

Groen opgewekt in Wageningen

Onderzoek naar lokale duurzame energieopwekking
in Wageningen



Opdrachtgever: ChristenUnie
Contactpersoon: Simon Frans de Vries
Coach: Josette Jacobs
Datum: 16 oktober 2014
Academic Consultancy Training
YMC-60809 Wageningen UR

Mathijs ten Brinke
Marlies Karelse
Judith Kas
Jelle Meeuwissen
Lisanne Nijmeijer
Dennis de Raaij

Voorwoord

Met dank aan:

Josette Jacobs
Ingo Leusbrock
Bas van Vliet
Michiel van der Wal

Dit rapport is gemaakt door studenten van Wageningen Universiteit als onderdeel van hun MSc-opleiding.

Het is géén officiële publicatie van Wageningen Universiteit of Wageningen UR. Wageningen Universiteit neemt middels dit rapport geen formele positie in, noch representeert het haar visie of mening in deze.

Copyright © 2014. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze publicatie mag worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt worden, in enige vorm of op enige wijze, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de auteurs.

Samenvatting

De gemeente Wageningen heeft als doelstelling om in het jaar 2030 klimaatneutraal te zijn. Dit houdt in dat ten opzichte van het jaar 2008 50% bespaard moet worden op het gas- en elektriciteitsverbruik. De andere 50% van de energie moet op duurzame wijze (hernieuwbare bronnen) worden verkregen. In de Routekaart Klimaatneutraal staat vermeld dat windenergie erg belangrijk is om de benodigde hoeveelheid energie te bereiken. In opdracht van de ChristenUnie wordt in dit rapport gekeken naar alternatieven om een gelijkwaardige hoeveelheid energie op duurzame wijze op te wekken van drie grote windturbines van het merk Senvion (type MM92). Dit komt overeen met ca. 16.000 MWh aan elektriciteit per jaar.

In totaal zijn negentien alternatieve energiebronnen met elkaar vergeleken. Deze alternatieven zijn getoetst op drie basiseisen. Ten eerste of de techniek binnen vijftien jaar te implementeren is, ten tweede of de techniek toepasbaar is binnen de gemeentegrenzen van de stad Wageningen en tot slot of de alternatieven volgens bronnen voldoende energie oplevert. Na de negentien alternatieven getoetst te hebben aan de hier genoemde criteria bleven naast de drie grote windturbines nog acht alternatieven over, welke verder zijn beoordeeld in een Multi-Criteria Analyse (MCA) op vijftien criteria, namelijk; veiligheid, opbrengst, oppervlaktegebruik, variabiliteit energiebron, investeringskosten, terugverdientijd, kosten per kWh, emissies, restafval en zware metalen, geluid, habitats en soorten, sociale acceptatie, participatiemogelijkheden en economische stimulans. De in totaal negen energiebronnen die meegenomen zijn in de MCA zijn: grote windturbines, drie typen kleine windturbines op daken, zonnepanelen, zonneboilers, rivierturbines, Vortex Induced Velocity Aquatic Clean Energy (VIVACE), warmte koude opslag (WKO) en energie uit asfalt. Omdat deze genoemde energiebronnen verschillende vormen van energie leveren zijn alle waarden omgerekend naar kWh, zodat opbrengsten met elkaar vergeleken kunnen worden.

Waarschijnlijk kan geen van de andere alternatieven dan grote windturbines die meegenomen zijn in de MCA een gelijkwaardige hoeveelheid energie opleveren als drie grote windturbines. Om een substantiële bijdrage te leveren aan het energiegebruik van Wageningen zonder grote windturbines, lijkt een mix van verschillende duurzame energiebronnen noodzakelijk om aan de ca. 16.000 kWh te komen die drie grote windturbines per jaar zouden opleveren. Een zonnepark en systemen die WKO, zonneboilers en warmte uit asfalt combineren zijn daarvan waarschijnlijk de meest realistische alternatieven. Kleine windturbines kunnen een kleine bijdrage leveren aan het opwekken van elektriciteit binnen de grenzen van Wageningen, maar zijn op dit moment financieel nog niet rendabel. Over rivierturbines is weinig bekend, maar voor de meeste types stroomt de rivier Nederrijn waarschijnlijk te langzaam gedurende het grootste deel van het jaar. Financieel gezien zijn grote windturbines binnen Wageningen de meest aantrekkelijke optie.

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting.....	ii
1. Introductie	1
1.1 Situatieschets	1
1.1.1 Landschappelijke ligging Wageningen.....	2
1.1.2 Ecologie	7
1.1.3 Demografie.....	9
1.1.4 Gedrag consument en bedrijven op het gebied van energie.....	10
1.1.5 Omgevingsbeleid en duurzame energiebeleid op EU, nationaal, provinciaal en gemeentelijk niveau	11
1.2 Doelstelling en onderzoeksvragen	13
2. Methode	15
2.1 Multi-Criteria Analyse.....	15
2.2 Stappenplan.....	15
3. Toetsingscriteria	17
3.1 Financiële criteria	17
3.2 Technische Criteria	17
3.3 Milieucriteria	18
3.4 Sociale criteria	20
4. Alternatieven.....	22
4.1 Overzicht alternatieven	22
4.2 Toetsing aan de hand van drie basiseisen.....	24
4.3 Afvallers.....	26
4.4 Kansrijke alternatieven.....	27
5. Toetsing	28
5.1 Grote windturbines	28
5.2 Kleine windturbines.....	32
5.3 Zonnepark.....	36
5.4: Zonneboilers.....	38
5.5 Stromend water (Vortex, rivierturbines).....	40
5.6 Warmte-Koude Opslag (WKO).....	42
5.7: Energie uit asfalt.....	44
5.5 Prestatiematrix: overzicht van de voor- en nadelen van alle alternatieven	47

6. Analyse van de resultaten	48
6.1 Gevoeligheidsanalyse	48
6.1.1 Technische criteria	48
6.1.2 Financiële criteria	48
6.1.3 Milieucriteria	48
6.1.4 Sociale criteria	48
6.1.5 Technisch / Financieel	49
6.1.6 Sociaal/Milieu	49
6.1.7 Milieu/Financieel	49
6.1.8 Technisch/Milieu	49
6.2 Mix van alternatieven:.....	49
7. Trends.....	51
7.1 Algemene trends	51
7.2 SolaRoads	51
7.3 Plant-e	51
7.4 Piëzo-elektriciteit.....	52
7.5 Combinatie thermische en PV-panelen.....	52
7.6 Energieopslag	52
7.6.1 Waterstofgas	52
7.6.2 Micro-organismen	53
7. Discussie en conclusie	54
Referenties	56
Artikelen en rapporten.....	56
Overige referenties.....	62
Appendix A: Financiële berekeningen.....	67

1. Introductie

Door economische en technische ontwikkelingen en door de groeiende wereldbevolking wordt de vraag naar energie steeds groter (Saidur, 2011). Daarnaast produceren verscheidene industriële bedrijven gassen die het milieu vervuilen. De daaraan gerelateerde problemen met global warming en klimaatverandering worden gezien als de grootste bedreigingen voor de mensheid in de 21^e eeuw (Saidur, 2011). Een verdubbeling van de CO₂-concentratie zou al kunnen leiden tot een temperatuurstijging van het aardoppervlak van vier á vijf graden Kelvin (Ramanathan 2009). Om deze redenen wordt er steeds vaker gekeken naar nieuwe en duurzame energiebronnen. Er is echter veel discussie over de term 'duurzaam,' en het begrip wordt vaak verkeerd begrepen (Lior, 2010). Een algemene definitie van duurzaamheid is 'een gelijke verdeling van beperkte hulpbronnen en mogelijkheden in de context van de economie, de samenleving en het milieu' (Alanne, 2006). In de literatuur worden duurzame energiesystemen meestal gedefinieerd in termen van energie-efficiëntie, betrouwbaarheid en impact op het milieu (Alanne, 2006). Met 'duurzame energie' wordt in dit project 'hernieuwbare energie' bedoeld; energie die verkregen wordt uit de natuurlijke omgeving, en continu vernieuwd wordt, zoals wind- en zonne-energie (Verbruggen, 2010). Deze vormen van energie zijn minder schadelijk voor het milieu, doordat ze minder CO₂-uitstoot veroorzaken (Verbruggen, 2010).

Vanuit de overheid worden er op meerdere niveaus beslissingen genomen die moeten leiden tot een duurzamer energieverbruik. Het Rijk heeft bijvoorbeeld als doelstelling dat 20% van de energieconsumptie in 2020 duurzaam geproduceerd moet zijn (Gemeente Wageningen, 2013). De gemeente Wageningen wil in 2030 klimaatneutraal zijn, wat inhoudt dat 50% bespaard moet worden op het gas- en elektriciteitsverbruik ten opzichte van 2008. De overige 50% van de energie die verbruikt wordt, moet duurzaam opgewekt zijn, en kan aangevuld worden met de inkoop van groene stroom en groen gas. Het College van B&W van Wageningen heeft aanvankelijk voorgesteld aan de gemeenteraad om de omgeving van het Havenkanaal aan te wijzen als mogelijke locatie voor windmolens (Gemeente Wageningen, 2014). Rijkswaterstaat heeft op 8 oktober 2014 echter besloten dat de windmolens bij het Havenkanaal definitief niet doorgaan, vanuit het oogpunt van hoogwaterveiligheid (Gemeente Wageningen, 2014).

In de Routekaart Klimaatneutraal staat vermeld dat windenergie erg belangrijk is om de benodigde hoeveelheid energie te bereiken (Gemeente Wageningen, 2012). De afdeling van de ChristenUnie in Wageningen wil de burgers beter informeren over mogelijke alternatieven, omdat de discussie over duurzame energie vooral om windmolens lijkt te draaien. De discussie geeft een vrij eenzijdig beeld van de mogelijkheden op het gebied van duurzame energie. Omdat de aanleg van windmolens een aantal nadelen met zich meebrengt, en het plan van de turbines bij het Havenkanaal inmiddels ook van de baan is, wil de ChristenUnie dat er een beter overzicht komt van de alternatieven.

Dit project is bedoeld als een objectieve analyse, waarbij de voor- en nadelen van ieder alternatief zorgvuldig belicht zullen worden. De ChristenUnie zal dit onderzoek intern gebruiken: het is in eerste instantie vertrouwelijk en zal niet in het openbaar gepubliceerd worden. De resultaten kunnen gebruikt worden door het Wetenschappelijk Instituut van de ChristenUnie, en eventueel ook voorgelegd worden aan de gemeenteraad van Wageningen. De oplossingen die in dit onderzoek aangedragen worden zijn, uiteindelijk ook belangrijk voor alle inwoners van Wageningen, omdat dit onderzoek draait om hun energievoorziening en verbruik.

1.1 Situatieschets

Om een beter beeld te krijgen van de specifieke omstandigheden in de gemeente Wageningen, wordt in het volgende gedeelte de situatie geschetst op een vijftal deelgebieden. Op deze manier wordt het probleem vanuit meerdere invalshoeken bekeken. Deze gebieden zijn: landschappelijke ligging, ecologie, demografie, gedrag van consumenten en bedrijven, en omgevings- en duurzaam energiebeleid.

1.1.1 Landschappelijke ligging Wageningen

In dit hoofdstuk wordt het landschap beschreven en gekeken in hoeverre de situatie van het landschap van Wageningen gebruikt kan worden om energie op te wekken. Dit is belangrijk om te weten voor de mogelijkheden van de alternatieven, aangezien het landschap van invloed is op de winning van een energiebron.

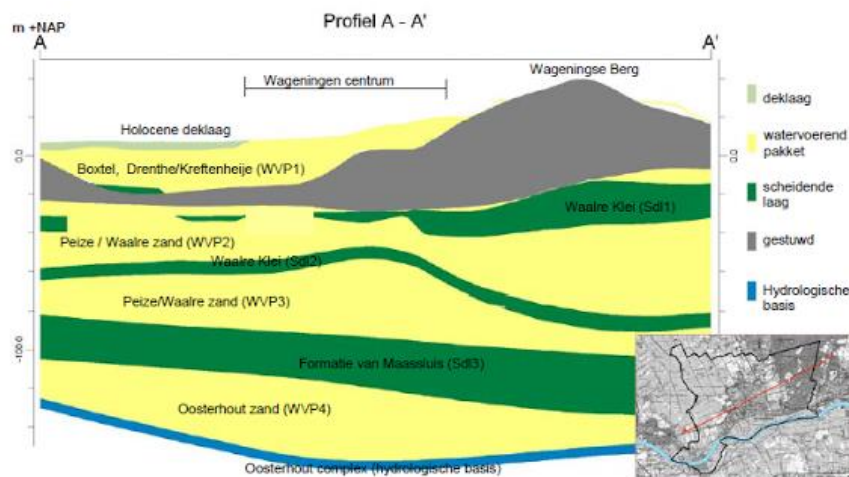
Vorming van het landschap

De stad Wageningen is gelegen aan de rivier Nederrijn in de Gelderse Vallei. Het landschap rondom Wageningen is grotendeels gevormd zoals het nu is in de periode vanaf de voorlaatste ijstijd het Saalien, 200.000 jaar geleden. Tijdens het Saalien heeft het landijs grote delen van Nederland bedekt. Het landijs is gekomen vanuit het noorden tot aan de lijn Haarlem - Hilversum - Rhenen - Wageningen - Nijmegen. De Gelderse Vallei werd gevormd door het ijs. De ondergrond werd door het ijs weggeperst en voortgestuwd. Het voortgestuwde materiaal vormde stuwwallen; aan de oostelijke kant werd de Utrechtse Heuvelrug gevormd die van Amersfoort tot aan Rhenen loopt en aan de westelijke kant het zuidelijke deel van de Veluwe, waaronder de Wageningse Berg tussen Wageningen en Lunteren. De vallei ligt door dit proces op ca 25 meter onder NAP en de stuwwallen op een hoogte van ca 55 meter boven NAP.

De stuwwallen bestaan uit gestuwd materiaal. Naast de stuwwallen ligt een vlakte die bestaat uit geërodeerd materiaal van de stuwwallen dat voornamelijk uit grofzand bestaat. Het zuidelijke deel van de stuwwallen is voornamelijk onder invloed van de rivier de Rijn door erosie verdwenen. (Kok et al., 2014)

Aardlagen

Na het Saalien is het ijs gesmolten en de Gelderse vallei opgevuld met watervoerende pakketten en waterscheidende lagen (zie figuur 1) (Kok et al., 2014). Watervoerende pakketten zijn aardlagen waarin horizontale grondwaterstroming plaatsvindt en die meestal niet met elkaar in verbinding staan. Watervoerende pakketten worden (aan de onderkant) begrensd door waterscheidende lagen. Waterscheidende lagen zijn kleilagen met geringe verticale stroming. De bovenkant van deze kleilaag ligt op 115 meter onder NAP. Door deze laag wordt het grondwaterstromingssysteem begrensd, dit wordt de hydrologische basis genoemd. Boven de kleilaag ligt een laag van 120-170 meter dik met watervoerende pakketten en waterscheidende lagen (Kok et al., 2014).



Figuur 1: Schematische bodemopbouw onder Wageningen. Overgenomen van Ruiten, A. van, Wanders, J., & Vrieswijk, S. (2009). WKO Potentiële kaart gemeente Wageningen. In opdracht van Gemeente Wageningen. Pagina 9. Copyright 2009 TTE Consultants.

In de Gelderse Vallei zijn liggen drie watervoerende pakketten met daartussen twee waterscheidende lagen. (Kok et al., 2014) Deze pakketten/lagen worden hier van boven naar beneden behandeld. Het eerste watervoerende pakket ligt het meest aan het oppervlakte en bestaat uit fijn dekzand uit de laatste ijstijd, het Weichselien, en heeft een dikte van ongeveer 10

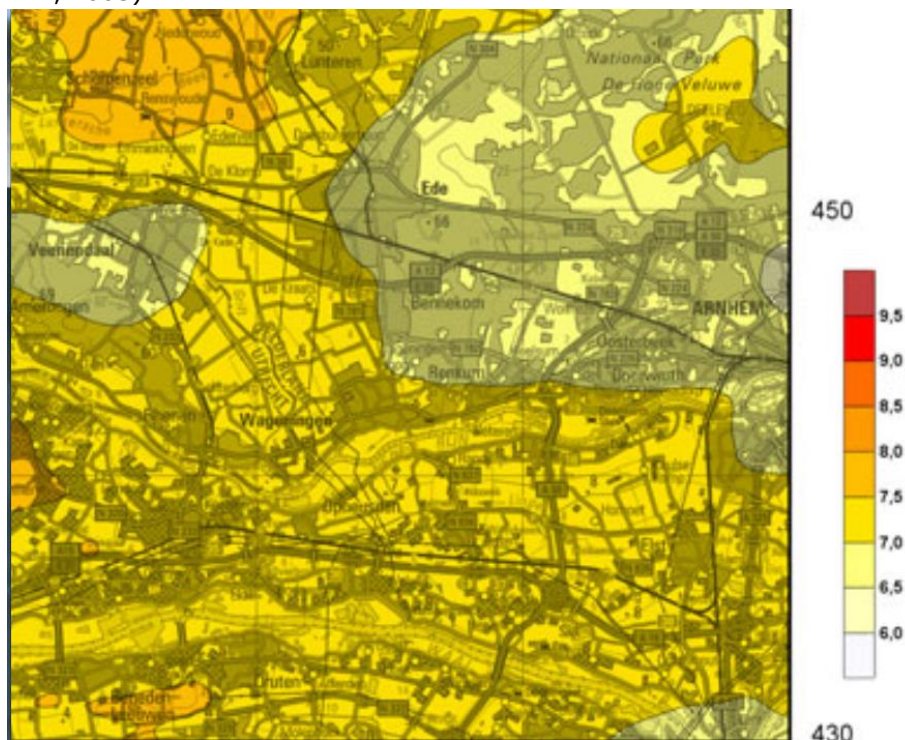
meter. Dan volgt de eerste waterscheidende laag die bestaat uit veenlagen met plaatselijk kleilagen van enkele meters dik. Vervolgens wordt het 10-14 meter dikke tweede watervoerende pakket aangetroffen met afzettingen door vroegere rivieren en ijs, en met een hoger doorlaatvermogen dan het eerste watervoerende pakket. De tweede waterscheidende laag varieert in dikte van 1-5 meter in het oosten tot 15 meter diepte in het zuiden. Het derde watervoerende pakket is gemiddeld 80-90 meter dik en bestaat uit zand uit afzettingen van vroegere rivieren. Deze laag ligt op de hydrologische basis. (Kok et al., 2014)

In Nederland stijgt tussen de 0,5 en 3 kilometer onder het aardoppervlak de bodemtemperatuur met 30 °C elke kilometer dichter naar de aardkern toe (Ter Voorde M. et al., 2014). In de bovenste 70-500 meter onder het aardoppervlak stijgt de bodemtemperatuur met 20 °C. Dit wordt ook wel de temperatuurgradiënt genoemd (Ter Voorde M. et al., 2014). Grondwater stroming kan lokaal voor een verkoeling van de bodemtemperatuur zorgen (Luijendijk E., 2012).

Wind

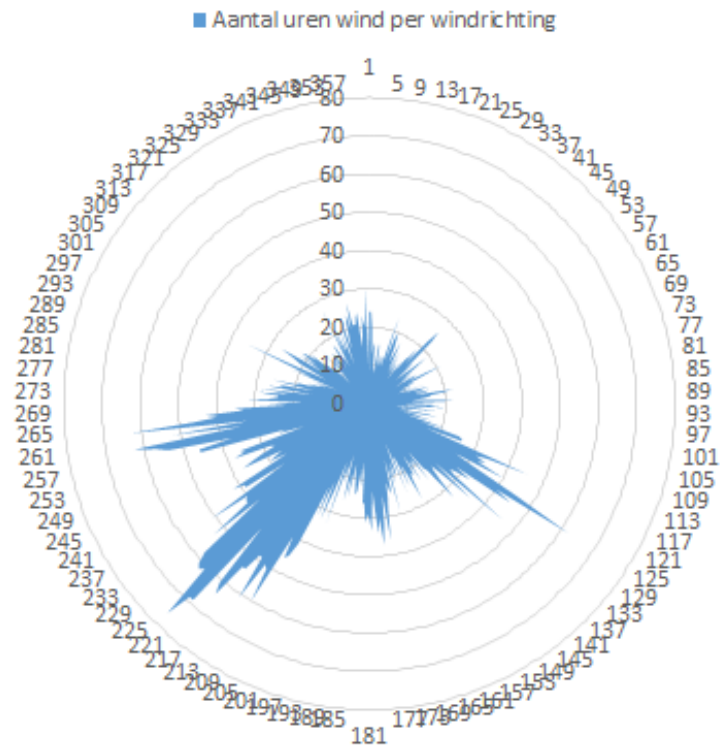
De ligging van de stad Wageningen en de Rijn, de variatie (vanaf enkele meters) in reliëf, bodemgesteldheid en landgebruik (vooral aanwezigheid van bos) zijn factoren die het weer in de omgeving van Wageningen beïnvloeden (Kok et al., 2014). Ook het hoogteverschil van de stuwwallen met de omgeving heeft invloed op het weer, met name de wind (Kok et al., 2014). De Wageningse Berg is zeer bepalend voor de windsnelheid en windrichting. De oostenwind wordt grotendeels tegengehouden door de Wageningse berg. Ten noorden van Wageningen bij noordelijke wind vindt afbuiging van de wind plaats naar het noordoosten over de Eng, de westerflank van de Wageningse Berg (Kok et al., 2014). Als de wind uit het westen waait, wordt deze wind tegengehouden door de Utrechtse Heuvelrug waardoor een deel van de wind verandert van windrichting en richting het zuiden gaat waaien over de uiterwaarden richting het oosten. Door de opwaartse beweging van luchtstromingen veroorzaakt door de stuwwallen kan bewolking ontstaan. (Kok et al., 2014)

Van de windkaart, die de windsnelheid aangeeft in Nederland op 100 meter hoogte (zie figuur 2) is af te lezen dat in de omgeving van Wageningen de wind een snelheid heeft van 7,0-7,5 m/s. Ten oosten van Wageningen waait de wind met een snelheid van 6,5-7,0 m/s. (SenterNovem Nederland B.V., 2005)



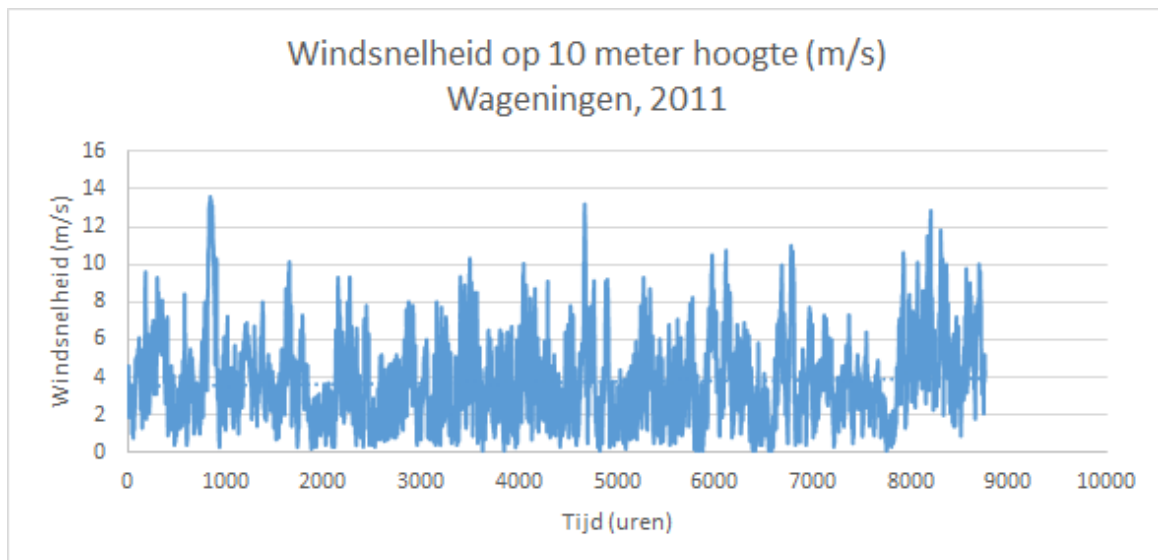
Figuur 2: Windsnelheid in Wageningen. Overgenomen van SenterNovem B.V. (2005). Windkaart van Nederland. Arnhem: SenterNovem. Pagina 27. Copyright 2005, dienst voor het kadaster en de openbare registers, Apeldoorn.

Windverdeling Wageningen 2011



Figuur 3: Windverdeling Wageningen 2011. Gebaseerd op cijfers van Meteorology and Air Quality Group (n.d.) Haarwegdata.

Volgens de windrichting verdeling van het jaar 2011 (zie figuur 3) waait er overheersend een zuid - westen wind. Deze data zijn van het Haarweg meteostation. De wind in het jaar 2011 heeft op 10 meter hoogte gemiddeld een snelheid van 4 m/s (zie figuur 4)



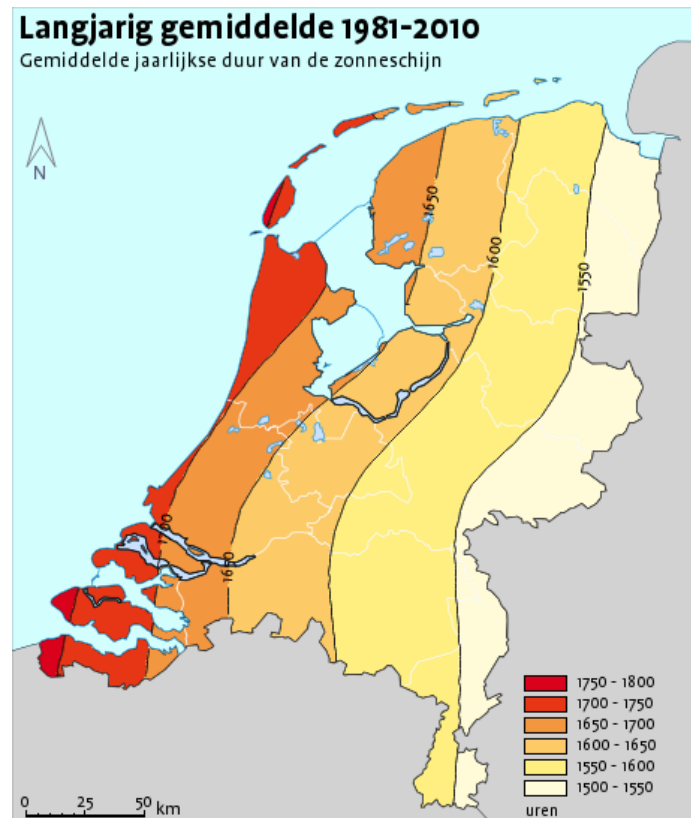
Figuur 4: Windsnelheid op 10 meter hoogte (m/s) Wageningen 2011. Gebaseerd op cijfers van Meteorology and Air Quality Group (n.d.) Haarwegdata.

De windsnelheid is afhankelijk van de hoogte waarop gemeten wordt (Soens, 2005). De windsnelheid is groter bij een grotere hoogte. De omgeving speelt ook een belangrijke rol. Door obstakels (zoals bomen en gebouwen) ondervindt de wind weerstand, wat vaak voor turbulentie

zorgt en wordt de windsnelheid verlaagd (Soens, 2005). Hierdoor is op het hoogte niveau van gebouwen een lagere windsnelheid in de stad dan op het platte land.

Zon

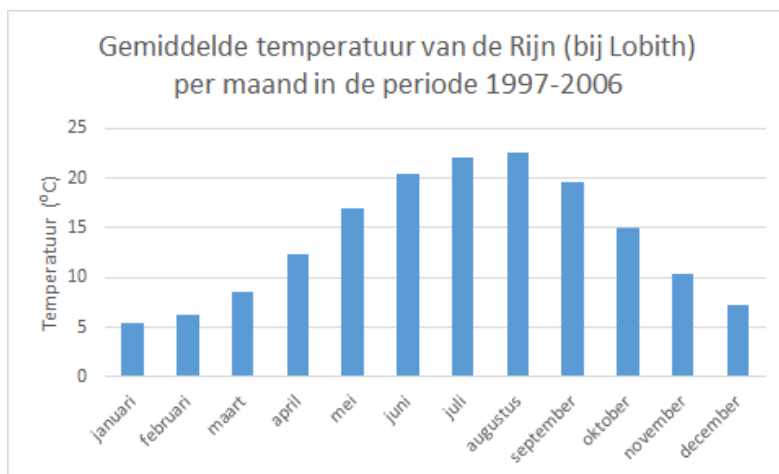
In Nederland heerst een zeeklimaat met zachte winters en koele zomers. Wageningen ligt op 51°58' noorderbreedte 5°40' oosterlengte (Gemeente Wageningen, 2013) nagenoeg in het midden van Nederland. Aan de kust is het gemiddeld aantal zonuren meer dan in het binnenland (zie figuur 5). Wageningen kent dan ook een lager aantal zonuren dan aan de kust. Dit geldt vooral in de lente. Aan de kust waait de zeelucht landinwaarts waar deze opwarmt en er wolkenvorming ontstaat. Hierdoor zorgt de opgewarmde aarde voor meer wolkenvorming landinwaarts zorgt. (Floor K., 2007)



Figuur 5: Gemiddelde jaarlijkse duur van de zonneschijn - Langjarig gemiddelde 1981-2010. Overgenomen uit KNMI (g.d.). Klimaatatlas. Copyright Koninklijk Nederland Meteorologisch Instituut.

Rijn

De Rijn stroomt ten zuiden van Wageningen. De Rijn ontspringt in de Alpen, waar deze smeltwater afvoert (Reggiani & Weerts, 2008). Vervolgens stroomt de Rijn door Duitsland en komt in Lobith Nederland binnen. Daar heeft de rivier een afvoer van 2200 m³/s (Parmet B.W.A.H. et al., 2001) De temperatuur van het water varieert gemiddeld (bij Lobith van 1997 t/m 2006) van 5,5 °C in januari tot en met 22,5 °C in augustus (zie figuur 6). De rivier wordt op haar weg naar zee voornamelijk gevoed door regenwater. (Reggiani & Weerts, 2008)



Figuur 6: Gemiddelde temperatuur van de Rijn (bij Lobith) per maand in de periode 1997-2006. Gebaseerd op gegevens van Pompe, L., Boxem, F., Weijtmans, T., Khanal, G., Lam, T.K., Strauch, S., Schalkwijk, B., Bobasa, A., Muijs, F., Elzinga, J., Sudirjo, E., Beek, B. van der (2012). H2gO - Making rivers work. ACT-project in opdracht van de gemeente Wageningen. Pagina 16. Copyright 2012.

Landgebruik

Wageningen ligt in een rivierenlandschap. Dit landschap wordt gekenmerkt door stroomruggen, oeverwallen en kommen. Stroomruggen en oeverwallen bestaan grotendeels uit zand en kommen uit klei. Deze landschapsvormen hebben grote invloed op het huidige landgebruik. Akker- en weidebouw bevinden zich voornamelijk op de stroomruggen en oeverwallen. In de kommen voornamelijk grasland. (Jongmans A.G. et al., 2013) Ten noordwesten van Wageningen tussen Wageningen, Bennekom, Ede, Veenendaal en Rhenen ligt het Binnenveld. Dit is een agrarisch gebied met weilanden en maïsakkers. Er is een grote veedichtheid (Provincie Gelderland, g.d.)

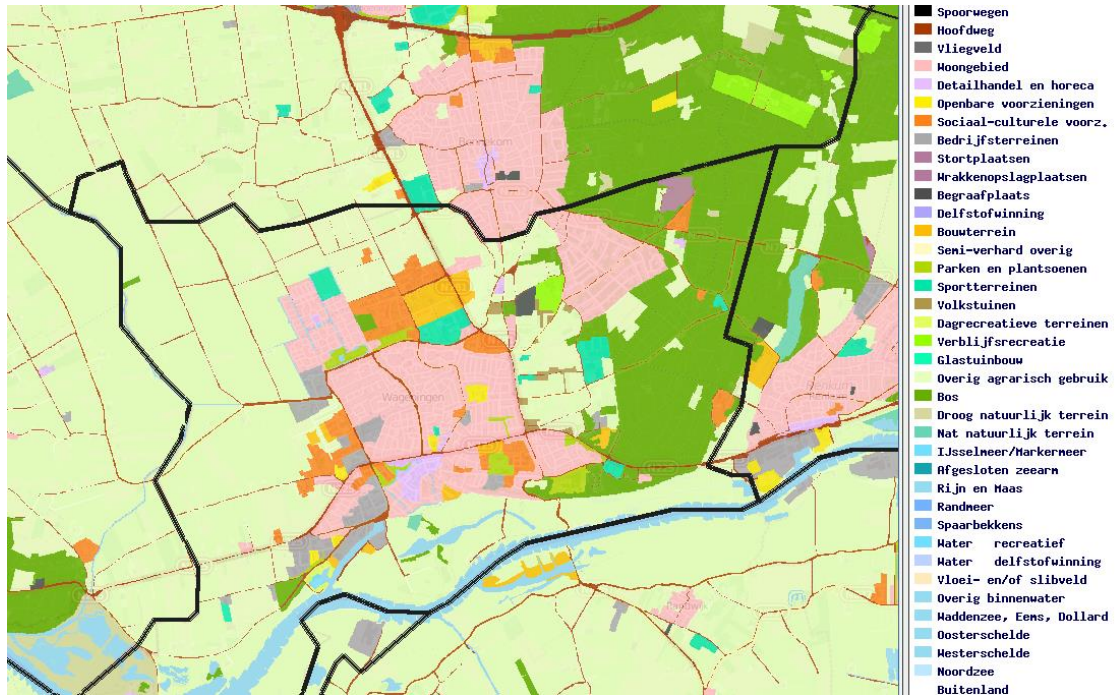
Zoals in tabel 7 te lezen is, word het merendeel van het aantal hectare in Wageningen dan ook gebruikt voor agrarische doeleinden (50,3%). Bebouwd terrein neemt minder dan een kwart van het totale landgebruik in beslag (24%). Als derde beslaat bos en open natuurlijk terrein 17,4% van de gemeente.

	Wageningen		Gelderland		Nederland	
	ha	rel. ¹⁾	ha	rel. ¹⁾	ha	rel. ¹⁾
Verkeersterrein	89	2,9	16 386	3,3	117 149	3,5
Bebouwd terrein	732	24,0	44 654	9,0	344 874	10,2
Semi-bebouwd terrein	53	1,7	5 476	1,1	51 391	1,5
Recreatieterrein	111	3,6	12 990	2,6	97 659	2,9
Agrarisch terrein	1 533	50,3	303 283	61,0	2 275 827	67,5
Bos en open natuurlijk terrein	529	17,4	114 172	23,0	485 003	14,4

¹⁾In % van oppervlakte land.

Figuur 7: Bodemgebruik 2008 naar gemeentelijke en provinciale indeling 2010. Overgenomen van Centraal Bureau voor de Statistiek (2011). Gemeente op maat: Wageningen. Den Haag: CBS. Pagina 29. Copyright 2011 CBS.

Wageningen heeft een totaal oppervlak van 32,35 km², waarvan 30,47 km² land en 1,88 km² water (Gemeente Wageningen, 2013). Het landgebruik in Wageningen is weergegeven in figuur 8.

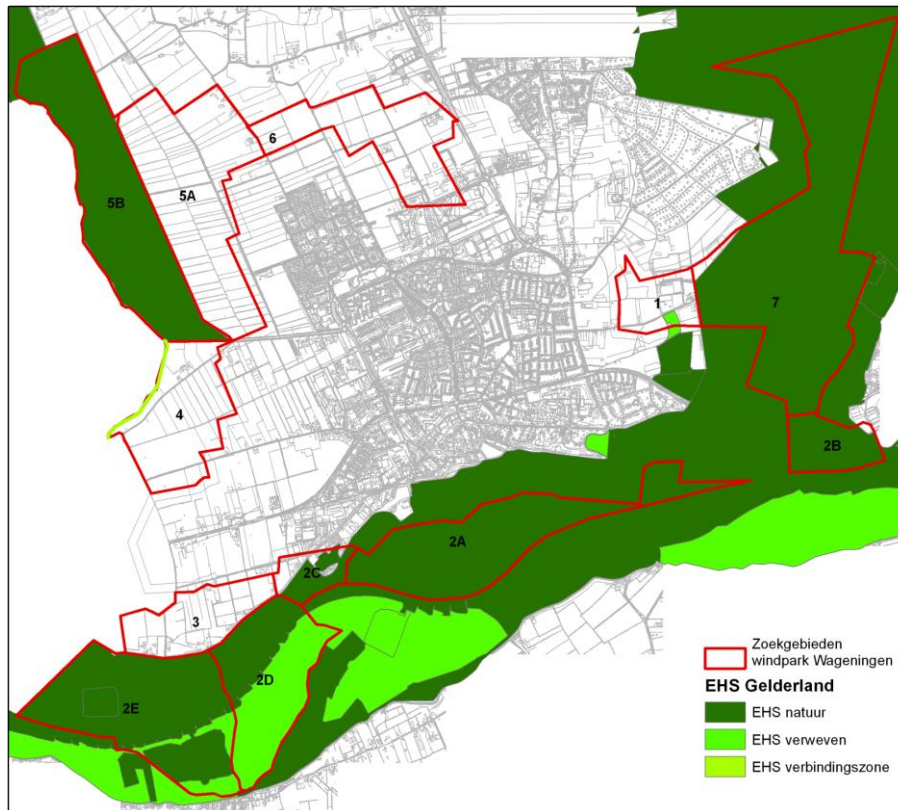


Figuur 8: Landgebruik in Wageningen. Gemaakt in Educatief GIS-portaal (g.d.). <http://kaart.edugis.nl/>

1.1.2 Ecologie

Het aanleggen van nieuwe energiesystemen kan grote consequenties hebben voor lokale ecosystemen en soorten die in de omgeving van Wageningen leven. Een deel van de gemeente Wageningen is namelijk onderdeel van de Ecologische Hoofdstructuur, een netwerk van beschermde natuurgebieden, landgoederen en landbouwgebieden met natuurwaarden (Smits, 2011). Deze gebieden zijn met elkaar verbonden door verbindingzones. Daarnaast zijn in en rondom de gemeente Wageningen drie verschillende Natura2000-gebieden gelegen: Veluwe, Binnenveld en Neder-Rijn (Smits, 2011). Natura 2000 is het netwerk van natuurgebieden in de Europese Unie (Winkelman, 2008).

Er leven in de omgeving van Wageningen een aantal beschermde soorten, maar de effecten van een energiesysteem verschillen sterk per soort (Smits, 2011). De effecten hangen daarnaast af van de grootte van het energiesysteem; bij de aanleg ervan kunnen de natuurlijke habitats van veel soorten aangetast worden. In heel Nederland is het doden, verwonden en verontrusten van beschermde soorten verboden, tenzij er een ontheffing verkregen is (Winkelman, 2008). Voor vogels en vleermuizen geldt daarnaast nog een uitgebreide toets, waarbij gekeken moet worden of er geen alternatieve oplossing beschikbaar is, of dat er afbreuk wordt gedaan aan de instandhouding van de soort. Hieronder worden de belangrijkste beschermde soorten die in Wageningen en omgeving leven behandeld.



Figuur 9: Ligging van de EHS ten opzichte van de deelgebieden in de gemeente Wageningen. Overgenomen van Smits, R.R. Hoefsloot, G., Leusink, E.H.P., Prinsen, H.A.M. (2011). Quickscan effecten op natuur van windpark Wageningen. Culumborg: Bureau Waardenburg B.V. Pagina 17. Copyright 2011 Bureau Waardenburg.

Flora

Voor planten betekent het dat de impact van een energiesysteem waarschijnlijk beperkt is tot het verdwijnen van het habitat, of vermindering van kwaliteit door bijvoorbeeld ontwatering (Winkelman, 2008). Er komen in de Bovenste Polder, het uiterwaardengebied bij Wageningen dat zich vanaf de Nederrijn noordwaarts uitstrekt tot het zuiden van Wageningen en in het noordoosten grenst aan de Wageningse berg een aantal karakteristieke habitattypen voor (KNNV, 2014). Tot deze typen behoren onder andere glanshaver-graslanden, natte graslanden, zeggevegetaties en periodiek droogvallende slikkige rivieroeveren (KNNV, 2014). De mosflora in de uiterwaarden zijn typisch voor het rivierengebied, en dat geldt vooral voor de wilgenbossen, de kribben en de beschoeiingen langs de rivier (KNNV, 2014).

Vogels

Er zijn twaalf soorten beschermde vogels in Wageningen, waaronder de buizerd, gierzwaluw en steenuil (Smits, 2011). Op de zuidelijke oever van de Nederrijn (in deelgebied 2D in figuur 9.) liggen gebieden die door de provincie Gelderland zijn aangewezen als weidevogel en/of ganzenfoerageergebied. De aanleg van een systeem voor energievoorziening kan dit gebied aantasten als gevolg van doorsnijding van het gebied, aantasting van rust en openheid en door verstoring (Smits, 2011).

Daarnaast kan een energievoorziening in de genoemde deelgebieden effect hebben op een aantal niet-broedvogels, zoals de kleine zwaan, ganzen, smient, Kievit en wulp, omdat deze soorten regelmatig in binnendijkse agrarische gebieden foerageren (Smits, 2011).

Zoogdieren

In de gemeente Wageningen komen verschillende soorten grondgebonden zoogdieren voor, zoals de eekhoorn en das (Smits, 2011). Daarnaast zijn er ook enkele waarnemingen gedaan van de steenmarter (Smits, 2011). Bij deze dieren kan verstoring door menselijke aanwezigheid een rol spelen (Winkelman, 2008).

Vleermuizen

Alle soorten vleermuizen die in Nederland voorkomen zijn opgenomen in de Flora- en faunawet. Er komen binnen de gemeente Wageningen een aantal zeldzamere soorten voor, namelijk de gewone baardvleermuis, franjestaart en meervleermuis (Smits, 2011). Vleermuizen gebruiken een netwerk van verblijfplaatsen en verplaatsen zich in een seizoen of in een jaar regelmatig van de ene naar de andere plek (Winkelman, 2008). De verblijfplaatsen zijn vaak verbonden via vliegroutes in het landschap.

Reptielen

Er leven verschillende soorten reptielen in de gemeente Wageningen: van de ringslang en hazelworm zijn grote populaties aanwezig (Smits, 2011). Daarnaast zijn er ook waarnemingen gemeld van de zandhagedis en de levendbarende hagedis in het oosten van de gemeente.

Amfibieën en vissen

In Wageningen komen een aantal soorten amfibieën voor, zoals de kamsalamander en de rugstreeppad (Smits, 2011). Voor amfibieën is vooral het soort water, de mate van droogvallen en de predatie door vissen van belang (KNNV, 2014). Op het moment dat poelen blijven droogvallen, zal dit grote consequenties hebben voor soorten als de kamsalamander (KNNV, 2014). Er leven in de omgeving van Wageningen een aantal beschermde soorten vissen, waarvan vier soorten alleen in de rivier te verwachten zijn (Smits, 2011). Drie andere soorten komen ook in de gemeente voor, zoals de grote modderkruiper. Daarnaast zijn er beschermde soorten die ook in de uiterwaarden voorkomen, zoals de kleine modderkruiper en de bittervoorn (Smits, 2011).

Ongewervelden

Er komen twee soorten beschermde ongewervelde dieren voor binnen de gemeente Wageningen, namelijk de platte schijfhoren en de rivierrombout (Smits, 2011). De larven van de rivierrombout komen in de uiterwaarden voor.

1.1.3 Demografie

Het belang van de invloed van de inwoners van Wageningen moet niet onderschat worden in het oplossen van dit probleem. De gemeente Wageningen heeft aangegeven belang te hechten aan de mening van de burgers in dit debat, omdat zij belangrijk zijn voor de initiering, financiering van projecten en omdat zij de gevolgen ervan dragen. In dit hoofdstuk wordt een kort overzicht gegeven van kenmerken van de Wageningse bevolking.

In 2014 wonen er 37.429 mensen in Wageningen (CBS, 2014) waarvan er bijna 9.000 student zijn. Het opleidingsniveau is ten opzichte van de rest van Nederland hoog (CBS, 2014). Hierdoor is ook het gemiddelde inkomen relatief hoog: €30.400 per jaar. Deze gegevens kunnen van belang zijn voor dit project, omdat de implementatie van duurzame oplossingen (gedeeltelijk) zal moeten steunen op investeringen en inzet van burgers (Gemeente Wageningen, 2012).

Een ander gegeven dat van belang kan zijn, is de verhouding tussen koopwoningen en huurwoningen in de stad. Wageningen heeft, ondanks het grote aantal studenten, veel koopwoningen. In Nederland is gemiddeld minder dan tweederde van de particuliere woningen een koopwoning, terwijl in Wageningen ruim 80% van de huizen bezit is van de inwoner (CBS, 2011). Voor de implementatie van kleinschalige oplossingen (zoals bijvoorbeeld zonnepanelen op daken) is de medewerking van huiseigenaren noodzakelijk. Veel mensen in Wageningen beslissen over hun eigen woning, dus de oplossingen die uit dit rapport naar voren komen zullen aan moeten sluiten bij de wensen van huiseigenaren.

Tot slot is de attitude van de Wageningers ten opzichte van duurzaamheid van belang. De Routekaart naar Klimaatneutraal van de gemeente, kreeg steun van alle politieke partijen op het CDA (tegen) en D66 (verdeeld) na (Hoe stemt uw raad in Wageningen, 2014), toont aan dat

duurzaamheid speelt in Wageningen. Wageningen Universiteit heeft dit jaar voor de derde keer de SustainaBul gewonnen, een prijs voor de duurzaamste Nederlandse universiteit (Studenten voor Morgen, 2014). Er zijn verschillende burgerinitiatieven om Wageningen duurzamer te maken (bijv. Platform Duurzaam Wageningen (2014) en Wageningen Woont Duurzaam (2014)). De gemeente kan gebruik maken van deze initiatieven om maatregelen die in dit rapport worden aangedragen te realiseren.

1.1.4 Gedrag consument en bedrijven op het gebied van energie

Zoals eerder beschreven, is het doel van de gemeente Wageningen 50% van de energie die verbruikt wordt, in 2030 lokaal en duurzaam op te wekken. In dit hoofdstuk wordt in kaart gebracht hoeveel elektriciteit en gas er worden gebruikt binnen de gemeentegrenzen. Op basis van deze getallen wordt bepaald hoeveel en wat voor soort energie duurzaam en lokaal opgewekt moet worden.

In tabel 1 staat het energieverbruik in Wageningen in 2008 uitgesplitst naar huishoudens en bedrijven (Liander, 2008)

Tabel 1: Elektriciteits- en gasverbruik en CO₂-uitstoot in Wageningen in 2008. Tussen haakjes staan de percentages. Gebaseerd op Liander (2008). E-atlas: Inzicht in het energieverbruik van de gemeente Wageningen 2008. Geraadpleegd op 25 september 2014 via: http://www.wageningen.nl/Wonen_milieu_en_verkeer/Natuur_en_milieu/Klimaat/Algemene_info/Energie_in_Beeld

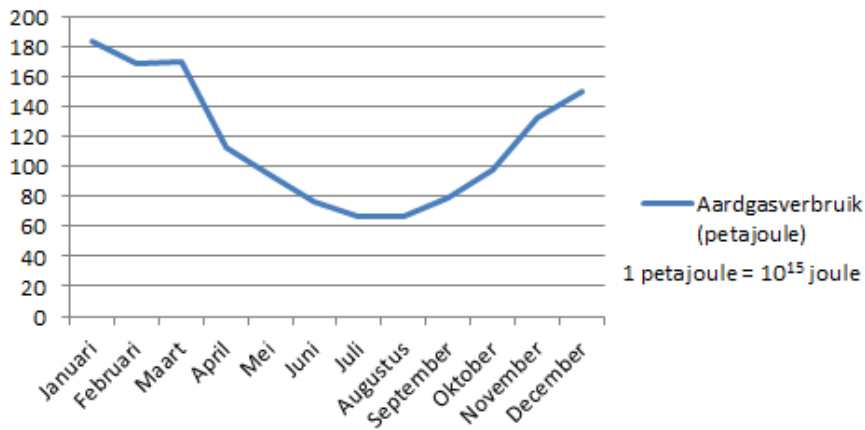
	Elektriciteitsverbruik (miljoen kWh)	Gasverbruik (miljoen m ³)	CO ₂ -uitstoot (kiloton)
Huishoudens	35.9 (21.9)	16.4 (38.4)	50.6 (29.1)
Bedrijven	127.8 (78.1)	26.3 (61.6)	123.1 (70.9)
Totaal	163.7 (100)	42.7 (100)	173.7 (100)

Er wordt ook elektriciteit teruggeleverd aan het net door Wageningse bedrijven en huishoudens, maar zoals in tabel 2 te zien is, is dit maar een fractie van de hoeveelheid elektriciteit die er in Wageningen verbruikt wordt.

Tabel 2: Elektriciteit teruggeleverd aan het net in Wageningen Gebaseerd op Liander (2008). E-atlas: Inzicht in het energieverbruik van de gemeente Wageningen 2008. Geraadpleegd op 25 september 2014 via: http://www.wageningen.nl/Wonen_milieu_en_verkeer/Natuur_en_milieu/Klimaat/Algemene_info/Energie_in_Beeld

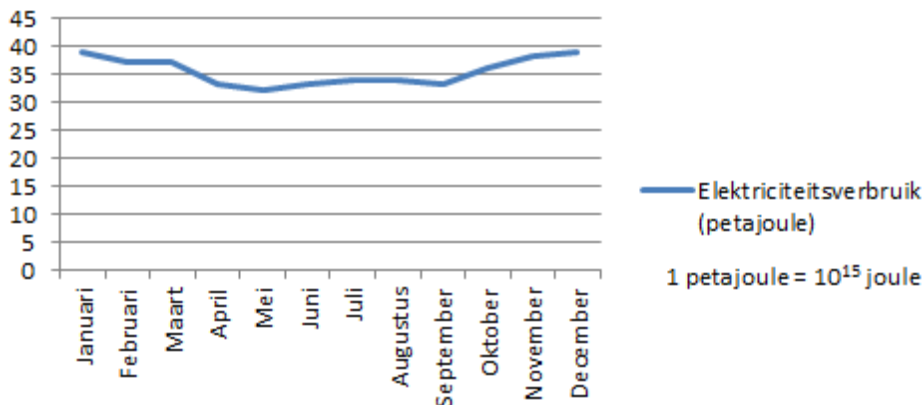
	Elektriciteit (miljoen kWh)
Huishoudens	0.0001
Bedrijven	4.6
Totaal	4.6

Naast het gemiddelde gas- en elektriciteitsverbruik per jaar moet rekening gehouden worden met verschillende patronen per dag en per seizoen. In tegenstelling tot energie uit fossiele brandstoffen, kan de productie van energie uit duurzame bronnen vaak niet aangepast worden aan het verbruik. In figuur 10 is te zien dat er in de wintermaanden ruim twee keer zoveel gas gebruikt wordt dan in de zomer.



Figuur 10: Aardgasverbruik in Nederland in 2013, Gebaseerd op gegevens van CBS Statline (g.d.). <http://statline.cbs.nl/Statweb/>

Het elektriciteitsverbruik is ook hoger in de winter dan in de zomer (zie figuur 11), maar dit verschil is veel minder groot dan de schommeling in gasverbruik.



Figuur 11: Elektriciteitsverbruik in Nederland in 2013. Gebaseerd op gegevens van CBS Statline (g.d.). <http://statline.cbs.nl/Statweb/>

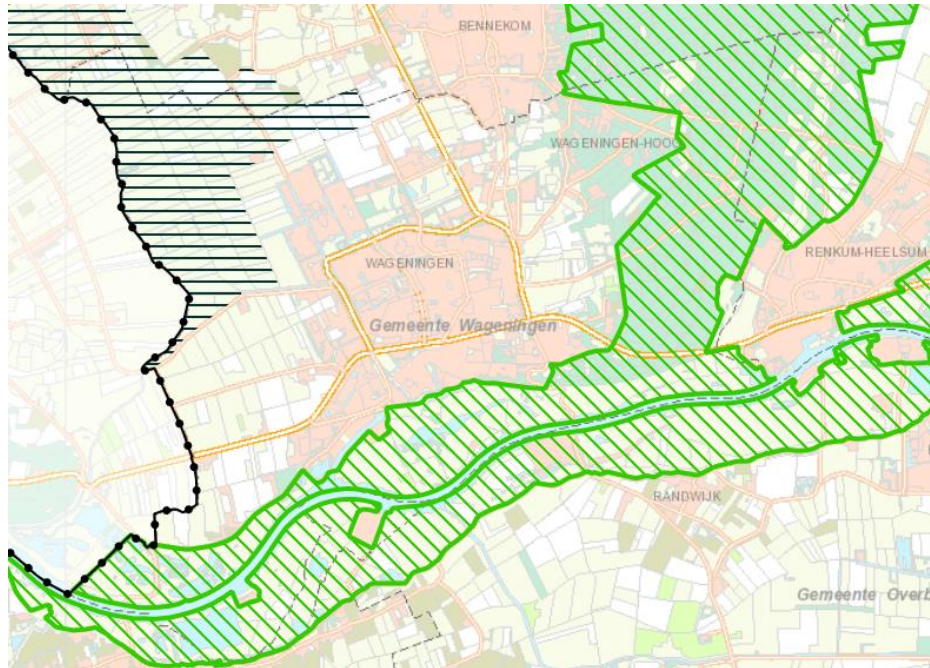
Om deze schommelingen in de vraag op te vangen, moet goed worden nagedacht over mogelijkheden om het aanbod te sturen of om opgewekte energie op te kunnen slaan.

1.1.5 Omgevingsbeleid en duurzame energiebeleid op EU, nationaal, provinciaal en gemeentelijk niveau

In deze paragraaf van de situatieschets wordt er ingegaan op het omgevingsbeleid en tevens het duurzaamheidsbeleid dat voor de gemeente Wageningen is opgesteld. Dit is belangrijk om mogelijke problemen vroegtijdig op te sporen, aangezien bepaalde regelgeving en beleid een mogelijk alternatief al snel zou kunnen ondermijnen. Anderzijds is het ook handig om te weten wat wel goed past binnen het beleid en of de implementatie van bepaalde alternatieven wordt aangemoedigd.

De gemeente Wageningen bestaat uit- en is omringd door diverse landschappen. Vanuit de EU is er onder de habitat- en vogelrichtlijn bepaald dat bepaalde landschappen niet mogen worden aangetast, dat wil zeggen dat bepaalde habitats en diersoorten niet mogen worden verstoord (Kistenkas, 2012). De Veluwe en het merendeel van de uiterwaarden vallen onder deze Europese richtlijnen. Deze richtlijnen werken in Nederland door en worden tezamen de 'Natura 2000' genoemd (Kistenkas, 2012; Provincie Gelderland, 2014d). De Ecologische Hoofdstructuur (EHS) is onderdeel van Rijksbeleid en is dus minder strikt dan de Natura 2000. De laatste valt echter ook onder de EHS, maar wordt zwaarder getoetst (Kistenkast, 2012).

Naast de EHS en Natura 2000 zijn grote delen van het Binnenveld als stiltegebieden bestempeld. Dit betekent dat hier geen activiteiten zijn toegestaan die de geluidsbelasting negatief beïnvloeden (Provincie Gelderland, 2014c; Provincie Gelderland, 2014d). Dit beleid wordt wederom op Europees niveau door middel van de EU-richtlijn 'Omgevingslawaaï' kracht bij gezet (Europees Parlement en de Raad, 2002). Voor stiltegebieden geldt voor de provincie Gelderland hetzelfde als voor de EHS: stilte en rust zijn essentieel. De provincie zelf hanteert hier het principe van 'stand still - one step forward', dat wil in het geval van de stiltegebieden zeggen dat het geluidsniveau niet verder toe moet nemen en bij voorkeur dient af te nemen (Provincie Gelderland, 2014c).



Figuur 12: Natura 2000-gebieden (groen gearceerd) & stiltegebieden (zwart gearceerd). Overgenomen van Provincie Gelderland (2014d). Ruimtelijke plannen: <http://gelderland.planoview.nl/Conceptplannen/>.

Dan liggen er binnen de gemeente ook gebieden die vanuit waterhuishoudkundig perspectief belangrijk zijn. Dit zijn de uiterwaarden, ofwel buitendijks gebied. In de *Handreiking beleidslijn grote rivieren* (Rijksoverheid, 2014) wordt beschreven dat bij hoogwater het gehele rivierbed overstroomt in onder andere dit deel van het rivierengebied. In de toekomst zal de afvoer van de Rijn alleen maar groter worden en de ruimte rondom de rivier dat kan en mag overstromen, is schaars. Hierdoor is de doorstroming van vitaal belang. Obstakels zijn in eerste instantie niet gewenst, aangezien deze zorgen voor "een significant waterstandsverhogend effect en belemmeren de afvoer" (Rijksoverheid, 2014). In deze gebieden wordt het stroomvoerend regime toegepast, wat inhoudt dat alleen riviergebonden activiteiten zijn toegestaan en uitzonderingen alleen mogelijk zijn als de situatie aan specifieke criteria voldoet (Rijksoverheid, 2014).

De Europese Unie heeft de ambitie om in 2050 de CO₂-uitstoot met 80 % te verminderen, hiervoor is een energie-stappenplan 2050 gemaakt. Binnen deze ambitie vallen een aantal initiatieven, waaronder het klimaat- en energiepakket, waarin wordt gesteld dat voor 2020 een 20% reductie op broeikasgas emissies ten opzichte van 1990 dient te zijn behaald (European Commission, 2014). De maatregelen die in 2014 zijn voorgesteld bestaan uit een bindende doelstelling van 27% duurzame energie en tevens een energiebesparing van 30% in 2030 (Europa Nu, 2014). Nederland committeert zich binnen deze doelstellingen aan een reductie van 15 % broeikasgassen en aan 14% duurzame energie opwekking voor 2020 (Europa Nu, 2014; Provincie Gelderland, 2012).

De ambitie van de provincie Gelderland is om in 2020 al 20% aan energiebesparing bij te dragen ten opzichte van 2010. Ze willen in 2020 in totaal voor 14% afhankelijk zijn van duurzame energie. Hieronder valt zonne-energie, bio-energie, windenergie, waterkracht en warmte via

warmtepompen/-wisselaars uit (diepe) bodem, water en lucht (Provincie Gelderland, 2012). Dit doel is gelijk aan het tussendoel dat Europa voor Nederland heeft opgesteld. Uiteindelijk wil de provincie Gelderland in 2050 'energie neutraal' zijn. (Provincie Gelderland, 2012). Dit doel komt terug in de zogenaamde *Energietransitie* (2012) die zij heeft opgesteld. Een doelstelling van de energietransitie is dat de provincie wil bijdragen aan duurzame energie, door bijvoorbeeld financiële steun te bieden, goede randvoorwaarden te stellen en vernieuwingsprojecten te ondersteunen (Provincie Gelderland, 2012). Projecten die hieronder vallen zijn onder andere de windvisie van Gelderland, waarin de provincie haar plannen en doelstellingen met betrekking tot windenergie in uitlegt, en de helpdesk zon, waar mensen terecht kunnen met vragen over zonne-energie (Provincie Gelderland, 2014b).

Een ander streven van de provincie is het creëren van een biobased economy: "een economie waarin fossiele brand- en grondstoffen zo veel mogelijk vervangen worden door biomassa: gewassen (zoals planten) en reststromen uit de landbouw, landschap en voedingsmiddelenindustrie (provincie Gelderland, 2014a)."

Om haar bijdrage te leveren aan de oplossing van het wereldwijde klimaatprobleem wil de gemeente Wageningen reeds in het jaar 2030 'klimaatneutraal' zijn. Met 'klimaatneutraal' wordt bedoeld dat de netto broeikasgas uitstoot van Wageningse bedrijven en huishoudens wordt teruggebracht naar nul. De voornaamste bijdrages hieraan zijn het besparen op energieverbruik en de realisatie van duurzame energieproductie (Gemeente Wageningen, 2012). De doelstellingen voor 2030 van de gemeente op dit gebied zijn als volgt:

- 50% besparing op gas- en energieverbruik ten opzichte van het jaar 2008.
- Duurzaam opwekken van de overige energiebehoefte, aangevuld met inkoop van groene stroom en groen gas. De focus bij deze doelstelling ligt op de productie van duurzame energie.
- 60% minder uitstoot van voertuigbrandstoffen in 2030 en 100% in 2050.

Om deze doelstellingen te behalen heeft de gemeente een *Routekaart Wageningen klimaatneutraal in 2030* (2012) opgesteld, waarin het beoogde pad naar klimaatneutraliteit in meer detail en met meer concrete doelstellingen wordt besproken.

1.2 Doelstelling en onderzoeksvragen

Het uiteindelijke doel van dit project is het opstellen van een overzicht met realistische en duurzame alternatieven voor de drie windturbines uit het oorspronkelijke plan van de gemeente. De verschillende alternatieven die in deze vergelijking worden behandeld leveren verschillende vormen van energie. Om de alternatieven onderling te kunnen vergelijken is het nodig om die verschillende vormen van energie uit te drukken in dezelfde eenheid.. Daarom worden de energieopbrengsten van de alternatieven uitgedrukt in MWh en in het aantal huishoudens dat van energie kan worden voorzien in de totale energiebehoefte (waarbij dus geen onderscheid wordt gemaakt tussen elektriciteit en gas). Volgens Velthuijsen (2014) leveren drie windturbines van het type Senvion MM92 2MW in de uiterwaarden nabij de haven ca. 16.000 MWh per jaar op. Het totale elektriciteitsverbruik van de particuliere huishoudens in Wageningen was ca. 35,9 miljoen kWh in het jaar 2008. Het gemiddelde elektriciteitsverbruik van de 20.720 Wageningse particuliere huishoudens is 1,73 MWh per jaar (1).

$$1. \quad 35.900 \text{ MWh} / 20.720 \approx 1,73 \text{ MWh}$$

Het totale elektriciteitsverbruik van de particuliere huishoudens in Wageningen was ca. 35,9 miljoen kWh in het jaar 2008. Het gasverbruik in hetzelfde jaar is ca. 16,4 miljoen m³ gas. Dit komt overeen met een verbrandingswaarde van 144.183 MWh (2). De totale particuliere energievraag van Wageningen in 2008 was ca. 180.083 MWh (3). Wageningen heeft op 1 januari 2013 20.720 huishoudens. Hieruit volgt dat de totale energievraag per huishouden in Wageningen ongeveer 8,7 MWh per jaar is (4).

2. $16.400.000 * 31.65 = 519.060.000 \text{ MJ} = 144183333 \text{ kWh} \approx 144.183 \text{ MWh}$
3. $35.900 \text{ MWh} + 144.183 \text{ MWh} \approx 180.083 \text{ MWh}$
4. $180.083 \text{ MWh} / 20.720 \approx 8,7 \text{ MWh}$

De beoogde windturbines kunnen bij een opbrengst van 16.000 MWh per jaar de totale energievraag (inclusief gasverbruik) vervullen van ca. 1.839 Wageningse huishoudens (5).

5. $16.000 / 8.7 = 1.839 \text{ huishoudens}$

In dit onderzoek komt de focus te liggen op het directe energiegebruik (gebruik van gas en elektriciteit) en niet op het indirecte gebruik, zoals consumptie en het gebruik van goederen en diensten (Gemeente Wageningen, 2012). Er zal zowel naar bronnen gekeken worden die warmte opleveren, als naar bronnen die elektriciteit opleveren, omdat duurzaam opgeleverde warmte ook bijdraagt aan een klimaatneutraal Wageningen. Het gaat hier niet alleen om bestaande energiebronnen, maar ook om mogelijke nieuwe bronnen, die misschien nog niet voldoende belicht zijn en daardoor over het hoofd zijn gezien. De alternatieven die bekeken worden moeten uiteindelijk hetzelfde rendement halen als drie windturbines, om 1.839 huishoudens per jaar van energie te voorzien. Om een goed en objectief beeld te krijgen van de duurzame alternatieven die haalbaar zijn voor de gemeente Wageningen, is het noodzakelijk om een zo compleet mogelijk overzicht te krijgen van alle alternatieven. Om die reden wordt het centrale probleem opgesplitst in de volgende drie onderzoeksvragen:

1. Welke criteria zijn van belang bij het beoordelen van de geschiktheid van alternatieve energiebronnen?
2. Welke duurzame energiebronnen en technieken om energie te winnen bestaan er of zijn in ontwikkeling?
3. Wat zijn voor- en nadelen van de verschillende alternatieven op basis van de criteria?

In het volgende hoofdstuk lichten we eerst de gebruikte methode toe. Vervolgens kijken we naar de belangrijkste criteria en de meest geschikte alternatieven voor Wageningen. Deze alternatieven zullen vervolgens getoetst worden aan de hand van de criteria, en bij deze toetsing zullen de resultaten op een overzichtelijke manier gepresenteerd worden in een prestatiematrix. Daarnaast wijden we ook een gedeelte aan trends: duurzame alternatieven die al wel in ontwikkeling zijn, maar die nog in een innovatief stadium zijn en nog niet binnen enkele jaren toegepast kunnen worden in Wageningen. In de discussie wordt er uiteindelijk een gevoeligheidsanalyse gedaan, waarbij er verschillende waardes gehecht kunnen worden aan de criteria. Dit houdt in dat bepaalde alternatieven aantrekkelijker zijn als er bijvoorbeeld meer waarde wordt gehecht aan specifieke criteria. Tenslotte geven we ook een conclusie, waarbij we aangeven wat naar aanleiding van deze analyse de mogelijkheden zijn voor de winning van duurzame energie in Wageningen.

2. Methode

In dit hoofdstuk worden de deelvragen vertaald in een concrete aanpak. Er wordt uitgelegd waarom er voor welke methode is gekozen en het stappenplan voor de uitvoering van het onderzoek wordt uitgelegd. Voor de beantwoording van de deelvragen is gebruik gemaakt van een Multi-Criteria Analyse. Deze methode heeft verschillende voordelen: de resultaten zijn overzichtelijk en transparant, waardoor iedereen kan zien waar het door komt dat bepaalde alternatieven beter scores dan andere (Department for Communities and Local Government, 2009). Daarnaast is het een methode die gebruikt kan worden om consensus te bereiken: individuen kunnen verschillende gewichten aan de verschillende criteria geven en dat kan worden doorberekend in de uiteindelijke score van elk alternatief (Department for Communities and Local Government, 2009).

2.1 Multi-Criteria Analyse

Een MCA bestaat uit verschillende stappen (Department for Communities and Local Government, 2009):

1. **Bepaal de context waarin het project plaatsvindt.**
 - a. Identificeer het doel van het project.
 - b. Identificeer sub-doelen.
 - c. Zet de doelen om in meetbare criteria.
2. **Identificeer alternatieve opties.**
3. **Meet iedere alternatieve optie aan de hand van de criteria.**
4. Geef een gewicht aan de criteria.
5. Combineer de gewichten en scores voor elk alternatief om tot een totaalscore te komen.
6. Beoordeel de resultaten, evalueer en orden de alternatieven.
7. **Gevoeligheidsanalyse:** in hoeverre is het resultaat afhankelijk van de gewichten die aan de verschillende criteria worden gegeven?

Stap 1 tot en met 3 zijn uitgevoerd voor dit project. Stap 4 tot en met 6 van de MCA zijn niet uitgevoerd in dit project. De verschillende alternatieven zijn geëvalueerd aan de hand van de opgestelde criteria, maar er zijn geen gewichten aan de verschillende criteria gehangen, omdat die gewichten te persoonsgebonden zijn en niet objectief. Stap 7 is wel uitgevoerd: in het concluderende hoofdstuk zijn verschillende scenario's gegeven: afhankelijk van het gewicht dat aan de verschillende criteria wordt gegeven zijn andere alternatieven geschikter om de Wageningse doelen te bereiken.

2.2 Stappenplan

De eerste twee delen van stap 1 (doel en subdoelen van het project bepalen) zijn al beschreven in de introductie van dit rapport. Het laatste onderdeel van stap 1, het omzetten van doelen in meetbare criteria, is verwoord in deelvraag 1:

Deelvraag 1: Welke criteria zijn van belang in het beoordelen van de geschiktheid van alternatieve energiebronnen?

Om de verschillende mogelijke alternatieven te beoordelen zijn diverse criteria gebruikt. Aan de hand van brainstormsessies, wetenschappelijke artikelen waarin voor- en nadelen van verschillende duurzame energiebronnen zijn besproken, documenten van de gemeente Wageningen en gesprekken met experts op het gebied van duurzame energie binnen Wageningen UR is een lijst gemaakt van criteria die relevant zijn voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen. In de lijst zijn zo veel mogelijk criteria opgenomen om de analyse zo volledig mogelijk te maken. Om voor elk criterium tot een beoordeling te komen moesten ze gekoppeld worden aan variabelen, die de criteria meetbaar maken. Omdat de meeste criteria op verschillende manier geoperationaliseerd konden worden, is gekozen voor de variabelen die vaak gebruikt

worden in onderzoek of die van belang zijn voor Wageningen. In het hoofdstuk 'criteria' is uitgelegd waarom voor de specifieke variabelen is gekozen.

De tweede stap van MCA is het identificeren van alternatieve methoden om duurzame energie op te wekken in Wageningen. De tweede deelvraag sluit daarop aan:

Deelvraag 2: Welke duurzame energiebronnen (zoals gedefinieerd in de introductie) en technieken om ze te winnen bestaan er of zijn in ontwikkeling?

Naast de alternatieven die al door de gemeente Wageningen zijn bekeken zijn nieuwe alternatieven opgenomen in de lijst. Door middel van brainstormsessies, literatuuronderzoek en gesprekken met Bas van Vliet (Universitair docent bij de leerstoelgroep Milieubeleid aan Wageningen UR, o.a. gespecialiseerd in energie-infrastructuur en sociaal-technische milieuveranderingen) is een lange lijst met alternatieven opgesteld. Wagens een beperkte tijd om het project uit te voeren zijn alleen de kansrijkste alternatieven meegenomen in de volgende stappen van de MCA. De alternatieven in de lijst zijn getoetst aan drie basiseisen:

- Omdat er maar 15 jaar is om 50% van de energie die in Wageningen gebruikt wordt op een duurzame, lokale manier op te wekken, moet de benodigde technologie nu of in de nabije toekomst beschikbaar zijn.
- De technologie moet aansluiten bij de Wageningse situatie (grootschalige alternatieven, zoals de aanleg van een stuwmeer, zullen niet worden meegenomen, omdat de invloed daarvan veel verder gaat dan de Wageningse gemeentegrenzen).
- De technologie moet een substantiële bijdrage kunnen leveren aan het behalen van de doelen van de gemeente Wageningen. Dat betekent dat alleen alternatieven die op grote schaal kunnen worden ingezet worden meegenomen in de analyse.

Alleen alternatieven die voldoen aan deze eisen worden meegenomen in de volgende stap van de analyse.

In de derde stap van de MCA worden de resultaten van de eerste twee deelvragen gecombineerd. De alternatieven die geselecteerd zijn getoetst aan de lijst met criteria. De deelvraag die hiermee beantwoord is:

Deelvraag 3: Wat zijn voor- en nadelen van de verschillende alternatieven op basis van de criteria?

De benodigde informatie voor deze analyse is uit wetenschappelijke literatuur en uit interviews met experts op het gebied van de specifieke technologieën gehaald. Bas van Vliet, werkzaam bij de leerstoelgroep Milieubeleid, en Ingo Leusbrock van de leerstoelgroep Environmental Technology hebben veel kennis over voor- en nadelen van verschillende alternatieven aangedragen. Michiel van der Wal heeft specifiek over het alternatief Warmte-Koude opslag verteld vanuit zijn rol als energiecoördinator van Wageningen UR. De resultaten zijn per alternatief verwerkt in dit rapport. Daarnaast is een samenvatting van de resultaten gemaakt in de vorm van een prestatiematrix.

De laatste stap van de MCA is de gevoeligheidsanalyse. In deze stap is beschreven welke alternatieven het meest geschikt zijn om de doelstelling van de gemeente te bereiken, afhankelijk van de gewichten die aan de criteria worden gegeven. Hier zijn dus als-dan scenario's gegeven: als veel gewicht wordt gegeven aan criterium A, dan scoort alternatief B goed.

3. Toetsingscriteria

Aan de hand van onderstaande criteria zullen we de verschillende energiebronnen toetsen en deze met elkaar vergelijken. De criteria zijn in te delen in vier koppen; financieel, technisch, milieu en sociaal.

3.1 Financiële criteria

Als financiële criteria gebruiken we een aantal veel gebruikte investeringsafwegingen. Het is hierbij belangrijk dat de juiste kosten en baten in beschouwing worden genomen. Zo zijn er directe en indirecte kosten en baten die een rol kunnen spelen. Indirecte kosten zijn bijvoorbeeld het verlies van banen (en dus inkomsten voor mensen) als gevolg van een energieproject. Vanwege de relatief kleine schaal van dit project laten we deze indirecte kosten en baten buiten beschouwing in de financiële analyse en zullen we ons focussen op geldstromen die direct met de constructie, onderhoud en operatie van de verschillende alternatieven gemoeid zijn. Hieronder worden de criteria en de manier waarop ze gemeten worden op een rij gezet.

Investeringskosten

Dit zijn de investeringskosten voor constructie inclusief infrastructuur (euro / output) zonder rente op lening & lonen etc. (Stein, 2013). Het gaat hier om één som geld, deze weerspiegelt de totale omvang van de investering en het mogelijke risico.

Meetbaarheid: Investeringskosten zijn goed meetbaar in eenheden geld (euro's). Echter moet er wel goed worden onderzocht wat precies de kosten zijn van de specifieke techniek op de specifieke plek en de daarbij horende aansluitkosten. In principe staat de output die een installatie moet opleveren vast (dit is 11% van de huidige energiebehoefte van Wageningen) en is het variabele deel de 'hoeveelheid' investering die nodig is om dit te halen. Achteraf kan echter blijken dat er meer of minder energie wordt opgewekt dan van tevoren is ingeschat, wat invloed kan hebben op de daadwerkelijke uitkomst.

Kostenefficiëntie (€/kWh)

Met kostenefficiëntie meten we hoeveel geld het kost om één kWh aan stroom op te wekken. Hierbij worden de investeringskosten en de jaarlijkse onderhoudskosten bij elkaar opgeteld voor de technische levensduur van de techniek en vervolgens gedeeld door de hoeveelheid kWh de techniek in deze levensduur oplevert.

Meetbaarheid: Om de kostenefficiëntie te meten moeten de jaarlijkse kosten van een techniek in kaart gebracht worden. Voor veel duurzame energie technieken zijn hier kengetallen voor verkrijgbaar waarmee goed te werken valt. Daarnaast zijn de investeringskosten nodig, die in het eerste criterium al berekent zijn.

Terugverdienperiode in jaren

De terugverdienperiode is het aantal jaren waarin de initiële investering wordt terugverdiend. Hierbij wordt de tijdswaarde van geld niet in beschouwing genomen (kosten en opbrengsten in de toekomst worden niet verdisconteerd).

Meetbaarheid: Om de terugverdienperiode te berekenen is informatie nodig van de investeringskosten en jaarlijkse kosten en opbrengsten. De eerste twee zijn al berekend in de criteria 'investeringskosten' en 'kostenefficiëntie'. De opbrengsten op jaarbasis moeten worden berekend door de jaarlijkse output (in kWh) te vermenigvuldigen met de daarvoor beschikbare vergoeding.

3.2 Technische Criteria

Haalbaarheid op technisch vlak ligt aan de basis van beoordeling van de verschillende alternatieven. Aan de hand van de technische criteria proberen we te beoordelen of een alternatief fysiek mogelijk is, of hoeveel extra werk het met zich mee zou brengen op dit vlak.

Veiligheid

Welke risico's brengt de techniek met zich mee voor bijvoorbeeld de gezondheid van de omgeving, beschikbaarheid van energie etc.

Meetbaarheid: Omdat het moeilijk is om hier een kwantitatief bedrag aan te hangen, zal dit voornamelijk een kwalitatieve analyse worden van de verschillende aspecten die een techniek met zich mee brengt die mogelijk een risico vormen.

Opbrengst

Met opbrengst wordt de hoeveelheid opgewekte energie in een jaar gemeten en vergeleken met de opbrengst van de hoeveelheid energie die drie windmolens van het merk Senvion (type MM92) zouden opwekken.

Meetbaarheid: Dit criterium is goed meetbaar, daar het goed te achterhalen moet zijn wat er in en uit een bepaalde energie opwekker gaat aan energie. Omdat het doel van 16.000 Mwh per jaar vast staat, wordt er hier gemeten hoeveel eenheden van een bepaalde technologie nodig zijn om dit doel te halen.

Oppervlaktegebruik (in hectares)

Hoeveel vierkante meters grond of ander oppervlakte gebruikt de technologie.

Meetbaarheid: Oppervlaktegebruik is goed te meten in het aantal hectares dat een bepaalde techniek gebruikt. Het is echter lastiger om een waardeoordeel te geven over de waarde van het oppervlakte dat wordt gebruikt. Zonnepanelen, bijvoorbeeld, worden vooral geïnstalleerd op daken, waar men weinig last van ondervindt. Andere technieken, zoals windparken of biomassageneratoren gebruiken grond die ook voor bijvoorbeeld recreatie doeleinden geschikt zou kunnen zijn.

Invloed variabiliteit energiebron

Hierbij wordt bedoeld welke invloed de energiebron heeft op de energieopwekking door de energie opwekker. En hoe beïnvloed de variabiliteit van de energiebron het vermogen om energie op te wekken.

Meetbaarheid: Als de energiebron erg variabel is over een bepaalde tijd, dan is de energie opbrengst ook variabel in dezelfde periode. Terwijl de energie vraag vraag naar een constant energievermogen en deze wil leveren en aanbieden. Dit criterium is lastig om in kwantitatieve termen te meten.

3.3 Milieucriteria

Als belangrijkste milieucriteria worden een aantal schadelijke emissies en stoffen behandeld; daarnaast worden ook zaken als horizonvervuiling en geluidsoverlast meegenomen. Tenslotte wordt ook gekeken naar de effecten op habitats en soorten.

Emissies

CO₂:

Koolstofdioxide (CO₂) is een van de belangrijkste broeikasgassen (Ramanathan, 2009). De CO₂ in de atmosfeer voorkomt dat warmte verloren gaat; doordat de hoeveelheid CO₂ toeneemt, wordt er meer warmte vastgehouden en neemt het broeikaseffect toe (Ramanathan, 2009).

Meetbaarheid: er moet vastgesteld worden wat de gemiddelde uitstoot van CO₂ van het energiesysteem is (in ton per jaar),

Besparen van CO₂-emissie

Het besparen van de uitstoot van CO₂ heeft vooral betrekking op de uitstoot van CO₂ door energiecentrales (Cavallaro, 2005). Duurzame energiesystemen zouden de energie die geleverd wordt door energiecentrales kunnen compenseren, waardoor de uitstoot van CO₂ verminderd wordt.

Meetbaarheid: er moet vastgesteld worden hoeveel er bespaard wordt in vergelijking met een systeem dat gebruikt maakt van conventionele brandstoffen (in ton per jaar).

Methaan

Methaan (CH₄) is het tweede belangrijkste broeikasgas na CO₂ dat genoemd wordt in het Kyoto Protocol (Shine, 2005). De effecten van methaan zijn echter veel sterker: 1 ton methaan-uitstoot staat gelijk aan 21 ton CO₂-uitstoot (Upton, 2008).

Meetbaarheid: er wordt een schatting gegeven van de hoeveelheid methaan die geproduceerd wordt door het energiesysteem, in kg/jaar.

NO_x

NO_x is een verzamelnaam voor de stikstofoxides NO en NO₂. Deze stoffen kunnen bijdragen aan luchtvervuiling en klimaatverandering (Wang, 2009). Er kunnen chemische reacties optreden tussen NO_x en andere stoffen, waaronder ammonia, waardoor toxische producten kunnen ontstaan die de gezondheid aantasten en biologische mutaties veroorzaken (Wang, 2009).

Meetbaarheid: de hoeveelheid NO_x die geproduceerd wordt door het energiesysteem wordt geschat in kg/jaar.

SO₂

Zwavel dioxide (SO₂) is een schadelijk gas voor het milieu, en bij de oxidatie ervan kan er H₂SO₄ ontstaan, waardoor er zure regen kan ontstaan (Wang, 2009). Daarnaast kan SO₂ longziektes en vroegtijdig sterven veroorzaken.

Meetbaarheid: de hoeveelheid SO₂ die geproduceerd wordt door het energiesysteem wordt geschat in kg/jaar.

Fijnstof

Bij het omzetten van SO₂ en de emissie van NO_x kan er fijnstof (PM10) in de atmosfeer gevormd worden. Met PM10 worden deeltjes met een diameter tot 10 µm bedoeld (RIVM, 2014). Dit stof kan licht weerkaatsen, en nevelige condities veroorzaken, waardoor het zicht belemmerd wordt. Daarnaast kan het stof ook een risico opleveren voor de gezondheid van mensen (Wang, 2009).

Meetbaarheid: de hoeveelheid fijnstof die geproduceerd wordt door het energiesysteem wordt geschat in kg/jaar.

Restafval en zware metalen

Energiesystemen kunnen ook toxische stoffen als restproducten produceren, zoals zware metalen (bijvoorbeeld lood), die in de bodem of in het water terecht kunnen komen. Per energiesysteem moet nauwkeurig gekeken worden welke afvalstoffen er precies vrijkomen.

Meetbaarheid: hierbij kunnen de hoeveelheden van de geproduceerde afvalstoffen geschat worden in kg/jaar.

Visuele impact

De visuele aspecten hebben betrekking op de verstoring van het uitzicht die een bepaald energiesysteem kan hebben. Dit houdt onder andere in de verstoring van het landschap, de afstand tot de dichtstbijzijnde waarnemer, en het type en de grootte van het systeem (Cavallaro, 2005).

Meetbaarheid: dit criterium kan slechts in subjectieve kwalitatieve termen vastgesteld worden, bijvoorbeeld door een belevingsonderzoek onder de lokale bevolking. Het draagvlak voor de voorziening wordt deels bepaald door de visuele impact.

Geluid

Geluid kan de activiteiten van mensen en dieren hinderen, en fysiologische of psychologische schade aanrichten bij mensen (Wang 2009). Chronische blootstelling aan lawaai kan daarnaast verlies van het gehoor veroorzaken.

Meetbaarheid: het geluid van een bepaald energiesysteem kan in decibel (dB) vastgesteld worden.

Habitats en soorten

De flora, fauna en ecosystemen in het algemeen kunnen verstoord worden door de aanbouw van nieuwe energiesystemen (Wang, 2009). Habitats kunnen verstoord worden, en ook ontwatering kan grote effecten op flora en fauna (Smits, 2011). Per energiesysteem verschilt het hoeveel landoppervlakte er benodigd is; hoe groter deze oppervlakte, hoe groter de kans dat een ecosysteem of natuurlijk habitat verstoord wordt.

Meetbaarheid: hierbij kan vastgesteld worden of een specifieke energievoorziening negatieve impact heeft op natuurgebieden. Er kan daarnaast gekeken worden wat de mogelijke effecten zijn van het systeem op beschermde soorten.

3.4 Sociale criteria

Sociale acceptatie

Een belangrijk sociaal criterium is de sociale acceptatie van een energievoorziening: in hoeverre wordt het geaccepteerd door de lokale bevolking? Sociale acceptatie wordt in toenemende mate gezien als een beperkende factor in de transitie naar een duurzame samenleving (Wüstenhagen, et al, 2007; Cavallaro, 2005; Sauter & Watson, 2006). Het is ook belangrijk om vast te stellen wie de belangrijkste stakeholders zijn: bijvoorbeeld inwoners van een bepaalde wijk, of bepaalde bedrijven.

Meetbaarheid: dit criterium kan slechts in kwalitatieve termen vastgesteld worden, door middel van een draagvlakonderzoek onder de lokale bevolking. Voor veel alternatieven zal zo'n onderzoek (nog) niet beschikbaar zijn, dus worden casestudies van andere projecten gebruikt. Daarnaast wordt een globaal overzicht gegeven van de belangrijkste stakeholders die waarschijnlijk bij het alternatief betrokken zullen worden.

Participatie

De gemeente Wageningen heeft aangegeven bij de implementatie van technologieën voor de winning van duurzame energie vooral een initiatief-nemende en coördinerende rol te spelen (Gemeente Wageningen, 2012). De financiering van de projecten zal gedaan moeten worden door (Wageningse) burgers en bedrijven. Afhankelijk van de schaal van de projecten, is er ook adoptie van technologieën door burgers nodig. In dit hoofdstuk worden de alternatieven verdeeld in twee schalen: grootschalige, centraal geleide projecten en projecten op kleinere schaal die decentraal geregeld worden. De bijdrage van burgers aan centraal geleide projecten zal vooral bestaan uit financiering van de alternatieven door deelneming in coöperaties. Decentrale projecten vereisen dat burgers en bedrijven technologieën interesse hebben in de adoptie van een technologie, omdat de gemeente mensen niet kan verplichten mee te werken aan de implementatie van alternatieven. Meetbaarheid: Voor de adoptie door burgers van innovaties zijn vijf factoren van belang (Faiers & Neame, 2006):

- Relatief voordeel van het alternatief ten opzichte van andere mogelijkheden. Deze voordelen worden in de andere criteria toegelicht.
- Compatibiliteit: in hoeverre sluit het alternatief aan bij de waarden van een individu? In dit rapport zal deze factor niet in detail behandeld worden, omdat waarden per persoon verschillen. Van belang kan wel zijn dat een meerderheid van de Wageningers heeft aangegeven een voorkeur voor duurzame opwekking van elektriciteit te hebben ten opzichte van elektriciteit uit fossiele brandstoffen (Uitzinger, 2013). Over het algemeen zullen duurzame alternatieven dus relatief goed aansluiten bij de waarden van de Wageningse inwoners.
- Waarneembaarheid: hoe zichtbaar is het alternatief?
- Testbaarheid: is het mogelijk om het alternatief eerst een periode te testen voordat op aanschaf wordt over gegaan?
- Complexiteit: hoe moeilijk is het om (de technologie achter) het alternatief te begrijpen?

Voor alternatieven waar de adoptie door burgers belangrijk is zullen de waarneembaarheid, testbaarheid en complexiteit beschreven worden om te bepalen waar aandacht aan besteed moet worden bij de implementatie.

Economische stimulans

Nieuwe energiesystemen kunnen een bijdrage leveren aan lokale ontwikkeling en welvaart: door het creëren van o.a. nieuwe werkplekken, nieuwe bedrijven voor energievoorziening, en mogelijke nieuwe industriegebieden (Tsoutsos, 2009). Een andere economische factor is de verandering in huizenprijzen als gevolg van de implementatie van alternatieven.

Meetbaarheid: Voor elk alternatief zal gekeken worden wat de bijdrage is aan de lokale werkgelegenheid en economie, wat de invloed is op de huizenprijzen en wat de invloed van het alternatief is op sociale (on)gelijkheid in Wageningen.

4. Alternatieven

In het vorige hoofdstuk is de eerste stap van de Multi-Criteria Analyse (MCA) gezet: het definiëren van criteria waar de alternatieven aan getoetst worden. De volgende fase is het identificeren van alternatieve opties. Deze fase is weer verdeeld in twee stappen:

1. Het identificeren van alle potentiële energiebronnen en technologieën
2. Het selecteren van technologieën die getoetst worden in de volgende stap van de MCA.

4.1 Overzicht alternatieven

Door middel van brainstormsessies, interviews met experts en literatuuronderzoek is een lijst met potentiële technologieën opgesteld. De enige vereiste om in deze lijst te komen was dat de energie opgewekt moest worden uit duurzame bronnen. Kernenergie en fossiele brandstoffen zijn om die reden niet in de lijst opgenomen. Hieronder worden de verschillende technologieën toegelicht.

Windenergie: grote windturbines

Het huidige plan van de gemeente Wageningen is om grote windturbines te plaatsen in de uiterwaarden van rivier de Nederrijn nabij de haven. Uit een haalbaarheidsstudie uitgevoerd door Bosch & van Rijn (Velthuisen, 2014) is geconcludeerd dat er geen ruimtelijke of financiële belemmeringen zijn voor het plaatsen van drie windturbines van het merk Senvion, type MM92.

Windenergie: kleine windturbines op daken

Er bestaan ook windturbines die ontworpen zijn voor plaatsing binnen de bebouwde kom. Deze zijn vaak maar enkele m³ groot en zijn geschikt voor plaatsing op hoger gelegen daken van gebouwen of open terreinen binnen de bebouwde kom. In deze analyse zijn drie "urban wind turbines" meegenomen in de vergelijking van alternatieven voor duurzame energie binnen de stad Wageningen:

- Turby® is een windturbine met een diameter van 2 meter en een hoogte van ca. 3 meter. De molen draait om een verticale as. Het ontwerp is ontwikkeld door het bedrijf Core International in samenwerking met de Technische Universiteit Delft.
- Swift™ is ook een kleinere windturbine van het bedrijf Cascade Renewable Energy. Dit kleinschalige eenvoudige ontwerp is zeer geschikt voor plaatsing op daken van gebouwen door de minimale trillingen die de windturbine veroorzaakt.
- Energy Ball V200® is een kleinere windturbine van het bedrijf Home Energy International. Het ontwerp is in de vorm van, zoals de naam zegt, een ronde draaiende bal met een diameter van ca. 2 meter. De bal draait op een horizontale as.

Zonne-energie: zonnepanelen

Zonnepanelen zijn geschikt voor plaatsing op daken of op zogenoemde "zonneparken", waarbij een bepaalde hoeveelheid ruimte zo optimaal mogelijk wordt ingericht met zonnepanelen. Fotovoltaïsche (zonne)cellen, meestal van gemaakt van Silicium, verzameld op een paneel absorberen onder invloed van zonlicht fotonen waardoor een spanning ontstaat waaruit elektriciteit opgewekt kan worden.

Zonne-energie: zonneboilers

Een zonneboiler (ook wel zonnecollector genoemd) zet zonlicht om in warmte. In zonneboilers zit water dat door het geabsorbeerde zonlicht verwarmd wordt. Op deze manier kunnen huishoudens van warm water worden voorzien en in het geval van grotere systemen kunnen ook ruimtes worden verwarmd.

Zonne-energie: zonnetoren

Een zonnetoren maakt gebruik van natuurkundige eigenschappen van lucht om energie op te wekken. In een groot cirkelvormig veld wordt de (relatief) koele lucht van de omgeving opgewarmd

door radiatie van de zon op de collectoren en naar de centrale toren geleidt. Door het drukverschil dat en ontstaat wordt de warme lucht door de toren naar boven geperst (warme lucht heeft een lagere dichtheid en stijgt op). Door middel van turbines onderaan de toren wordt de energie omgezet in elektriciteit.

Zonne-energie: SolaRoad

SolaRoad is een wegdek dat zonlicht omzet in elektriciteit. In oktober 2014 wordt een testfietspad aangelegd in de woonplaats Krommenie en is vanaf 12 november open voor publiek (SolaRoad, 2014).

Energie uit water: stuwmeer

Elektriciteit kan worden opgewekt door middel van een stuwdam een stuwmeer te creëren. Hierdoor ontstaat een groot verval, waarmee een waterturbine kan worden aangedreven. Voor een stuwmeer is veel ruimte nodig en het moet goed in de omgeving passen. Het enige stuwmeer momenteel aanwezig in Nederland is die in de Anstelvallei in de stad Kerkrade.

Energie uit water: stromend water

Uit bewegend water (bijvoorbeeld een stromende rivier) kan elektriciteit opgewekt worden met behulp van waterturbines. De waterturbine die meegenomen is in deze analyse is de Darrieus Turbine van het bedrijf Alternative Hydro Solutions.

Energie uit water: Blue Energy

Blue Energy is energie die gewonnen wordt uit het mixen van twee watermassa's met verschillende zoutconcentratie. Geschikte locaties hiervoor zijn bijvoorbeeld plaatsen waar zoet (rivier)water samenkomt met zout (zee)water (Liu, g.d.).

Energie uit water: Vortex Induced Velocity Aquatic Clean Energy (VIVACE)

De VIVACE-techniek wekt elektriciteit op uit (langzaam) stromend water door obstakels te plaatsen in het water (Raghavan, 2007). De obstakels veroorzaken wervelingen welke kunnen worden omgezet in elektriciteit (Raghavan, 2007).

Energie uit water: getijdenenergie

Ook uit de eb- en vloedbewegingen van oceanen kan energie gewonnen worden; getijdenenergie. Dit kan met name langs kustgebieden waar het verschil in waterhoogte tussen eb en vloed relatief groot is. Water wordt gedurende de vloedbeweging opgevangen achter een afsluitbare dam, waardoor een kleine waterkrachtcentrale wordt gecreëerd.

Geothermie: aardwarmte (diepe geothermie)

Aardwarmte wordt in Nederland gewonnen uit een diepte van 1,5 tot 3 km. Het opgepompte water met hoge temperaturen kan bijvoorbeeld worden gebruikt voor verwarming van gebouwen. Niet overal in Nederland is de bodem geschikt voor deze techniek (Ministerie van Infrastructuur & Milieu, 2013).

Geothermie: warmte uit de Nederrijn

De warmte uit het water van rivier de Nederrijn kan in de zomer worden opgeslagen in de bodem, om in de winter te gebruiken voor het verwarmen van gebouwen (Pompe et al., 2012).

Geothermie: warmte koude opslag (WKO)

Net als bij aardwarmte wordt relatief warm (grond)water opgepompt uit de bodem, maar bij een WKO-systeem komt dit water van minder diep. Hierdoor is het water ook minder warm en moet het verder opgewarmd worden voor gebruik met behulp van een warmtepomp (Michiel van der Wal, persoonlijke communicatie, 7 oktober 2014). Vervolgens wordt het afgekoelde water weer afgegeven aan een koudebron, waarvandaan het in warmere perioden weer gebruikt kan worden voor verkoeling.

Geothermie: energie uit asfalt

Doordat asfalt donker van kleur is, heeft het de eigenschap dat het snel opwarmt door zonlicht. Door een buizensysteem aan te leggen onder het asfalt kan deze warmte opgevangen worden waarna de gewonnen energie kan worden gebruikt. Dit principe wordt al veel toegepast in koude landen om sneeuw op het wegdek te laten smelten in de winter.

Bio-energie: waste to energy

De term "waste to energy" omvat alle processen waarbij afval dat niet geschikt is voor recycling gebruikt wordt om energie op te wekken in de vorm van warmte en elektriciteit.

Bio-energie: Plant-e

Het bedrijf Plant-e maakt gebruik van het natuurlijke groeiproces van planten om energie op te wekken. Een deel van de door middel van fotosynthese verkregen organische stof kan niet worden gebruikt door de planten zelf, en komt via de wortels in de bodem terecht. Wanneer micro-organismen de organische stof afbreken voor energy, komen er elektronen vrij die geoogst kunnen worden (Plant-e, 2009-2014).

Overig alternatieven: warmte uit net gemolken melk

Verse melk wordt direct na het melken gekoeld. Hierbij komt warmte vrij die kan worden opgeslagen voor later gebruik.

Overig alternatieven: Piëzo-elektriciteit

Piëzo-elektriciteit is elektriciteit dat gewonnen wordt als gevolg van het piëzo-elektrisch effect. Dit effect houdt in dat bepaalde materialen (piëzo-kristallen) een elektrische spanning als gevolg van druk creëren. Bijvoorbeeld autowegen bieden toepassingsmogelijkheden voor deze techniek.

4.2 Toetsing aan de hand van drie basiseisen

Na het maken van de lijst zijn de alternatieven getoetst op drie basiseisen:

1. Omdat er maar 15 jaar is om 50% van de energie die in Wageningen gebruikt wordt op een duurzame, lokale manier op te wekken, moet de benodigde technologie nu of in de nabije toekomst beschikbaar zijn. Een kanttekening hierbij is dat de ontwikkelingen die nu plaatsvinden op het gebied van nieuwe technologieën hoogstwaarschijnlijk niet tot grootschalige oplossingen leiden binnen 15 jaar.
2. De technologie moet aansluiten bij de Wageningse situatie: alternatieven die hier niet gaan werken - wegens de ligging en kenmerken van de gemeente - zoals onder andere een stuwmeer, blauwe energie (zout/zoet) zullen niet worden meegenomen.
3. De technologie moet een substantiële bijdrage kunnen leveren aan het behalen van de doelen van de gemeente Wageningen. Dat betekent dat alleen alternatieven die op grote schaal kunnen worden ingezet worden meegenomen in de analyse.

In tabel 3 staat de lijst met alle alternatieven en de scores op de drie basiseisen. Deze scores zijn gebaseerd op een eerste literatuurscan en gesprekken met de expert(s) van het betreffende alternatief en zijn dus een algemene schatting.

Tabel 3: Alternatieven getoetst aan drie basiseisen

Energiebronnen	Alternatieven	Techniek binnen 15 jaar implementeerbaar	Geschikt voor Wageningse situatie	Voldoende energie-opbrengst
Wind	Grote windturbines	ja	ja	ja

	Kleine windturbines	ja	ja	ja
Zon	Zonnepanelen op daken	ja	ja	ja
	Zonnepark	ja	ja	ja
	Zonneboiler/collector	ja	ja	ja
	Zonnetoren	ja	nee	ja
	SolaRoad	ja	ja	ja
Waterkracht	Stuwmeer	ja	nee	ja
	Stromend water	ja	ja	ja
	Blauwe energie (zout/zoet)	ja	nee	ja
	Getijdenenergie	ja	nee	ja
Geothermiek	Aardwarmte (diep)	ja	nee	ja
	Warmte uit Rijn	ja	ja	onduidelijk
	Warmte-koude opslag in gebouwen	ja	ja	ja
	Energie uit asfalt	ja	ja	ja
	Warmte uit net gemolken melk	ja	nee	nee
Bio-energie	Waste-to-energy	ja	onduidelijk	ja
	Biodiesel	ja	nee	ja
	Bioethanol	ja	nee	ja
	Palmolie	ja	nee	ja
	Lijnzaadolie	ja	nee	ja
	Waterstofgas	onduidelijk	ja	onduidelijk
	Plant E	onduidelijk	ja	nee
	Algen	ja	ja	onduidelijk
Overige	Piezo-elektriciteit (e.g. Energie- dansvloer, wegen)	onduidelijk	ja	nee

4.3 Afvallers

Alternatieven die bij voorbaat geen kans van slagen hebben in Wageningen worden niet meegenomen in de MCA. Hieronder staat een lijst met alternatieven die afvallen en de belangrijkste redenen daarvoor:

- **Zonnepanelen op daken:** Dit alternatief valt af, omdat de gemeente al het plan heeft om een groot deel van de daken vol te leggen met zonnepanelen (Gemeente Wageningen, 2013).
- **Zonnetoren:** de toren en bijbehorende collector is één kilometer hoog en neemt ruim 38 vierkante kilometer grond in beslag (Zhou & Xu, 2014), dus dat is niet realistisch in Wageningen.
- **SolaRoad:** Deze techniek is pas net in opkomst in Nederland en zit nog volop in het testtraject en daarom zijn er nog geen eenduidige cijfers en eventuele casestudies te vinden over dit alternatief. Wegens het gebrek aan voldoende informatie hebben we besloten dit alternatief af te laten vallen.
- **Blauwe energie en getijdenenergie:** op plekken waar rivieren de zee in stromen, kan energie worden opgewekt als zout en zoet water zich mengen (Boon & Roij, 2011). Wageningen ligt niet aan zee, dus die is geen optie in dit project.
- **Getijdenenergie:** voor de winning van deze energie wordt gebruik gemaakt van het verschil in waterhoogte tussen eb en vloed (Dewit, 2008). Wageningen ligt niet aan zee, dus die is geen optie in dit project.
- **Aardwarmte (diep):** Om aardwarmte te winnen zijn bereikbare, watervoerende lagen nodig die dik genoeg zijn. De twee zandlagen die onder Wageningen liggen zijn hier te dun voor (respectievelijk 40 en 5 meter dik). De zandlaag in het noordoosten van Wageningen ligt te veel aan het oppervlak en heeft een te lage temperatuur om voldoende energie op te winnen (Wanders & Kanen, 2010)
- **Warmte uit net gemolken melk:** Deze methode wordt al veel toegepast, dus daar valt niet veel extra energie meer te winnen (Klimaatmonitor, 2013).
- **Waste-to-energy:** Dit alternatief is uiteindelijk geschrapt, omdat er teveel onzekerheden aan verbonden zijn. Op dit moment gaat het Wageningse snoeiafval naar een bedrijf Ede en de rest van het GFT-afval wordt vergist in een verwerkingsbedrijf in Twente (Gemeente Wageningen, 2012b). Het is niet mogelijk om met de informatie die beschikbaar is in te schatten of dit een realistisch alternatief is binnen de gemeentegrenzen van Wageningen en of een lokale centrale kan concurreren met grotere centrales, dus hebben we besloten dit alternatief niet mee te nemen in de toetsing.
- **Biodiesel, bioethanol, palmolie en lijnzaadolie:** voor de productie van deze biobrandstoffen is landbouwgrond nodig (Searchinger et al., 2008). De ruimte in Wageningen is beperkt, dus deze opties vallen af.
- **Waterstofgas:** Waterstofgas kan op verschillende manieren geproduceerd worden. Water kan met behulp van elektrolyse omgezet worden naar zuurstof en waterstof. (Nowotny et al., 2014) Ook kan deze omzetting plaatsvinden door de warmte van een kerncentrale met behulp van zwavelzuur en jodium. Er is (nu nog) te veel energie nodig om waterstof te produceren. Dus deze optie valt af bij onze analyse. Rendabele manieren om waterstofgas te produceren zijn nog in ontwikkeling (Nowotny et al., 2014). Ook naar de mogelijkheid om waterstof vanuit biomassa te produceren wordt onderzoek gedaan (o.a. Udomsirichakorna et al., 2014; Olaleyea et al., 2014).
- **Plant-e:** met deze technologie wordt energie opgewekt uit levende planten. Het is niet waarschijnlijk dat de techniek over vijftien jaar zo ontwikkeld is dat het gebruikt kan worden om op grote schaal elektriciteit mee op te wekken (Plant-e, 2014).
- **Algen:** Onderzoek naar energieopwekking is nog in volle gang (Borowitzka en Moheimani, 2010). Deze mogelijkheid is daarom waarschijnlijk niet binnen 15 jaar realiseerbaar in Wageningen en valt af.
- **Piëzo-electriciteit:** door middel van druk op bepaalde materialen kan elektriciteit opgewekt worden. Met deze technologie is onder andere een 'energiedansvloer' gebouwd

(Sustainable Dance Club, 2011). Er zijn testen op snelwegen uitgevoerd, waaruit blijkt dat deze methode voor energieopwekking (nog) niet geschikt is (Weijers & de Groot, 2007)

4.4 Kansrijke alternatieven

De kansrijkste alternatieven die overblijven na toetsing aan de hand van de basiseisen zijn:

- Grote windturbines
- Kleine windturbines
- Zonnepanelen (zonnepark)
- Zonneboilers
- Warmte-koude opslag in gebouwen
- Energie uit asfalt
- Stromend water (Vortex/rivierturbines)

5. Toetsing

In dit hoofdstuk worden de alternatieven getoetst aan de opgestelde criteria uit hoofdstuk 3. De laatste paragraaf bevat de prestatiematrix met het overzicht van alle voor- en nadelen van de alternatieven.

5.1 Grote windturbines

5.1.1 Technisch: veiligheid

Het geluid dat wordt geproduceerd door windturbines is niet schadelijk voor het gehoor, maar kan wel slapeloosheid veroorzaken bij mensen die in de buurt van windturbines wonen (Nissenbaum et al., 2012; Rideout et al., 2010). Klachten die vaker voorkomen binnen een straal van 1400 meter zijn hoge bloeddruk, hoofdpijn en duizeligheid (Nissenbaum et al., 2012). Windturbines produceren ook "infrageluid": geluid wat niet direct te horen is voor mensen, maar wel gezondheidsproblemen veroorzaakt (Bolin et al., 2011; Rideout, 2010). Een oplossing zou kunnen zijn de windturbines zo te plaatsen dat geluid overwegend door de wind van dichtbevolkte gebieden vandaan wordt geblazen. Behalve hinder door (infra)geluid afkomstig van windturbines kunnen mensen ook hinder ondervinden van de schaduwbewegingen die veroorzaakt worden door het draaien van de wieken, ook wel slagschaduw genoemd. Echter, de frequentie hiervan zou geen verhoogde kans op epileptische reacties geven (Rideout, 2010).

Naast potentiële risico's bestaan er ook directe veiligheidsrisico's als gevolg van technisch falen van windturbines. Een voorbeeld is de brand in een windturbine nabij Ooltgensplaat ("Twee doden bij brand op 67 meter hoogte", 2013) en de geknakte windmolen tussen de woonplaatsen Zeewolde en Almere ("Windmolen dreigt om te waaien op Eenmeerdijk", 2006). Op woensdag 27 mei 2009 viel een wiek van één van de windturbines langs de A6 op de snelweg en blokkeerde de afrit ("Wiek van windmolen valt op snelweg", 2009). De hier genoemde gevaren zijn uiteraard te beperken door windturbines op voldoende afstand van bebouwde omgeving en wegen te plaatsen.

5.1.2 Technisch: opbrengst

Zoals Velthuisen (2014) laat zien, is de opbrengst van drie windmolens in de uiterwaarden nabij de haven 16.000 MWh/jaar. Dit komt overeen, zoals eerder vermeld in hoofdstuk 2, met de totale energiebehoefte van 1.839 huishoudens.

5.1.3 Technisch: oppervlaktegebruik

Om te bepalen wat de optimale plek is om windturbines te plaatsen moet rekening gehouden worden met de variatie in wind intensiteit, de richting en de invloed die de turbines op elkaar hebben. (Emami & Noghreh, 2010). De ruimte die een windpark nodig heeft, is voornamelijk afhankelijk van de rotordiameter van de turbines. De tussenafstand tussen de turbines moeten minimaal vijf keer de rotordiameter zijn, dus het benodigde grondoppervlak voor één turbine is 25 maal de diameter in het kwadraat (Paraschivoiu, 2002). De diameter van de Senvion turbines is 92 meter, dus het benodigde oppervlak voor drie windturbines is 0,63 km².

5.1.4 Technisch: invloed variabiliteit energiebron

De opbrengst van grote windturbines is afhankelijk van de windsnelheid en windrichting op 100 meter hoogte. Vanaf 2-3 m/s levert een windturbine elektriciteit en als de windsnelheid toeneemt, wordt het geleverde vermogen hoger. Ongeveer 15% van de tijd is de windsnelheid minder dan 2 m/s en wekken de windturbines geen elektriciteit op (Meteorology and Air Quality Group, g.d.). Het maximale vermogen van de windturbines wordt bereikt bij een windsnelheid van 12 m/s en bij hogere snelheden blijft het vermogen constant (Soens, 2005). Bij een snelheid van 25 m/s worden de turbines stilgezet om te voorkomen dat de belasting te groot wordt voor de windmolens (Soens, 2005). Deze snelheden worden nooit bereikt in Wageningen, dus dat is niet aan de orde (zie: introductie).

5.1.5 Financieel: Investeringskosten

De benodigde informatie voor het inschatten van kosten en baten van grote windturbines komt van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) en het eindadvies basisbedragen SDE+ (Wijers & de Groot, 2013).

Investeringskosten:

Wijers & de Groot (2013) stellen de kosten voor het bouwen van een windturbine op 1350 euro per kW aan vermogen. Wageningen wil minstens 3 turbines met elk een vermogen van 2 MW neerzetten. Voor de investering betekent dit een bedrag van $3 \times 2 \times 1000 \times 1350 = 8.100.000$ euro. In de kosten zijn meegenomen het plaatsen van turbines en de kosten voor fundering, elektrische infrastructuur, netaansluiting, civiele infrastructuur, grondverwervingskosten, bouwrente en verzekering tijdens de bouw. De levensduur van een grote windturbines is 25 jaar (Velthuisen, 2014).

5.1.6 Financieel: Terugverdienperiode

Het SDE+ basisbedrag voor 2014 is 8,75 cent per kWh voor fase 1 (RVO,2014). De SDE+ subsidie heeft een looptijd van maximaal 15 jaar. Voor de eerste vijftien jaar is uitgegaan van de SDE+ basisbedrag als vergoeding. Voor de overige tien jaar is uitgegaan van de basisenergieprijs van 4,4 cent per kWh. Velthuisen (2014) stelt dat in Wageningen er jaarlijks 2.691 vollasturen wind zijn voor de windturbines. Door het vermogen in kWh te vermenigvuldigen met het aantal vollasturen kan de jaarlijkse energieproductie in kWh berekend worden. Als deze vervolgens wordt vermenigvuldigd met de prijs van energie (de SDE+ prijs voor de eerste vijftien jaar en de basisenergieprijs voor de overige jaren) wordt de jaarlijkse omzet van de molen geschat. Dit bedrag is ca. 1,4 miljoen euro tijdens de SDE+ subsidie en 710.000 euro in de jaren daarna.

In het Eindadvies basisbedragen SDE+ stellen Wijers & de Groot de jaarlijkse kosten voor het onderhoud van de windturbines op 15,3 euro per geïnstalleerd kW vermogen en 1,48 cent per geproduceerde kWh. Voor Wageningen komt dit neer op een jaarlijkse kostenpost van 330.000 euro.

Wanneer de kosten van de baten worden afgetrokken komen we tot een jaarlijkse 'cashflow' van ca. 1,07 miljoen euro tijdens de SDE+ subsidie tijd en 380.000 euro daarna. Op basis hiervan kan worden berekend na hoeveel jaar de initiële investering van 8,1 miljoen is terug verdiend. Zoals te zien is in de tabel in Appendix A is dat in het tiende jaar.

5.1.7 Financieel: Kosten per kWh

Op basis van de initiële investering, jaarlijkse kosten en energieopbrengst kan de prijs per kWh berekend worden. De formule hiervoor is als volgt:

$$\frac{\text{Investering} + (20 \times \text{jaarlijkse kosten})}{(20 \times \text{jaarlijkse energieopbrengst})} = \text{€} / \text{kWh}$$

Uit deze berekening komt dat de opwekking van energie uit grote windturbines in Wageningen ongeveer 4 cent per kWh kost.

5.1.8 Milieu: emissies

Windturbines produceren geen emissies die zure regen kunnen veroorzaken, en ook geen broeikasgassen (Saidur, 2011). Tijdens de bouw en de gebruiksfase van de windturbines komt er echter wel een kleine hoeveelheid CO₂ vrij, maar deze hoeveelheid kan op een natuurlijke manier omgezet worden door bomen door middel van fotosynthese (Saidur, 2011). De CO₂-uitstoot zou gereduceerd kunnen worden met 0,33 tot 0,50 ton per MWh (Saidur, 2011). Ervan uitgaande dat de windturbines 16.000 MWh per jaar opleveren:

- $0,33 \times 16.000 = 5.280$ ton CO₂
- $0,50 \times 16.000 = 8.000$ ton CO₂

De CO₂-besparing zou 5.280 tot 8.000 ton per jaar bedragen.

5.1.9 Milieu: Restafval en zware metalen

Windturbines produceren tijdens hun gebruik geen schadelijke afvalstoffen.

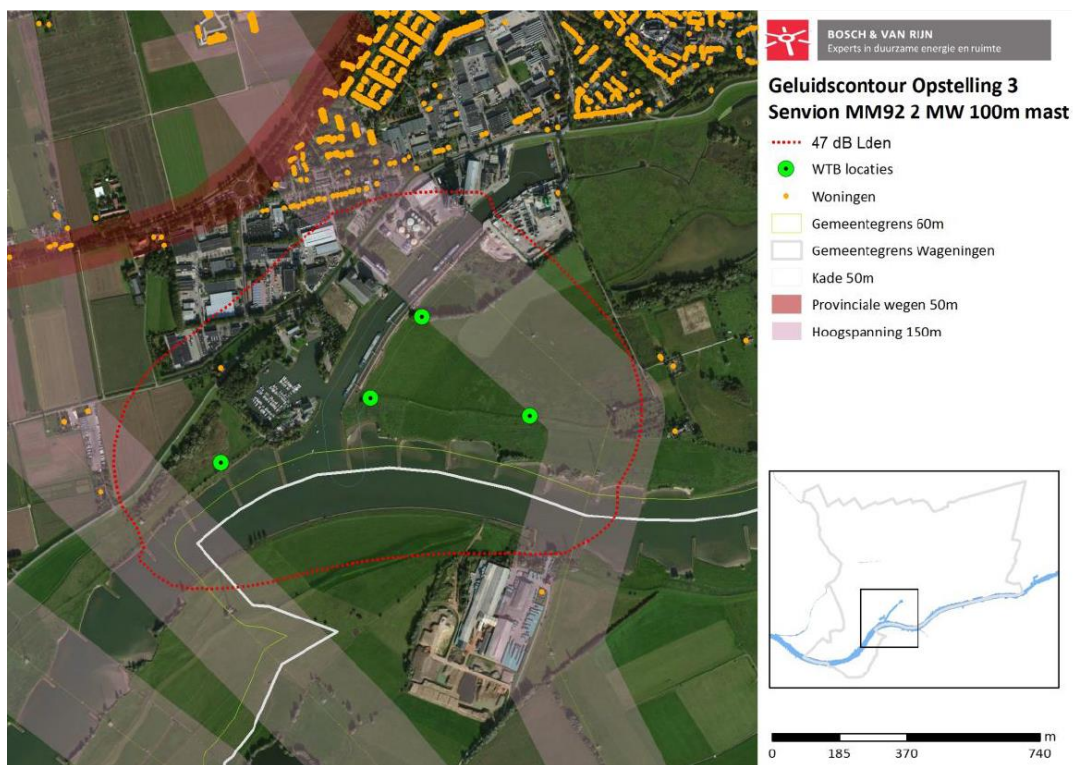
5.1.10 Milieu: Visuele impact

Windturbines kunnen wel een visuele impact hebben (Saidur, 2011), maar dit hangt ook af van de precieze locatie en de subjectieve visie van de omwonenden. De gevolgen zullen vooral merkbaar zijn in de directe omgeving van de windturbines (Leung, 2012).

5.1.11 Milieu: Geluid

Windturbines veroorzaken twee typen geluid: mechanisch en aerodynamisch geluid (Leung, 2012). Mechanisch geluid is afkomstig van de turbine zelf, en aerodynamisch geluid ontstaat door interactie van de rotorbladen met lucht, en wordt vaak als het meest storend gezien (Oerlemans, 2007). Ook hier ondervindt de directe omgeving de meeste gevolgen van de windturbine.

Een windturbine van het type Senvion, met een masthoogte van 100 m en een rotordiameter van 92 m, levert voor enkele huizen die binnen de rode grens in figuur 13 wonen een geluidsbelasting op van meer dan de wettelijke normen van 47 dB (Velthuijsen, 2014). De geluidsbelasting voor mensen die verderaf wonen is lager dan 47 dB.



Figuur 13: Verwachte geluidsbelasting van een Senvion-windturbine. Overgenomen van Velthuijsen (2014).
Haalbaarheidsstudie windturbines in de omgeving Havenkanaal. Copyright 2014 Bosch en van Rijn

5.1.12 Milieu: Habitats en soorten

Windturbines hebben de grootste impact op vogels en vleermuizen. Vogels behoren tot de grootste groepen aanvaringsslachtoffers van windturbines ter wereld (Saidur, 2011). Uit een onderzoek van Sovacool blijkt dat windenergie twintig keer minder vogels doodt dan fossiele brandstoffen doen (Sovacool, 2009). Het aantal slachtoffers door windenergie is verwaarloosbaar in relatie tot het aantal slachtoffers door ontbossing en verstedelijking. Van het totale aantal vogels dat gedood wordt in een jaar, waren er 20 slachtoffer van windturbines, tegenover 1500 die gedood werden door jagers, en 2000 door botsingen met voertuigen en elektriciteitsdraden (Saidur, 2011).

Windmolens zouden doorgaans geen serieus gevaar moeten vormen voor vogels, omdat vogels snel kunnen leren om obstakels te ontwijken (Leung, 2012). De effecten van windmolens verschillen niet alleen per vogelsoort, maar ook per jaargetijde tijdstip in de levenscyclus, tijd van de dag, weerscondities en biotoopvoorkeur (Winkelman, 2008). De meeste slachtoffers vallen in het voorjaar en najaar, tijdens de grootschalige vogeltrek.

Windmolens dragen significant bij aan het aantal slachtoffers onder vleermuizen (Saidur, 2011), maar de gevoeligheid van vleermuizen voor windturbines verschilt ook per soort. Ook soorten met een laag risico kunnen echter aanvaringslachtoffer worden, of last hebben van verstoringseffecten (Winkelman, 2008). Er is ook een relatie tussen slachtofferrisico en vleugelmorfologie en vliegsnelheid aangetoond: de Baardvleermuis, een soort met brede vleugels, kan minder goed manoeuvreren dan een soort met smallere vleugels (Winkelman, 2008).

Daarnaast kunnen windmolens effect hebben op planten: habitats kunnen verdwijnen of kwalitatief minder worden ten gunste van bijbehorende elementen van een windturbine, zoals een weg of onderhoudsgebouw (Winkelman, 2008). Daarnaast kan ontwatering door bouwactiviteiten ook van invloed zijn op planten. Bij kleine ongewervelde dieren speelt het verdwijnen of minder geschikt worden van habitat waarschijnlijk ook een rol. De fysieke aanwezigheid van windturbines kan via licht, geluid, straling en slagschaduw wellicht effect hebben op andere diersoorten, maar hier is nog maar weinig onderzoek naar gedaan (Winkelman, 2008).

5.1.13 Sociaal: Acceptatie

In het algemeen is er veel steun voor het opwekken van elektriciteit uit wind (Devine-Wright, 2005). Ook uit het draagvlakonderzoek in opdracht van de gemeente Wageningen komt naar voren dat een meerderheid van de ondervraagden vindt dat de gemeente actief moet zoeken naar een geschikte locatie voor windmolens in Wageningen, voornamelijk vanwege de hoge elektriciteitsopbrengst en milieuaspecten (Uitzinger, 2013). Onder omwonenden van de voorgestelde locaties is dit percentage echter veel lager. Als grootste struikelblokken worden de verstoring van het open landschap en stads- en dorpsgezicht genoemd en geluidsoverlast (Uitzinger, 2013). Ook uit andere onderzoeken naar de implementatie van windmolens komen deze factoren naar voren (Simon, 1996), samen met onbetrouwbaarheid van het systeem, hoge kosten en gevaar voor vogels en andere fauna en wantrouwen jegens de organisaties die de turbines realiseren (Devine-Wright, 2005). Onderzoek op plekken waar windparken zijn gerealiseerd laat zien dat mensen die in de buurt van die parken leven verschillend reageren: een groot deel van de omwonenden geeft aan dat het geluid en de visuele verandering van het landschap geen invloed op hun leven hadden (Kaldellis, 2013), terwijl anderen aangaven wel last te hebben van het geluid, lichtflikkeringen en de beweging van de rotorbladen (Pedersen et al., 2007).

5.1.14 Participatiemogelijkheden

Grote windturbines vallen in de categorie 'grootschalige, centraal geleide projecten.' Dit betekent dat er, behalve financiële participatie, geen inbreng van inwoners wordt verwacht op het gebied van de realisatie van de turbines. Als dit de beste optie blijkt, zal de gemeente uiteindelijk besluiten waar de molens komen te staan en de aanbesteding regelen.

5.1.15: Sociaal: Economische stimulans

De bouw van windmolenparken lijkt geen significant effect te hebben op prijzen van huizen die minder dan een kilometer van de turbines af staan (Hoen et al, 2011; Sims et al, 2010). Door middel van participatieprojecten kunnen ook inwoners met lagere inkomens meedelen in de winst van de bouw van de windturbines. Als de realisatie van het project uitbesteed wordt aan partners die niet per se in Wageningen gevestigd zijn, is de directe invloed van de bouw van de turbines op de lokale economie beperkt (Munday et al, 2011).

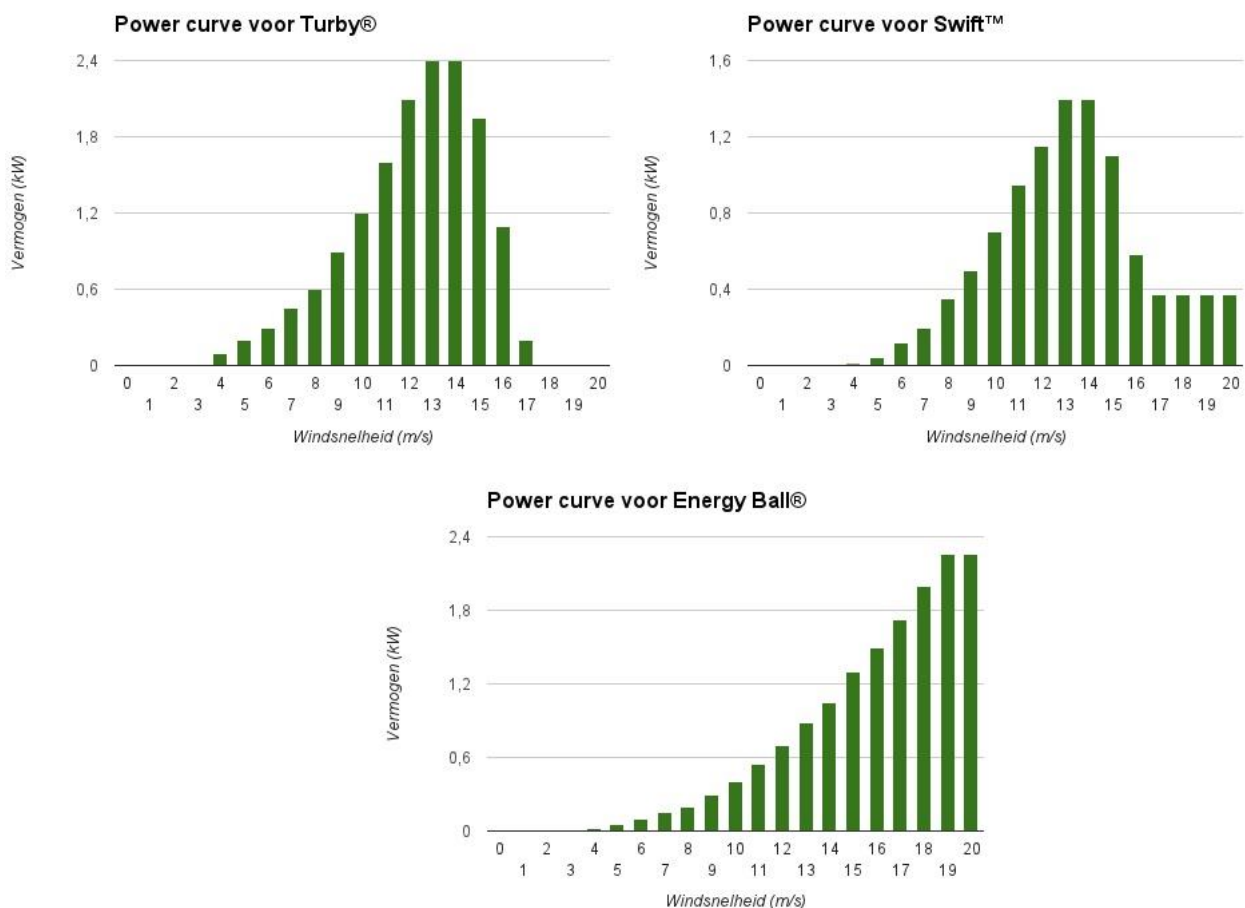
5.2 Kleine windturbines

5.2.1 Technisch: veiligheid

Net als grote windmolens veroorzaken kleine windturbines mogelijk hinder van slagschaduwen en geluidsoverlast. Door het kleinere formaat vinden mogelijke slagschaduwen en schittering in een hogere frequentie plaats (Cace, 2007). Daarnaast is er bij kleine windmolens op daken ook sprake van trillingen (Cace, 2007) wat kan zorgen voor een snellere slijtage van het materiaal. Deze trillingen en de mate van geluid kunnen aanzienlijk verminderd worden door het (technisch) ontwerp van de kleine windturbine, keuze van het gebouw en een goede fundatie voor de turbine (Van Bussel, 2013). Heller (2008) noemt dat veiligheidsrisico's als vallende onderdelen en schade als gevolg van elektrische mankementen onwaarschijnlijk zijn bij moderne kleine windturbines.

5.2.2 Technisch: opbrengst

Voor de berekening van energieopbrengsten zijn waarden van de zogenoemde power curves van de drie kleine windturbines vermenigvuldigd met de gemiddelde windsnelheid verdeling in uren per jaar die in Wageningen geldt (zie figuur 3 in paragraaf 1.1.1). Voor de windturbine Turby® zijn waarden voor de power curve geschat met behulp van een grafiek uit Bussel et al. (2004). Voor de windturbine Energy Ball® V200 zijn de waarden voor de power curve geschat aan de hand van een power curve op de website van HomeEnergy (g.d.). Tot slot zijn voor de windturbine Swift™ de waarden voor de power curve geschat uit een grafiek afkomstig uit de Swift™ performance data (Swift™, g.d.). De power curves zoals gebruikt om de verwachte opbrengsten te berekenen voor Wageningen zijn weergegeven in figuur 14 .



Figuur 14: Vermogen (kW) van kleine windturbines bij verschillende windsnelheden (m/s). Gebaseerd op Bussel (2004), HomeEnergy (g.d.) en Swift™ (g.d.)

In tabel 5 is voor de drie gekozen windturbines weergegeven wat de verwachte opbrengst (in MWh, afgerond op twee decimalen) per exemplaar is, voor hoeveel huishoudens één windturbine kan

voorzien in de energiebehoefte en hoeveel exemplaren nodig zijn om 1839 huishoudens te voorzien van de totale energiebehoefte (zie Introductie).

Tabel 4: Energieopbrengst van kleine windturbines

Type kleine windturbine:	Verwachte opbrengst	Huidige totale energie-behoefte aantal huishoudens	Aantal voor totale energiebehoefte
Turby®	3,70 MWh	0,43	4.324
Energy Ball® V200	1,32 MWh	0,15	12.260
Swift™	1,88 MWh	0,22	8.510

Aantal exemplaren benodigd voor 1839 huishoudens: 4.324 x Turby®, of 12.620 x Energy Ball® V200 of 8.510 x Swift™

5.2.3 Technisch: oppervlaktegebruik

Eén Turby® kost 5,3 m² (Cace et al., 2007), dus voor 4.324 Turby's® is 22.917 m² nodig. De Swift™ is kleiner, namelijk 3,14 m² maar daar zijn er meer van nodig dan van de Turby® (Cace et al., 2007). In totaal zouden 8.510 Swifts™ 26.921 m² in beslag nemen. De Energy Ball® is de kleinste van de drie windturbines en neemt maar 1 m² per stuk in beslag, dus 12.260 m² in totaal (Cace et al., 2007).

5.2.4 Technisch: invloed variabiliteit energiebron?

De opbrengst van kleine windturbines is, meer dan van grote windturbines, afhankelijk van de windintensiteit en windrichting (Cace et al., 2007). De windintensiteit en -richting worden beïnvloed door een aantal factoren. In de eerste plaats variëren windkracht en -richting dagelijks en waait het hoger in de lucht harder dan dicht bij de grond. (Meteorology and Air Quality Group, n.d.). Ook bebouwing en landschappelijke kenmerken kunnen de windsnelheid en richting beïnvloeden. Op hogere gebouwen aan randen van steden is de opbrengst van kleine windturbines het hoogst, omdat daar een gladde luchtstroom en weinig obstakels zijn (Vermeer et al., 2003).

5.2.5 Financieel: Investeringskosten

Omdat we in dit rapport kijken naar drie soorten kleine windturbines, met elk andere kosten en opbrengsten, geven we hier een bandbreedte waarin de scores op de financiële criteria vallen. Alle windturbines hebben een levensduur van 15 jaar (RenCom, 2010).

Leveranciers van de verschillende type turbines hebben de investeringskosten gegeven. Deze kosten zijn exclusief transport, montage en btw. De drie turbines die in dit rapport worden behandeld kosten tussen de 3.500 en 17.000 euro.

5.2.6 Financieel: terugverdientijd

In dit rapport nemen we aan dat kleine windturbines op daken/terrein staan van individuele huishoudens. Omdat de turbines per stuk minder dan 5.000 kWh per jaar leveren mogen de opbrengsten daarvan gesaldeerd worden. Salderen is het aftrekken van de opgewekte energie van de energie die geleverd wordt vanuit het net. Als salderingsbedrag (prijs / kWh) gaan we uit van een conservatieve schatting van 15 cent / kWh. De opbrengsten zijn op dezelfde manier berekend als bij grote windturbines, door het vermogen te vermenigvuldigen met de vollasturen en de energieprijis. Dit geeft een jaarlijkse opbrengst die tussen de 130 en 550 euro ligt.

Kleine windturbines onderhoudsarm (RenCom, 2010). Om deze reden worden er geen onderhoudskosten gerekend bij dit alternatief.

De terugverdientijd ligt bij de drie windturbines tussen de 25 en 32 jaar. Dit is bij elke turbine een aantal jaren langer dan de technische levensduur van de apparaten (15 jaar).

5.2.7 Financieel: Kosten per kWh

Op dezelfde manier als bij grote windturbines zijn voor de kleine windturbines de kosten per kWh geleverde elektriciteit berekend. Deze liggen tussen de 18 en 31 eurocent per kWh.

5.2.8 Milieu: Emissies

Bij kleine windturbines komen er geen broeikasgassen vrij (Milieucentraal, 2014). Er wordt per opgewekte kWh 0,566 kg CO₂ bespaard (Agentschap NL, 2010). Per MWh: 566 kg; of 0,566 ton. Ervan uitgaand dat de turbines 16.000 MWh opbrengen, levert dat een CO₂-besparing op van $0,566 * 16.000 = 9.056$ ton per jaar.

5.2.9: Milieu: Restafval en zware metalen

Bij kleine windturbines komen er ook geen vervuulende stoffen vrij (Milieucentraal, 2014). De turbines leveren echter pas milieuwinst op wanneer ze meer uitstoot vermijden dan er bij de bouw en afvalverwerking ontstaan (Milieucentraal, 2014).

5.2.10 Milieu: Visuele impact

Door het formaat en uiterlijk van de kleine windturbines zijn de effecten op de leefomgeving minimaal (Vermeer, 2003). De kleine windturbines zijn wel zichtbaar, omdat ze op bebouwing geplaatst moeten worden om genoeg wind te kunnen vangen en om slijtage door turbulentie lager bij de grond te voorkomen (Heller, 2008).

Een ander belangrijk punt is dat de kleine windturbines in de stedelijke omgeving en bij de gebouwen waar ze op staan moeten passen. Uiteraard is dit ook afhankelijk van ieders persoonlijke smaak (Van Bussel, 2013; Heller, 2008).

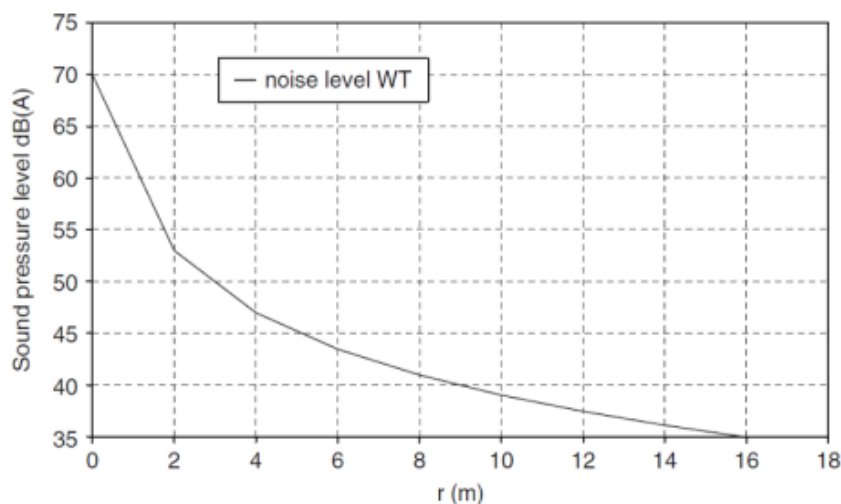
Ook kleine windturbines kunnen volgens Cace et al (2007) zorgen voor 'flikkeren' wanneer het een zonnige dag is. Deze overlast is echter maar in één (praktijk)situatie genoteerd, dus Cace raadt verder onderzoek voor naar de visuele impact van kleine windturbines aan.

5.2.11 Milieu: Geluid

De sterkte van het geluid geproduceerd door kleine windturbines is afhankelijk van het type turbine en de afstand tot de turbine (Heller, 2008). In het algemeen de geluidsproductie van kleine windturbines beperkt (Van Bussel, 2013; Heller, 2008). In het artikel van Cace et al (2007) worden tien verschillende typen klein windturbines getoetst, waaronder ook de drie turbines die wij geselecteerd hebben. Het geluidsniveau op 25 meter afstand bij een windsnelheid van 10 m/s is voor de Turby® 50 dB, 0dB voor de Energy Ball® en onbekend voor de Swift™ (Cace et al., 2007).

De perceptie van het geluid dat door de turbines geproduceerd is, is ook afhankelijk van andere geluiden in de omgeving (Van Bussel, 2013). In stedelijk gebied zijn meer (achtergrond) geluiden dan in buitengebieden. In figuur 14 is te zien hoe het geluid in dB(A) afneemt naarmate de afstand (in meters) tot de kleine windturbine toeneemt.

Kleine windturbines hebben een grotere rotatiefrequentie dan grote windturbines. Door deze hogere frequentie kunnen ze vibraties afgeven die hoorbaar zijn voor mensen (Van Bussel, 2013). Deze vibraties kunnen aanzienlijk verminderd worden door hier rekening mee te houden in het (technisch) ontwerp van de kleine windturbine, de keuze van het gebouw en een goede fundatie voor de turbine (Van Bussel, 2013).



Figuur 15: Geluidsniveau van kleine windturbines op verschillende afstanden van een puntbron van 70 DB. Gebaseerd op Bussel (2004), HomeEnergy (g.d.) en Swift™ (g.d.)

5.2.12: Habitats en soorten

Op enkele locaties in Nederland kwam men tijdens de voor- en najaarstrek van vogels uit op een gemiddelde van 0,06 tot 0,11 slachtoffers per dag bij kleine tot middelgrote turbines (Everaert, 2002). Bij vleermuizen lijken kleinere windturbines relatief minder slachtoffers te vergen dan grote windturbines (Winkelman, 2008).

5.2.13 Sociale acceptatie

Argumenten die worden genoemd tegen het plaatsen van kleine windturbines zijn visuele impact en geluidsoverlast (Rodman & Meentemeyer, 2006). Een ander punt van aandacht is de veiligheid: mensen twijfelen of windmolens in de stedelijke omgeving veilig zijn, ook als onderzoek uitwijst dat dat wel zo is (Dayan, 2006).

5.2.14 Participatiemogelijkheden

Net zoals bij centraal geleide projecten zoals grote windturbines zal de financiering van kleine windturbines door particulieren gedaan worden. Bedrijven en huishoudens kunnen besluiten hun eigen turbine(s) te kopen, of ze kunnen besluiten een coöperatie op te richten. In tegenstelling tot grootschalige projecten, zal de implementatie van kleine turbines niet centraal gebeuren. Burgers en bedrijven spelen een belangrijke rol in de realisatie van de plannen als het besluit om met kleine windturbines energie op te wekken wordt genomen, omdat de turbines op hun grond of dak geplaatst moeten worden. Aan de hand van de drie factoren die beschreven zijn in het hoofdstuk 'Criteria' is bepaald wat aandachtspunten zijn bij de realisatie van kleine windturbines in Wageningen:

- **Waarneembaarheid:** Van turbines die op hoge gebouwen worden geplaatst, zijn de visuele effecten gering. Turbines op woonhuizen zijn beter zichtbaar, maar omdat de wind lager bij de grond turbulenter is, wordt plaatsing op huizen sowieso afgeraden (Heller, 2008)
- **Testbaarheid:** Het voordeel van kleine windturbines, is dat de implementatie in fases kan verlopen. De windturbines hoeven niet allemaal tegelijk geplaatst te worden, dus kan er eerst getest worden hoe het plan uitpakt in de praktijk.
- **Complexiteit:** Hoewel kleine windturbines in Nederland nog relatief weinig gebruikt worden (Milieucentraal, g.d.), is het idee om elektriciteit op te wekken met wind een bekend concept. Huishoudens en bedrijven zijn misschien wel onzeker wat betreft veiligheid, overlast en opbrengst en dat kan adoptie verhinderen.

5.2.15 Economische stimulans

Huishoudens en bedrijven die investeren in de aanschaf van kleine windturbines kunnen profiteren van de winst van de geleverde energie. Om te voorkomen dat alleen kapitaalkrachtige huishoudens

met plaats voor windturbines profiteren, zouden participatieprogramma's opgezet kunnen worden. Over de invloed van de bouw van kleine windturbines op huizenprijzen en de lokale economie is geen informatie beschikbaar.

5.3 Zonnepark

5.3.1 Technisch: veiligheid

Er zijn geen directe veiligheids- en gezondheidsrisico's met betrekking tot zonnepanelen in stedelijke omgeving of op zonneparken gevonden.

5.3.2 Technisch: opbrengst

De gemiddelde opbrengst van zonnestroomsystemen in Nederland was in 2013 874 kWh/kWp (Sark, 2014). De kWp (kilowattpiek) is een eenheid om het vermogen van een zonnepaneel aan te geven. Afhankelijk van het type zonnepaneel, is 5 m² tot 10 m² nodig om aan 1 kWp te komen. Om aan de totale huidige energievraag te voldoen van 1.839 huishoudens in Wageningen (ca. 16.000 MWh, zie paragraaf ...) zijn ongeveer 18.307 kWp aan zonnepanelen nodig (1). Dit betekent een oppervlakte tussen (afhankelijk van het type zonnepaneel) 91,25 km² (2) en 183 km² (3).

1. 16.000 MWh / 874 kWh \approx 18307 kWp
2. 18.307 kWp * 5 m² = 91.535 m²
3. 18.307 kWp * 10 m² = 183.070 m²

5.3.3 Technisch: oppervlaktegebruik

Om 16.000 MWh op te wekken is dus tussen de 91 en 183 km² aan zonnepanelen nodig. Bij de plaatsing van zonnepanelen in een zonnepark moet de hoek van de zonnepanelen met de grond ongeveer 35 graden zijn en moeten de panelen zuidelijke richting wijzen (Zonnepanelen Informatiepunt, 2013). Daarnaast moet rekening gehouden worden met schaduwen door bomen en gebouwen (Hieropgewekt, 2014).

5.3.4 Technisch: invloed variabiliteit energiebron?

Het aantal zonne-uren heeft invloed op de opbrengst van een zonnepark. In het midden van Nederland schijnt de zon zo'n 1550-1600 uur per jaar, dat is relatief weinig ten opzichte van het westen van Nederland. (KNMI, 2014). Zonnepanelen in een zonnepark werken wel als het bewolkt is, maar leveren dan minder op (Najera et al., 2011).

5.3.5 Financieel: Investeringskosten

De kosten behorend bij de installatie van zonnepanelen komen van het 'Eindadvies basisbedragen SDE+ 2014' (Wijers & de Groot, 2013). Om aan de 16.000 MWh per jaar te komen is een zonnepark nodig met een vermogen van ongeveer 18 watt.

De investeringskosten voor zonnepanelen zijn 1.080 euro per kW aan vermogen. Dit betekent dat een installatie van 18 MW kost: 18000*1080 = 19.4 miljoen euro.

5.3.6 Financieel: terugverdientijd

Grootschalige zonnesystemen, waar we hier vanuit gaan, brengen volgens de SDE+ regeling de eerste vijftien jaar 7 cent per geleverde kWh op. Na de subsidieperiode gaat die prijs naar 4.4 cent per kWh. Per kWh zijn er ook onderhoudskosten van ca. 1.7 cent per kWh. Gecombineerd levert dit een terugverdientijd op van ca. 31 jaar. Dit is zes jaar langer dan de gemiddelde levensduur van een zonnestroom systeem, die 25 jaar is (van Latum & Batenburg, 2010).

5.3.7 Financieel: Kosten per kWh

Door de jaarlijkse levering aan stroom te vermenigvuldigen met de verwachte levensduur van 25 jaar, en vervolgens de totale kosten (investering en onderhoud) te delen door dit getal komen we op een kostprijs per kWh van 6.5 eurocent.

5.3.8 Milieu: Emissies

Zonne-energie zorgt voor een reductie in CO₂ en NO_x en voorkomt uitstoot van de toxische gassen SO₂ en fijnstof (Tsoutsos, 2005). Gedistribueerde fotovoltaïsche cellen leveren een besparing van CO₂-uitstoot op van 0,6 tot 1,0 kg/kWh (Tsoutsos, 2005). Ervan uitgaand dat het systeem 16.000 MWh in een jaar oplevert is de bespaard CO₂-uitstoot per jaar:

1. 0,0006 ton * 16.000.000 kWh = 9.600 ton/jaar.
2. 0,001 ton * 16.000.000 kWh = 16.000 ton/jaar.
3. De besparing in CO₂ -uitstoot bedraagt dus 9.600 tot 16.000 ton CO₂ per jaar.

Uit een artikel van Turney et al. blijkt dat de uitstoot van CO₂ van zonneparken op grote schaal kan variëren tussen de 16,0 en 86,3 g per kWh (Turney, 2011). Voor een systeem met een rendement van 16.000 MWh, betekent dit een uitstoot van 256 tot 1328 ton CO₂ per jaar.

5.3.9 Milieu: Restafval en zware metalen

Bij zonne-energievoorzieningen komt 50 tot 1.000 keer minder kwik vrij dan bij traditionele elektriciteitsopwekking: 0,1 g Hg GW/h afkomstig van zonne-energie tegenover 15 g Hg GW/h afkomstig van steenkool (Turney, 2011). Ervan uitgaand dat het systeem 16.000 MWh oplevert, levert het een Hg-uitstoot op van $16 * 0,1 = 1,6$ g/jaar.

Fotovoltaïsche cellen die gemaakt zijn van CdTe cadmium telluride (CdTe) stoten 0,02 g Cd GW/h uit, wanneer ze geproduceerd zijn met schone elektriciteit. Bij een systeem met een rendement van 16.000 MWh, betekent dit een Cd-uitstoot van $16 * 0,02 = 0,32$ g/jaar. Dit is 100 tot 300 keer minder cadmium-uitstoot dan bij het winnen van energie uit steenkool (Turney, 2011). Cadmium is een toxische stof die zich op kan hopen in ecologische voedselketens, maar de kans dat het vrijkomt bij het breken van de PV-modules is erg klein (Alsema, 2006). De hoeveelheid cadmium in PV-modules is namelijk erg klein: 5 tot 10 g/m²

5.3.10 Milieu: Visuele impact

Er is weinig onderzoek op dit gebied gedaan (Chiabrande, 2009). Impacts op esthetisch en visueel gebied zijn daarom ook niet duidelijk voor zonneparken. Veelal staan zonneparken in dunbevolkte gebieden wegens visuele overlast en mogelijke impact op recreatie en ecologie. (Turney, 2011).

5.3.11 Milieu: Geluid

Fotovoltaïsche zonnepanelen genereren geen geluid (Tsoutsos et al, 2005), dus wordt geen geluidshinder ondervonden (Turney, 2011).

5.3.12 Milieu: Habitats en soorten

De grootste impact van zonneparken op habitats en soorten komt door het gebruik van land: voor sommige dieren zullen de schuilplekken, jachtstrategieën en de beschikbaarheid van voedsel beïnvloed worden (Turney, 2011). Een belangrijk concept dat door Turney et al. genoemd wordt, is de connectiviteit van het land: de verbindingen tussen habitats. Bij zonne-energie op grote schaal moet rekening worden gehouden met de mogelijkheid tot migratie en interactie van soorten (Turney, 2011).

Daarnaast wordt de bodem soms afgeschraapt tijdens de bouw en vrijgehouden van vegetatie door middel van herbicides (Turney, 2011). In andere gevallen laat men de vegetatie tot een bepaalde hoogte groeien, maar ook hier wordt de vegetatie significant beïnvloed. De PV-panelen kunnen schaduwen werpen op de vegetatie en effect hebben op het microklimaat (Turney, 2011). De verstoring van de bodem zal bij een zonnepark relatief weinig zijn, omdat er minder bodem wordt verwijderd, maar hier is verder onderzoek naar nodig.

5.3.13 Sociale acceptatie

Zonne-energie komt in het algemeen goed uit de bus in onderzoeken naar de perceptie van mensen met betrekking tot duurzame energie (Devine-Wright, 2007). Over de mening van mensen ten aanzien van zonnepanelen op daken is veel literatuur (e.g. Faiers & Neame, 2006; Kaldellis, 2013). Zonneparken zijn minder bekend, maar omwonenden van toekomstige parken geven aan dat ze zich zorgen maken om de esthetische waarde van het landschap, de gevolgen voor de gezondheid van omwonenden en reflectie van zonlicht door zonnepanelen (Nelson et al., 2012).

5.3.14 Participatiemogelijkheden

Een zonnepark valt in de categorie 'grootschalige, centraal geleide alternatieven.' De rol van burgers zal vooral bestaan uit de financiering van het project. Omdat er land nodig is om het zonnepark te realiseren, zou er voor particulieren of bedrijven die grond bezitten ook een initiërende rol in de realisatie van het project kunnen zijn. Om ook minder kapitaalkrachtige burgers te betrekken is het van belang dat het mogelijk is om kleine aandelen te kopen.

5.3.15 Economische stimulans

Bewoners van huizen in de buurt van zonneparken zijn bang dat de waarde van hun huizen daalt door de aanwezigheid van het park (Nelson et al., 2012). Uit onderzoek blijkt echter niet dat huizenprijzen dalen als een zonnepark in de buurt wordt aangelegd (First Solar, 2011). De bouw van het zonnepark levert waarschijnlijk weinig extra werkgelegenheid op, omdat de opdracht vergeven zal worden via openbare aanbesteding. Het onderhoud levert ook weinig of geen nieuwe banen op (First Solar, 2011).

5.4: Zonneboilers

5.4.1 Technisch: veiligheid

Er zijn geen directe veiligheid- en gezondheidsrisico's met betrekking tot zonneboilers in stedelijke omgeving gevonden.

5.4.2 Technisch: opbrengst

Er zijn veel verschillende zonneboilers op de markt met verschillende opbrengsten. AgentschapNL (2012) gebruikt de kerngegevens van 700 vollasturen in Nederland per jaar en een vermogen van 0,7 kW per m². Eén m² van een zonneboilersysteem levert met deze gegevens 490 kWh (1). Om aan de totale huidige energiebehoefte van 1839 huishoudens (ca. 16.000 MWh, zie hoofdstuk 1) te voldoen is ca. 32.653 m² aan zonneboilersystemen nodig (2). Om aan te geven wat dit per particulier huishouden zou zijn, wordt dit getal gedeeld door het aantal particuliere huishoudens in Wageningen. Hieruit volgt dat 1,58 m² aan zonneboilersysteem per particulier huishouden nodig zou zijn in Wageningen om aan de totale huidige energiebehoefte te voldoen van 1839 huishoudens (3).

1. 700 uren * 0,7 kW = 490 kWh
2. 16.000 MWh / 490 kWh ≈ 32.653
3. 32653 m² / 20.720 huishoudens = 1,58 m²

5.4.3 Technisch: oppervlaktegebruik

Om evenveel energie te winnen als 1.839 huishoudens verbruiken, is 32.653 m² aan zonnecollectoren nodig. Bij het transport van het water gaat warmte verloren (Pompe et al., 2012), dus om optimaal gebruik te kunnen maken van de zonnewarmte is het van belang dat de zonneboilers in de buurt van de plek waar de warmte gebruikt wordt worden geïnstalleerd. Daken van huizen en bedrijfspanden zijn daarvoor uitermate geschikt.

5.4.4 Technisch: invloed variabiliteit energiebron?

De warmte die wordt gewonnen in de zonnecollectoren, kan voor korte tijd worden opgeslagen in een opslagtank in huis. In de zomer kan meer energie worden gewonnen dan in de winter, door verschillen in buitentemperatuur en zonneshijns (Zondag et al, 2003). Zonder systeem dat het water in de winter warm kan houden, kan de winning van energie dus niet goed afgestemd worden op het verbruik. Technologieën om de warmte voor langere tijd op te slaan zijn nog in ontwikkeling, maar kosten en de grote hoeveelheid die opslag tanks in beslag nemen zijn een probleem (Pinel et al., 2011).

5.4.5 Financieel: investeringskosten

Om 16.000 MWh aan energie te leveren is een zonneboiler vermogen van 23MW aan nodig. Belangrijk gegeven is dat voor het krijgen van SDE+ subsidie de collector een oppervlak moet hebben van ten minste 100 m².

Volgens Wijers & De Groot (2013) zijn de investeringskosten voor een zon thermisch systeem 700 euro per kWh. Voor een systeem van 23000 kW is dus een investering nodig van 16.1 miljoen euro.

5.4.6 Financieel: terugverdientijd

Zoals hierboven besproken, kent een zonthermisch systeem kent vergelijkbare baten als een zonnestroom systeem.. De investeringskosten in een dergelijk systeem zijn iets lager dan die bij een zonnestroomsysteem, waardoor de terugverdientijd 23 jaar is.

5.4.7 Financieel: Prijs per kWh

Op dezelfde wijze als bij zonnestroom is de prijs per kWh berekend. Deze komt voor een zonthermisch systeem neer op 5.4 cent per kWh.

5.4.8 Milieu: Emissies

De CO₂-uitstoot van een zonneboilersysteem van 3 kW bedraagt 0.293 ton per jaar, tegenover 0,889 ton per jaar CO₂-uitstoot door het gebruik van conventionele brandstoffen (Kalogirou, 2009) De CO₂-uitstoot omgerekend naar een systeem voor 16.000 MWh is

1. 8766 uren per jaar
2. 3 kW * 8766 = 26.298 kWh
3. 16.000 MWh / 26,298 MWh ≈ 608,4

$$608,4 * 0,293 \text{ ton} \approx 178,26 \text{ ton CO}_2/\text{jaar.}$$

Dit is een besparing van (540,87 - 178,26) = 362,61 ton CO₂/jaar.

De NO_x-uitstoot van zonneboilers bedraagt 16,3 g/jaar voor een systeem van 3 kW. (Kalogirou, 2009). Omgerekend naar 16.0000 MWh is dit 9,916 g per jaar.

De SO₂-uitstoot (3 kW: 164,5 g/jaar) bedraagt 608,4 * 164,5 = 100,0 kg/jaar.

De uitstoot van fijnstof (3 kW: 54,8 g/jaar) bedraagt 608,4 * 54,8 = 33,34 kg/jaar.

De uitstoot van methaan (3 kW: 2,7 g/jaar) tenslotte is 1,642 kg/jaar.

5.4.9 Milieu: Restafval en zware metalen

Van de materialen die gebruikt worden voor de productie van zonneboilers hebben staal en koper de grootste invloed op het milieu (Tsilingiridis, 2004). De zonnecollectoren worden namelijk gemaakt van koperen buizen en de achterzijde van de collectoren bestaat uit gegalvaniseerd staal. De precieze gehalten van koper en staal zijn onbekend; dit hangt van het type systeem af. Vervuiling door plastic en papier is beperkt, en vervuiling door glas en aluminium is verwaarloosbaar (Tsilingiridis, 2004). De vervuiling die vrijkomt bij de afbraak van zonneboilers is

niet groter dan de vervuiling bij een conventioneel energiesysteem, en de overgrote meerderheid van de onderdelen voor het zonnestelsel kan gerecycled worden (Kalogirou, 2009).

5.4.10 Milieu: Visuele impact

Niet van toepassing / geen informatie over te vinden.

5.4.11 Milieu: Geluid

Niet van toepassing / geen informatie over te vinden.

5.4.12 Milieu: Habitats en soorten

Door de reductie in de uitstoot van broeikasgassen bij het gebruik van zonneboilers worden negatieve effecten op gewassen voorkomen (Kalogirou, 2009). Effecten op andere typen habitats of soorten zijn niet bekend.

5.4.13 Sociale acceptatie

Net als bij zonnepanelen kan een nadeel van zonneboilers op daken de aantasting van het uiterlijk van het huis zijn (Weiss, 2001). In 2010 hadden in Nederland 110.000 huishoudens een zonneboiler op hun dak (CBS, 2010). Dat aantal is ongeveer gelijk aan het aantal huizen met zonnepanelen in Nederland (Natuur en Milieu, 2013).

5.4.14 Participatiemogelijkheden

Huishoudens en bedrijven kunnen zelf besluiten om zonneboilers op hun dak te leggen. Daarnaast zouden, bijvoorbeeld door middel van een coöperatie, huishoudens die niet de financiële middelen of geen geschikt dak hebben bij kunnen dragen aan de bekostiging van zonneboilers.

- Waarneembaarheid: Zonneboilers worden, net zoals zonnepanelen, zichtbaar op daken geplaatst. De efficiëntie van zonneboilers is hoger dan die van zonnepanelen, dus om dezelfde hoeveelheid energie op te wekken is een kleiner oppervlak op het dak nodig (zie paragraaf 5.3.3 'oppervlaktegebruik'). Dit vermindert de visuele impact van zonneboilers ten opzichte van zonnepanelen.
- Testbaarheid:
- Complexiteit: Zonneboilers zijn minder bekend bij consumenten dan zonnepanelen (Scott et al., 2014). De techniek is relatief eenvoudig te begrijpen, omdat zonnewarmte direct gebruikt wordt om huizen te verwarmen, in plaats van dat het omgezet wordt in een andere soort energie (Muñoz et al., 2009).

5.4.15 Economische stimulans

Huizen waarop zonnepanelen zijn geïnstalleerd hebben hogere prijzen dan vergelijkbare huizen zonder panelen (Dastrup et al., 2012). Of hetzelfde geld voor huizen met zonneboilers op het dak is onbekend. Over de invloed van de plaatsing van zonneboiler op de lokale economie en werkgelegenheid is ook geen informatie te vinden.

5.5 Stromend water (Vortex, rivierturbines)

5.5.1 Technisch: veiligheid

Er zijn geen directe veiligheidsrisico's met betrekking tot VIVACE-cilinders en rivierturbines gevonden.

5.5.2 Technisch: opbrengst

In een eerder ACT-onderzoek is berekend wat de VIVACE-cilinder aan energie op zou wekken in de rivier Nederrijn (Pompe et al., 2012). Deze gegevens zijn weergegeven in tabel 5. Zoals te zien is in de tabel daalt de opbrengst snel met een lagere stroomsnelheid. De Nederrijn stroomt (met name op grotere diepte) meestal langzamer dan 1 m/s (Pompe et al., 2012). Zelfs in het meest gunstige geval (stroomsnelheid van 1 m/s) zijn te veel cilinders nodig om een bijdrage te kunnen leveren aan de energievoorziening van Wageningen.

Tabel 5: Energieopbrengst van kleine windturbines.

Stroomsnelheid (m/s)	Energie van één VIVACE cilinder (kWh/jaar)	Aantal benodigde cilinders om 16.000 MWh op te wekken.
1,00	152,53	104.897
0,50	19,01	841.662
0,25	2,38	6.722.689
0,00	0,00	-

Verschillende typen rivierturbines beginnen met het leveren van energie bij een stroomsnelheid van tenminste 0,5 m/s. Omdat de rivier Nederrijn dit niet altijd haalt, zal de opbrengst van een rivierturbine niet voldoende zijn om een realistische terugverdientijd te hebben of een relevante bijdrage te kunnen leveren aan de energievoorziening van Wageningen (Pompe et al., 2012).

5.5.3 Technisch: oppervlaktegebruik

Zoals in de vorige paragraaf is beschreven, is het niet mogelijk om exact te bepalen hoeveel rivierturbines nodig zijn om in de energiebehoefte van 1.839 Wageningse huishoudens te voorzien. Het is dan ook niet mogelijk om de totale benodigde oppervlakte te berekenen. Gegevens over het oppervlaktegebruik van één rivierturbine of VIVACE-cilinder zijn wel bekend. Een standaard rivierturbine heeft een diameter van 1,25 meter en neemt 0,45 m² in beslag (Alternative Hydro Solutions, 2014). De VIVACE-cilinder die gebruikt is voor de berekening van de energieopbrengst in de vorige paragraaf heeft een diameter van 3 meter en een hoogte van 2,5 meter. De benodigde oppervlakte kan berekend worden als er gedetailleerde gegevens over de stroomsnelheid van de Rijn bij Wageningen bekend zijn.

5.5.4 Technisch: invloed variabiliteit energiebron?

De opbrengst van rivierturbines en VIVACE-cilinders is afhankelijk van de stroomsnelheid van de Rijn (Alternative Hydro Solutions, 2014; Vortex Hydro Energy, 2014). De stroomsnelheid is afhankelijk van het debiet van de Rijn. Dit debiet is weer afhankelijk van de hoeveelheid smeltwater en neerslag stroomopwaarts (Reggiani & Weerts, 2008). In de lente is het debiet van de Rijn in het grootst, met pieken waarin de maximale afvoer ruim drie keer zo hoog is dan in de zomer (Lemans, 2007).

5.5.5 Financieel: Investeringskosten

Over de precieze kosten van de door ons geselecteerde rivierturbine is helaas geen informatie beschikbaar.

5.5.6 Financieel: Terugverdienperiode

Geen informatie beschikbaar

5.5.7 Financieel: Kosten per kWh

Geen informatie beschikbaar

5.5.8 Milieu: Emissies

Geen informatie beschikbaar

5.5.9: Milieu: Restafval en zware metalen

Bij VIVACE zijn alle mechanische en elektrische componenten afgesloten van het watermilieu (Bernitsas, 2008). De effecten van chemicaliën bij rivierturbines kunnen onder controle worden gehouden door geschikte, niet-toxische verfsoorten te gebruiken en ervoor te zorgen dat hydraulische vloeistoffen goed opgesloten zitten in de turbine (Cada, 2007).

5.5.10 Milieu: Visuele impact

Niet van toepassing.

5.5.11 Milieu: Geluid

Niet van toepassing.

5.5.12: Milieu: Habitats en soorten

Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy (VIVACE) maakt geen gebruik van propellers, turbines of dammen, en de trillingen van de cilinders zijn langzaam (ongeveer 1 cyclus per seconde), waardoor ze geen direct fysiek gevaar vormen voor vissen (VIVACE, 2013). Vissen lijken zelfs te gedijen in de stroming die veroorzaakt wordt door de cilinders.

Rivierturbines moeten op de een of andere manier aan de bodem bevestigd worden, door middel van palen in het sediment of door middel van ankers of kabels (Cada, 2007). Verstoring van het sediment kan bodemhabitats veranderen, de troebelheid van het water veranderen of vervuilende stoffen uit de bodem vrijmaken (Cada, 2007).

De Darrieus-turbine zal geen problemen vormen voor vissen: de beweging van de rotorbladen zal de vissen afschrikken. De breedte van de turbine i.v.m. de breedte van de rivier zal de vissen genoeg mogelijkheden geven om te migreren zonder in de turbine te belanden (Alternative Hydro Solutions, 2014). Als een vis toch door het langzaam roterende gedeelte komt, zullen de stompe hoeken en de openheid van de turbine ervoor zorgen dat de vis niet vast komt te zitten of beschadigd wordt (Alternative Hydro Solutions, 2014).

5.5.13 Sociale acceptatie

Geen informatie beschikbaar

5.5.14 Participatiemogelijkheden

Net als bij grote windturbines en SolaRoads zullen rivierturbines of Vortex Hydro Energy installaties door de gemeente worden gerealiseerd of uitbesteed. Van de inwoners wordt geen inbreng op dit gebied verwacht, maar zij zijn wel nodig voor de financiering van de installaties.

5.5.15 Economische stimulans

Geen informatie beschikbaar

5.6 Warmte-Koude Opslag (WKO)

5.6.1 Technisch: veiligheid

Er zijn geen directe veiligheidsrisico's gevonden met betrekking tot WKO.

5.6.2 Technisch: opbrengst

WKO is moeilijk toepasbaar in bestaande gebouwen (AgentschapNL, 2011) dus wordt het vooral toegepast in nieuw te bouwen woningen en bedrijfs- en kantoorpanden. Ook is de toepasbaarheid sterk afhankelijk van de bodemgeschiktheid. Delen van de gemeente Wageningen zijn geschikt voor het aanleggen van WKO-systemen, onder andere op de campus van Wageningen UR en in diverse woonwijken wordt de techniek gebruikt (Ruiten, 2009). Het is lastig te bepalen wat WKO voor Wageningen kan betekenen in termen van totale energieopbrengst. Volgens Michiel van der Wal, energiecoördinator van Wageningen UR, is een energiebesparing van 15 tot 20 % mogelijk

met behulp van een WKO-systeem (Michiel van der Wal, persoonlijke communicatie, 7 oktober 2014).

5.6.3 Technisch: oppervlaktegebruik

WKO gebruikt voornamelijk ruimte onder de grond. De hoeveelheid ruimte die een WKO-systeem nodig heeft hangt af van de diepte van het watervoerend pakket en van de hoeveelheid warmte die nodig is (BRON). Op 65 meter diepte zit in Wageningen een watervoerende laag die geschikt voor WKO (Michiel van der Wal, persoonlijke communicatie, 7 oktober 2014). Het is met de informatie die beschikbaar is voor ons niet mogelijk om te bepalen hoeveel ruimte een WKO-installatie precies in beslag zal nemen. Het is belangrijk om voldoende afstand te bewaren tussen de koude en de warme bron. Het grondwater in de verschillende bronnen stroomt langzaam naar elkaar toe, waardoor de bronnen in de toekomst (30-40 jaar) zich met elkaar zullen vermengen (Michiel van der Wal, persoonlijke communicatie, 7 oktober 2014).

5.6.4 Technisch: invloed variabiliteit energie

WKO maakt gebruik van temperatuurverschillen tussen de seizoenen. In de zomer wordt warmte die wordt gewonnen in gebouwen opgeslagen in het grondwater, terwijl in de winter koude wordt opgeslagen in de grond. De opgeslagen warmte en koude worden respectievelijk in de winter en zomer gebruikt om gebouwen op de juiste temperatuur te houden. De buitentemperatuur heeft invloed op de hoeveelheid warmte en koude kunnen worden opgeslagen, maar kortdurende temperatuurschommelingen of afwijkingen van gemiddelden hebben geen invloed op de opbrengst van WKO-systemen. Schommelingen op grotere schaal hebben wel invloed: in een warme zomer kan meer warmte worden gewonnen dan in een koele zomer. De winter van 2012-2013 was bijvoorbeeld erg koud, waardoor een sterkere afkoeling van de bodem dan in een gemiddelde winter is veroorzaakt en er een koude-overschot is in het WKO-systeem in Orion (Michiel van der Wal, persoonlijke communicatie, 7 oktober 2014).

5.6.5 Financieel: Investeringskosten

De kosten van WKO installaties variëren sterk afhankelijk van locatie, grootte en tijd van bouw (tijdens nieuwbouw of daarna). Kosten kunnen variëren van enkele duizenden euro's tot een half miljoen per installatie (Michiel van der Wal, persoonlijke communicatie, 7 oktober 2014).

5.6.6 Financieel: Terugverdienperiode

Op basis van een inschatting verkregen van Michiel van der Wal is de terugverdienperiode van een WKO installatie ongeveer 10 tot 15 jaar (Michiel van der Wal, persoonlijke communicatie, 7 oktober 2014).

5.6.7 Financieel: Kosten per kWh

Geen informatie beschikbaar.

5.6.8: Milieu: Emissies

WKO-systemen hebben een positief effect op het klimaat, omdat ze bijdragen aan de vermindering in CO₂-uitstoot (Rijkswaterstaat, 2014). Er wordt bespaard op het gebruik van conventionele brandstoffen, zoals bijvoorbeeld aardgas voor Cv-ketels. Er worden verder geen schadelijke stoffen geproduceerd door WKO-systemen (Michiel van der Wal, persoonlijke communicatie, 7 oktober, 2014).

5.6.9: Milieu: Restafval en zware metalen

Niet van toepassing / heeft geen impact (Michiel van der Wal, persoonlijke communicatie, 7 oktober 2014).

5.6.10 Milieu: Visuele impact

Niet van toepassing / heeft geen impact (Michiel van der Wal, persoonlijke communicatie, 7 oktober 2014).

5.6.11 Milieu: Geluid

Geen informatie bekend.

5.6.12 Milieu: Habitats en soorten

De gevolgen voor de bodem zullen minimaal zijn (Michiel van der Wal, persoonlijke communicatie, 7 oktober 2014). De temperatuurveranderingen van de bodem hebben waarschijnlijk geen grote invloed op bodemorganismen. De bodem kan tot 25 graden Celsius verwarmd worden zonder dat de bodemorganismen er last van hebben, maar bij een temperatuur van 35-40 graden Celsius verandert de samenstelling van de bodem (Michiel van der Wal, persoonlijke communicatie, 7 oktober 2014).

5.6.13 Sociale acceptatie

Geen informatie bekend.

5.6.14 Participatiemogelijkheden

WKO-installaties zijn het best toe te passen in nieuwbouwprojecten (Agentschap NL, 2011). Het initiatief voor de implementatie van WKO kan van de gemeente, de (toekomstige) gebruikers van de panden (inwoners of bedrijven) of van projectontwikkelaars komen. De gemeente kan een informerende rol aannemen om burgers en bedrijven op de hoogte te brengen van voor- en nadelen van WKO. De financiering van de systemen zal door burgers en bedrijven gebeuren.

5.6.15 Economische stimulans

Huizen die verwarmd en gekoeld worden door middel van WKO-systemen hebben hogere prijzen dan huizen verwarmd met gas (Dincer & Rosen, 2001). Over de verdere invloed van WKO-systemen op de Wageningse economie en werkgelegenheid is geen informatie te vinden.

5.7: Energie uit asfalt

5.7.1 Technisch: veiligheid

Geen extra directe veiligheidsrisico's.

5.7.2 Technisch: opbrengst

Dit is een WKO-systeem die extra warmte uit asfalt haalt. Daardoor wordt met dit systeem minder elektriciteit gebruikt voor het opwarmen van water dan bij een gewoon WKO-systeem.

Eén m² asfalt levert ongeveer 0.8 GJ energie per jaar (Zonneweg®, n.d.). Om een hoeveelheid energie op te wekken die in 1839 huishoudens in Wageningen per jaar gebruiken, is 72.002 m² asfalt nodig.

1. $0.8 * 277,77 \text{ kWh} = 222,216 \text{ kWh}$
2. $222,216 \text{ kWh} = 0,222216 \text{ MWh}$
3. $16.000 \text{ MWh} / 0.222216 \text{ MWh} = 72.002$

5.7.3 Technisch: oppervlaktegebruik

Er is 71.994 m² asfalt nodig om de hoeveelheid energie die in 1839 huishoudens wordt verbruikt te winnen. Een voordeel van de winning van warmte uit wegen, is dat het asfalt gewoon als weg gebruikt kan worden terwijl de energie gewonnen wordt. Voor de winning van energie is dus geen extra oppervlak nodig. Het WKO-systeem dat nodig is voor de opslag van warmte en koude uit asfalt is hetzelfde als het WKO-systeem dat eerder beschreven is (paragraaf 5.6).

5.7.4 Technisch: invloed variabiliteit energiebron?

De opbrengst van de warmtecollector in het asfalt hangt af van de buitentemperatuur, schaduw, windkracht en het type asfalt (Zonneweg, g.d.). Juist door die variabiliteit in de eerste twee factoren door het jaar heen, kan in de zomer warmte en in de winter koude worden gewonnen uit het asfalt.

5.7.5 Financieel: Investeringskosten

In de factsheet warmte-koude-opslag met asfaltcollectoren (Weijers & Rodink, n.d.) staat beschreven dat gegevens om een betrouwbare kosten-baten analyse van een dergelijk project te maken ontbreken. Toch is er een voorzichtige poging gedaan om de kosten en baten van het systeem in te schatten.

Wijers & Rodink rekenen een bedrag van 137,50 euro per vierkante meter asfaltcollector. Mochten de windmolens compleet vervangen worden door dit systeem, dan is er een wegoppervlak van 72.000 m² nodig. Dit zou betekenen een investering van 9,9 miljoen euro. Belangrijk gegeven is in deze kosten geen bijbehorend WKO systeem zit inbegrepen.

5.7.5 Financieel: Terugverdientijd

Gebaseerd op de geschatte opbrengst per m² asfaltcollector, en de prijzen (dezelfde als bij het zonthermische project) is een terugverdientijd geschat van 8 jaar. Van onderhoudskosten zijn geen gegevens beschikbaar, dus die zijn niet meegerekend in deze berekening.

5.7.6 Financieel: kosten per kWh

Kosten per kWh van de asfaltcollectoren komen neer op 1,6 cent per kWh. Dit lijkt goedkoop, maar er ontbreekt nog informatie over de kosten van het bijbehorende WKO-systeem en het onderhoud. Daarnaast is het aanleggen van een dergelijk systeem een complexe gebeurtenis, omdat bijvoorbeeld een weg tegelijk moet worden aangelegd met een bijbehorende bestemming voor de opgewekte warmte.

5.7.8 Milieu: Emissies

Er is nog geen onderzoek gedaan naar de specifieke besparing in CO₂-uitstoot. Uit een proefproject met het WinnerWay-systeem bij de N57 over de Haringvlietsluizen is echter berekend dat een wegoppervlak van 18.000 m² de CO₂ uitstoot per huis zou halveren, in vergelijking met huizen die worden voorzien door fossiele brandstoffen (Weijers en De Groot, 2007).

5.7.9 Milieu: Restafval en zware metalen

Niet van toepassing.

5.7.10 Milieu: Visuele impact

Niet van toepassing.

5.7.11 Milieu: Geluid

Niet van toepassing.

5.7.12 Milieu: Habitats en soorten

De effecten van een WKO-systeem op de bodem zijn minimaal (Michiel van der Wal, persoonlijke communicatie, 7 oktober, 2014).

5.4.13 Sociale acceptatie

Over de acceptatie van warmte-koudewinning uit wegen is nog geen veel informatie bekend. In Nederland is een aantal proeven uitgevoerd, maar daarbij is niet gekeken naar ervaringen van omwonenden (Weijers et al., 2000).

5.4.14 Participatiemogelijkheden

De gemeente is de wegbeheerder van alle lokale wegen in Wageningen (Rijksoverheid, 2014). De realisatie van warmte- en koudewinning uit wegen in Wageningen zal dus vooral op initiatief van de gemeente moeten gebeuren. Net als bij andere grootschalige projecten zal de participatie van burgers vooral bestaan uit de financiering.

5.15 Economische stimulans

Over de invloed van de aanleg van systemen om warmte en koude te winnen uit asfalt op huizenprijzen is geen informatie bekend, maar WKO-systemen in woningen leiden in het algemeen tot hogere huizenprijzen (Dincer & Rosen, 2001). De invloed van deze wegen op de lokale economie is onbekend.

5.5 Prestatiematrix: overzicht van de voor- en nadelen van alle alternatieven

		Grote windturbines	Kleine windturbines	Zonnepark (op groot deel daken al zonnepanelen gepland)	Zonneboilers	Warmte-koude opslag	Energie uit asfalt	Rivierturbines/Vivace
Technisch	Veiligheid	Infrageluid, slagschaduw	Mogelijke geluidshinder en slagschaduw	Minimale risico's	Minimale risico's	Onbekend	Onbekend	Minimale risico's
	Benodigd aantal eenheden technologie (om 16.000 MWh = energie voor 1839 huishoudens te winnen)	3	Turby®: 4.324 Swift™: 8.510 Energy Ball®: 12.629	91.250 - 183.000 m²	32.563 m²	Vooraf toepasbaar in nieuwbouwprojecten. Opbrengst lastig te berekenen	71.994 m2 asfalt	Nauwkeurige berekening niet mogelijk door te variabele stroming
	Oppervlaktegebruik	0.48 km²	Voornameeljk op daken Turby®: 22.917,2 m² Swift™: 26.721,4 m² Energy Ball®: 12.620 m²	91.250 - 183.000 m²	32.653 m²	Ondergronds	71.994 m2 asfalt	Onbekend
	Energie aanbod verdeling	Meer wind in de herfst en winter	Meer wind in de herfst en winter	Zonneschijn varieert per dan en seizoen.	Zonneschijn varieert per dan en seizoen.	Warmtewinning in zomer, koudewinning in de winter	Warmtewinning in zomer, koudewinning in de winter	Variabele stroming: waarschijnlijk te langzaam
Financieel	Investeringskosten €	€ 8.100.000	€ 44.000.000 tot €74.000.000	€ 19.440.000	€ 16.100.000	Onbekend	€10.037.500 (zonder WKO)	Onbekend
	Kosten Efficiëntie €/kWh	0.04	0.25 - 0.31	0.066	0.055	Onbekend	0.0165 (zonder WKO en onderhoud)	Onbekend
	Terugverdienperiode	10 jaar	25 - 32 jaar	31 jaar	23 jaar	10 - 15 jaar	8 jaar (zonder WKO & onderhoudskosten)	Onbekend
Milieu	Emissies	Onbekend	Onbekend	258 tot 1340 ton CO2/jaar	178 ton CO2/jaar; 9.916 kg NOx/jaar; 100,0 kg SO2/jaar; 33,3 kg fijnstof/jaar; 1,642 kg CH4/jaar	Geen	Geen	Geen
	CO2-besparing	5.280 tot 8.000 ton/jaar	9.056 ton/jaar	9.600 tot 16.000 ton/jaar	363 ton/jaar	Onbekend	Halvering CO2-uitstoot (schatting)	Onbekend
	Restafval en zware metalen	Minimaal	Minimaal	1.615 g Hg/jaar 0.323 g Cd/jaar	Koper en staal	Minimaal	Minimaal	Minimaal
	Visuele impact	Hangt af van beleving; impact vooral op direct omwonenden	Minimaal: hangt af van beleving; flikkeren door weerkaatsing zonlicht	Hangt af van beleving	Hangt af van beleving	Geen	Geen	Geen
	Geluid	Direct omwonenden: geluid hoger dan 47 dB.	Niet hoger dan 50 dB.	Geen	Geen	Geen	Geen	Geen
	Habitats en soorten	Voornameeljk aanvaringslachtoffers onder vogels en vleermuizen;	Minimaal	Aantasting land, bodem en vegetatie; aantasting verbindingroutes	Minimaal	Minimaal effect op bodem	Minimaal effect op bodem	Aantasting van bodem bij aanleg; minimaal effect op vissen
Sociaal	Acceptatie	Voor: elektriciteit uit wind goed idee Tegen: verstoring landschap, geluidsoverlast, hoge kosten, gevaar vogels, wantrouwen jegens uitvoerende organisatie	Voor: elektriciteit uit wind goed idee Tegen: Visuele impact en geluidsoverlast	Voor: positieve attitude in algemeen Tegen: angst voor verstoring landschap, gevolgen gezondheid, reflectie	Tegen: aantasting uiterlijk huis (maar: kleiner oppervlak dan zonnepanelen)	Onbekend	Onbekend	Onbekend
	Participatiemogelijkheden	Alleen financiering	Financiering + initiatief. Kleine windmolens relatief onbekend	Alleen financiering	Financiering + initiatief.	Financiering	Financiering	Financiering
	Economische stimulans	Geen effect op huizenprijzen. Invloed op lokale economie beperkt	Invloed op huizenprijzen onbekend	Geen effect op huizenprijzen. Invloed op lokale economie beperkt.	Onbekend	Hogere huizenprijzen	WKO-systeem leidt tot hogere huizenprijzen	Onbekend

6. Analyse van de resultaten

In het vorige hoofdstuk is een overzicht van de voor- en nadelen van de verschillende alternatieven gegeven. In dit hoofdstuk worden deze resultaten geïnterpreteerd in een gevoeligheidsanalyse en wordt een voorbeeld gegeven van hoe alternatieven gecombineerd kunnen worden.

6.1 Gevoeligheidsanalyse

Aan de hand van de resultaten van de toetsing die verwerkt zijn in de prestatiematrix kan een gevoeligheidsanalyse gedaan worden. Deze kan helpen bij het maken van een besluit over dit probleem. Per criteriagroep wordt aangegeven welke alternatieven Per criteriagroep wordt een analyse gegeven van welke alternatieven goed scoren op die criteria. Daarna worden een aantal combinatiescenario's voorgesteld waarin belang wordt gehecht aan een combinatie van twee criteria (bijv. milieu & financieel).

6.1.1 Technische criteria

Wanneer de meeste waarde wordt gehecht aan efficiëntie op technisch gebied zijn de interessante opties binnen de alternatieven de grote windturbines en WKO-systemen. Grote windturbines zijn in staat een hoop elektriciteit te leveren. Het nadeel hiervan is echter wel dat de opwekking van deze energie varieert met het windaanbod. Warmte-koude opslagsystemen hebben als voordeel dat ze weinig grondoppervlak nodig hebben (het grootste deel zit immers ondergronds). Daarnaast kan de gewonnen warmte opgeslagen kan worden om op een later tijdstip te gebruiken: iets wat windturbines niet kunnen. De potentiële opbrengst of besparing die een WKO systeem levert is echter lager dan die van windturbines.

6.1.2 Financiële criteria

Op financieel gebied behoren grote windturbines ook tot de meest aantrekkelijke opties. Daarnaast is een zonne-energie systeem (zonnepanelen of zonneboilers) een aantrekkelijke mogelijkheid. Windmolens leveren naar inschatting de goedkoopste kWh op en hebben de kortste terugverdienperiode. Zonnepanelen hebben een terugverdienperiode die ongeveer twee keer zo lang is. Dit betekent echter niet dat het een onaantrekkelijke optie is, want de geleverde kWh zijn nog steeds niet hoog in kostprijs (5 a 6 cent per kWh).

6.1.3 Milieucriteria

WKO-systemen en 'energie uit asfalt' vallen onder de milieuvriendelijkste alternatieven. Dit komt vooral door het feit dat deze systemen geen uitstoot, geluid en visuele impact teweegbrengen. Omdat WKO onder de grond zit en energie uit asfalt uit bestaande infrastructuur gewonnen wordt, leveren beide alternatieven geen problemen voor de habitat van soorten. Energie uit asfalt en WKO zijn complementaire systemen: warmte die wordt opgewekt uit asfalt kan worden opgeslagen in de grond.

6.1.4 Sociale criteria

Het is lastig om te bepalen welk alternatief het beste scoort op de sociale criteria. Er kan globaal een onderscheid worden gemaakt tussen twee typen alternatieven:

- Grootschalige alternatieven: grote windturbines, zonneparken, WKO, energie uit asfalt en rivierturbines. De gemeente speelt een grote rol in de implementatie van deze alternatieven. De mening van de burgers is belangrijk voor de gemeente, maar voor de uitvoering van deze grootschalige projecten is initiatief vanuit de bewoners niet noodzakelijk.
- Kleinschalige alternatieven: kleine windturbines en zonneboilers. Voor de implementatie van deze alternatieven is het initiatief vanuit de burgers nodig, omdat de infrastructuur voor de winning van energie op hun daken of grond geplaatst moet worden. Dit kan een directe barriere vormen voor de uitvoering van de plannen van de gemeente. Er moet dus goed ingespeeld worden op de wensen van de burgers.

6.1.5 Technisch / Financieel

In een situatie waarin de nadruk ligt op het technisch en financieel rendement, kan op basis van onze resultaten gesteld worden dat windturbines de beste optie zijn voor het opwekken van de beoogde hoeveelheid energie. Windmolens leveren, voor zover bekend, de goedkoopste kWh en nemen daarnaast de minste ruimte in voor de hoeveelheid energie die ze opleveren. Het nadeel van windturbines is dat ze te veel energie kunnen leveren op tijden dat het niet nodig is en te weinig energie wanneer het wel nodig is. Dit heeft te maken met de variabiliteit van het windaanbod en de vraag naar energie. Manieren om deze energie op te slaan en later weer te gebruiken zijn in ontwikkeling, maar worden op dit moment nog niet op grote schaal ingezet of zijn nog niet rendabel.

6.1.6 Sociaal/Milieu

Als de nadruk gelegd wordt op sociale- en milieucriteria, dan komen zonneboilers en WKO-systemen het beste uit de bus. Een nadeel van deze systemen is echter dat het niet realistisch is om ze 16.000 MWh op te laten wekken. Bovendien is het moeilijk om warmte over lange afstanden te vervoeren, dus moeten de installaties in de buurt van de plek waar de warmte gebruikt gaat worden, worden aangelegd. WKO systemen moeten tegelijk met de bebouwing die het gaat verwarmen aangelegd worden voor een optimale werking en om de kosten te drukken. Een nadeel van zonneboilers is dat ze, net als zonnepanelen, op daken geplaatst worden. De gemeente Wageningen is van plan om een groot deel van de daken al vol te leggen met zonnepanelen, dus misschien is er geen ruimte meer voor de zonneboilers. Het aanschaffen van zonneboilers is voornamelijk gunstig in grote projecten in verband met de subsidieregeling 'Stimulering Duurzame Energieproductie' en andere subsidies. Een mogelijke oplossing zou het aanleggen van een thermisch-zonnepark zijn, op of nabij grote warmte-afnemers, zoals bedrijventerreinen.

6.1.7 Milieu/Financieel

In een situatie waarin de nadruk wordt gelegd op prestaties op milieugebied, gecombineerd met financieel rendement zijn grote windturbines en WKO waarschijnlijk het aantrekkelijkst. Windturbines omdat ze financieel gezien het goedkoopst zijn en daarbij op milieucriteria relatief goed scoren (op het punt visuele impact na) en WKO systemen omdat die zich vrij snel terugverdienen en op milieugebied goed scoren. Over de precieze kosten van WKO-systemen kan echter niets gezegd worden.

6.1.8 Technisch/Milieu

Op het moment dat men zich focust op hoog rendement met zo min mogelijk impact op het milieu, zonder dat geld een rol speelt, zijn WKO en zonneboiler systemen de aantrekkelijkste opties.

6.2 Mix van alternatieven:

In het geval dat windmolens absoluut geen optie zijn binnen Wageningen moet de doelstelling op een andere manier behaald worden. Uit de resultaten blijkt dat er geen enkele technologie beschikbaar is die de opbrengst van de windturbines realistisch zou kunnen vervangen. Een zonnepark dat de opbrengst van de windmolens zou vervangen moet een vermogen hebben van ongeveer 18 watt. Er is in Zeeland een verkenning gaande naar een project van deze schaal ("Tholen krijgt grootste zonnepark van Nederland", 2014), maar naar onze inschatting is zo'n project niet realistisch in Wageningen. Een mix van alternatieven zou wellicht een interessantere optie zijn. Een voorbeeld daarvan staat hieronder beschreven.

Een zonnepark van 30.000 tot 60.000 vierkante meter (ongeveer 6 tot 12 voetbalvelden) aan panelen kan potentieel een opbrengst van 5.000 MWh per jaar leveren, dat is een derde van de elektriciteit die de windmolens op zouden leveren. De ruimte die dit park in beslag neemt zal in de randen van de grenzen van Wageningen gezocht moeten worden, bijvoorbeeld door het opkopen van weilanden. Volgens het financiële model zou dit park 6.5 miljoen euro kosten (exclusief kosten voor land). Dit project zou vergelijkbaar zijn met een project dat in Ameland gestart is, wat het

grootste zonnepark van Nederland moet worden ("Ameland krijgt grootste zonnepark Nederland", 2013).

Zonneboilers zijn ook in staat substantieel bij te dragen aan het winnen van energie. In het rapport '*Verduurzaming energiegebruik gebouwde omgeving Wageningen*' (Fens et al, 2010) staat beschreven hoe bij maximale inspanning zonneboilers mogelijk 50 TJ aan energie kunnen opleveren in Wageningen. Het praktijkplan is om in te zetten op 36 TJ, hier kan dus nog potentieel 14 TJ extra energie worden opgewekt. Dit komt overeen met ongeveer 3.900 MWh per jaar. Om dit te bereiken moet er goed worden nagedacht over waar en hoe er nog zonneboilers ingezet kunnen worden. Zoals bij zonnepanelen op daken ook het geval is, wordt er al ingezet op een hoog percentage van gebouwen dat zonneboilers moet krijgen, 70% van de woningen en ieder bedrijf dat een relevante warmtevraag heeft (Gemeente Wageningen, 2012). Bij bedrijven is de maatstaf nog niet erg concreet, hier valt mogelijk dus nog veel te halen. Grote projecten op zonthermisch gebied (collector oppervlakte van 100 m² of meer) komen in aanmerking voor SDE+.

Naast het zonnepark en zonneboilers is de aantrekkelijkste optie qua energieopbrengst, waar Wageningen nog niet (volledig) op inzet, de constructie van een systeem waar energie uit asfalt gehaald wordt. Asfalt kan ongeveer 220 kWh per m² per jaar opleveren aan energie. Het asfalt van het vierkant Ritzema Bosweg, Diedenweg/Mansholtlaan, Nijenoord Allee, Kortenoord Allee beslaat een lengte van ca 6.5 kilometer en een conservatief geschatte breedte van 3 meter. Het totale weggoppervlak op deze wegen is dus 19.500m². Dit zou potentieel energie leveren van 4290 MWh per jaar. De warmte die hierbij wordt opgewekt kan gebruikt worden door de bebouwing langs deze wegen, bijvoorbeeld door de verschillende studentencomplexen (Asserpark, Hoevestein, Bornsesteeg en Rijnsteeg), particuliere woningen of het agri-business park. Een project als dit vergt echter veel en precieze planning, omdat tegelijkertijd met de wegcollectoren de benodigde infrastructuur voor warmteopslag en gebruik door omliggende gebouwen moet worden aangelegd. Omdat deze bebouwing er al staat is het extra moeilijk om deze mogelijkheden hier nog in te passen.

De combinatie van deze drie alternatieven levert een potentiële opbrengst van zo'n 13.000 MWh per jaar op, 3.000 MWh minder dan de windturbines. Alternatieven om dit gat op te vullen zijn bijvoorbeeld kleine windturbines, hoewel die qua financiën (nog) niet erg werkbaar zijn. Om een jaarlijkse opbrengst van 3.000 MWh te behalen met kleine windturbines moeten er zo'n 810 Turby's® worden geplaatst, dit lijkt niet een heel realistische optie.

7. Trends

In dit hoofdstuk behandelen we een aantal trends en ontwikkelingen die gaande zijn op het gebied van duurzame energie. Het gaat hierbij onder andere om alternatieven die op dit moment nog in een innovatief stadium zijn en wellicht in de toekomst toegepast kunnen worden. Hiertoe behoren ook enkele alternatieven die niet meegenomen zijn in onze toetsing. In de eerste paragraaf worden een aantal algemene trends beschreven. In de paragrafen daarna worden ontwikkelingen op het gebied van een aantal technologieën voor de winning van duurzame energie beschreven. Deze technologieën zijn: SolaRoads, Plant-e en piëzo-elektriciteit. Daarnaast kijken we naar de mogelijkheden voor een combinatie tussen thermische en fotovoltaïsche panelen op daken. Tenslotte wijden we een paragraaf aan mogelijkheden op het gebied van energieopslag door middel van waterstof en micro-organismen die waterstof produceren.

7.1 Algemene trends

Een algemene trend die waarschijnlijk de komende decennia door gaat zetten is een stijging van de energieprijzen. Naar verwachting stijgen de wereldprijzen van steenkool met zo'n 10 procent, de olieprijs met ruim 30 procent en de gasprijzen zelfs met meer dan 40 procent (Oxford Economics, 2009). Deze trends kunnen de energiewinning uit duurzame bronnen relatief goedkoper en dus aantrekkelijker maken.

7.2 SolaRoads

Bij SolaRoad wordt zonlicht dat op het wegdek opgevangen door zonnecellen en omgezet in elektriciteit (SolaRoad, 2014). Er wordt gebruik gemaakt van betonnen modules met een geharde glazen en lichtdoorlatende toplaag van ongeveer 1 cm dikte; onder het glas liggen kristallijn silicium cellen.

De SolaRoad is een innovatief concept dat momenteel nog in de testfase verkeert. SolaRoads zijn nog niet op grote schaal uitgevoerd, dus er is nog weinig informatie bekend over voor- en nadelen volgens gebruikers en omwonenden. Er is echter al wel een SolaRoad-pilot gepland voor het najaar van 2014 bij Krommenie, langs de provinciale weg N203 (Maassen, 2011). Dit pilot-fietspad van 100m wekt naar verwachting elektriciteit voor drie tot vier huishoudens op (SolaRoad, 2014b). Op de website van SolaRoad staat dat het testfietspad veilig en comfortabel is, dus waarschijnlijk is er voor weggebruikers geen verschil met gewone wegen (SolaRoad, 2014). De gemeente is de wegbeheerder van alle lokale wegen in Wageningen (Rijksoverheid, 2014). De realisatie van SolaRoads in Wageningen zal dus vooral op initiatief van de gemeente moeten gebeuren. Net als bij grote windturbines zal de participatie van burgers vooral bestaan uit de financiering. Omdat het concept van SolaRoads nog in de testfase verkeert en waarschijnlijk niet binnen korte termijn op grote schaal in Wageningen mogelijk is, hebben we dit concept niet meegenomen in onze toetsing.

7.3 Plant-e

Plant-e ontwikkelt producten waarbij elektriciteit opgewekt wordt door levende planten (Plant-e, 2014). De organische afvalstoffen die geproduceerd worden door de plant worden afgebroken door micro-organismen die rond de wortels leven. Bij dit proces komen elektronen vrij; deze kunnen worden opgenomen door een elektrode om elektriciteit op te slaan. Deze techniek is veilig voor zowel de plant als zijn omgeving (Plant-e, 2014).

Er zijn inmiddels al enkele producten op de markt gebracht, zoals de Plant-e-roof, om elektriciteit voor gebouwen op te wekken door middel van planten op het dak, en Plant-e-mobile, voor het opladen van je mobiele telefoon (Plant-e 2014). Plant-e is inmiddels ook gestart met de productie van de eerste modulaire systemen: de systemen zullen geïnstalleerd worden op het HEMbrug-terrein in Zaandam en op een later te bepalen locatie in Ede/Wageningen (Plant-e, 2014). Omdat dit systeem zich voor een groot deel nog in de testfase bevindt en veel zaken nog onduidelijk zijn, is het geen realistisch alternatief voor Wageningen op de korte termijn.

7.4 Piëzo-elektriciteit

Door middel van druk op bepaalde materialen kan elektriciteit worden opgewekt. Met deze technologie is onder andere een 'energiedansvloer' gebouwd (Sustainable Dance Club, 2011) en zijn er testen op snelwegen uitgevoerd, maar hieruit blijkt dat de energieopbrengst van deze methode nog te laag is om op grote schaal elektriciteit op te wekken (Weijers & de Groot, 2007). Als er in de toekomst een methode wordt gevonden om op grotere schaal energie op te wekken uit druk van voertuigen op wegen, zou piëzo-elektriciteit toegepast kunnen worden in Wageningen. Een voordeel van deze methode is dat er geen extra grond nodig is voor het opwekken van elektriciteit, omdat de wegen er toch al zijn.

7.5 Combinatie thermische en PV-panelen

Thermische en fotovoltaïsche panelen kunnen wellicht gecombineerd worden, om meer rendement te halen uit zonlicht. Een voorbeeld hiervan is de Dimark Module, een kunststof module die functioneert als dakbedekking, dienst doet als warmtecollector en drager is voor verschillende PV-panelen (Agentschap NL, 2011). De kunststof module is flexibel vorm te geven en te gebruiken als bouwelement (Agentschap NL, 2011). Er zijn echter nog geen concrete cijfers bekend over de hoeveelheid energie die deze modules opleveren, omdat deze techniek nog in ontwikkeling is. Wanneer deze techniek op grote schaal ingezet kan worden, is het mogelijk een goede optie voor particuliere huishoudens en nieuwbouwprojecten.

7.6 Energieopslag

Een andere ontwikkeling is onderzoek naar methoden om (duurzaam) opgewekte elektriciteit op te slaan. Een probleem gerelateerd aan een aantal duurzame energietechnologieën is nu nog dat vraag en aanbod niet op elkaar afgestemd kunnen worden. In het criterium 'variabiliteit energiebron' is voor elk alternatief aangegeven hoe de spreiding van de opwekking per jaar is. Zonnepanelen brengen bijvoorbeeld in de zomer het meest op, omdat de zon dan meer schijnt dan in de andere seizoenen. De meeste elektriciteit wordt echter in de winter gebruikt (zie: paragraaf 1.1.3). Op dit moment is het nog niet mogelijk om elektriciteit die in de zomer opgewekt is op te slaan om het in de winter te gebruiken, omdat de batterijen van nu daar nog niet geschikt voor zijn. Onderzoek naar de ontwikkeling van kleinere batterijen met een grotere capaciteit is in volle gang (bijv. Aramand & Tarascon, 2008), dus in de toekomst is opslag van elektriciteit mogelijk rendabeler. Op die manier kunnen vraag en aanbod van duurzame elektriciteit beter op elkaar afgestemd worden en dat maakt duurzame energiebronnen aantrekkelijker voor de winning van energie. Hieronder worden nog een aantal andere ontwikkelingen op het gebied van opslag van energie behandeld.

7.6.1 Waterstofgas

Waterstof zou een grote rol kunnen spelen als vervanging van fossiele brandstoffen, omdat er geen schadelijke stoffen uitgestoten worden (Barbir, 2005). Waterstof is echter geen energiebron, omdat het niet in zijn elementaire vorm voorkomt en dus geproduceerd moet worden. Het is echter wel een *energy carrier*, net als bijvoorbeeld elektriciteit (Barbir, 2005) en is dus geschikt als een vorm van energieopslag. De meest voorkomende bron van waterstof is water, maar dit moet gesplitst worden, waar veel energie voor nodig is (Barbir, 2005). De hoeveelheid energie die benodigd is om waterstof te produceren, is groter dan de energie die het oplevert. Waterstof is alleen duurzaam als de energie die gebruikt wordt om het te produceren afkomstig is van een duurzame bron, zoals windenergie of zonne-energie (Milieuloket, 2014). Met het oog op duurzaamheid is een synergie tussen waterstof en elektriciteit daarom een interessante optie (Barbir, 2005). Naast elektrolyse kan waterstof gewonnen worden uit koolwaterstoffen; de meeste waterstof wordt op deze manier gewonnen uit natuurlijke gassen (Momirlan, 2005). Daarnaast kan waterstof gewonnen worden uit biomassa: door middel van hitte kan vaste biomassa vloeibaar gemaakt worden. Vervolgens wordt stoom gebruikt om waterstof uit de bio-olie te genereren (Momirlan, 2005). Waterstof is op dit moment duurder dan traditionele energiebronnen. De productie-efficiëntie en de infrastructuur om waterstof te transporteren moet verbeterd worden om dit realistisch te maken (Momirlan, 2005).

7.6.2 Micro-organismen

Waterstof kan door een groot aantal microbiële organismen geproduceerd worden, bijvoorbeeld micro-algen en cyanobacteriën kunnen door middel van zonlicht water omzetten in waterstof (Meher Kotay, 2008). Deze vorm van waterstofproductie is een aantrekkelijke methode om in de toekomst significant bij te dragen aan de waterstofvoorraad. Daarnaast is vergisting door micro-organismen een veelbelovende methode, ondanks de relatief lage opbrengst in waterstof (Meher Kotay, 2008). Bij de oxidatie van organische substraten door anaerobe micro-organismen komt waterstof vrij (Meher Kotay, 2008). Het is echter nog niet zeker of deze methode zo ontwikkeld kan worden dat het voldoende waterstof produceert en zo kan concurreren met fossiele brandstoffen en met andere methodes om waterstof op te wekken. Deze technologie moet dus eerst verder ontwikkeld worden, voordat het een rendabel alternatief zou kunnen zijn voor fossiele brandstoffen.

7. Discussie en conclusie

Een Multi-Criteria Analyse is een geschikte methode voor het in kaart brengen van verschillende aspecten die gekoppeld zijn aan een probleem. Toch heeft het uitvoeren van een Multi-Criteria Analyse ook zijn nadelen.

Om een objectieve uitslag van de Multi-Criteria Analyse te krijgen is het belangrijk dat de geselecteerde criteria samen een zo breed mogelijk spectrum aan aspecten belichten. Bijvoorbeeld; al zouden de verschillende alternatieven enkel getest worden op opbrengst en visuele impact, dan zouden windturbines bij voorbaat al slecht scoren, omdat van te voren al bekend is dat die het meeste in het zicht liggen. De selectie van criteria is dus sturend voor de uitslag. Hoewel er bij het opstellen van de criteria zorgvuldig is gelet op de objectiviteit kan het dus zijn dat met andere criteria tot andere resultaten gekomen wordt.

Een brede selectie van criteria is belangrijk voor de objectiviteit van het onderzoek, maar heeft als nadeel dat het moeilijk is geworden om alle aspecten heel ver uit te diepen in de tijd die voor dit project is gegeven. Hierdoor kunnen de uitslagen van de Multi-Criteria Analyse slechts gezien worden als een indicatie.

Doordat de MCA een breed scala aan alternatieven vergelijkt, die op verschillende locaties inzetbaar zijn, zijn de resultaten op bepaalde punten moeilijk met elkaar te vergelijken. Zo is het oppervlaktegebruik van een zonneboiler niet te vergelijken met die van een windturbine, omdat een zonneboiler op een dak ligt als deel van een multifunctioneel oppervlak en een windturbine maar een klein stukje land nodig heeft, maar wel hoog in de lucht steekt. Omdat alle resultaten in de juiste context geplaatst moeten worden, is het moeilijk om de resultaten op een objectieve manier te visualiseren.

De financiële analyse is veelal gebaseerd uit getallen afkomstig uit de SDE+subsidie, of het advies voor kengetallen SDE+. Opbrengsten uit de SDE+subsidie zijn laag, en er zijn financiële constructies denkbaar waarin projecten een stuk rendabeler gemaakt kunnen worden en waardoor de terugverdientijd teruggebracht kan worden. Omdat de mogelijkheden hiervoor uitgebreid en ingewikkeld zijn is ervoor gekozen om waar mogelijk de getallen van SDE+ aan te houden, ook om projecten makkelijker met elkaar te vergelijken.

Uit deze Multi-Criteria Analyse kan geconcludeerd worden dat er een aantal alternatieven zijn voor windturbines in Wageningen. Een zonnepark en systemen die WKO, zonneboilers en warmte uit asfalt combineren zijn daarvan waarschijnlijk de meest realistische alternatieven die binnen Wageningen een substantiële bijdrage kunnen leveren aan het opwekken van energie. Wat echter wel blijkt is dat waarschijnlijk geen van deze alternatieven als op zichzelf staand systeem de hoeveelheid elektriciteit die windturbines opwekken kunnen vervangen. Er moet dus worden gekeken naar een mix van alternatieven, zoals genoemd in de analyse van de resultaten. Daarnaast zijn windturbines waarschijnlijk op financieel gebied nog steeds de meest aantrekkelijke investering.

Kleine windturbines kunnen een kleine bijdrage leveren aan het opwekken van elektriciteit binnen de grenzen van Wageningen, maar zijn op dit moment financieel nog niet rendabel. Over rivierturbines is nog niet genoeg informatie te verkrijgen, maar waarschijnlijk kunnen die vanwege de lage stroomsnelheid van de Rijn geen substantiële bijdrage te leveren aan de energiewinning in Wageningen.

Omdat veel resultaten van deze analyse gebaseerd zijn op inschattingen, dient naar ieder alternatief dat in dit rapport genoemd wordt nog verder onderzoek gedaan te worden voordat deze geïmplementeerd kan worden. Onderzoek naar alternatieve locaties voor grote windturbines is aan te raden vanwege hun hoge potentiële opbrengst.

Om technieken in te zetten op de plek waar ze het efficiëntst zijn, is het aan te bevelen om ook buiten de gemeentegrenzen te kijken. Samenwerking met andere gemeenten kan mogelijk tot een hoger rendement leiden dan wanneer iedere gemeente apart haar energievoorziening regelt. Een andere mogelijkheid is om nog eens kritisch te kijken naar de doelstelling Klimaatneutraal 2030. De haalbaarheid van 50% lokale energieopwekking en 50% groen ingekochte energie kan nog eens goed onder de loep worden genomen en de verhouding zou eventueel aangepast kunnen worden.

Referenties

Artikelen en rapporten

- Abbasi, T., & Abbasi, S.A. (2010) Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 919-937.
- Achillas, C., Vlachokostas, C., Moussiopoulos, N., Baniyas, G., Kafetzopoulos, G., & Karagiannidis, A. (2011). Social acceptance for the development of a waste-to-energy plant in an urban area. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9), 857-863.
- Alanne, K., & Saari, A. (2006). Distributed energy generation and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(6), 539-558.
- Alsema, E. A., Wild-Scholten, M.J. de & Fthenakis, V.M. (2009). Environmental and landscape impacts of photovoltaic systems: definition of impacts and assessment of the glare risks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (9), 2441-2451.
- Armand, M., Tarascon, J.M. (2008). Building better batteries. *Nature*, 451, 652-657.
- Barbir, F. (2005). PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources" *Solar Energy* 78 (5), 661-669.
- Bernitsas, M. M., Raghavan, K., Ben-Simon, Y., & Garcia, E. M. (2008). VIVACE (vortex induced vibration aquatic clean energy): a new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 130(4), 041101.
- Bussel, G. J. W van., Mertens, S., Polinder, H., & Sidler, H. F. A. (2004, April). TURBY®: concept and realisation of a small VAWT for the built environment. In *EAWE/EWEA conference, Delft*.
- Bussel, G.J.W. van (2013). Electricity Generation with Small Windturbines. *Renewable Energy Systems* 2013, 696-713.
- Cace, J., Horst, E. ter, Syngellakis, K., Niel, M., Clement, P., Heppener, R., & Peirano, E. (2007.) *Urban Wind Turbines: Guidelines for small windturbines in the built environment*. WINEUR: Wind Energy Integration in the Urban Environment.
- Cada, G., Ahlgrimm, J., Bahleda, M., Bigford, T., Stavrakas, S. D., Hall, D., ... & Sale, M. (2007). Potential impacts of hydrokinetic and wave energy conversion technologies on aquatic environments. *Fisheries*, 32(4), 174-181.
- Cavallaro, F., & Ciruolo, L. (2005). A multicriteria approach to evaluate wind energy plants on an Italian island. *Energy Policy*, 33(2), 235-244.
- Chiabrando, R., Fabrizio, E., & Garnero, G. (2009). The territorial and landscape impacts of photovoltaic systems: definition of impacts and assessment of the glare risk. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2441-2451.
- Dastrup, S.R., Zivin, J.G., Costa, D.L. & Kahn, M.E. (2012). Understanding the Solar Home price premium: Electricity generation and 'Green' social status. *European Economic Review*, 56 (5), 961-973.
- Dayan, E. (2006). Wind energy in buildings: Power generation from wind in the urban environment - where it is needed most. *Refocus*. 7 (2), 33-34, 36, 38.

Department for Communities and Local Government (2009). *Multi-criteria analysis manual for making government policy*. London. ISBN: 9781409810230. Geraadpleegd op 10 september 2014 via <https://www.gov.uk/government/publications/multi-criteria-analysis-manual-for-making-government-policy>

Devine-Wright, P. (2005). Beyond NIMBYism: towards an Integrated Framework for Understanding Public Perceptions of Wind Energy. *Wind Energy*, 8, 125-138.

Devine-Wright, P. (2007). *Reconsidering public attitudes and public acceptance of renewable energy technologies: a critical review*. Working paper

Dewit, L. (2008). *Hernieuwbare energie als alternatieve energiebron: een realistische opportuniteit of 'wishful thinking'*. Universiteit Gent: Masterproef.

Dewit, L., & Dentchev, N. (2010). *Hernieuwbare energie als alternatieve energiebron: een realistische opportuniteit of "wishful thinking"*. Gent: Universiteit Gent. Masterproef.

Dincer, I. & Rosen, M.A. (2001). Energetic, environmental and economic aspects of thermal energy storage systems for cooling capacity. *Applied Thermal Engineering*, 21 (11), 1105-1117.

Dresselhaus, M.S. & Thomas, I.L. (2001). Alternative energy technologies. *Nature*, 414, 332-337.

D'Souza, C. & Yiridoe, E.K. (2014). Social acceptance of wind energy development and planning in rural communities of Australia: A consumer analysis. *Energy Policy*, In Press: Corrected Proof.

Dvir, R. & Pasher, E. (1997). Innovation engines for knowledge cities: an innovation ecology perspective. *Journal of Knowledge Management*, 8 (5), 16-27.

Emami, A., & Noghreh, P. (2010). New approach on optimization in placement of wind turbines within wind farm by genetic algorithms. *Renewable Energy*, 35(7), 1559-1564.

Everaert, J., Koen D., & Eckhart Kuijken (2002). Windturbines en vogels in Vlaanderen. *Instituut voor Natuurbehoud, Brussels*.

Faiers, A. & Neame, C. (2006). Consumer attitude towards domestic solar power systems. *Energy Policy*, 34 (14), 1797-1806.

Fens, J., Manders, H., Manussen, T., Remmers, J. (2010). *Verduurzaming energiegebruik gebouwde omgeving Wageningen*. Delft: BuildDesk.

First Solar (2011). Municipal and Public Consultation Report: Amherstburg Solar Farm. Retrieved via Nelson, H., Michaud, S., Sanborn, E. (2012). Analysis of Social Impact Assessment for Solar Energy Projects. In: Sprague, C., Parkins, J.R. (2012). *Social Impact Assessment of Alternative Energy Production in Alberta*. University of Alberta: project report.

Gemeente Wageningen (2012). *Routekaart - Wageningen klimaatneutraal in 2030*. Wageningen.

Hoen, B., Wiser, R., Cappers, P., Thayer & M., Sethi, G. (2011). Wind Energy Facilities and Residential Properties: The Effect of Proximity and View on Sales Prices. *Journal of Real Estate Research*, 33 (3), 279-316

Jongmans A.G., van den Berg M.W., Sonneveld M.P.W., Peek G.J.W.C., van den Berg van Saparoea R.M. (2013) *Landschappen van Nederland Geologie, Bodem en Landgebruik deel 1*. Wageningen Academic Publishers. ISBN: 978-90-8686-213-9

- Kahraman, C., Kaya, I. (2010). A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives. *Expert Systems with Applications*, 37 (9), 6270-6281.
- Kaldellis, J.K., Kapsali, M., Kaldelli, E., Katsanou, E. (2013). Comparing recent views of public attitude on wind energy, photovoltaic and small hydro applications. *Renewable Energy*, 52, 197-208.
- Kalogirou, S. (2009). Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters. *Solar Energy* 83 (1), 39-48.
- Kistenkas, F.H. (2012). *Recht voor de groenblauwe ruimte*. Wageningen Academic Publishers.
- Klimaatmonitor (2013). *Swing Quickstep: Hernieuwbare Energie in Nederland*. Via: http://www.klimaatmonitor.databank.nl/quickstep/QsReport.aspx?report=hernieuwbaar_html
- Kok, K., Botman, S., Dijksman, R., Goede, R de., Heusinkveld, B., Keizer, M., Koopmans, G., Lanen, H van., Molen, M van der., Peek, G., Peeters, E., Ploeg, M van der., Stoorvogel, J. (2014). *Syllabus Intergratievak Bodem, Water en Atmosfeer*. Wageningen Universiteit.
- Lemans, J.M. (2007). *Afvoerverdeling Rijntakken*. TU Delft: Afstudeeronderzoek Potentie Meet- en Regeltechniek op grote watersystemen in Nederland.
- Leung, D.Y.C. & Yuan Y. (2012) Wind energy development and its environmental impact: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (1), 1031-1039.
- Lior, N. (2010). Sustainable energy development: the present (2009) situation and possible paths to the future. *Energy*, 35(10), 3976-3994.
- Luijendijk, E., 2012. *The role of fluid flow in the thermal history of sedimentary basins – Inferences from thermochronology and numerical modeling in the Roer Valley Graben, southern Netherlands*. PhD thesis, Vrije Universiteit Amsterdam (Amsterdam).
- Meher Kotay, S., & Das, D. (2008). Biohydrogen as a renewable energy resource—prospects and potentials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(1), 258-263.
- Momirlan, M., & Veziroglu, T. N. (2005). The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(7), 795-802.
- Munday, M., Bristow, G., & Cowell, R. (2011). Wind farms in rural areas: How far do community benefits from wind farms represent a local economic development opportunity? *Journal of Rural Studies*, 27 (1), 1-12.
- Muñoz, J., Abánades, A., & Martínez-Val, J. M. (2009). A conceptual design of solar boiler. *Solar Energy*, 83(9), 1713-1722
- Najera, Y., Reed, D.R., & Grady, W.M. (2011). Image processing methods for predicting the time of cloud shadow arrivals to photovoltaic systems. *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011 37th IEEE* (pp. 000188-000191). IEEE.

Nelson, H., Michaud, S., & Sanborn, E. (2012). Analysis of Social Impact Assessment for Solar Energy Projects. In: Sprague, C., Parkins, J.R. *Social Impact Assessment of Alternative Energy Production in Alberta*. University of Alberta: project report.

Nissenbaum, M. A., Aramini, J. J., & Hanning, C. D. (2012). Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health. *Noise and Health*, 14(60), 237.

Nowotny, J., Bak, T., Chu, D., Fiechter, S., Murch, G.E., & Veziroglu, T.N. (2014). Sustainable practices: Solar hydrogen fuel and education program on sustainable energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(9), 4151-4157.

Oerlemans, S., Sijtsma, P., & Méndez López, B. (2007). Location and quantification of noise sources on a wind turbine. *Journal of sound and vibration*, 299(4), 869-883.

Olaleye, A. K., Kunle J. Adedayo, K., Wub, C., Nahilb, M.A. Wanga, M., Williamsb, P.T. Experimental study, dynamic modelling, validation and analysis of hydrogen production from biomass pyrolysis/gasification of biomass in a two-stage fixed bed reaction system, Fuel, 137, 364-374.

Oxford Economics (2009). IEA WEO 2009. Geciteerd in: European Climate Foundation (2010). *Roadmap 2050: a practical guide to a prosperous, low-carbon Europe*. Volume I: technical and economic assessment.

Paraschivoiu, I. (2002). *Wind Turbine Design*. Ecole Polytechnique fe Montreal.

Permet, B.W.A.H., Langemheen, W. van de, Chbab, E.H., Kwadijk, J.C.J., Diermanse, F.L.M, Klopstra, D. (2001). *Analyse van de maatgevende afvoer van de Rijn te Lobith*. Arnhem: Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat.

Pedersen, E., Hallberg, LR-M., & Wayne, K.P. (2007). Living in the Vicinity of Wind Turbines - A Grounded Theory Study. *Qualitative Research in Psychology*, 4 (1-2), 49-63.

Pinel, P., Cruickshank, C.A., Beausoleil-Morrison, I., Wills, A. (2011). A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (7), 3341-3359.

Pompe, L., Boxem, F., Weijtmans, T., Khanal, G., Lam, T.K., Strauch, S., Schalkwijk, B., Bobasa, A., Muijs, F., Elzinga, J., Sudirjo, E., Beek, B. van der (2012). *H2gO - Making rivers work*. ACT-project in opdracht van de gemeente Wageningen.

Raghavan, K. (2007). *Energy extraction from a steady flow using vortex induced vibration*. University of Michigan: Doctoral dissertation.

Ramanathan, V., & Y. Feng. (2009). Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment* 43 (1), 37-50.

Reggiani, P, & Weerts, A.H. (2008). A Bayesian approach to decision-making under uncertainty: An application to real-time forecasting in the river Rhine. *Journal of Hydrology*, 356 (1-2), 56-69.

RenCom (2010). Parktische toepassing van mini-windturbines. *Agentschap NL*, Utrecht.

Rideout, K., Copes, R., & Bos, C. (2010). *Wind turbines and health*. National Collaborating Centre for Environmental Health,

- Rodman, L.C. & Meentemeyer, R.K. (2006). A geographic analysis of wind turbine placement in Northern California. *Energy Policy*, 34 (15), 2137-2149.
- Ruiten A. van, Wanders J., Vrieswijk S., (2009). *WKO potentiekaart gemeente Wageningen*. in opdracht van Gemeente Wageningen
- Saidur, R., Rahim, N. A., Islam, M. R., & Solangi, K. H. (2011). Environmental impact of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2423-2430.
- Sark, W van. (2014). *Opbrengst van zonnestroomsystemen in Nederland*. Utrecht, Copernicus instituut voor duurzame ontwikkeling
- Sauter, R., Watson, J. (2006). Strategies for the deployment of micro-generation: Implications for social acceptance. *Energy Policy*, 35 (5), 2770-2779.
- Scott, F.L., Jones, C.R., Webb, T.L. (2014). What do people living in deprived communities in the UK think about household energy efficiency interventions? *Energy Policy*, 66, 335-349.
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgozm S., Hayes, D., & Yu, T. H. (2008). Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, 319(5867), 1238-1240.
- SenterNovem (2005). *De Windkaart van Nederland op 100 m hoogte*. door KEMA Nederland B.V in opdracht van SenterNovem
- Shepherd, D., McBride, D., Welch, D., Dirks, K. N., & Hill, E. M. (2011). Evaluating the impact of wind turbine noise on health-related quality of life. *Noise and Health*, 13(54), 333.
- Shine, K. P., Fuglestvedt, J. S., Hailemariam, K., & Stuber, N. (2005). Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases. *Climatic Change*, 68(3), 281-302
- Shireen, M.K., & Das, D. (2008). Biohydrogen as a renewable energy resource—prospects and potentials. *International Journal of Hydrogen Energy* 33 (1), 258-263.
- Simon, A.M. (1996) A summary of Research Conducted into Attitudes to Wind Power from 1990-1996. *British Wind Energy Association*.
- Sims, S., Dent, P., Oskrochi, R. (2010). Modelling the impact of wind farms on house prices in the UK. *International Journal of Strategic Property Management*, 12 (4), 251-269.
- Smits, R.R. Hoefsloot, G., Leusink, E.H.P., Prinsen, H.A.M. (2011). *Quickscan effecten op natuur van windpark Wageningen*. Culumborg: Bureau Waardenburg B.V.
- Soens J. (2005) *Impact of wind energy in a future power grid*. Katholieke Universiteit Leuven – Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Proefschrift
- Solangi, K. H., Islam, M. R., Saidur, R., Rahim, N. A., & Fayaz, H. (2011). A review on global solar energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2149-2163.
- Sornes, K. (2010). Small-scale water current turbines for river applications. *Zero Emission Resource Organisation (ZERO)*.
- Sovacool, B. K. (2009). Contextualizing avian mortality: A preliminary appraisal of bird and bat fatalities from wind, fossil-fuel, and nuclear electricity. *Energy Policy*, 37(6), 2241-2248.

- Stein, E. W. (2013). A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 640-654.
- Tsiliniridis, G., Martinopoulos, G., & Kyriakis, N. (2004). Life cycle environmental impact of a thermosyphonic domestic solar hot water system in comparison with electrical and gas water heating. *Renewable Energy* 29 (8), 1277-1288.
- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, 33(3), 289-296.
- Tsoutsos, T., Drandaki, M., Frantzeskaki, N., Iosifidis, E., & Kiosses, I. (2009). Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. *Energy Policy*, 37(5), 1587-1600.
- Turney, D., & Fthenakis, V. (2011). Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3261-3270.
- Udomsirichakorna, J., Basub, P., Salama, P.A., Acharyac B. (2014). CaO-based chemical looping gasification of biomass for hydrogen-enriched gas production with in situ CO₂ capture and tar reduction, Fuel Processing Technology, 127, 7-12
- Uitzinger, J. (2013). *Gemeentelijk draagvlakonderzoek windenergie 2013*. Amsterdam: IVAM research and consultancy on sustainability.
- Upton, B., Miner, R., Spinney, M., & Heath, L. S. (2008). The greenhouse gas and energy impacts of using wood instead of alternatives in residential construction in the United States. *Biomass and Bioenergy*, 32(1), 1-10.
- Velthuisen, S. (2014). *Haalbaarheidsstudie Windturbines in de omgeving Havenkanaal*. Utrecht: Bosch & van Rijn.
- Verbruggen, A., Fishedick, M., Moomaw, W., Weir, T., Nadai, A., Nilsson, L. J., ... & Sathaye, J. (2010). Renewable energy costs, potentials, barriers: conceptual issues. *Energy Policy*, 38(2), 850-861.
- Vermeer, E. (2003). *Slagroomkloppers, grasmaaiers of wikkels? Een onderzoek naar de implementatie van kleine windturbines in de gebouwde omgeving van Noord-Brabant*. Technische Universiteit Eindhoven: Afstudeeronderzoek.
- Vermeer, L.J., Sørensen, J.N., & Crespo, A. (2003). Wind turbine wake aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 39 (6-7), 467-510.
- Voorde M. ter, Balen R. van, Luijendijk E., Kooi H. (2014). *Weichselian and Holocene climate history reflected in temperatures in the upper crust of the Netherlands*. *Netherlands Journal of Geosciences*, 93, 107-117.
- Wanders, J., & Kanen, K. (2010). *Potentie diepe WKO en Geothermie in de gemeente Wageningen*. TTE.
- Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., & Zhao, J. H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263-2278.

Weijers, E.P., Hensen, A., Erisman, J.W., Wilde, H.P.J. de, Cnubben, P.A.J.P. (2000). *Het energieke wegdek: Verkenning van de mogelijkheden tot duurzame energieopwekking langs de snelweg*. Innovatieprogramma In opdracht van Rijkswaterstaat.

Weijers, E.P., De groot, G.J. (2007). *Energiewinning uit weginfrastructuur*. Innovatieprogramma rijkswaterstaat. Utrecht

Weiss, W. (2001). *Solar Combisystems - Industry Workshop*. Delft: International Energy Agency.

Winkelman, E.; F.H. Kistenkas, F.H.; & Epe, M.J. (2008) *Ecologische en natuurbeschermingsrechtelijke aspecten van windturbines op land*. Wageningen UR: Alterra. Rapport 1780, ISSN 1566-7197,

Wu, D. W., & Wang, R. Z. (2006). Combined cooling, heating and power: a review. *progress in energy and combustion science*, 32(5), 459-495.

Wüstenhagen, R., Wolsink, M., Bürer, M.J. (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy*, 35 (5), 2683-2691.

Zhou, X.; Xu, Y. (2014). Solar updraft tower power generation. *Solar Energy*, In press (corrected proof)

Zondag, H.A., Vries, D.W. de, Helden, W.G.J. van , Zolingen, R.J.C. van, Steenhoven, A.A. van (2003). The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy*, 74 (3), 253-269.

Overige referenties

Alternative Hydro Solutions (2014). *Darrieus Turbine*. Geraadpleegd op 7 oktober 2014 via <http://www.althydrosolutions.com/sites.html>

AgentschapNL (2011). Vier winnende innovaties op het gebied van zonne-energie. Geraadpleegd op 15 oktober 2014 via <http://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Vier%20winnende%20innovaties%20voor%20zonne-energie.pdf>

AgentschapNL (2012). Zonnethermische daken. Geraadpleegd op 13 oktober 2014 via http://www.rvo.nl/sites/default/files/Brochure%20zonthermische%20daken_0.pdf

Agentschap NL. (2013). Beheer warmte koude opslag. Retrieved from <http://www.rvo.nl/sites/default/files/Factsheet-Warmte%20Koude%20Opslag.pdf>

Bio-energie De Vallei. *Waterdamp*. Geraadpleefd op 7 oktober 2014 via <http://bio-energievallei.nl/hoe-werkt-het/co2-neutraal/>

Bolin, K., Bluhm, G., Eriksson, G., & Nilsson, M. E. (2011). Infrasound and low frequency noise from wind turbines: exposure and health effects. *Environmental Research Letters*, 6(3), 035103.

Boon, N., Roij, R. (2011). 'Blue energy' from ion absorption and electrode changing in sea and river water. *Molecular Physics: An international Journal at the Interface Between Chemistry and Physics*, 109 (7-10).

Borowitzka, M. A., & Moheimani, N. R. (2010). Sustainable biofuels from algae. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(1), 13-25.

Centraal Bureau voor de Statistiek (2010). Recordaantal zonneboilers geplaatst. Geraadpleegd op 9 oktober 2014 via <http://www.cbs.nl/nl-NL/menu/themas/industrie-energie/publicaties/artikelen/archief/2010/2010-03-25-tk-8.htm>

Centraal Bureau voor de Statistiek (2011). *Gemeente op Maat - Wageningen*. Den Haag: Centraal Bureau voor de Statistiek.

Centraal Bureau voor de Statistiek (2014). Bevolking; geslacht, leeftijd, burgerlijke staat en regio, 1 januari. Geraadpleegd op 22 september 2014 via <http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=03759ned&D1=0-2&D2=129-132&D3=823&D4=25-26&VW=T>

De Volkskrant (9 februari 2006). *Windmolen dreigt om te waaien op Eemmeerdiijk*. Geraadpleegd via <http://www.volkskrant.nl/binnenland/windmolen-dreigt-om-te-waaien-op-eemmeerdiijk~a830342/?akamaiType=FREE>

De Volkskrant (31 oktober 2013). *Twee doden door brand op 67 meter hoogte*. via <http://www.volkskrant.nl/dossier-archief/twee-doden-bij-brand-op-67-meter-hoogte~a3535513/?akamaiType=FREE>

Energie in Beeld (2014). *Wageningen*. Geraadpleegd op 23 september 2014 via <http://www.energieinbeeld.nl/login.html> Gebruikersnaam: Wageningen, password: STauH

Europa Nu, 2014. Europese aanpak klimaatverandering .Geraadpleegd op 24 september 2014 via http://www.europa-nu.nl/id/vhesf063wxu9/europese_aanpak_klimaatverandering

European Commission, 2014. EU greenhouse gas emissions and targets. Geraadpleegd op 20 september via http://ec.europa.eu/clima/policies/g-gas/index_en.htm, 22/09/2014.

Europees Parlement en de Raad, 2002. "Richtlijn 2002/49/EG van het Europees Parlement en de Raad van 25 juni 2002 inzake de evaluatie en de beheersing van omgevingslawaai." Publicatieblad van Europese Gemeenschappen 18.7.2002
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2002:189:0012:0025:NL:PDF>

Floor K. (2007) Kust en eilandefecten op bewolking. Zenit

Gemeente Wageningen (2012). Routekaart Wageningen klimaatneutraal in 2030.
Gemeente Wageningen (2012b). *Verwerking GFT*. Geraadpleegd op 15 oktober 2014 via http://www.wageningen.nl/Wonen_milieu_en_verkeer/Natuur_en_milieu/Afval/Afvalscheiding/Groente_fruit_en_tuinafval_GFT/Verwerking_GFT

Gemeente Wageningen (2013). Onderzoek naar draagvlak windmolens in Wageningen. Geraadpleegd op 1 oktober 2014 via http://www.wageningen.nl/Wonen_milieu_en_verkeer/Natuur_en_milieu/Klimaat/Nieuws/Archief/Onderzoek_naar_draagvlak_windmolens_in_Wageningen

Gemeente Wageningen (2013b). *Algemene feiten en cijfers*. Geraadpleegd op 23 september 2014 via http://www.wageningen.nl/Ontdek_Wageningen/Feiten_en_cijfers/Algemene_feiten_en_cijfers

Gemeente Wageningen (8 oktober 2014). *Geen windmolens bij het havenkanaal*. Geraadpleegd via http://wageningen.nl/Actueel/Nieuws/Archief_2014/Geen_windmolens_bij_het_Havenkanaal

Heller, E. (2008). Urban wind turbines. *Zoning Practice*, 2.

Hieropgewekt (2014). *Aandachtspunten voor een zonnepark*. Geraadpleegd op 13 oktober 2014 via

<http://www.hieropgewekt.nl/kennis/zonnepanelen-zonneparken/aandachtspunten-voor-een-zonnepark>

Hoe stemt uw raad in Wageningen? (2014). Overzicht van stemmingen in de gemeenteraad van Wageningen 2010-2014. Geraadpleegd op 14 oktober 2014 via <http://www.hoestemtuwraadinwageningen.nl/2010-2014.html>

HomeEnergy (n.d.) *Power Curve Energy Ball V200*. Geraadpleegd op 6 oktober 2014 via [http://home-energy.com/files/power%20curve%20EBV200%20\(SI%20and%20imperial\).pdf](http://home-energy.com/files/power%20curve%20EBV200%20(SI%20and%20imperial).pdf)

KNNV (2014). *Bovenste Polder*. Geraadpleegd op 29 september 2014 via <http://www.knnv.nl/knnv-afdeling-wageningen/bovenste-polder>

Latum, van E., Batenburg, van B. (2010). *Potentie Zonnestroom*. Retrieved from <http://www.rvo.nl/sites/default/files/Potentie%20Zonnestroom.pdf>

Liander (2008). *E-atlas: Inzicht in het energieverbruik van de gemeente Wageningen 2008*. Geraadpleegd op 25 september 2014 via: [http://www.wageningen.nl/Wonen milieu en verkeer/Natuur en milieu/Klimaat/Algemene info/Energie in Beeld](http://www.wageningen.nl/Wonen%20milieu%20en%20verkeer/Natuur%20en%20milieu/Klimaat/Algemene%20info/Energie%20in%20Beeld)

Meteorology and Air Quality Group (n.d.) *Haarwegdata*. Geraadpleegd op 14 oktober 2014 via <http://www.met.wau.nl/haarwegdata/dayfiles/>

Milieucentraal (g.d.) *Kleine windmolens*. Geraadpleegd op 15 oktober 2014.

Milieuloket (n.d.), *Waterstof*. Geraadpleegd op 8 oktober 2014 via <http://www.milieuloket.nl/id/vhurdyxrmz2/waterstof>

Ministerie van Infrastructuur & Milieu (2013), *Infoblad Aardwarmte*. Geraadpleegd op 15 oktober 2014.

Natuur en Milieu (2013). *Explosief aantal zonnepanelen op Nederlandse daken*. Geraadpleegd op 03 oktober 2014 via <http://www.natuurenmilieu.nl/nieuws/perscentrum/20130206-explosief-aantal-zonnepanelen-op-nederlandse-daken/>

Nu.nl (27 mei 2009) *Wiek van windmolen valt op snelweg*. Geraadpleegd via <http://www.nu.nl/algemeen/1970377/wiek-van-windmolen-valt-op-snelweg.html>

Nu.nl (30 oktober 2013) *Ameland krijgt grootste zonnepark van Nederland*. Geraadpleegd op 14 oktober 2014 via <http://www.nu.nl/economie/3615316/ameland-krijgt-grootste-zonnepark-nederland.html>

Plant-e (2014). *Plant-e*. Geraadpleegd op 8 oktober 2014 via <http://plant-e.com>.

Plant-e-update Mei 2014. Geraadpleegd op 8 oktober 2014 via <http://us6.campaign-archive1.com/?u=a5d8b76568a20430dee0eac8a&id=57a15c985b>

Platform Duurzaam Wageningen (2014). *Home..* Geraadpleegd op 23 september 2014 via <http://www.duurzaamwageningen.nl/>.

Provincie Gelderland, 2012. *Werk met eigen energie; Het Gelderse programmaplan voor energietransitie (2012-2015)*. Publicatiedatum: mei 2012.

Provincie Gelderland, 2014a. Biobased economy: van fossiel naar biomassa. Geraadpleegd op 12 september 2014 via <http://www.gelderland.nl/4/Milieu-en-water-Energietransitie/Doelen-voor-energietransitie/Biobased-economy-van-fossiel-naar-biomassa.html>

Provincie Gelderland, 2014b. Windvisie voor Gelderland. Geraadpleegd op 15 september 2014 via <http://www.gelderland.nl/4/Milieu-en-water-Energietransitie/Projecten-energietransitie-uitgelicht/Windvisie-voor-Gelderland.html>

Provincie Gelderland, 2014c. Ruimtelijk beleid voor stilte. Geraadpleegd op 12 september 2014 via <http://www.gelderland.nl/4/Home/2-Generiek-beleid/211-Ruimtelijk-beleid-voor-stilte.html>

Provincie Gelderland, 2014d. Kaart; Omgevingsvisie Gelderland. Geraadpleegd op 11 september 2014 via <http://gelderland.planoview.nl/Conceptplannen/>

Provincie Gelderland (g.d.) Land- en tuinbouw in Gelderland. Geraadpleegd op 15 oktober 2014.

Pzc, 2014. *Tholen krijgt grootste zonnepark van Nederland*. Geraadpleegd op 13 oktober via <http://www.pzc.nl/regio/zeeuws-nieuws/tholen-krijgt-grootste-zonnepark-van-nederland-1.4510912>

Rijksdienst voor ondernemend Nederland. "Stimulering Duurzame Energieproductie (SDE)." Geraadpleegd 07-10, 2014, op <http://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/stimulering-duurzame-energieproductie-sde>.

Rijksoverheid, 2014. Handreiking beleidslijn grote rivieren. Februari 2014.

Rijksoverheid (n.d.) *Geluidsoverlast*. Geraadpleegd op 25 september 2014 via <http://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/geluidsoverlast/geluidsoverlast-in-de-wet>

Rijkswaterstaat (n.d. b) *Leefomgeving, Bodemenergie*. Geraadpleegd op 3 oktober, 2014 via <http://www.rwsleefomgeving.nl/onderwerpen/bodem-ondergrond/bodemenergie/bodemenergie/>

RIVM (n.d.) *Risico's van stoffen: Fijnstof*. Geraadpleegd op 25 september 2014 via http://www.rivm.nl/Onderwerpen/F/Fijn_stof

SolaRoad (2014). *Technologies*, Geraadpleegd op 2 oktober 2014 via <http://solaroadtechnologies.com/technology>

SolaRoad (2014b). *Frequently Asked Questions*. Geraadpleegd op 10 oktober 2014 via <http://www.solaroad.nl/faq/>

Studenten voor Morgen (2014). *SustainaBul*. Geraadpleegd op 23 september 2014 via <http://www.studentenvoormorgen.nl/sustainabul/> .

Sustainable Dance Club (2011). *Sustainable Dance Floor: Series v1.0 product sheet*. Rotterdam

Swift™ (n.d.) *Swift Performance data*. Geraadpleegd op 6 oktober 2014 via www.renewabledevices.com/downloads/SD0026%20Performance.pdf

Vortex Hydro Energy (2014). *VIVACE Technology*. Geraadpleegd op 1 oktober 2014 via <http://vortexhydroenergy.com/>,

WageningenUR (2013). *Feiten en cijfers*. Geraadpleegd op 22 september 2014 via <http://www.wageningenur.nl/nl/Wageningen-University/Over-Wageningen-University/Feiten-en-cijfers.htm>

WageningenUR (2014). *Energivisie 2030*. Geraadpleegd op 13 oktober 2014 via http://www.wageningenur.nl/upload_mm/c/c/7/ed16e315-4f76-4ed9-a52c-6e4802403ca7_20140818_EnergieVisie_2030_v1.0%20DEF.pdf

Wageningen Woont Duurzaam (2014) *Bedrijven, bewoners en gemeente werken aan energiezuinig wonen*. Geraadpleegd op 23-09-2014 via <http://wageningenwoontduurzaam.nl/>.

Weijers, E., Rodink, R. (nd). Factsheet Warmte-Koude Opslag met Asfaltcollectoren. Retrieved from www.skbodem.nl/download/1183/ecn-bkm-2011-143.pdf.

Zonne-energie uit de weg – SolaRoad combineert weg met paneel (2011), Charlotte Maassen, copyright TNO 2011.

Zonnepanelen Informatiepunt (2013). *Zonnepanelen*. Geraadpleegd op 13 oktober 2014 via <http://www.zonnepanelen-info.nl/>.

Zonneweg (n.d.) *Toepassing & haalbaarheid*. Geraadpleegd op 13 oktober 2014 via <http://www.zonneweg.nl/>

Appendix A: Financiële berekeningen

Jaar	Kosten (€)	Baten (€)	Cashflow (€)	Restschuld (€)		Opbrengst per kwh met SDE+ (€)	0.0875
0	-8100000		-8100000	-8100000		Opbrengst per kwh zonder SDE+ (€)	0.044
1	-330760.8	1412775	1082014.2	-7017985.8		Vermogen (Kw)	6000
2	-330760.8	1412775	1082014.2	-5935971.6		Vollasturen	2691
3	-330760.8	1412775	1082014.2	-4853957.4		Variable onderhoudskosten per kwh (€)	0.0148
4	-330760.8	1412775	1082014.2	-3771943.2		Vaste onderhoudskosten per Kw (€)	15.3
5	-330760.8	1412775	1082014.2	-2689929			
6	-330760.8	1412775	1082014.2	-1607914.8			
7	-330760.8	1412775	1082014.2	-525900.6		GROTE WINDTURBINES	
8	-330760.8	1412775	1082014.2	556113.6			
9	-330760.8	1412775	1082014.2	1638127.8			
10	-330760.8	1412775	1082014.2	2720142			
11	-330760.8	1412775	1082014.2	3802156.2			
12	-330760.8	1412775	1082014.2	4884170.4			
13	-330760.8	1412775	1082014.2	5966184.6			
14	-330760.8	1412775	1082014.2	7048198.8			
15	-330760.8	1412775	1082014.2	8130213			
16	-330760.8	710424	379663.2	8509876.2			
17	-330760.8	710424	379663.2	8889539.4			
18	-330760.8	710424	379663.2	9269202.6			
19	-330760.8	710424	379663.2	9648865.8			
20	-330760.8	710424	379663.2	10028529			
21	-330760.8	710424	379663.2	10408192.2			
22	-330760.8	710424	379663.2	10787855.4			
23	-330760.8	710424	379663.2	11167518.6			
24	-330760.8	710424	379663.2	11547181.8			
25	-330760.8	710424	379663.2	11926845			
Kosten € / kwh	0.04055251						

Turby				Swift				Energy ball					Opbrengst per kwh zonder SDE+ (€)	0.15
Jaar	Kosten (€)	Baten (€)	Cashflow (€)	Restschuld (€)	Kosten (€)	Baten (€)	Cashflow (€)	Restschuld (€)	Kosten (€)	Baten (€)	Cashflow (€)	Restschuld (€)	Jaarlijkse energie opbrengst turby (kw)	3700
0	-17000		-17000	-17000	-8000		-8000	-8000	-3500		-3500	-3500	Jaarlijkse energie opbrengst swift (kw)	1880
1		555	555	-16445		282	282	-7718		198	198	-3302	Jaarlijkse energie opbrengst energy ball (kw)	1320
2		555	555	-15890		282	282	-7436		198	198	-3104		
3		555	555	-15335		282	282	-7154		198	198	-2906		
4		555	555	-14780		282	282	-6872		198	198	-2708		
5		555	555	-14225		282	282	-6590		198	198	-2510		
6		555	555	-13670		282	282	-6308		198	198	-2312	KLEINE WINDTURBINES	
7		555	555	-13115		282	282	-6026		198	198	-2114		
8		555	555	-12560		282	282	-5744		198	198	-1916		
9		555	555	-12005		282	282	-5462		198	198	-1718		
10		555	555	-11450		282	282	-5180		198	198	-1520		
11		555	555	-10895		282	282	-4898		198	198	-1322		
12		555	555	-10340		282	282	-4616		198	198	-1124		
13		555	555	-9785		282	282	-4334		198	198	-926		
14		555	555	-9230		282	282	-4052		198	198	-728		
15		555	555	-8675		282	282	-3770		198	198	-530		
16		555	555	-8120		282	282	-3488		198	198	-332		
17		555	555	-7565		282	282	-3206		198	198	-134		
18		555	555	-7010		282	282	-2924		198	198	64		
19		555	555	-6455		282	282	-2642		198	198	262		
20		555	555	-5900		282	282	-2360		198	198	460		
	Kosten € / kwh	0.306306306			Kosten € / kwh	0.28369			Kosten € / kwh	0.176767677				

Jaar	Kosten (€)	Baten (€)	Cashflow	Restschuld (€)		Opbrengst per kwh met SDE+ (€)	0.07
0	-19440000		-1.9E+07	-19440000		Opbrengst per kwh zonder SDE+ (€)	0.044
1	-259875	1102500	842625	-18597375		Vollasturen	875
2	-259875	1102500	842625	-17754750		Variable onderhoudskosten per kwh (€)	0.0165
3	-259875	1102500	842625	-16912125		Vermogen (Kw)	18000
4	-259875	1102500	842625	-16069500			
5	-259875	1102500	842625	-15226875			
6	-259875	1102500	842625	-14384250			
7	-259875	1102500	842625	-13541625			
8	-259875	1102500	842625	-12699000			
9	-259875	1102500	842625	-11856375		ZONNEPANELEN (pv)	
10	-259875	1102500	842625	-11013750			
11	-259875	1102500	842625	-10171125			
12	-259875	1102500	842625	-9328500			
13	-259875	1102500	842625	-8485875			
14	-259875	1102500	842625	-7643250			
15	-259875	1102500	842625	-6800625			
16	-259875	693000	433125	-6367500			
17	-259875	693000	433125	-5934375			
18	-259875	693000	433125	-5501250			
19	-259875	693000	433125	-5068125			
20	-259875	693000	433125	-4635000			
21	-259875	693000	433125	-4201875			
22	-259875	693000	433125	-3768750			
23	-259875	693000	433125	-3335625			
24	-259875	693000	433125	-2902500			
25	-259875	693000	433125	-2469375			
26	-259875	693000	433125	-2036250			
27	-259875	693000	433125	-1603125			
28	-259875	693000	433125	-1170000			
29	-259875	693000	433125	-736875			
30	-259875	693000	433125	-303750			
	Kosten € / kwh	0.065871429					

Jaar	Kosten (€)	Baten (€)	Cashflow (€)	Restschuld (€)		Opbrengst per kwh met SDE+ (€)	0.069984
0	-16100000		-16100000	-16100000		Opbrengst per kwh zonder SDE+ (€)	0.0468
1	-300472	1126742.4	826270.4	-15273729.6		Vollasturen	700
2	-300472	1126742.4	826270.4	-14447459.2		Variable onderhoudskosten per kwh (€)	0.01152
3	-300472	1126742.4	826270.4	-13621188.8		Vaste onderhoudskosten per Kw (€)	5
4	-300472	1126742.4	826270.4	-12794918.4		Vermogen (Kw)	23000
5	-300472	1126742.4	826270.4	-11968648		SDE+ in €/GJ	19.44
6	-300472	1126742.4	826270.4	-11142377.6		zonder SDE in €/GJ	13
7	-300472	1126742.4	826270.4	-10316107.2			
8	-300472	1126742.4	826270.4	-9489836.8		ZONNEWARMTE (thermisch)	
9	-300472	1126742.4	826270.4	-8663566.4			
10	-300472	1126742.4	826270.4	-7837296			
11	-300472	1126742.4	826270.4	-7011025.6			
12	-300472	1126742.4	826270.4	-6184755.2			
13	-300472	1126742.4	826270.4	-5358484.8			
14	-300472	1126742.4	826270.4	-4532214.4			
15	-300472	1126742.4	826270.4	-3705944			
16	-300472	753480	453008	-3252936			
17	-300472	753480	453008	-2799928			
18	-300472	753480	453008	-2346920			
19	-300472	753480	453008	-1893912			
20	-300472	753480	453008	-1440904			
21	-300472	1126742.4	826270.4	-614633.6			
22	-300472	753480	453008	-161625.6			
23	-300472	753480	453008	291382.4			
24	-300472	753480	453008	744390.4			
25	-300472	753480	453008	1197398.4			
	Kosten € / kwh	0.054930286					

