet ontgroeid en is alleen uitgeprobeerd in een proefvak.

De warmteopbrengst van een asfaltcollector is afhankelijk van de volgende factoren:

- de in- en uittredetemperatuur van het koelmedium
- de hoeveelheid water die door de collector stroomt (debiet)
- de diepte waarop de warmtewisselaar wordt geplaatst
- het type collector
- het warmteopslagsysteem

Bij de benutting van warmte uit asfalt is de uittredetemperatuur van belang want deze bepaalt de bruikbare warmte. De uittredetemperatuur van de collector kan worden beïnvloed door het debiet te verhogen of te verlagen. Naarmate er meer water door de collector stroomt, zal het water korter in de collector aanwezig zijn en dus minder opwarmen. Een hoger debiet leidt dus tot een lagere uittredetemperatuur en daarmee tot een hogere energieopbrengst. Ook de diepte waarop de collector in het wegdek wordt geplaatst is van invloed op de hoeveelheid warmte die aan het asfalt kan worden onttrokken. Onderzoeken van TU Delft en Rijkswaterstaat laten zien dat de energieopbrengst met ca. 5% afneemt als de warmtewisselaar dieper ligt. In Figuur 3.1 is een voorbeeld gegeven van de hoeveelheid energie één m<sup>2</sup> asfalt kan opbrengen als functie van de uittredetemperatuur. Door toepassing van een zowab-collector zou de opbrengst kunnen verdubbelen.



Figuur 3.1 *Energieopbrengst asfaltcollector (© WinnerWay); de opbrengst is bepaald bij een warmtegeleidingcoëfficiënt van 1,2 W/mK en een warmtecapaciteit van 800 J/kgK [25].*

Warmtecollectoren 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 [26].

De mogelijkheden van warmtecollectoren in asfalt zijn in beginsel drieledig:

1. In de zomer kan de temperatuur in het asfalt oplopen tot 50 à 60 °C. Als deze warmte met een redelijk rendement kan worden onttrokken en opgeslagen, is dit in de winter een interessante energiebron voor verwarming in de woning- en utiliteitsbouw vormen.
2. De verzamelde warmte kan ook aangewend worden voor het verwarmen van het wegdek in de winter en zo een aandeel leveren in de gladheidbestrijding. Een dergelijke toepassing 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 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 c.q. slijtage optreedt [26]. De levensduur van verkeerswerken neemt toe (minder uitzet- en krimp schade), waardoor tevens minder onderhoud nodig is.

### 3.3 Opbrengst en kosten

Zoals beschreven hebben de gekozen intrede- en uittredetemperatuur en het debiet een grote invloed op het rendement. 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 uittredetemperatuur van de koelvloeistof is, des te groter de optredende verliezen tijdens het transport naar de aquifer. De keuze van 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 in ieder geval temperatuursvereffening (daling) optreden. Bij temperaturen boven ca. 30 °C wordt de dichtheid van de opgeslagen warme watermassa zo laag dat er convectionstromingen in de aquifer gaan optreden, waardoor de warmte-uitwisseling met de omgeving toeneemt [27]. De meeste ontwikkelaars van systemen streven daarom naar een uittredetemperatuur tussen 20 en 25°C [26].

De Sectie Verkeerskunde van de TU-Delft heeft op basis van berekeningen en simulaties een schatting gemaakt van de energieopbrengst van het DWV 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 uittredende water temperatuur van 20°C. Deze gemodelleerde opbrengstwaarde wordt ondersteund door voorlopige experimenten aan een proefvak [28]. 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 berekende opbrengst van verschillende asfaltcollectoren [26]. 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.). Voor zover valt na te gaan is de kostprijs de afgelopen jaren ongeveer gelijk gebleven.

De gemiddelde jaaropbrengst berekend over de in de tabel genoemde 11 studies is (afgerond) 0,8 GJ/m<sup>2</sup>. Andere (meer commerciële) bronnen noemen netto opbrengsten die hier niet van afwijken: 0,8 GJ/m<sup>2</sup> [29], 0,5-0,7 GJ/m<sup>2</sup> [30] en 0,6 GJ/m<sup>2</sup> [31]. Arcadis [29] noemt een energieopbrengst een energieopbrengst die varieert tussen de 0,5 en 1,0 GJ per m<sup>2</sup> verharding op jaarbasis<sup>6</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. Het *totale* energieopwekkingpotentieel voor warmtewinning uit asfalt in Nederland bedraagt maximaal 0,7 PJ, een bijdrage van minder dan 1% op de totale duurzame energiedoelstelling voor 2010.

De aanleg van een buizensysteem kost 25,- à 50,- €/m<sup>2</sup> [32], exclusief het besturingsysteem 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 450 k€ en 900 k€<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> Voor een gemiddelde eengezinswoning is op jaarbasis ca. 30 GJ nodig voor verwarming. Met 30 tot 60 m<sup>2</sup> asfaltcollector wordt dus voldoende energie gewonnen om een jaar lang de woning te verwarmen.

<sup>7</sup> Het totale oppervlakte aan asfalt in Nederland is meer dan 400 km<sup>2</sup>. Jaarlijks komt daar zo'n 40 km<sup>2</sup> bij.

Tabel 3.1 *Voorbeelden van opbrengst wegdekcollectoren*

Bron	Status	Energieopbrengst in MJ/m <sup>2</sup> per jaar
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 Asphalt?	Berekening (numeriek) op basis van experimentele gegevens.	612 <sup>1)</sup>
De Asphaltcollector	Berekening (numeriek)	640 <sup>2)</sup>
De Asphaltcollector	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>

<sup>1)</sup> Geen rekening gehouden met bewolking en neerslag.

<sup>2)</sup> Volgens de auteurs van het rapport worden de prestaties van het numeriek gesimuleerde systeem met minstens een factor 2 overschat.

<sup>3)</sup> 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.

### 3.4 Recente ontwikkelingen

Er zijn enkele consortia van bedrijven die elk hun eigen type asphaltcollector hebben ontwikkeld en op de markt hebben gebracht. Hieronder volgt een opsomming.

- WinnerWay-systeem (Buizen in Beton) op basis van 25 mm zogenaamde 'crosslinked' polyethyleenbuizen. Dit product is ontwikkeld vanuit een samenwerking tussen Van den Boom Wegbouwkundig Bureau BV, ARCADIS Bouw/Infra BV, IF Technology BV en Velta BV. Inmiddels wordt dit systeem ook aangeboden door KWS.

Voorbeeldproject:

Rijkswaterstaat heeft een proefproject met dit systeem uitgevoerd bij de N57 over de Haringvlietsluizen. Dit experiment is mede uitgevoerd als mogelijke oplossing voor de noodzaak van frequent onderhoud aan de voegen van de betonnen brugconstructie. Besloten werd om meerdere deskundige bedrijven gezamenlijk naar een oplossing te laten zoeken. Uit dit samenwerkingsverband is uiteindelijk de oplossing met isolatie en het leidingensysteem ontstaan. De test bleek te voldoen aan de verwachtingen, sterker nog de opbrengst was hoger dan vooraf berekend. Verder bleek dat van de warmte die in de zomer wordt opgeslagen, slechts 20% nodig is om in de winter het asfalt ijsvrij te houden. De extra investeringen nodig voor de aanleg van dit systeem verdienen zichzelf terug in 5 à 10 jaar en het wegdek heeft een langere levensduur van ca. 15 jaar.

De Haringvlietspui sluizen hebben een wegoppervlak van 18.000 m<sup>2</sup>. Met de gewonnen energie uit dit wegoppervlak is berekend dat tussen de 500 en de 700 woningen en 5000 m<sup>2</sup> kantoorruimte van warmte worden voorzien. Dit zou een energieopbrengst ter waarde van 200.000 € per jaar en een halvering van de hoeveelheid CO<sub>2</sub>-uitstoot per huis ten opzichte van huizen die van energie worden voorzien door fossiele brandstoffen. Met de resterende warmte is overigens niets gedaan. Onlangs is de constructie afgebroken vanwege het aanbrengen van een nieuwe laag asfalt.

Naar aanleiding van deze resultaten is besloten haalbaarheidsstudies uit te voeren voor toepassing van dit systeem in grootschalige projecten zoals: A4 (Delft-Schiedam), A5 (Haarlemmermeer), A10 (Ring Amsterdam), N11 (Alphen-Bodegraven), N15 (Callandverbinding), A32 (Leeuwarden), A59 (bij Rosmalen). Opvallend is dat het in geen van de gevallen tot een daadwerkelijke uitvoering is gekomen.



Figuur 3.2 *Haringvlietsluis*

- Road Energy Systems (Buizen in Asphalt) op basis van polyethyleen buizen in het wegdek. Ontwikkelaar is Ooms Avenhorn Holding bv, in samenwerking met WTH Vloerverwarming BV. De toepassingen hebben betrekking op woongebieden, bedrijven terreinen, kantoren, en een vliegveld. Opvallend is dus dat er geen snelwegen worden gebruikt. Voorbeeld: Aanleg asfaltcollector op het Vondelingenviaduct. In opdracht van het Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam startte Ooms Nederland Holding in 2004 met de aanleg van ca. 10.000 m<sup>2</sup> op het Vondelingenviaduct in de Vondelingenweg (langs de rijksweg A15) Rotterdam. De primaire doelstelling van de aanleg is om door middel van het verwarmen en koelen van de asfaltlaag op het betonnen viaduct de verkeersveiligheid met name in de winter te bevorderen en de overlast voor de weggebruikers door wegwerkzaamheden te minimaliseren. Het systeem beperkt het krimpen en uitzetten van de wegsegmenten doordat het de temperatuurwisselingen in het wegdek aanzienlijk verkleint. Hierdoor ontstaat een duurzamere asfaltconstructie. Daarnaast reduceert dit systeem spoorvorming door het koelen in de zomer en vertraagt het de scheurvorming en rafeling door het verwarmen van het wegdek in de winter. Deze verwarming zorgt er tevens voor dat het viaduct in de winter sneeuw- en ijsvrij blijft. Het in de asfaltcollector opgewarmde water stroomt in de zomer door de leidingen naar de ‘warme bron’ in een aquifer (watervoerend zandpakket in de bodem) waar de uit het viaduct onttrokken energie wordt opgeslagen. In de winter brengt een pomp het water uit de warme bron naar boven om het asfalt te verwarmen. Na gebruik komt het koude water in de ‘koude bron’ terecht. Hiervandaan stroomt het water in de zomer weer naar het wegdek om te koelen.

Uit gesprekken met diverse producenten wordt duidelijk dat de technieken zoals hier beschreven op dit moment niet verder ontwikkeld worden. Men stelt dat een en ander redelijk uitontwikkeld is maar vermoedelijk speelt ook mee dat vanwege de grote investeringen in het verleden men op dit moment niet meer geld over heeft voor verder onderzoek.

Het toepassen van warmtewinning uit asfalt en gebruik voor verwarming was voorheen met name gekoppeld aan de winning vanuit en toepassing nabij (snel-)wegen. Ondanks de vele haalbaarheidsstudies lijkt dit idee niet erg succesvol te zijn geweest, het aantal projecten rondom snelwegen is beperkt.

De projecten in relatie tot verwarming van gebouwen die met deze techniek zijn uitgevoerd, vinden vooral plaats in combinatie met nieuwbouwprojecten. Voor bestaande woningen is deze optie minder interessant vanwege de noodzakelijke kostbare aanpassingen. Voorbeeld van zo'n project is Heeteren [26]. Dit betreft een nieuwbouwproject van 370 woningen waarvan ruimten en tapwatervoorzieningen verwarmd gaan worden met gebruikmaking van warmte uit asfaltcol-

lectoren. Andere projecten betreffen grote parkeerterreinen in de nabijheid van bedrijventerreinen en kantoren.

Uit gesprekken met betrokkenen wordt een aantal belemmeringen genoemd (deels niet nieuw; zie ook [33]):

- Er bestaan drie (met elkaar concurrerende) technieken. Ondanks samenwerking tussen producenten bemoeilijkt dit de verdere ontwikkeling en toepassing.
- De betrokken projecten blijken lastig te organiseren vanwege het grote aantal betrokkenen waaronder verschillende overheidsinstanties. Deze laatste willen niet de rol van energieleverancier op zich nemen. Als voorbeeld wordt een project bij de Gaasperdammerweg (A9) in Amsterdam genoemd dat technisch en financieel haalbaar bleek maar desondanks niet is uitgevoerd.
- De projecten zijn dermate verschillend dat standaardisatie van de techniek niet goed mogelijk is.
- De opslag en afzet (nuttig gebruik van de gewonnen warmte tegen niet te hoge kosten) van de verkregen warmte is rond snelwegen niet altijd te realiseren. De resterende warmte wordt dan verder niet benut. Het is wel mogelijk de warmte naar 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.
- Verder spelen nog de verkeersveiligheid en risico's voor het milieu een rol.

De conclusie is dat de techniek zich *in relatie tot de snelweg* tot nu toe (nog) niet bewezen heeft. De functie van de warmtecollector in snelwegasfalt is vooral het voorkomen van spoorvorming in de zomer (door koeling) en het vorst- en sneeuwvrij houden in de winter (verwarmen). De restwarmte kan in theorie benut worden voor warmte en koude distributie in de gebouwde omgeving. De gelijktijdigheid van de bouw van nieuwe woningen en kantoren en het plaatsvinden van wegonderhoud dan wel nieuwe wegeaanleg is daarbij bepalend voor het succes. Snelwegen bieden in deze weinig perspectief daar woningbouw nabij snelwegen nauwelijks plaatsvindt op basis van milieueisen (luchtverontreiniging, geluid). Toepassingen binnen een andere (verkeers-)infrastructuur (in relatie tot woningbouw) zijn succesvoller. Het aantal uitgevoerde projecten lijkt echter nog beperkt.



## 4. Biomassa

### 4.1 Inleiding

Biomassa neemt een unieke plaats in tussen de verschillende duurzame energiebronnen. Als enige is het een 'echte' brandstof die als energiegewas of als reststroom kan dienen als (olie/gas/kolenvervangende) grondstof voor allerlei producten. De overheidsdoelstelling van 20% duurzaam opgewekte energie in 2020 waarvan 50% uit biomassa zal naar verwachting leiden tot een forse groei (tot ca. 300 PJ) van het aandeel biomassa. Van de beoogde 300 PJ wordt thans ca. 58 PJ ingezet, grotendeels afkomstig van AVI's (ca 12 PJ) en als meestook in kolengestookte centrales (ca. 27 PJ) [34]. Analyse van het ontwikkelingspotentieel wijst uit dat meestook het meest rendabel is, onder meer omdat gebruik kan worden gemaakt van reeds bestaande installaties.



Figuur 4.1 *Ook langs de snelweg?*

Introductie van biomassa op grote schaal in deze eeuw lijkt in theorie mogelijk. De ontwikkeling van een 'schone' en 'goedkope' omzetting van biomassa in elektriciteit, en in vloeibare en gasvormige energiedragers verkeert echter nog in een experimenteel stadium. Factoren die bepalend zijn voor het welslagen is niet alleen een positieve ontwikkeling van de technologie zelf, maar ook de korte en lange termijn beschikbaarheid van biomassa, de toelaatbaarheid van emissies, toekomstige (mogelijk strengere) richtlijnen ten aanzien van deze emissies, onbekendheid van het publiek met bio-energie, en de concurrentie met andere duurzame energiedragers. Ook wordt in toenemende mate duidelijk wat de consequenties kunnen zijn van noodzakelijkerwijs groter grondbeslag, en de mogelijke sociale, milieu- en voedselconsequenties bij (eenzijdige) teelt in met name ontwikkelingslanden [35].

Succes of mislukking van een biomassaproject is afhankelijk van een veelvoud aan parameters [38]. Doorgaans concentreert men zich bij energiegewassen alleen op de kostprijs die bepaald wordt door kosten van productie (planten, onderhoud, oogsten) en vervoer [39,40], nog los van de kosten voor plaatselijke infrastructuur en verwerkende installaties. 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 pro-

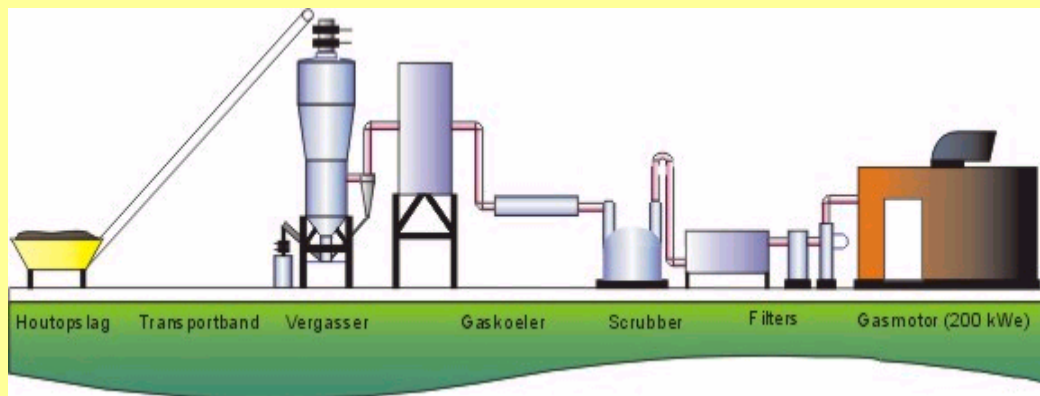
ducten van te maken (bioraffinage). Afhankelijk van het doel moet een conversietechniek worden gekozen. Dat kan een biologisch proces zijn waarbij micro-organismen slib of andere (natte) biomassa omzetten in biogas of bioalcohol (vergisten, fermentatie). Het alternatief is een thermisch proces: verbranding, 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. Voor toelichting omtrent een vergassingsinstallatie zie het kader hieronder.

### Biomassa vergassingsinstallatie

Kleinschalige biomassa vergassingsinstallaties kunnen met een hoog rendement energie opwekken. De hoeveelheid materiaal nodig voor het bedienen 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 wegetraject (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



### Meer energie

De vergassing kan plaats vinden in een vast-bed-vergassingsreactor. Briketten worden vergast bij hoge temperatuur. Het gas voedt een gasmotor, die de generator aandrijft. De briketten worden geperst uit biomassa. Op kleine schaal heeft de opwekking van elektriciteit door verbranding maar een opbrengst van twaalf tot veertien procent; bij vergassing is dat wel 20 - 25 procent. Bovendien kan er nog vijftig procent gebruikt worden voor warmte-toepassingen. Maar bij de vergassing wordt er minder zuurstof ingezet en ontstaat er een energierijk mengsel van o.a. stikstof, koolstofmonoxide, waterstof, koolstofdioxide en een beetje methaan. Met een gasmotor is daar meer energie uit te halen.

### Minder luchtverontreiniging

Bij verbranding ontstaat er uit zwavel zwaveldioxide en uit stikstof stikstofdioxide. Deze stoffen werken verzurend. In de vergassingsreactor ontstaan ammoniak en waterstofsulfide. Deze stoffen zijn gemakkelijk uit het gasmengsel te verwijderen. Bij verbranding moeten de rookgassen gereinigd worden. Dat is duur. Het stof- en teergehalte van het gas blijft laag en waarschijnlijk is het gehalte aan zware metalen in de as laag. In plaats van bermgras kunnen in de toekomst kunnen snelgroeiende gewassen zoals olifantsgras in aanmerking komen. Bij de teelt van de energiegewassen wordt er ongeveer evenveel koolstofdioxide in biomassa vastgelegd als er bij vergassing of verbranding vrijkomt.

Hiervoor werd de mogelijkheid genoemd van de productie van vloeibare en/of gasvormige brandstoffen uit biomassa. Voorbeelden zijn vergassing van biomassa en vervolgens de conversie van het vrijkomende (CO/H<sub>2</sub>) mengsel in Fischer-Tropf diesel, methanol of in waterstof. Toepassing van andere brandstoffen in combinatie met brandstofceltechnieken [42] laat nog op zich wachten. Ook kan via de vergassingsroute 'Groen Aardgas' worden geproduceerd. Een an-

dere 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 in vloeibare brandstoffen als benzine. De vraag naar biodiesel en ook bio-ethanol zal de komende jaren fors stijgen. Europa kent sinds kort bijmengverplichtingen van biobrandstoffen. Dat percentage loopt op van 2 procent dit jaar tot 5,75 procent in 2010 (en 20% in 2020). Lokale kleinschalige initiatieven zijn het gevolg (zie inzet biodiesel).

#### **Biodiesel**

Loonbedrijf Gebroeders Kok in de Knipe en ondernemer Jan Jacobs Zandberg uit Bakkeveen willen biodiesel produceren uit berm- en natuurgras en stro. Eind dit jaar (2005) moet op het terrein van het loonbedrijf een proefopstelling draaien. Het gaat om een uniek procédé. Normaalgesproken wordt biodiesel gemaakt uit pure plantaardige oliën zoals koolzaad en zonnebloemen. Zandberg, voorheen eigenaar van de gelijknamige broederij in Bakkeveen, en de Gebroeders Kok hebben voor het project het bedrijf Ecopower+ opgericht. Dat heeft de technologie gekocht van een Duits bedrijf dat in eigen land ook enkele proefopstellingen heeft opgezet

Als de proef aanslaat, gaat Ecopower het concept „verder uitrollen in Noord-Nederland", verklaart Zandberg. De technologie leent zich volgens hem niet voor grote fabrieken. „Het blijft kleinschalig. Verwacht geen raffinaderijen." Over de omvang van de productie, de werking van het productieproces en het investeringsbedrag, wil Zandberg niets zeggen. „Pas als we een tijdje draaien, zoeken we de publiciteit." De gemeente Heerenveen heeft toegezegd dat het bermgras wil afstaan voor de 'diesel-fabriek'. Het gebruik van plantaardige reststoffen kan op veel sympathie rekenen omdat ze niet ten koste gaan van landbouwgrond of natuurterreinen. Bij biodiesel van koolzaad en zonnebloemen is dat wel het geval met als gevolg dat de prijzen van veel akkerbouwgewassen en voedingsmiddelen het afgelopen jaar flink zijn gestegen.

Op basis van onderzoek van Shell in de tachtiger jaren is het HTU-proces ontwikkeld voor omzetting van biomassa in olie. Behalve houtchips zijn meerdere biomassastromen geschikt zoals groente-, fruit- en tuinafval (GFT)<sup>8</sup>.

## **4.2 Inventarisatie**

Recent literatuuronderzoek laat enkele referenties zien die handelen over energieproductie uit 'snelwegbiomassa':

- Door TNO-MEP is onderzoek gedaan naar de alternatieve verwerkingsmethoden voor bermgras in Nederland. Daarbij is met name gekeken naar de inzet van bermgras als hernieuwbare energiebron welke kan bijdragen aan een duurzame Nederlands energievoorziening [39]
- Ook provincies zijn actief op dit gebied. Zo heeft de provincie Overijssel een project in 2003 uitgevoerd naar het gebruik van bermgras voor energiewinning [40]
- Novem is in een eigen studie [41] tot de volgende conclusies gekomen: Nederland heeft ongeveer 400.000 ton bermgras per jaar. Bermgras is beschikbaar in het voorjaar en in het najaar. Met een stookwaarde van 4 GJ/ton vertegenwoordigt het bermgras 1,6 PJ per jaar aan bio-energie. Nieuwe wetgeving bestempelt bermmaaisel als afval. Het wordt daardoor steeds minder ingezet in landbouw en veeteelt. Daarom zoeken (provinciale) overheden naar goedkope andere oplossingen. Bermgras heeft ongunstige brandstofeigenschappen voor verbranding in een energiecentrale voor biomassa: het stikstofgehalte is hoog (hogere NO<sub>x</sub>), het bevat veel chloor (corrosie gevaar), het as-smeltpunt is laag (kans op slakvorming in de verbrandingsinstallatie), het vochtgehalte is hoog (65%). Bij verwerking van bermgras in een verbrandings-, vergassings- of pyrolyse-installatie verlaagt men eerst het vochtgehalte. Eco-

<sup>8</sup> Biomassa wordt, vermengd met water, verhit tot ongeveer 350 °C bij een druk van ongeveer 160 bar, gedurende zo'n 15 minuten. Hierbij ontstaat een drab die vergelijkbaar is met ruwe aardolie. Na een raffinageproces is hier dieselolie en benzine uit te halen, die wat kwaliteit en eigenschappen betreft vergelijkbaar zijn met dezelfde producten uit aardolie.

logisch bermbeheer staat natuurlijke droging van het gras in de berm niet toe. Het gras wordt geforceerd gedroogd.

- Het gebruik van wegbermgras samen met dierlijke mest en klei in een fermentor [42]. 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 [43], eventueel in combinatie met windturbine [44].
- ECN heeft enkele jaren geleden in samenwerking met DLO een onderzoek uitgevoerd 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, mineralen en Cl. De eiwitfractie is weer opnieuw te gebruiken. De overblijvende biomassa-brandstof is veel droger en door de geringere zoutlast treedt minder agglomeratie op bij thermische conversie.

### 4.3 Opbrengst en kosten

De hoeveelheid droge stof (bijvoorbeeld uit wilgenteelt) die jaarlijks op 1 ha langs 1 kilometer snelweg geproduceerd kan worden [23,45] is ongeveer 6-10 ton<sup>9</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>10</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 10-30 € per ton biomassa in een jaar, ofwel met een productie van 6-10 ton langs een kilometer: 60-300 €. In het geval van elektriciteitsproductie zijn in deze opzet de kosten per GJ 1,2-10 €<sup>11</sup>.

### 4.4 Recente ontwikkelingen

Jaarlijks wordt in Nederland circa 600 kton bermgras geproduceerd, waarvan ca. 165 kton beschikbaar komt bij Rijkswaterstaat. Bermgras wordt geproduceerd in gemiddeld twee maaibeurtten en wordt nu voor het grootste deel aangeboden aan composteerinrichtingen. In een aantal gebieden wordt bermgras van de eerste snede aangeboden als veevoer, bermgras van de tweede snede heeft over het algemeen een te lage voedingswaarde. Oorzaak hiervan is het gevoerde verschrallingsbeleid. De huidige verwerkingskosten voor compostering bedragen ca. 50€ per ton (excl. maaien, balen en transport). Het vochtgehalte bedraagt gemiddeld ca 50-60%, maar dit kan sterk variëren t.g.v. de weersomstandigheden en de oogstmethode. Sinds de introductie van loodvrije benzine is het gehalte zware metalen in bermgras aanzienlijk afgenomen en voldoet het meestal aan de norm voor zeer schone compost. Bij de thermische verwerking van bermgras voor energieopwekking kunnen met name het relatief hoge chloorgehalte en de aanwezigheid van alkalimetalen een probleem vormen.

Momenteel lopen er in Nederland een groot aantal initiatieven op commerciële schaal met betrekking tot verwerking van biomassa, welke ook relevant zijn voor bermgras. Bij elke alternatieve verwerkingsroute speelt de periodiciteit van de productie van bermgras een grote rol. In-

<sup>9</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>10</sup>  $P = 6 \text{ [ton/ha]} \times 1 \text{ [ha]} \times 16 \text{ [GJ/ton]} \times 68\% = 65 \text{ GJ/jaar}$ .

<sup>11</sup> Ondergrens prijs per GJ elektrische energie = 60 EURO/ 51[GJ]= 1,2 EURO; bovengrens = 300 EURO/31[GJ] = 10 EURO.

dien bermgras gedurende het hele jaar zou moeten worden ingezet in een speciaal daartoe ontwikkelde verwerkingsinstallatie, zou de hele productie na de oogst moeten worden opgeslagen. Indien het gras direct na het maaien zou kunnen worden aangeleverd aan een grote verwerkingseenheid welke grote hoeveelheden verschillende grondstoffen of brandstoffen kan verwerken, wordt de benodigde tussentijdse opslag beperkt. Rekening moet worden gehouden met een variërende kwaliteit van het bermgras en mogelijke verontreinigingen (met zware metalen). Een apart aspect is overigens het oogsten van het gras. De oogstmachines mogen niet te zwaar zijn en het mag geen gevaar opleveren voor het verkeer.

Ook valt te denken aan het gebruik van snelgroeïende gewassen als olifantsgras in plaats van bermgras. Olifantsgras kan een hoogte bereiken van meer dan 2 m. Een dergelijke discussie loopt in de agrarische sector m.b.t. het gebruik van natuurgras (in combinatie met dierlijke mest). Het omvormen van biomassa als brandstof voor verkeer zou in de directe omgeving van de snelweg kunnen plaatsvinden en aan het verkeer worden aangeboden middels een pompstation<sup>12</sup>.

Mogelijke verwerkingsprocessen voor bermgras (en haalbaarheid):

- Anaerobe vergisting, in combinatie met ander organisch materiaal;  
Met name het covergisten van bermgras met mest zou veel milieutechnische voordelen kunnen bieden.
- Verbranding met afval in afvalverbrandingsinstallaties;  
Meeverbranden met afval in AVI's is technisch geen probleem, maar dit is met verwerkingskosten van € 90,- tot € 150,- per ton geen optie.
- Verbranding/vergassing in of bij elektriciteitscentrales;  
Het bij- en meestoken van bermgras in kolencentrales biedt de beste perspectieven, zowel qua verwerkingskosten als volumes die kunnen worden verwerkt. In verband met de groeiende vraag naar bijstoken van biomassa in kolencentrales en de periodiciteit waarmee bermgras wordt geproduceerd is het daarbij belangrijk dat de installatie een hoge mate van brandstofflexibiliteit heeft. De aanwezigheid van geringe hoeveelheden chloor en zware metalen kan mogelijk op problemen stuiten.
- Verbranding/vergassing in specifieke installaties voor biomassa;  
In Nederland zijn op dit moment enige initiatieven met stand-alone verbrandings- en vergassingsinstallaties met elektriciteitsopwekking voor biomassa. Daarbij wordt o.a. hout als brandstof ingezet voor €30,- tot €50,- per ton en kippenmest (Tzum vergasser in Friesland). Bermgras heeft echter dusdanig andere verbrandingseigenschappen (lager as-smeltpunt en hoger vochtgehalte) dat dit niet direct kan worden verbrand in dergelijke installaties.
- Verwerking in een HTU-installatie, voor de productie van biobrandstof. Het HTU proces lijkt ook een kosteneffectieve verwerkingstechniek voor bermgras. Een dergelijke installatie op praktijkschaal zou een groot scala aan verschillende grondstoffen moeten kunnen verwerken, waaronder bermgras. Verwacht wordt dat dit mogelijk is vanaf ca 2010.

---

<sup>12</sup> Men dient zich hierbij te bedenken dat tussen de kosten voor compostering (-50€/ton) en mogelijke brandstofkosten van 30 € per ton (zonder MEP) er een speelruimte zit van 80 € per ton die te benutten is voor het opwerken van bermgras tot brandstof.

## 5. Windenergie

### 5.1 Inleiding

De productie van energie met windturbines in Nederland is sinds 2001 verdrievoudigd naar 1500 MW in 2006. Eind 2006 stonden er 1828 windturbines op het land en in zee genoeg om ca. 600.000 huishoudens van stroom te voorzien. De jaarlijkse groei van het aantal turbines nam af maar de capaciteit per turbine steeg. In 1995 werden in Nederland met 350 exemplaren de meeste turbines in één jaar in gebruik genomen. Dat was in 2006 afgenomen tot ruim honderd. In de afgelopen jaren is het vermogen van windturbines wel blijven toenemen omdat het rotoroppervlak steeds groter werd. Anno 2007 heeft de standaard windturbine een vermogen van 3 MW (0,75 MW in 1995) en komen fabrikanten met nieuwe modellen van 5 tot 6 MW.

In Nederland worden in de westelijke en noordelijke kustgebieden vermogens gerealiseerd van 800-1200 kWh/jaar per m<sup>2</sup> rotoroppervlak. Meer landinwaarts is de opbrengst lager (500-800 kWh/jaar per m<sup>2</sup>). De meeste windturbines staan in de provincie Flevoland. Deze zijn goed voor 38 procent van de geproduceerde windenergie. Een belangrijke impuls kwam eind 2006 toen de 36 turbines met ieder een vermogen van 3 MW van het park in zee bij Egmond aan Zee in gebruik werden genomen. Deze leveren 7 procent van de windenergie in ons land. [46,47]. De afgelopen jaren is de markt voor grote én kleine windturbines gegroeid en was er een daling van de kostprijs. Anno 2006 kost het opwekken van stroom door windenergie 8,8 tot 10,3 cent per kWh<sup>13</sup>.

Opvallend is de toegenomen belangstelling voor kleinere windturbines met verticale draai-as. Het voordeel van dergelijke turbines is dat deze betrekkelijk veilig te plaatsen zijn nabij of op gebouwen, weinig ruimte in beslag nemen en minder geluidsoverlast kennen dan ‘traditionele’ windturbines. De techniek van deze systemen is de laatste jaren betrouwbaarder geworden. Ook het combineren van kleine windturbines met PV-panelen is een interessante ontwikkeling van de laatste jaren.



Figuur 5.1 *Combineren van zonne- en windenergie*

<sup>13</sup> Het opwekken van conventionele elektrische energie kost 2,9 tot 5,8 ct per kWh (2006). Voor de periode 2008-2012 wordt de gemiddelde bandbreedte geschat op 4,5-6,3 ct/kWh [48].

In zijn algemeenheid kan gezegd worden dat de ruimte *direct* langs snelwegen niet geschikt is voor recreatie of permanente bewoning. De vraag is dan 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 dat de automobilist door de bewegende (en soms zonlicht reflecterende) rotorbladen kan worden afgeleid. Rijkswaterstaat hanteert daarom voor windturbines een minimum afstand tot de weg die afhangt van de grootte van de rotorbladen. Andere, meer algemene, bezwaren wegen (iets) minder bij plaatsing langs de snelweg zoals geluidsoverlast, ruimtegebruik en horizonvervuiling. Op zichzelf bieden grote windturbines weinig mogelijkheden tot innovatieve toepassingen langs de snelweg. Daarom is in deze studie vooral gekeken naar kleinere turbines. Een ander onderwerp is het benutten van de windenergie die wordt opgewekt door de rijdende voertuigen op de weg. Dit onderwerp staat nog steeds in de belangstelling (ondanks de naar verwachting geringe opbrengst).

## 5.2 Opbrengst en kosten grote windturbines

Een standaard windturbine met 2 of 3 bladen, met een diameter van 40 m en een masthoogte van 50 m, kan bij een optimale windsnelheid (windkracht 6) 500-750 kW leveren. Een grotere windturbine met een rotordiameter van 60 m en een masthoogte van 70 m kan een vermogen hebben van 1 tot 1,5 MW. Windturbines moeten op een bepaalde minimale afstand van elkaar staan. Een vuistregel voor de onderlinge afstand is vijf keer de diameter van de rotor. Een kleine onderlinge afstand heeft tot gevolg dat de turbines niet optimaal profiteren van de wind. Ze staan dan bij sommige windrichtingen in elkaars luwte, en de opbrengst daalt daardoor. Doordat er steeds grotere turbines op de markt komen, bestaat er een trend dat windturbines steeds verder uit elkaar komen te staan en dat projecten ook meer turbines gaan omvatten. In de praktijk blijkt dat enkele grotere windturbines meer kWh opleveren dan meerdere kleinere voor het zelfde bedrag.

De potentiële schatting voor geschikte windturbines geplaatst over een afstand van 1 kilometer gaat daarom uit van een turbinevermogen tussen de 500 kW en 1,5 MW. De opbrengst is gesteld op 1.800 kWh/(kW jaar) voor beide types. Bij gebruik van de kleinere windturbines van 500 kW kunnen er 5 worden geplaatst per kilometer. De potentiële opbrengst<sup>14</sup> wordt dan ca. 16.000 GJ/jaar [23]. In het geval van de grotere (1 MW) turbines is het plaatsen van maximaal drie turbines mogelijk langs een kilometer snelweg; de potentiële opbrengst<sup>15</sup> is dan ongeveer ligt dan tussen 19.000 en 30.000 GJ/jaar<sup>16</sup>.

Overigens dient men zich te realiseren dat tijdens de levenscyclus van een windturbine niet alleen energie geproduceerd wordt maar ook verbruikt voor winning van de benodigde grondstoffen, productie, onderhoud, regelelektronica en afbraak. Dit geldt vanzelfsprekend niet alleen voor windturbines.

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 1.000-1.300 € 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. 15 € per kW aangehouden [49,50].

De kosten van aanleg, productie en netkoppeling van 5 windturbines van 500 kW bedragen dan tussen de 2,5-3,2 M€. Met een levensduur van 20 jaar voor een gemiddelde windturbine komt dit neer op een jaarlijkse afschrijving tussen de 125-160 k€; het onderhoud per jaar voor deze 5 turbines bedraagt 37,5 k€. De totale kosten per jaar liggen dan tussen de 165-195 k€. De prijs

<sup>14</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>15</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>16</sup> Deze schattingen zijn berekend voor het westen van Nederland. Verder landinwaarts neemt de opbrengst af door de gemiddeld lagere windsnelheid.

voor 1 GJ elektrische energie opgewekt door windturbines geplaatst in deze opzet ligt tussen de 10-12 €. De opbrengstkosten verhouding voor de configuratie van de drie grotere turbines is van dezelfde orde van grootte.

### 5.3 Overzicht kleine windturbines

In de vorige studie is reeds de mogelijke toepassing van kleinere turbines besproken. Als interessant voorbeeld van deze systemen kwam destijds de Turby naar voren (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 om en boven hoge gebouwen is sprake 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 in verband met 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 mastterugslag 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 dit probleem nu is opgelost (zie tekst en voetnoot 15).



*Delft; proefveld langs de A13*

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 10.000. 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 20-40 EURO kosten. Dit is exclusief kosten voor installatie, onderhoud en verdere koppeling. Een grotere turbine (nog in ontwikkeling) is de Turby MkII die ca. 10.000kWh per jaar moet gaan produceren.

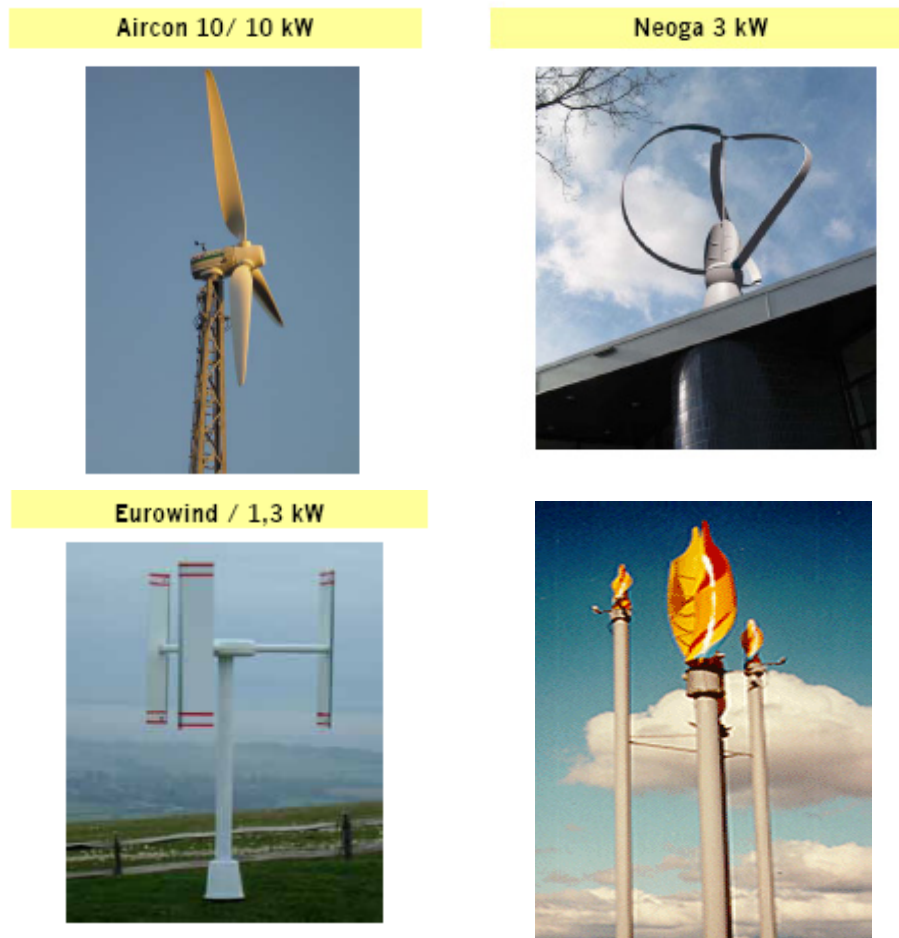
Enkele proefexemplaren waaronder de Turby zijn een jaar lang getest op een parkeerterrein langs de A50. De eis hierbij was dat deze systemen zonder hinder wegverlichtingsarmaturen en portalen met signaalgevers van energie kunnen voorzien (door plaatsing op dit wegmeubilair), ook in gebieden met weinig wind (windkracht 2 à 3 gemiddeld).

De resultaten van de pilot waren tegenvallend: met moeite zouden beide turbines één lantaarn van energie kunnen voorzien waarbij niet het gehele jaar de toevoer van energie gegarandeerd was. De prijs-prestatie verhouding was ver verwijderd van een potentiële duurzame energiebron voor verlichting of signalering, zelfs als die verlichting energiezuinig zou zijn. Andere experimentele bevindingen waren dat de Turby teveel trillingen veroorzaakte in zijn mast (hoogte 20



meter) en daarom uit veiligheidsoverwegingen moest worden stilgezet<sup>17</sup>. Een ander getest systeem (de Tulp) werkte pas goed bij windkracht 5, een windsnelheid die op de proeflocatie amper werd gehaald gedurende de testperiode. De conclusie van Rijkswaterstaat luidde dat vanwege de optredende ‘eigenfrequenties’ een stevige fundering met korte masten vereist is. Derhalve zouden dergelijke turbines ongeschikt zijn voor plaatsing op hogere verlichtingsmasten en verkeersportalen. Tevens dienen de prijzen verder te dalen in de nabije toekomst.

De afgelopen jaren is er een flinke groei geweest in de ‘markt’ van de kleine turbines. Zo zijn er in Europa maar liefst 33 systemen geïdentificeerd, bestaande én nieuwe systemen, traditioneel (met rotorbladen) en tamelijk exotisch [51]. Enkele voorbeelden zijn te zien in Figuur 5.2.



Figuur 5.2 Enige voorbeelden van kleine windturbines

Nederlandse fabrikanten zijn Ecofys (Utrecht), Fortis Wind Energy (Haren), TH (Rijswijk), Tulipower (Amsterdam), Turby (Lochem), Venturi Wind (Deventer) en Wind Energy Solutions (ZijdeWind). Uit gesprekken met diverse fabrikanten blijkt dat er sprake zou zijn van hogere op-

<sup>17</sup> Reactie Dick Sidler, ontwikkelaar Turby: ‘Het probleem van destijds was dat de mast eigenschappen niet of onvoldoende waren afgestemd op de turbine. Wij hebben intussen geleerd dat de turbine – hoe goed we die ook dynamisch balanceren – altijd enige trillingen zal veroorzaken, die tot resonantie van de mast kunnen leiden. De oplossing daarvoor is de mast zo te construeren dat hij in het bedrijfsgebied van de turbine (120 – 420 rpm; 2 – 7 Hz) geen eigen frequenties heeft. Wij berekenen de masten op een eerste eigenfrequentie van ca. 1 Hz en hebben ervaren dat het dan goed gaat. Ook werken we aan een oplossing waarbij de turbine bevestiging op de mast zodanig is geconstrueerd dat die geen frequenties boven de 1 Hz kan doorgeven. Het gedrag wordt dan als van een centrifuge; bij aanloop en stoppen is er kortstondig sprake van een trilling, maar in het werkgebied staat de zaak ‘strak’.

brengsten, een grotere stijfheid en bij serieproductie lagere prijzen dan 2000 het geval was<sup>18</sup>. Het staven van dergelijke beweringen valt helaas buiten het bestek van deze inventarisatie. Een nieuw proefproject valt te overwegen. Ondersteuning in de selectie van turbines geschikt voor langs de snelweg door een onafhankelijke partij verdient hierbij aanbeveling.

Belangrijke toetsingscriteria bij deze selectie zijn (zie ook [52-54]):

- Welke van de nieuwe systemen zijn mogelijk geschikt zijn voor toepassing langs de snelweg?
- In welk frequentiegebied bevinden zich de eigenfrequenties?
- Wat zijn de eisen voor de fundering?
- Kosten testexemplaar en kosten bij serieproductie?
- Wat is de prijs-prestatieverhouding?
- Levert het systeem voldoende vermogen om (als voorbeeld) één lantaarnpaal een jaar lang van energie te kunnen voorzien?

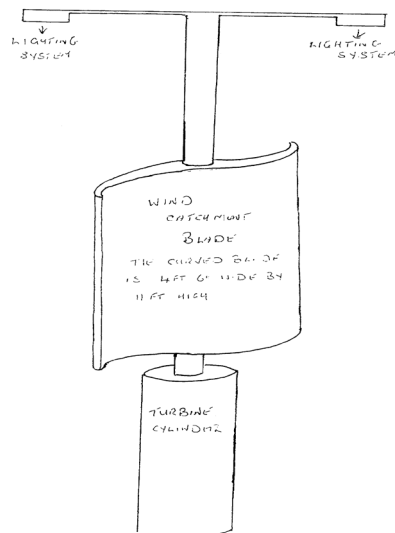
## 5.4 Windenergie geïnduceerd door rijdende voertuigen

### 5.4.1 Inventarisatie

Het gebruik maken van de turbulentie die wordt opgewekt door de voorbijrijdende voertuigen door middel van plaatsing van turbines in de middenberm staat (en stond) in de belangstelling: er zijn (opnieuw) diverse verwijzingen gevonden, meestal in de vorm van patenten. Deze zijn allen gebaseerd op het principe van omzetting van kinetische energie van de lucht in elektrische energie middels kleine windturbines of windtrommels geplaatst in de (midden)berm.

Enkele (recente) voorbeelden:

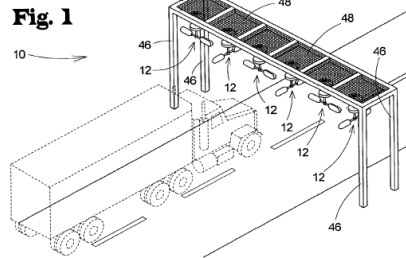
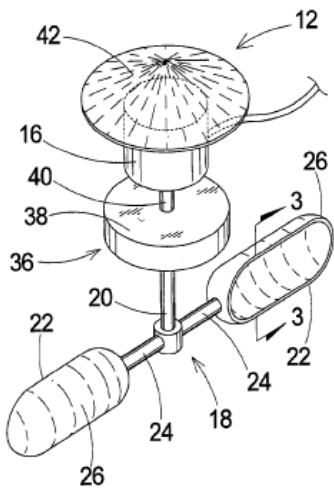
- ‘Curved blade’ windturbines (zie Figuur 5.3) geplaatst vlak naast de rijweg of spoorlijn waarbij de opgewekte energie wordt gebruikt voor wegverlichting, verdrijven van mist e.d. [55].



Figuur 5.3 ‘Curved blade’ wind turbine

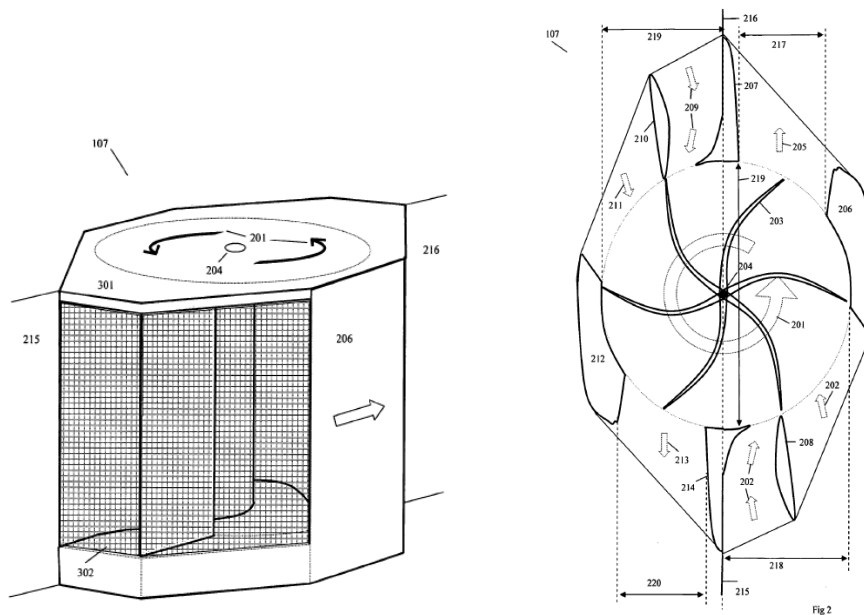
- ‘Cup anemometer’ windturbines [56] (zie Figuur 5.4) te plaatsen langs of boven de rijweg of spoorlijn.

<sup>18</sup> Daarnaast was er kritiek op de gekozen locatie van het pilotproject. De parkeerplaats was teveel omgeven door bomen.



Figuur 5.4 *Afbeelding in een Amerikaans patent van een zgn. ‘cupanemometer’ windturbine met mogelijke toepassing*

- Een derde voorbeeld is te zien in Figuur 5.5 [57]. Het idee is dat ‘delen’ van de energie die voertuigen opwekken wordt ‘ingevangen’ door systemen geplaatst in de middenberm dan wel langs de snelweg. Via openingen in de behuizing wordt de bewegende lucht naar het roterende deel van het systeem geleid. Ingeval van plaatsing is sprake van een dubbele uitvoering, voor de zijberm is een enkelvoudig systeem ontwikkeld



Figuur 5.5 *Voorbeeld van een mogelijke toepassing langs snelwegen*

Een nogal ‘exotisch’ en recent ontwerp staat beschreven in onderstaand kader.

### Windturbines boven de snelweg

Een student uit Arizona heeft een nieuwe toepassing bedacht voor windturbines: boven de snelweg. Hij ontwierp het concept als opdracht voor zijn studie.



Als beschrijving bij zijn project geeft hij aan dat de turbine vergeleken kan worden met een parasiet. De turbine maakt namelijk gebruik van de auto's die onder hem doorrijden. De luchtverplaatsing die door de auto's veroorzaakt wordt, wordt gebruikt om de turbine aan te drijven. Hij rekende uit dat elke turbine, bij een standaardwind van ongeveer 10 mijl per uur 9.600 kWh per jaar kan genereren. Het is daarbij enigszins ironisch dat de energie uiteindelijk afkomstig van het verbranden van fossiele brandstoffen.

Bron: [58]

Andere referenties zijn te vinden in [59-66]. Duidelijk is dat er een scala aan ontwerpen is waarvan men claimt dat deze voldoen. Experimenten met dergelijke turbines zijn overigens niet bekend en de vraag of het voldoende energie oplevert blijft vooralsnog onbeantwoord (zie volgende paragraaf).

### 5.4.2 Opbrengst en kosten

Bepalend voor de opbrengst is de te verwachten gemiddelde snelheden van de wind in de berm. In de literatuur worden windsnelheden in de middenberm genoemd van ca. 24 km/h [59]; nader onderzoek in deze is noodzakelijk<sup>19</sup>. Het aantal draaiuren kan variëren: genoemd wordt ca. 5 draaiuren per dag [23] (dit is het aantal draaiuren van grote turbines), elders wordt met 18 uur/dag wordt gerekend [59]. 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 turbines (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>20</sup> (5 uur/dag) tot 140 GJ/jaar<sup>21</sup> (18 uur/dag). Uitgaande van een kostprijs van ca. 70 € per stuk en een levensduur van 10 jaar dan zijn de kosten per GJ tussen de 210<sup>22</sup> 95-350 €.

In het geval van meer geavanceerde turbines (zoals in [60], potentieel vermogen is 3 kW) kunnen er ca. 65 geplaatst worden. Bij 5 draaiuren is de maximale opbrengst dan 1.280 GJ/jaar (bij

<sup>19</sup> Allerlei obstakels langs de weg en het gegeven dat de turbines relatief dicht bij de grond staan maken het niet gemakkelijk om algemene conclusies te trekken met betrekking tot het windaanbod. Zie ook [67,68]

<sup>20</sup>  $P (2000 \text{ trommelmolens}; 5 \text{ uur/dag}; 1 \text{ jaar}) = 2000 \times 3[W] \times 5 \times 365 \times 3600[s] = 39,4 \text{ GJ/jaar}$

<sup>21</sup>  $P (2000 \text{ trommelmolens}; 18 \text{ uur/dag}; 1 \text{ jaar}) = 18/5 \times 39,4[\text{GJ/jaar}] = 141,9 \text{ GJ/jaar}$

<sup>22</sup> Kosten per GJ:  $(2000 \times 75 \text{ EURO} / 10[\text{jaar}]) : 141,9[\text{GJ/jaar}] = 100 \text{ EURO/jaar}$

18 draaiuren 4.600 GJ/jaar); de prijs per GJ (bij gelijke levensduur) ligt tussen de 40-140 €, ruwweg een factor 3 lager, eveneens exclusief plaatsing en onderhoud.

Kanttekening is dat de door het passerende verkeer veroorzaakte turbulente energie 'af te vangen' de snelheid van de lucht boven de weg afneemt en de luchtweerstand dus toe. Voertuigen zullen daarom meer brandstof gaan verbruiken voor het halen van dezelfde snelheid. Hoe dit netto uitvalt is onduidelijk. Het lijkt zinvol om een meetexperiment uit te voeren voor daadwerkelijke toetsing van beweerde opbrengsten. Een experiment met simpele windsnelheidsmeters is tamelijk eenvoudig te realiseren.

## 6. Piëzo-elektriciteit en Peltier elementen

### 6.1 Inleiding

#### 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.

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 oppervlakte-weerstand is daar geen probleem, soms zelfs een voordeel.

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. Het is met name deze reden waarom een substantiële bijdrage aan duurzame (schone) energiewinning langs een snelweg niet te verwachten valt.

#### 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. Hoe hoger het temperatuurverschil tussen beide metalen des te groter de opbrengst aan elektrische energie.

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 Toepassingen

### 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 [69].

- 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 beweging kan weer worden omgezet in elektrische energie [62]

## 6.2.2 Peltier

Over dit onderwerp is één relevante literatuurreferentie gevonden:

- In Japan is het zgn. ‘Road Electric Generation System (REGS)’ ontwikkeld dat gebruik maakt van het Seebeck principe [70]. 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>.
- De meest in het oog springende toepassing van Peltier elementen in de voorbijgaande jaren is die van EC-fics (EC-Energie Conversie - Fully Integrated Clean Systems) geweest in 2005 (in het kader van de pilot Energiek Wegdek). Ofschoon de proef langs de A18 op zich als geslaagd wordt beoordeeld ("de techniek werkt") is de methode onrendabel. Hiervoor zijn twee redenen aan te geven: ten eerste is er (nog) geen geautomatiseerde manier om de elementen in het asfalt aan te brengen (gebeurt nu dus met de hand), ten tweede dient verder (fundamenteel) onderzoek aan de elementen plaats te vinden voor een noodzakelijke verbetering van de opbrengst. Voor zover bekend vindt op dit moment dergelijk onderzoek niet plaats.

## 6.3 Opbrengst en kosten

### 6.3.1 Piëzo-elektriciteit

Voor piëzo-elementen op deze grootteschaal 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 [70] zijn 0,4 MW<sup>23</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>) bedragen minimaal 10 € per element [71-72]. Als we 18.000 m<sup>2</sup> snelweg beleggen met dergelijke elementen dan bedragen de kosten zeker meer (zelfs bij kwantumkorting) dan 10 M€. Duidelijk is dat dit geen rendabele optie is voor plaatsing in het asfalt van een (referentie)snelweg van 1 kilometer lengte.

---

<sup>23</sup>  $P [\text{jaar}] = 0,62[\text{W/m}^2] * 18.000[\text{m}^2] * 3[\text{maanden}] * 6[\text{uur}] * 3600[\text{s}] = 72,3 \text{ MJ}$

## 7. Integrale energiewinning

In de voorafgaande hoofdstukken zijn de verschillende energiewintechnieken besproken. Bij de bijbehorende projecten is vrijwel altijd één van de technieken ingezet. Een optimalisatie van energieopwekking is te vinden in een goede combinatie van technieken. Niet alleen leidt dit tot een grotere productie van energie, ook de continuïteit van de productie is meer gewaarborgd. Daarnaast blijken er andere voordelen te "ontstaan". Een mogelijkheid voor zo'n integrale benadering ontstaat als een weg overdekt wordt. Door overkapping van de rijbanen wordt ruimte gecreëerd voor de plaatsing van zonnepanelen en windmolens, en eventueel voor biomassa verbouw. Een (enigszins futuristische) interpretatie van dit idee is afgebeeld in Figuur 7.1 (afkomstig uit de prijsvraag 'Energiek Wegdek'). De integrale benadering is niet alleen interessant maar heeft bovendien een grotere innovatieve waarde dan toepassing van één enkele techniek.

Doorgaans dienen overkappingen zwaar te worden uitgevoerd, zeker bij de toepassing van de 'traditionele' zonnepanelen. Dit vertaalt zich in hoge kosten. Inmiddels is de techniek zover gevorderd dat bepaalde type zonnecellen licht van gewicht zijn, zoals beschreven in Hoofdstuk 2. Daarnaast zijn deze grotendeels transparant zodat daglicht beschikbaar is en de weggebruiker niet het idee heeft in een tunnel te rijden. Een impressie van zo'n 'lichte' constructie (in dubbel opzicht) is te zien in Figuur 7.2

Een overkapping biedt ruimte voor de plaatsing van windturbines, groot en klein. De overkapping zal deze molens (deels) aan het zicht onttrekken zodat het risico tot afleiding van bestuurders afneemt. Er is een besparing op de kosten van wegonderhoud, er hoeft namelijk geen ZOAB gebruikt te worden. De veiligheid op de weg waar regen en gladheid nu geen rol van betekenis meer spelen neemt toe. Bij regen is er evenmin een probleem met opspattend water. Run-off, verwaaiing en de verspreiding van verkeersemmissies worden door een overkapping tegengegaan. Dieren die zich ophouden in de berm waar biomassa verbouwd kan worden zijn eenvoudig van de rijbaan te weren middels de overkapping. Andere vormen van energiewinning rondom een overkapping zijn daarbij windmolen(tje)s in de (midden)berm (indien er sprake is van voldoende rendement), biomassateelt en waterenergie door opvangen regenwater dat van de overkapping afstroomt. Voordelen en besparingen zijn samengevat in Tabel 7.1.

Tabel 7.1 *Mogelijke voordelen/besparingen bij aanleg van een overkapping*

---

### Besparing

---

Ruimtebesparing

Plaatsing windmolens op en/of naast overkapping

Besparing onderhoudskosten

Geen dooibestrijding noodzakelijk

Extra energie uit zonnecellen

D.A.B mogelijk in plaats van Z.O.A.B.

Geen opspattend water

Besparing op verlichting

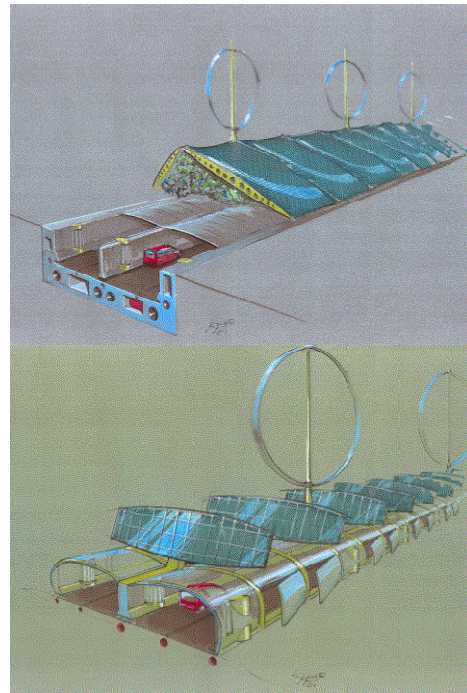
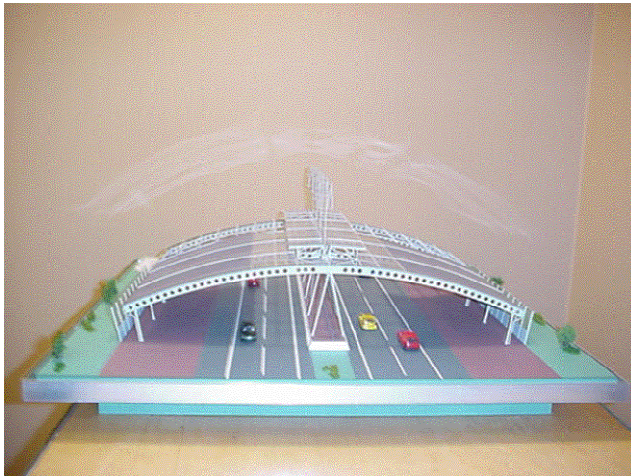
Besparing door het wind mee effect.

Vermindering verspreiding luchtverontreiniging

Regenwateropvang

---





Figuur 7.1 *Maquettes gemaakt door KWS/DHV/ECN als voorbeelden van integrale energiewinning langs de snelweg*

Er zijn ruwweg drie soorten van overkapping te bedenken:

- volledig gesloten
- wind mee situatie
- eenvoudige overkapping

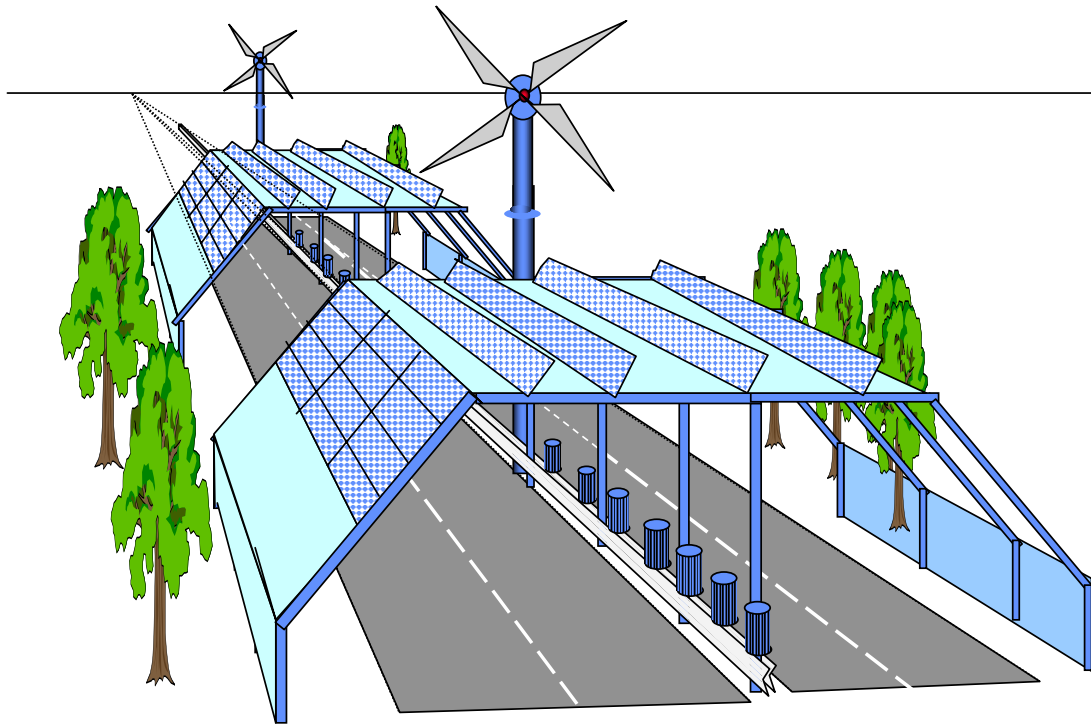
#### *Volledig gesloten*

Volledig gesloten overkapping heeft specifieke voordelen in de bebouwde kom. Door volledig gesloten constructies is het mogelijk om centraal de lucht af te zuigen en via een filter te reinigen. Hierdoor wordt de gezondheid van omwonenden minder belast en de belemmeringen voor de bouw door overschrijding van luchtkwaliteitsnormen weggenomen. Hier is het belang voor gezondheid en plaatselijke economie groot.

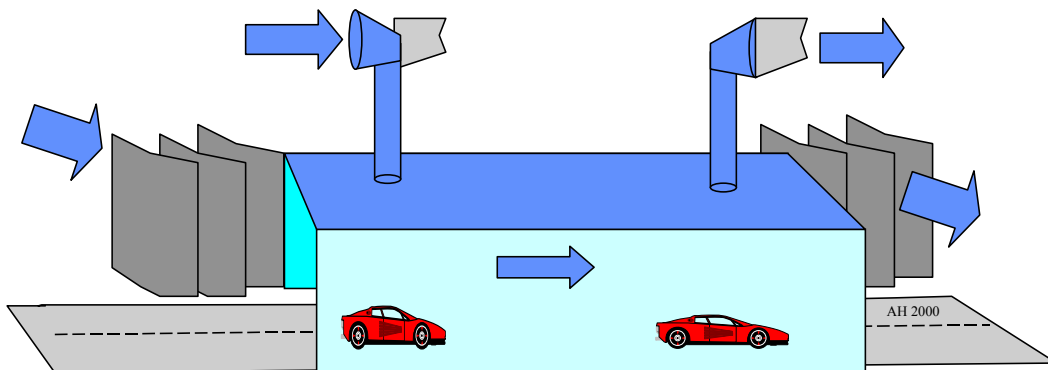
#### *Continu wind mee situatie.*

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<sup>24</sup>. Een voorbeeld van een continu-wind mee concept is weergegeven in Figuur 7.3. Het idee van de getoonde kokers in Figuur 7.3 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.

<sup>24</sup> 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 7.2 *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 7.3 *Door aan de in- en uitgang van de tunnels panelen te plaatsen en door gebruik te maken van ventilatiekoekers of ventilatoren kan een wind mee situatie onder de overkapping gerealiseerd worden*

#### *Eenvoudige overkapping*

Voor grootschalige toepassing kan een eenvoudige lichte overkapping volstaan. Los van het windmee voordeel kent dit nog steeds alle andere voordelen (zonnepanelen (folie), windenergie naast en boven de kap en biomassa productie, droog wegdek, etc.). Er zijn twee mogelijkheden: een paraplu-boog, waar het zonlicht op panelen wordt opgevangen en het regenwater aan de zij-kanten wegloopt. Een mogelijk (nog experimenteel) alternatief zou kunnen zijn de schotel overkapping, waarbij het zonlicht door spiegels geconcentreerd wordt op een punt en het regenwater in het midden wordt opgevangen en langs een turbine wordt geleid.

## 8. Conclusies

### 8.1 Criteria

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

- *Foto-voltaïsche systemen*
- *Warmtecollectoren*
- *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 verkeersveiligheid en landschappelijke inpasbaarheid in geval van een toepassing op, in, onder, naast of boven het wegdek van een willekeurige snelweg<sup>25</sup>. Het resultaat van deze toetsing is samengevat in Tabel 8.1 en wordt nader toegelicht. De kwantificering in de tabel geeft slechts een orde van grootte aan, van de diverse opbrengsten en kosten teneinde een eerste vergelijking tussen de wintechnieken te vergemakkelijken. In individuele projecten/situaties kunnen opbrengsten en kosten hiervan aanmerkelijk afwijken.

---

<sup>25</sup> In dit verband is het interessant om op te merken dat SenterNovem in opdracht van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat het programma Energiebesparing in de Grond-, Weg-, en Waterbouw (GWW) uitvoert. Dit programma richt zich in eerste instantie op openbare verlichting en verkeersregelininstallaties bij gemeenten en provincies omdat het grootste energiebesparings-potentieel van de GWW sector hier aanwezig is. Het doel is het bereiken van energiebesparing doordat de wegbeheerders dit als criterium voor beslissingen ten aanzien van verlichting langs wegen en openbare ruimten hanteren. Om dit te bereiken zijn in het kader van dit programma diverse instrumenten ontwikkeld die aan de beheerders ter beschikking worden gesteld. De mogelijke waarde voor toepassing langs snelwegen verdient nadere bestudering.

Tabel 8.1 Toetsingsresultaten voor de verschillende energiewintechnieken rondom de snelweg

	Opbrengst [GJ/km]	Investering [k€/km]	Kosten [€/GJ]	I	V	L
PV-systemen <sup>1)</sup>	540	900-1.300	50-80	+	o	-/o
Warmtewisselaars <sup>2)</sup>	10.000	450-900	45-90	+	+	o
Biomassa <sup>3)</sup>	65-110	0,060-0,30	1-5	+	o	++
Windturbines <sup>4)</sup>	11.000-20.000	165-195	10-12	o	-	--
Molens in berm <sup>5)</sup>	40-140	13,6	95-350	++	o(?)	-/o
Piëzo-elektriciteit	gbi	gbi	gbi	+	o	o
Peltier <sup>6)</sup>	0,073	>10.000	-	+	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. Zie berekening paragraaf 2.4.
- <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 €/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.
- <sup>7)</sup> Bij vergelijking met de inkooprijzen van kolen, gas en olie ( $\leq 5$  €/GJ) is de (verwachte) conclusie dat duurzame energiewintechnieken niet concurrerend zijn.

## 8.2 Foto-voltaïsche systemen

### *Innovatie*

De PV-techniek op zich is niet (meer) innovatief. 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 op zich als innovatief te kenmerken. Als meest 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]. Met de recente komst van hybride voertuigen lijken nut en noodzaak dichtbij te komen.

### *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 dubbelzijdig 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 [14,23] 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 [20]. 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 niet op tegen de kosten van een betrouwbaar verstelingsmechanisme [2].
- *Combineren van zonnepanelen met zgn. 'concentratoren'*  
Concentratoren zijn gebogen (bijvoorbeeld 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.
- *Voorzien van PV-systemen met koeling*  
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. Door toepassing van lichtdoorla-

tende flexibele zonnepanelen met weinig gewicht wordt noodzakelijke extra verlichting beperkt.

- *Aanbrengen van PV-systemen op terreinen rond verkeersknooppunten.*  
Bij berekeningen wordt normaliter 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.

### 8.3 Warmtecollectoren

#### *Innovatie*

Een gering aantal projecten is de afgelopen jaren met deze energiewintechniek uitgevoerd voor het grootste deel niet in relatie tot de snelweg. Inmiddels is de techniek en toepassing op zich niet meer als innovatief te beschouwen. De producenten geven verder aan dat er voorlopig weinig technische ontwikkeling zal zijn. Het lijkt overigens wel aannemelijk dat binnen het totaal concept van warmte halen uit het wegdek en het gebruik daarvan technische verbeteringen mogelijk zijn zowel voor wat betreft winning als voor het transport, gebruik en de opwaardering van de energie (bijvoorbeeld elektriciteit). Opvallende ontwikkelingen zijn echter niet op korte termijn te verwachten.

#### *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 zoals langs snelwegen 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 wellicht 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.

De conclusie is dat *in relatie tot de snelweg* deze energiewintechniek zich tot nu toe niet echt bewezen heeft. De voornaamste functies zijn verlenging levensduur asfalt en het ijsvrij houden in de winter. Met de bestaande systemen is dit goed uitvoerbaar. Het ziet er niet naar uit dat de toepasbaarheid in de toekomst snel zal veranderen. Het gebruik binnen een andere (verkeers-) infrastructuur (in relatie tot verwarming van gebouwen) lijkt succesvoller. Het aantal uitgevoerde projecten is echter nog beperkt.

## 8.4 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 installatie 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 Rijkswaterstaat inzake de verkeersveiligheid. Volledigheidshalve zij vermeld dat dergelijke 'energieteeltbiotopen' 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 af-

schermen van de weg, bijvoorbeeld door een adequate afrastering (eventueel met PV-systemen uitgerust).

## 8.5 Windenergie

Een keuze voor windenergie kan niet (meer) als innovatief gezien worden daar de techniek al lang bestaat. De innovatie ligt hier dan ook in mogelijke nieuwe toepassingen langs de snelweg. Er zijn hier drie mogelijkheden:

1. *Grote turbines.* Deze techniek levert de meeste kosteneffectieve wijze van duurzame energieopwekking op in vergelijking met alle andere hier besproken technieken. Spectaculaire verhogingen in opbrengst van dergelijke turbines zijn overigens niet te verwachten. De ontwikkeling richt zich op het verbeteren van bestaande technieken. Zo wordt meer vermogen alleen nog gerealiseerd door grotere rotorbladen.

Het vinden van locaties blijkt in de praktijk niet eenvoudig. 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. Ook de verkeersveiligheid is in deze een punt van zorg.

Men dient zich verder rekenschap te geven van een Beleidsregel waarin de plaatsing van turbines langs Rijkswegen aan regels is gebonden: de breedte van de berm dat onder het beheer van Rijkswaterstaat valt, is bepalend voor de grootte van de windmolens. 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.

2. *Kleine turbines.* De afgelopen jaren is er een flinke groei geweest in de 'markt' van de kleine turbines. Zo zijn er in Europa maar liefst 33 systemen geïdentificeerd. Uit gesprekken met diverse fabrikanten blijkt dat er sprake zou zijn van hogere opbrengsten, een grotere stijfheid en bij serieproductie acceptabele prijzen dan 2000 het geval was. Het lijkt derhalve nuttig het eerder uitgevoerde pilotproject te herhalen. Ondersteuning in de selectie van geschikte turbines voor langs de snelweg door een onafhankelijke partij verdient aanbeveling. Vragen die hierbij beantwoord moeten worden, zijn:

- Welke van de nieuwe systemen bijgekomen zijn mogelijk geschikt zijn voor toepassing langs de snelweg?
- In welk frequentiegebied bevinden zich de eigenfrequenties?
- Wat zijn de eisen voor de fundering?
- Kosten testexemplaar en kosten bij serieproductie?
- Wat is de prijs-prestatieverhouding?
- Levert het systeem voldoende vermogen om (als voorbeeld) één lantaarnpaal een jaar lang van energie te kunnen voorzien?

3. *Windenergie opgewekt door rijdende voertuigen.* Deze toepassing is op zich zeer innovatief (en heeft bovendien een hoge nieuws waarde). Er zijn vele ontwerpen maar meetexperimenten met dergelijke molens zijn niet bekend. Kritische kanttekening is dat door de windenergie af te 'vangen' de snelheid van de lucht boven de weg afneemt en de luchtweerstand toe. Hoe dit netto uitvalt is onduidelijk. De kosten lijken relatief hoog. De mogelijkheden van het opvoeren van het vermogen van molens en de plaatsing van grotere aantallen eventueel in combinatie met een middenscherm dient in ogenschouw te worden genomen.

Het verdient derhalve aanbeveling om een meetexperiment uit te voeren zodat een antwoord gevonden kan worden op deze vragen. Een dergelijk campagne is in eerste aanzet tamelijk eenvoudig van opzet: plaatsen van eenvoudige cupanemometers (die de windsnelheid regi-



streren) op zinvol gekozen plaatsen en hoogtes langs de snelweg (zij- en middenberm), en dit over een langere periode (in de orde van enkele maanden).

## 8.6 Piëzo-elektriciteit en Peltier elementen

### *Innovatie*

De toepassing van het piëzo-principe in het asfalt van een snelweg is als innovatief te bestempen. Piëzo lijkt een zinvolle toepassing te hebben op locaties waar verlichting slechts tijdelijk nodig is. Bijvoorbeeld op het moment dat er een voertuig nadert zorgt deze techniek ervoor dat verlichting of anderszins wordt ingeschakeld. Op deze wijze vindt efficiënt en passend verbruik van energie plaats.

De toepassing van de Peltier techniek is eveneens als innovatief te beschouwen. Dat het ‘werkt’ heeft een proef in 2005 laten zien. Hierbij is de opbrengst van de Peltier elementen verbeterd door toepassing van een koolstofrijk bindmiddel waardoor een groter temperatuurverschil over de thermokoppels wordt bereikt. en de opbrengst zou verbeteren. De opbrengst bleek is echter toch te laag voor rendabel gebruik. Ook is het inbrengen van de elementen in het asfalt arbeidsintensief en daarom duur. Verbeteringen op deze punten zijn allereerst noodzakelijk voordat aan een herhaling van dit experiment gedacht kan worden.

### *Haalbaarheid*

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

## Referenties

- [1] Weijers, E., Hensen, A. Erisman, J.W., Wilde, H. de, Cnubben, P. (2000): Het Energieke Wegdek, ECN rapport C--00-118.
- [2] Persoonlijke communicatie G.P. Wyers, ECN Zonne-energie, 2007.
- [3] Moore, T. (1994): Emerging markets for photovoltaics, EPRI Journal, p7-15.
- [4] Roberts, J.C. (1985): Solar-powered illuminated reflector, patent USA.
- [5] Dunlop, J.P. (1990): 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).
- [6] Sasaki, M., Fujita, S., Kaga, T. en Koyama, N. (1996): Snow melting system with electric heating using photovoltaic power generation, Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference.
- [7] Meier, C. (1993). Rapport Alpha Real AG, Zurich, Zwitserland.
- [8] Petersen, W. (1991): Pioneering photo-electric project at Rendsburg: Solar electricity for tunnel lighting, Windkraft Journal 11 , 33.
- [9] Achenbach, F. (1983): Autobahn in 2 Ebenen, patent no. P3141486.1.
- [10] Chuard, P., Chuard, D., Mercier, C., Gilst, J. van, Hadorn, J.C. (1983): 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) .
- [11] 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.
- [12] Basevi, F. and Bricca, E. (1988): 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).
- [13] Shao Shu Ren, Hu Xian Yun en Xia Qing Wei (1983): Advances in solar energy technology. V. 2. Proceedings of the biennial congress of the International Solar Energy Society held at Hamburg, pp. 1441-1445.
- [14] 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.
- [15] Nordmann T., Froelich A., (2000): The Potential of PV Noise Barrier Technology in Europe 16<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Glasgow, UK.

- [16] Goetzberger, A, Kleiss, G, Nordmann, T, Froelich, A, Hille, G, Reise, C, Wiemken, E, van Dijk, V, Betcke, J, Pearsall, N, Hynes, K, Gaiddon, B, Castello, S. (2000): The Potential of PV-noise barrier technology in Europe. Proceedings of the 16th European Photovoltaic Energy Conference, Glasgow, uk.
- [17] PV info NOVEM, 2000.
- [18] Betcke, J.W.H., Dijk, V.A.P. van, en Alsema, E.A. (2002): Opbrengstgegevens van het PV-geluidsscherm langs de A27 na twee jaar systeembedrijf. Rapport NWS-E-2002-14, Copernicus Instituut, Universiteit Utrecht.
- [19] Nordmann, T. (1993): In Verkehrsträger integrierte PV-Netzverbundanlagen - Fallbeispiele aus der Schweiz -, *Energieanwendung + Energietechnik* 42, 325-328.
- [20] Nordmann, T., Frölich, A., Dürr, M en Goetzberger, A. (2000): First experience with a bifacially PV noise barrier, pROC. 16<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Glasgow, UK.
- [21] Waltner, H. (1993): 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, p.607-617.
- [22] 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.
- [23] Ecofys (2000): Commentaar op ‘De weg met behoud van energie’ (van Erisman, J.W. en Hensen, A..
- [24] TDI; [www.info-tdi.com](http://www.info-tdi.com)
- [25] website SenterNovem
- [26] 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.
- [27] Persoonlijke communicatie J. Rikken, KEMA, oktober 2000.
- [28] Sloot, M. van der (1999): Tussenrapportage Monitoring Proefvakken Haringvlietsluizen, Rijkswaterstaat, Directie Zuid-Holland, Dienstkring Rhooon 252A020, 12 augustus 1999.
- [29] Monotoringsrapportage van het proefvak Haringvlietsluizen, website Arcadis.
- [30] Website Oom Avenhorn bv.
- [31] Ekomation, 2001: De markt voor warmtewinning uit asfalt (in opdracht voor Novem).
- [32] Mourik, G. van, (2003): Warmte uit Asfalt, Wegen, 2003.
- [33] Energie uit Asfalt: Inventariserend onderzoek naar de niet-technische knelpunten. SenterNovem, 2001. Samenvatting.

- [34] CBS (2007): Duurzame energie 2006, Toelichting bij nader voorlopige cijfers door R. Segers en M. Wilmer, Voorburg/Heerlen.
- [35] Toetsingskader voor Duurzame Biomassa, eindrapport van de projectgroep Duurzame productie van biomassa, 2007.
- [36] Ree, R. van. (2000): Kritische succesfactoren biomassa, ECN rapport, ECN-C--99-061, 85p.
- [37] Noon, C.E. en Daly, M.J. (1996): 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.
- [38] Rose, D.W. en Husain, S.A. (1997): Identifying potential sites for energy production from woody biomass, Report Minnesota University, Minneapolis, USA,.
- [39] Koppejan, J., Zeevalking, J., Hesseling, W., (2001): De haalbaarheid van energie-opwekking uit bermgras, TNO-MEP rapport in het kader van het programma Energiewinning uit Afval en Biomassa (EWAB).
- [40] Energiebureau Overijssel (2003): Verkennend onderzoek naar mogelijkheden voor de inzet van bermgras in Overijssel voor duurzame energie-opwekking. Projectno. 1146
- [41] Website SenterNovem, 2006.
- [42] van Dooren, H., Biewenga, G., Zonderland, J.: Vergisting van gras uit natuurgebieden, Praktijkrapport 62, Animal Sciences Group van Wageningen UR, Lelystad.
- [43] Japans patent: Fermenter for natural energy utilization for antifreeze material used in snowy, patent nummer: JP 11013009 A UPAB: 19990331.
- [44] Tezuka, N.: Snow-melting facilities capable multiple needs. Present state and future tasks in Tohoku district, Enerugi, 30 (1997) 82-84.
- [45] Persoonlijke communicatie J. van Doorn en H. Reith, ECN Biomassa, Kolen en Milieu.
- [46] Website Ministerie VROM
- [47] Beurskens, J, van Kuijk, G., (2004): Alles in de Wind, ECN Wind en ECN Beleidsstudies, Petten.
- [48] Wakker, A., van Tilburg, X., Hers, J. Seebregts, A. (2006): Elektriciteits- en brandstofprijzen, ECN Beleidsstudies ECN-E--06-024.
- [49] Persoonlijke communicatie D. Jansen, ECN Windenergie.
- [50] Persoonlijke communicatie J. Ybema, ECN Beleidsstudies.
- [51] Wineur project (2006): *Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers*. Intelligent Energy-Europe programme, [www.urbanwind.org](http://www.urbanwind.org).
- [52] Wineur project (2006): *Petites Eoliennes en Milieu Urban*. Intelligent Energy-Europe programme, [www.urbanwind.org](http://www.urbanwind.org)

- [53] Wineur project (2006): *Urban Wind Turbines, Leidraad voor kleine windturbines in de gebouwde omgeving*. Intelligent Energy-Europe programme, [www.urbanwind.org](http://www.urbanwind.org).
- [54] Wineur project (2006): *Urban Wind Turbines, Technology Review*. Intelligent Energy-Europe programme, [www.urbanwind.org](http://www.urbanwind.org).
- [55] McShane, D.W., Wind energy from vehicles, Patent, GB 2278645 A 7, 1994, 10p. The Patent Office, Sales Branche, Newport, UK.
- [56] US Patent 6809431B1.
- [57] US Patent Application Publication No. US2007/005097A1, maart 2007.
- [58] [http://www.treehugger.com/files/2007/04/using\\_the\\_space.php](http://www.treehugger.com/files/2007/04/using_the_space.php), april 2007
- [59] Wither, T. (1994): Median Winds: Vehilectrical Power Systems, Discover, 72.
- [60] Coventry Polytechnic: Turbines turn motorways into a source of power, New Scientist, (1990) 33.
- [61] 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.
- [62] Antonios, B. E.: Electrical power generation from residual air created by passage of a vehicle on a road way, patent.
- [63] Sekisui, J.: Wind generator with glare protection device – has luminescence body in glare protection device which lights, patent 1995.
- [64] 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.
- [65] Becker, W.: Wind energy - recovery system - uses drum-type windmill rotors along road in path of draught from vehicles, patent.
- [66] 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.
- [67] Kalthoff, N., D. Bäumer, U. Corsmeier, M. Kohler, B. Vogel (2005): *Vehicle-induced turbulence near a motorway*. Atm. Env. 39, 5737.
- [68] Rao, K.S., R.L. Gunter, J.R. White, R.P. Hosker (2002): *Turbulence and dispersion modelling near highway*. Atm. Env. 36, 4337.
- [69] 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.
- [70] Meiarashi, S.: Road Electric System with use of solar power, Proceedings of the American Power Conference, vol.1, p265-270, April 1997.
- [71] Producent HB, China; <http://www.hebeiltd.com.cn/>.
- [72] Persoonlijke communicatie G. Kos, Unit Schoon Fossiel, ECN, oktober 2000.