

BIJDRAGE VAN
AFVALVERWERKINGSINSTALLATIES
AAN DE DUURZAME
ENERGIEPRODUCTIE IN
NEDERLAND

Laurens Frowijn, 4123905

Begeleider: Max Rietkerk

Scriptie Milieu- Natuurwetenschappen (GEO3-2138) | 12-06-2017

Universiteit Utrecht

Woorden aantal: 5986

ABSTRACT

Om de negatieve effecten van klimaatverandering tegen te gaan zal er onder andere een transitie naar duurzame energieproductie moeten komen. Ook Nederland zal de productie van duurzame energie moeten vergroten. Nederland produceert al duurzame energie, waaronder uit afval. Dit gebeurt door middel van energierecuperatie uit het restafval in afvalverwerkingsinstallaties. In deze thesis is onderzocht in welke mate de afvalverwerkingsinstallaties bijdragen aan de duurzame energieproductie in Nederland en hoe dit aandeel vergroot kan worden. Dit is onderzocht door middel van een literatuuronderzoek en een kwantitatieve analyse. Hieruit bleek dat de bijdrage van afvalverwerkingsinstallaties 1,69 procent van de totale duurzame energieproductie was in 2015. 97 procent van de energierecuperatie was geen duurzame energie. De uitstoot van broeikasgassen bij de recuperatie van elektriciteit en warmte-energie uit restafval van het niet-duurzaam teruggewonnen deel was ongeveer gelijk aan de uitstoot bij de elektriciteits- en warmte-energieproductie met de meest gebruikte fossiele brandstoffen in Nederland. De energierecuperatie van duurzame energie in afvalverwerkingsinstallaties kan worden vergroot door het afval beter te scheiden en afvalverwerkingsinstallaties efficiënter te maken. Daarnaast kan de uitstoot van broeikasgassen worden verminderd door te kijken naar verbeteringen binnen de gehele *life cycle* van de energierecuperatie uit afval. Dit onderzoek laat zien dat energierecuperatie uit restafval geen significante bijdrage levert aan de duurzame energieproductie van Nederland. De energierecuperatie uit afval leidt wel tot het verminderen van het afvalvolume op een nuttige manier, al zou het verminderen van de afvalproductie mogelijk tot een groter effect leiden.

To counteract the negative effects of climate change, there needs to be an increase in renewable energy production. The Netherlands also have to increase their production of renewable energy. The Netherlands are already producing renewable energy, like from waste. This is done by recovering energy from municipal solid waste in waste management plants. In this thesis, research has been done to what extent the waste management plants contribute to sustainable energy production in the Netherlands and how this share can be enlarged. This has been researched by means of a literature review and a quantitative analysis. This showed that the contribution of waste processing plants was 1.69 percent of total renewable energy production in 2015. 97 percent of the energy recovery was non-renewable energy. The greenhouse gas emissions from the recovery of electricity and heat from municipal solid waste of the non-sustainable energy recovery were approximately equal to the emissions of electricity and heat energy production with the most commonly used fossil fuels in the Netherlands. The energy recovery of renewable energy in waste management plants can be increased by separating the waste better and making waste treatment facilities more efficient. In addition, greenhouse gas emissions can be reduced by looking at improvements throughout the entire life cycle of energy recovery from waste. This research shows that energy recovery from municipal solid waste does not have a significant contribution to the renewable energy production of the Netherlands. The recovery of energy from waste does lead to a reduction in waste volume, although reducing waste production might have a greater impact.

INHOUDSOPGAVE

Abstract	2
Afkortingen en uitleg van symbolen.....	4
1.0 Inleiding.....	5
1.1 Doelstelling en vraagstelling	5
2.0 Theoretisch kader	6
2.1 Afval als grondstof	6
2.2 Energy supply chain.....	7
2.3 Energieterugwinning met AVI's.....	7
2.4 Duurzame energie en hernieuwbare energie	8
2.5 Uitstoot CO ₂ AVI en fossiele brandstoffen.....	8
3.0 Methode.....	9
3.1 Dataverzameling.....	9
3.2 Data-analyse.....	10
4.0 Resultaten.....	11
4.1 Bijdrage AVI's aan duurzame energieproductie van Nederland	11
4.1.1 Elektriciteits- en warmte-energieproductie in 2015.....	12
4.1.3 elektriciteits- en warmte-energieproductie met AVI's.....	13
4.2 Uitstoot AVI's in vergelijking met fossiele brandstoffen	15
4.2.1 Uitstoot bij het produceren van warmte-energie en elektriciteit met fossiele brandstoffen	15
4.2.2 Overzicht van de uitstoot van broeikasgassen.....	17
4.3 Vergroten van het aandeel duurzame energieproductie in AVI's.....	19
4.3.1 Scheiden van afval en afvalvermindering.....	19
4.3.2 Innovaties en reductie van de uitstoot van broeikasgassen.....	20
5.0 Discussie.....	20
5.1 Analyse van de resultaten	20
5.2 Reflectie.....	21
6.0 Conclusie	22
Referenties.....	23

AFKORTINGEN EN UITLEG VAN SYMBOLEN

°C	Graden Celsius
AVI	Afvalverwerkingsinstallatie
CO ₂	Koolstofdioxide
kg	Kilogram
E	Geproduceerde Energie
F	Primaire fossiele brandstof
GJ	Gigajoule
H	Geproduceerde warmte-energie
km	Kilometer
kton	Kiloton
m ³	Kubieke meter
MJ	Megajoule
PJ	Petajoule
TJ	Terajoule
h	De efficiëntiefactor bij de productie van warmte-energie gebaseerd op de Carnot factor
e	De efficiëntiefactor bij de productie van electriciteit gebaseerd op de Carnot factor

1.0 INLEIDING

Eind 2015 kwamen bijna alle landen van de wereld samen in Parijs om te de implicaties klimaatverandering te bespreken en om afspraken te maken om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen om zo de opwarming van de aarde te minimaliseren. Zo werd afgesproken dat de gemiddelde globale temperatuur niet tot twee graden Celsius mag stijgen (UNFCCC, 2017).

Ook Nederland was aanwezig bij deze klimaattop. Het land ging akkoord met de afspraken en ratificeerde de gemaakte afspraken in 2016 (UNFCCC, 2017). Om de afspraken na te komen moet er in Nederland nog veel veranderen. Zo loopt Nederland achter in de consumptie en productie van duurzame energie in vergelijking met de rest van Europa. Met energieconsumptie en productie wordt de consumptie en productie van elektriciteit en warmte-energie bedoeld voor burgers en het bedrijfsleven (CBS, 2016). Het aandeel van de consumptie van duurzamere energievormen van de totale energieconsumptie is laag in vergelijking met de doelstellingen die tot stand zijn gekomen bij de gemaakte afspraken met de Europese Unie voor het jaar 2020. In 2015 was de consumptie van duurzame energie 5,8 procent van de totale consumptie, terwijl dit in 2020 veertien procent dient te zijn (Eurostat, 2016). Om dit te bewerkstelligen kan Nederland ervoor kiezen om duurzame energie te importeren uit landen die al in grote mate duurzame energie produceren, zoals Duitsland en Denemarken. Dit gebeurt al in grote mate en zal in de toekomst waarschijnlijk verder toenemen (Lamers e.a., 2014). Gezien er bij het Akkoord van Parijs ook voor de langere termijn afspraken zijn gemaakt zullen er drastische veranderingen moeten komen in de energieproductie en consumptie van Nederland om die afspraken na te kunnen komen. De productie van duurzame energie zal in grote mate moeten worden vergroot om aan die afspraken te kunnen voldoen (Sterl, Höhne & Kuramochi, 2016).

In Nederland wordt al op enkele manieren duurzame energie geproduceerd aan de hand van hernieuwbare energiedragers. Zo wordt warmte-energie en elektriciteit geproduceerd uit zonne-energie, windenergie, waterkracht, biomassa én uit restafval (CBS Statline, 2017). Dit restafval wordt door afvalverwerkingsinstallaties verwerkt tot bruikbare energie. Op deze manier wordt een afvalproduct dat normaal gesproken onbruikbaar of zelfs als problematisch kan worden beschouwd veranderd in nuttige en relatief duurzame energie (Rijkswaterstaat, 2016). Nederland is samen met enkele andere landen in Europa een voorloper op het gebied van afvalverwerking. Andere Europese landen storten hun afval in grote mate op storthopen en soms ook ondergronds. In Europa wordt gemiddeld 33 procent van het restafval gestort en in enkele Zuid-Europese landen wordt meer dan 50 procent van het restafval gestort (AVR, 2015). Het verwerken van afval tot energie heeft vele voordelen boven het storten van het afval, gezien storten zorgt voor een grote hoeveelheid methaan uitstoot (Vroonhof & Croezen, 2006). De AVI's bruikbare energie wordt uit het afval gehaald en door deze warmte-energie en elektriciteitsproductie zijn er minder fossiele brandstoffen nodig (AVR, 2015).

1.1 DOELSTELLING EN VRAAGSTELLING

Afvalverwerking tot bruikbare energie lijkt een dubbele oplossing te zijn gezien het niet alleen leidt tot een afname van het afvalvolume, maar het ook een duurzamer alternatief is voor energieproductie dan de bestaande fossiele brandstoffen. In deze thesis wordt gekeken of het uit afval geproduceerde energie een groot aandeel heeft of kan hebben in de duurzame energieproductie in Nederland. Dit zal meer inzicht geven in het energetisch voordeel en klimaatvriendelijke gehalte van deze vorm van afvalverwerking. Deze thesis levert een wetenschappelijke bijdrage aan de bestaande kennis over de duurzame energie door te kijken naar het proces van afval naar energie. Om deze probleemstelling te onderzoeken is de volgende hoofdvraag opgesteld:

In hoeverre dragen AVI's bij aan de duurzame energie productie in Nederland en hoe kan dit vergroot worden?

Om de hoofdvraag te beantwoorden is deze onderverdeeld in drie deelvragen, weergegeven in tabel 1.

Deelvraag-nummer	Vraagstelling	Uitleg
1	<i>Welk deel van de bruikbare energierugwinning door AVI's is duurzame energie?</i>	Deze deelvraag kijkt hoeveel energie er wordt teruggewonnen in Nederland door middel van AVI's en welk deel hiervan duurzaam geproduceerd is.
2	<i>Hoeveel uitstoot van broeikasgassen wordt verminderd door energie te produceren met AVI's in plaats van fossiele alternatieven?</i>	Deze deelvraag kijkt naar de verschillen in uitstoot van de totale uitstoot van broeikasgassen bij energierugwinning en vergelijkt deze uitstoot met de uitstoot bij het gebruik van enkele fossiele brandstoffen.
3	<i>Hoe kan het aandeel duurzame energie productie door AVI's vergroot worden?</i>	Deze deelvraag kijkt naar de mogelijkheden om het aandeel van de duurzame teruggewonnen energie te vergroten. Hierbij wordt ook gekeken naar energiebesparing bij het proces van energierugwinning en wordt er gekeken naar een voorbeeld van een succesverhaal buiten Nederland.

Tabel 1: Drie deelvragen en bijbehorende uitleg die gebruikt worden bij de beantwoording van de hoofdvraag.

2.0 THEORETISCH KADER

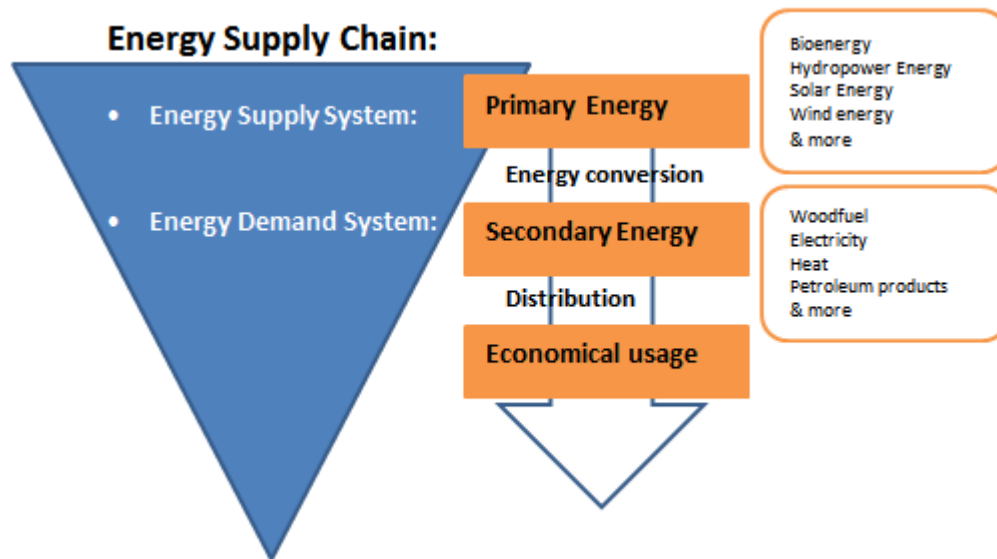
Om te vinden in welke mate AVI's bijdragen aan duurzame energieproductie in Nederland en hoe deze energierugwinning verder vergroot kan worden is het noodzakelijk om te weten van welke factoren de bijdrage en energierugwinning afhankelijk zijn.

2.1 AFVAL ALS GRONDSTOF

De grondstof, het afval, is bij AVI's in Nederland gebaseerd op huishoudelijk en stedelijk restafval (Rijkswaterstaat, 2016) en wordt omgezet in warmte-energie en elektriciteit (Branchini, 2015). Dit zijn de materialen die in stedelijke gebieden worden weggegooid en verzameld en afgezet door de gemeenten (Cheng & Hu, 2010). Het verbranden van afval begon in eerste instantie om het afvalvolume te verminderen, maar is ontwikkeld tot gedeeltelijke vervanging van fossiele brandstoffen. De ouderwetse installaties bestaan nog steeds. Deze hebben de status 'installatie voor verwijdering'. Deze installaties hebben de D10 status, wat inhoudt dat ze afval verbranden om het afvalvolume te verminderen. Alleen AVI's met voldoende *energy efficiency* zullen in dit onderzoek worden onderzocht. Deze hebben een status van R1 (Rijkswaterstaat, 2016; Grosso, Motta & Rigamonti, 2010). De R1 status hangt af van "[...] (a) the energy recovered from waste (exported energy plus internally used energy) minus the imported energy, and (b) the energy from waste plus other imported energy used for steam production." (EC, 2011, p. 22). Om de R1 status te behouden dienen de AVI's steeds schoner en efficiënter te worden. Dit wordt gemeten met een energierugwinningsratio. Bestaande AVI's moeten een energierugwinningsratio hebben van 0,6 of hoger en nieuwe installaties moeten een ratio van 0,65 of hoger hebben (Branchini, 2015).

2.2 ENERGY SUPPLY CHAIN

Energie wordt niet gecreëerd of vernietigd zoals de tweede wet van de thermodynamica aangeeft (Blok, 2009). Wel kan energie omgezet worden van de ene vorm naar de andere, waarbij een deel van de bruikbare energie verloren gaat in de vorm van onbruikbare energie. Deze omzettingen vinden plaats in de *energy supply chain*. Dit is een eenzijdige stroom waarbij primaire energie tot secundaire energie wordt omgezet. De primaire energie is de energie in zijn originele vorm. In praktijk betekent dit dat dit de energie is van een energiebron zoals in een kilo kolen. Als het omgezet is wordt het een secundaire energie, zoals elektriciteit, waarna het gebruikt kan worden voor economische doeleinden (Iakovou e.a., 2014). Een schema van deze *energy supply chain* is te zien in figuur 1 (Blok, 2009).



Figuur 1: *Energy Supply Chain*; De primaire energie wordt omgezet in secundaire energie wat weer gebruikt kan worden voor economische doeleinden (blok, 2009).

2.3 ENERGIETERUGWINNING MET AVI'S

De drie meest gebruikte afvalverwerkingstechnieken voor energierugwinning zijn: verbranding, vergisting en vergassing (Branchini, 2015). Het afval wordt direct omgezet in warmte en elektriciteit of indirect via biogas. Dit biogas kan ook worden verbrand om elektriciteit en warmte-energie te produceren (Nielsen & Illerup, 2003). De drie verschillende technieken hebben een verschillende efficiëntie gebaseerd op de Carnotfactor (Branchini, 2015). Hierbij staat de Carnotfactor met waarde 1 voor de maximale energieconversie (Blok, 2009; Bojic, 1997). AVI's produceren energievormen vanuit afval en hierbij is het niet mogelijk om alle energie van het afval volledig te benutten. Een deel gaat verloren of is niet bruikbaar. Daarnaast is er bij de productie van warmte-energie en elektriciteit door afvalverwerking ook uitstoot van broeikasgassen (Brunner & Rechberger, 2016; Consonni, Giugliano & Grosso, 2005). Fruergaard, Astrup & Ekvall (2009) vonden dat de uitstoot van broeikasgassen bij de energierugwinning wisselt per afvalverwerkingstechniek en afhangt van de efficiëntie van de energieconversie, de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit of warmte-energie en de compositie van het afval. In dit onderzoek zullen ook deze aspecten worden onderzocht. Bij de

productie van elektriciteit en warmte-energie gaat een deel verloren, zoals eerder aangegeven. Bij de productie van elektriciteit en warmte-energie door middel van fossiele brandstoffen wordt vaak gebruik gemaakt van een gecombineerde productie van elektriciteit en warmte-energie, waardoor elektriciteit en warmte-energie in hetzelfde systeem geproduceerd worden (Branchini, 2015). Hier is de efficiëntiefactor voor de productie van warmte-energie gemiddeld $\eta_h = 0,50$ en bij elektriciteit is de efficiëntiefactor; η_e , gemiddeld 0,40 (Blok, 2009). Deze factoren zijn gebaseerd op de lagere verbrandingswaarde en niet de hogere verbrandingswaarde, gezien deze het meest gebruikt wordt (Blok, 2009). De totale primaire energie gebaseerd op fossiele brandstoffen kan gevonden worden door de geproduceerde energie te delen door de efficiëntiefactor. Voor dit onderzoek zal bij elke fossiele brandstof deze gemiddelden gebruikt worden. In wiskundige taal ziet dit er als volgt uit: $\frac{Q}{\eta_h} = F$ of $\frac{Q}{\eta_e} = F$. Hierbij is E de geproduceerde elektriciteit, H de geproduceerde warmte-energie, η_h de efficiëntiefactor bij de productie van warmte-energie, η_e de efficiëntiefactor bij de productie van elektriciteit en F de primaire fossiele brandstof. De omzetting van de primaire energiedrager tot een secundaire energievorm zorgt voor een verlies in exergetisch vermogen bij de productie van warmte-energie. Deze maximale hoeveelheid arbeid uit elektriciteit is 100 procent, terwijl dit maar 35 procent is bij warmte-energie (Blok, 2009). De exergetische waarde zal in dit onderzoek niet aan bod komen, gezien alleen gekeken wordt naar de productie van warmte-energie en niet naar de exergetische bruikbaarheid van deze secundaire energievorm.

2.4 DUURZAME ENERGIE EN HERNIEUWBARE ENERGIE

Duurzame energie is een belangrijke component voor duurzame ontwikkeling omdat de productie en consumptie van een duurzame energievorm niet leidt tot het uitputten van de grondstoffen of voor verslechterde leefomstandigheden voor de huidige generatie en toekomstige generaties (Miller & Spoolman, 2012; Frey & Linke, 2002; Song, 2006). Gezien er bij energierugwinning van AVI's nog wel uitstoot is van broeikasgassen en andere milieu-aantastende stoffen is er meestal niet direct sprake van duurzame energie, wel is er een altijd deel uit hernieuwbare energiedragers geproduceerd. Dit is het deel van de grond- en brandstoffen dat kan worden aangevuld door de natuur binnen een mensenleven (Cheng & Hu, 2010; Dincer, 2000). Toch kan energierugwinning in AVI's gedeeltelijk als een duurzame energie productie beschouwd worden, of op zijn minst als een transitie naar een duurzame energie productie, gezien er nog steeds gebruik wordt gemaakt van fossiele alternatieven bij de productie van secundaire energie (Fruergaard, Astrup & Ekvall, 2009; Lund, 2007). Daarbij is het van belang dat er gezorgd wordt dat deze energie de schade aan het milieu zo goed mogelijk probeert tegen te gaan, want Frey en Linke (2002, p. 1264) laten zien dat: "What sustainability addresses is the need for society to consider energy consumption in a way that does not exceed the environment's capacity to absorb the effects, without permanent damage.". Dit wordt bevestigd door Miller en Spoolman (2012). Zij laten zien dat deze energierugwinning tot een mate van duurzame energie productie leidt als de vervuilende stoffen voor klimaat en menselijke gezondheid zoveel mogelijk worden gereduceerd. Dit komt omdat de gebruikelijke alternatieven voor afvalverwerking leiden tot grotere schade aan mens en natuur. Banos e.a. (2011) laten zien dat de hernieuwbare geproduceerde energie en duurzame energie zo verweven zijn dat ze als synoniem gebruikt kunnen worden en dat dit in de praktijk ook gebeurt.

2.5 UITSTOOT CO₂ AVI EN FOSSIELE BRANDSTOFFEN

De AVI's hebben een uitstoot van broeikasgassen bij de productie van elektriciteit en warmte-energie (Fruergaard, Astrup & Ekvall, 2009). Hierbij is de uitstoot een verzameling van alle uitstoot uitgedrukt in CO₂ equivalent. Het is niet mogelijk om één standaard hoeveelheid uitstoot CO₂ per kilogram te gebruiken bij de productie van deze energie met restafval als grondstof. Deze hoeveelheid varieert per regio door verschillen in consumentengedrag, levenswijze en

koopkracht (e.g. Diaz et al. 2005). Obermoser, Fellner & Rechberger (2009) vonden de verschillende hoeveelheden van uitstoot van CO₂ bij de energieproductie in AVI's voor enkele westerse landen. Deze verschillen van 293 kg CO₂ per ton restafval tot wel 557 kg CO₂ per ton restafval. Voor dit onderzoek zijn deze uitersten gebruikt gezien de toepasbaarheid van het onderzoek voor Nederland. Wel is er meer eensgezindheid over de uitstoot bij de productie van elektriciteit en warmte-energie door middel van fossiele energiebronnen (Obermoser, Fellner & Rechberger, 2009). De meest gebruikte fossiele brandstoffen in Nederland zijn aardgas, steenkool en stookolie (CBS Statline, 2017). De uitstoot van broeikasgassen van deze brandstoffen is te zien in tabel 2.

Fossiele brandstof	Uitstoot van broeikasgassen in kg CO ₂ per GJ
Steenkool	94
Stookolie	77
Aardgas	52

Tabel 2: Uitstoot van broeikasgassen (kg CO₂ per GJ) bij de productie van elektriciteit en warmte-energie van de meest gebruikte fossiele brandstoffen in Nederland (Obermoser, Fellner & Rechberger, 2009; Jaramillo, Griffin & McCoy, 2009).

3.0 METHODE

In dit hoofdstuk is weergegeven hoe en met welke data het onderzoek voor mijn thesis is uitgevoerd. Daarnaast is een zoekplan gegeven om aan te tonen hoe de data was verzameld voor het onderzoek en met de data-analyse wordt getoond hoe de data is verwerkt.

3.1 DATAVERZAMELING

Dit onderzoek is een literatuuronderzoek in de vorm van een onderzoekspaper. Om het literatuuronderzoek uit te voeren zijn verschillende soorten data uit wetenschappelijke literatuur nodig geweest. Deze data is gevonden door zoekwoorden in te voeren in (wetenschappelijke) zoekmachines als Google, Google Scholar, Omega, ScienceDirect en Web of Science. De informatiebronnen, data en de zoekwoorden die hierbij gebruikt zijn, zijn in tabel 3 genoteerd.

Benodigde informatie	Trefwoorden	Type data
Algemene informatie AVI's	AVI, Afvalverwerkingsinstallatie Afvalverbrandingsinstallatie, Waste management	Overheidsrapporten, Bedrijfsresultaten,
Energieterugwinning	Waste-to-energy, energieterugwinning	Wetenschappelijke artikelen
Duurzame energie in Nederland	Zonne-energie, Windenergie, Duurzame energie, Hernieuwbare energiedragers Sustainable energy	Wetenschappelijke artikelen, Overheidsrapporten

	Renewable energy	
Kwantitatieve en kwalitatieve data Afvalverwerking	Afvalverwerking Nederland	Overheidsrapporten
Kwantitatieve data duurzame energieproductie uit AVI's	CBS hernieuwbare energie	Overheidsrapporten
Uitstoot broeikasgassen AVI's	AVI's, afvalverwerkingsinstallaties, Broeikasgassen, CO2 equivalent, Klimaatverandering, Carbon dioxide equivalent, Emission wastemanagment, Greenhouse gases	Overheidsrapporten, Wetenschappelijke artikelen
Uitstoot broeikasgassen fossiele brandstoffen	Emissions, Broeikasgassen, CO2 equivalent, Klimaatverandering, Carbon dioxide equivalent, Emission, Greenhouse gases Fossil fuels, nonrenewable energy.	Wetenschappelijke artikelen
Efficiëntiefactor	Efficiency energy electricity heat, Efficiëntiefactor elektriciteit en warmte-energie	Wetenschappelijke boek Wetenschappelijke artikelen
Emissiefactoren	Uitstoot broeikasgassen energieproductie	Wetenschappelijke boek Wetenschappelijke artikelen

Tabel 3: Dataverzamelingstabel: In deze tabel is opgenomen wat voor (type) data is gebruikt en hoe de data te vinden is die noodzakelijk is voor het uitvoeren van dit onderzoek. Het eerste kopje betreft de benodigde informatie, een korte samengevatte categorie van de data, vervolgens is deze data te vinden door de trefwoorden onder het kopje 'trefwoorden' in te voeren in de zoekmachines. Het laatste kopje 'type data' laat zien wat voor soort data er gevonden is.

3.2 DATA-ANALYSE

De wetenschappelijke concepten en theorieën zijn het fundament voor het onderzoek geweest. Om te laten zien hoe deze in relatie staan tot het onderzoek is er een conceptueel model opgesteld; zie figuur 2. Hierin is de afhankelijke variabele; de bijdrage aan duurzame energie in Nederland door de energierugwinning van AVI's, te zien. Deze wordt beïnvloed door twee onafhankelijke variabele en één afhankelijke variabele. De twee onafhankelijke variabelen en de afhankelijke variabele worden onderzocht door middel van de literatuurstudie. De eerste onafhankelijke variabele is het afval als grondstof voor de energierugwinning. Hierbij wordt gekeken welk deel van het afval als hernieuwbaar en duurzaam kan worden beschouwd en waarom. De volgende onafhankelijke variabele is de invloed van de verschillende technieken voor energierugwinning met AVI's. Er wordt gekeken hoeveel invloed de verschillende technieken en methoden van de energierugwinning hebben op de uitstoot van broeikasgassen, milieuaantasting en met name de hoeveelheid energiewinning. De afhankelijke variabele is het verschil in uitstoot van broeikasgassen door energierugwinning in plaats van de productie van secundaire energie met fossiele brandstoffen. Er wordt gekeken naar het verschil qua

broeikasgassen bij eenzelfde energiewinning met het gebruik van fossiele brandstoffen. Deze informatie zal leiden tot het vinden van de bijdrage van AVI's aan de duurzame energieproductie in Nederland. Zelf is de afhankelijke variabele weer van invloed op een andere afhankelijke variabele, namelijk de totale duurzame energie productie in Nederland.



Figuur 1: Conceptueel model waarin de onafhankelijke variabelen worden laten zien die van invloed zijn op de afhankelijke variabele. Daarnaast laat het zien dat de afhankelijke variabele ook invloed heeft op een andere afhankelijke variabele.

4.0 RESULTATEN

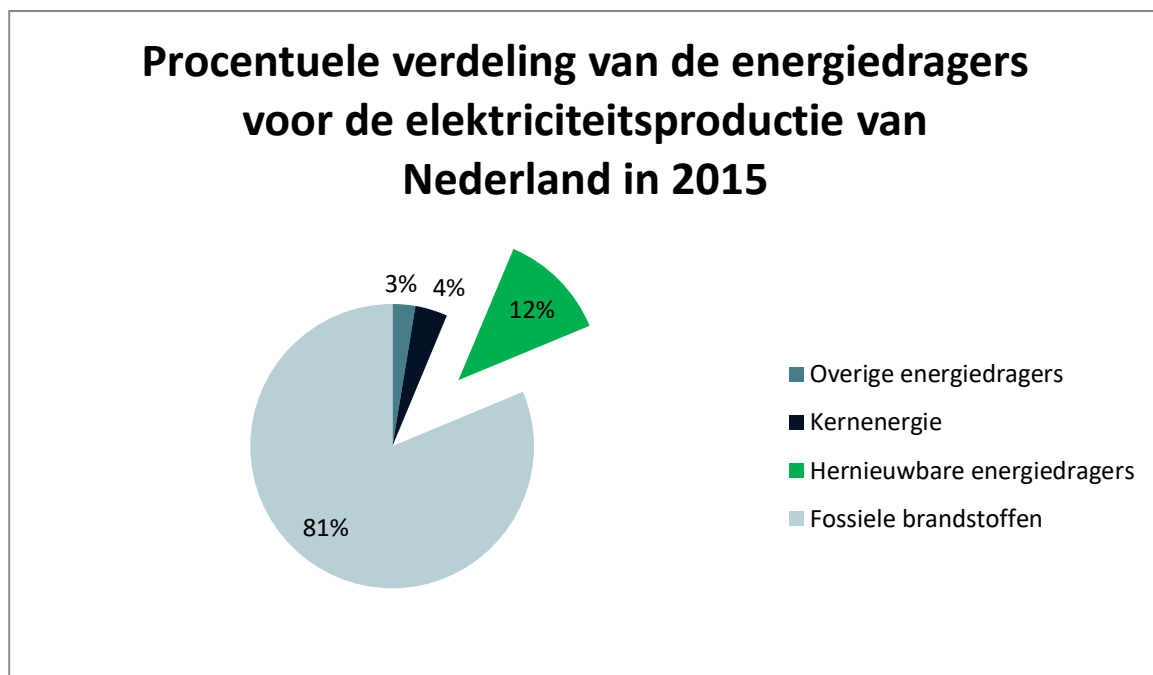
In dit hoofdstuk worden de deelvragen beantwoord. De drie deelvragen hebben betrekking op de energieteerugwinning van restafval in AVI's, de uitstoot van broeikasgassen bij AVI's in vergelijking met fossiele brandstoffen en de mogelijkheden tot het vergroten van de duurzame energie productie met AVI's.

4.1 BIJDRAGE AVI'S AAN DUURZAME ENERGIEPRODUCTIE VAN NEDERLAND

In dit deelhoofdstuk is eerst een overzicht gegeven van de elektriciteitsproductie en warmte-energieproductie van 2015. Daarnaast is gekeken in hoeverre AVI's een bijdrage hebben geleverd aan de duurzame energieproductie.

4.1.1 ELEKTRICITEITS- EN WARMTE-ENERGIEPRODUCTIE IN 2015

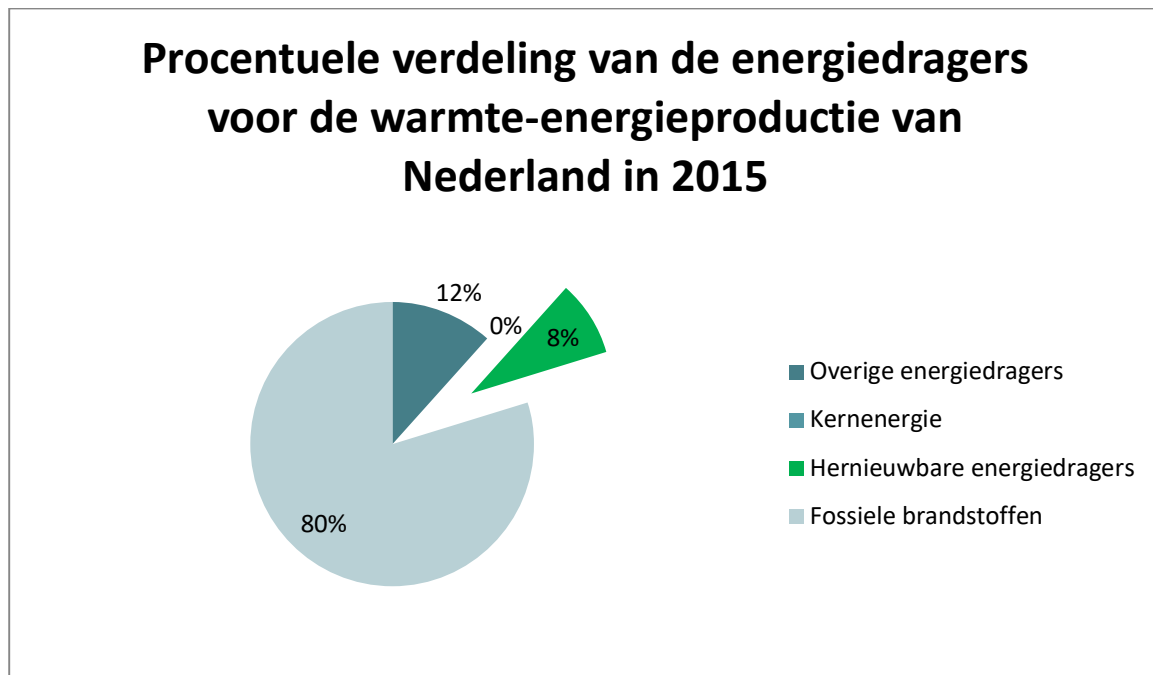
In Nederland werd in 2015 een totaal van 396.311 TJ aan elektriciteit geproduceerd. Van deze productie was het grootste deel geproduceerd met fossiele brandstoffen. In totaal was dit 322.020 TJ wat 81 procent van de gehele productie van dat jaar was. De rest van de elektriciteit in Nederland werd geproduceerd uit hernieuwbare energiedragers, kernenergie en overige energiedragers. Hierbij werd 49.300 TJ geproduceerd uit hernieuwbare energiedragers en 14.681 TJ uit kernenergie (CBS Statline, 2017). De overige energiedragers zijn het niet-hernieuwbare deel van grondstoffen en brandstoffen zoals gas, stoom, voedingswater en de verbranding van huishoudelijk en industrieel afval. Deze was in totaal 10.311 TJ in 2015 (CBS Statline, 2017). Ook een deel van de energieteerugwinning uit AVI's valt onder de overige energiedragers en het andere deel van de door AVI's geproduceerde energie valt onder de hernieuwbare energiedragers (Cheng & Hu, 2010). De verdeling van de totale productie van elektriciteit van 2015 is ook getoond in figuur 3.



Figuur 3: Procentuele verdeling van de energiedragers voor de productie van elektriciteit in Nederland in het jaar 2015 (CBS Statline, 2017).

Naast elektriciteit werd in 2015 ook 191.950 TJ aan warmte-energie geproduceerd. Evenals bij de elektriciteitsproductie werd de warmte-energie grotendeels geproduceerd met fossiele brandstoffen: In totaal 152.317 TJ wat 79 procent van de gehele productie was. De rest van de elektriciteit in Nederland werd geproduceerd uit hernieuwbare energiedragers en overige energiedragers, waarbij de hernieuwbare energiedragers alleen uit biomassa bestond. De productie uit hernieuwbare energiedragers was 16.410 TJ en 23.223 TJ uit overige

energiedragers (CBS Statline, 2017). De verdeling van de totale productie van warme-energie van 2015 is getoond in figuur 4.



Figuur 4: Procentuele verdeling van de energiedragers voor de productie van warmte-energie in Nederland in het jaar 2015 (CBS Statline, 2017).

4.1.3 ELEKTRICITEITS- EN WARMTE-ENERGIEPRODUCTIE MET AVI'S

In 2015 werd 7.565 kton restafval verbrandt in AVI's. Hiervan was het grootste deel afkomstig uit Nederland, maar ook werd 1.692 kton ingevoerd uit andere landen. Het verbranden van het afval produceerde 13.100 PJ elektriciteit en 21.300 PJ aan warmte-energie. Daarnaast werd er nog 560 kton vergist in AVI's wat 123 TJ aan elektriciteit opleverde en 125 TJ aan warmte-energie (Rijkswaterstaat, 2016). Ook werd 15,9 miljoen m³ aan biogas geproduceerd met een gelijke kwaliteit aan aardgas, wat ook om te zetten is in warmte-energie en/of elektriciteit met een omzettingsfactor van ongeveer 31,65 MJ per m³ (Blok, 2009). In totaal levert dit 503,24 MJ aan primaire energie op. Niet alle energie is bruikbaar. Door de omzetting naar elektriciteit, warmte-energie of een andere secundaire energievorm gaat er nog wel een deel van de bruikbare energie verloren. Daarnaast werd er 2.342 kton gestort op afvalstortplaatsen, waaruit ook een deel omgezet kon worden in duurzame energie. Alleen uit het gestorte restafval dat biologisch afbreekbaar is kan energie teruggewonnen worden. Hieruit werd 6,5 miljoen m³ aan gas, opnieuw in kwaliteit gelijk aan aardgas, met 205,73 TJ aan primaire energie, 115,16 TJ aan elektriciteit en 38,80 TJ aan warmte-energie geproduceerd (Rijkswaterstaat, 2016). In tabel 4 is een overzicht te zien van de totale elektriciteits- en warmte-energieproductie door middel van AVI's in 2015.

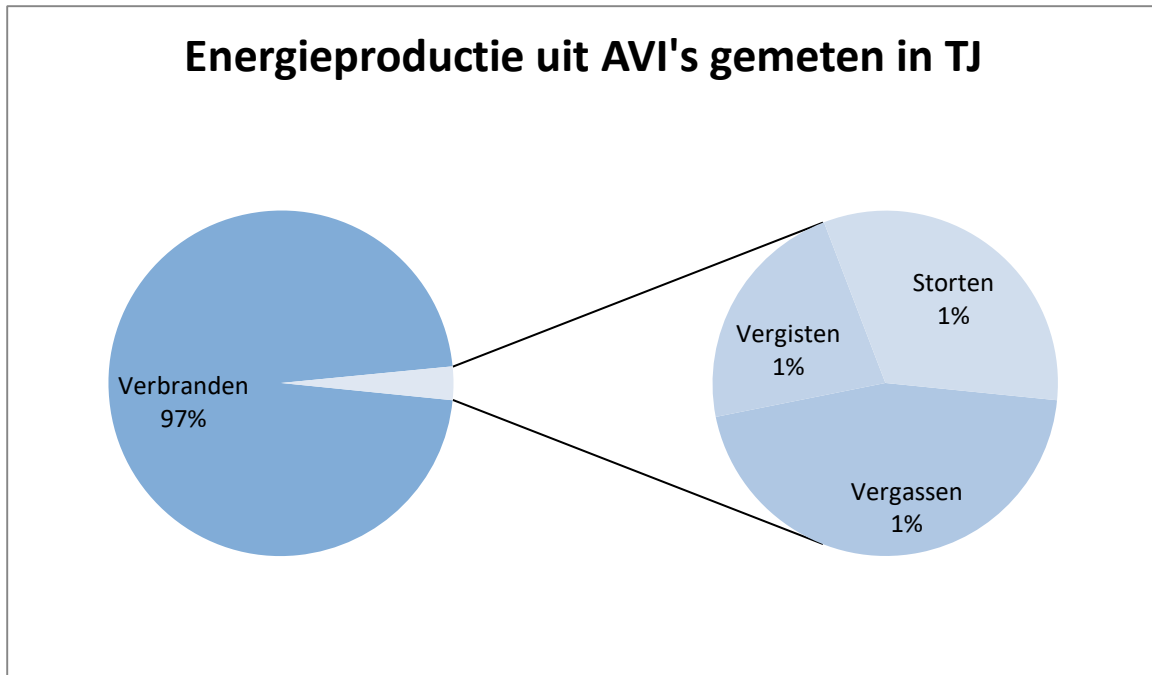
Techniek afvalverwerking	Hoeveelheid elektriciteit (TJ)	Hoeveelheid warmte-energie (TJ)	Hoeveelheid primaire energie in gasvorm (TJ)
Verbranding	13.100	21.300	-
Vergisting	123	125	-
Vergassing	-	-	503,24
(biologisch afbreekbaar) Storten	115,16	38,80	205,73

Tabel 4: Overzicht van de totale productie van warmte-energie en elektriciteit door middel van AVI's in Nederland in het jaar 2015. De hoeveelheid verschilt per gebruikte afvalverwerkingstechniek en is gemeten in TJ (Rijkswaterstaat, 2016).

Vergisting en vergassing bij AVI's is in Nederland hernieuwbaar gezien de oorsprong van het afval in een mensenleven aangevuld kan worden door de natuur (Cheng & Hu, 2010). Gekeken naar de totale energie productie in AVI's wordt het overgrote deel uit niet-hernieuwbare energiedragers geproduceerd, namelijk 34.400 TJ en maar een klein deel wel uit hernieuwbare energiedragers geproduceerd, namelijk 1.110,93 TJ. Deze verdeling is te zien in tabel 5 en gevisualiseerd in figuur 5. Dit is 1,69 procent van de totale duurzame energieproductie in Nederland en heeft dus geen groot aandeel aan de totale energieproductie in Nederland.

Techniek afvalverwerking	Hoeveelheid energie uit niet-hernieuwbare energiedragers (TJ)	Hoeveelheid energie uit hernieuwbare energiedragers (TJ)
Verbranding	34.400	0
Vergisting	0	248
Vergassing	0	503,24
Storten	0	359,69

Tabel 5: Overzicht van de verdeling van de uit hernieuwbare en niet-hernieuwbare energiedragers geproduceerde hoeveelheid warmte-energie en elektriciteit door middel van AVI's in Nederland in het jaar 2015. De hoeveelheid verschilt per gebruikte afvalverwerkingstechniek en is gemeten in TJ (Rijkswaterstaat, 2016).



Figuur 5: Procentuele verdeling van door AVI's geproduceerde energie in Nederland in het jaar 2015. Hierbij is er afgerond op gehele procenten. Wel is de verdeling van het hernieuwbare deel aangegeven in cirkeldiagram om de verhoudingen te verduidelijken (Rijkswaterstaat, 2016).

4.2 UITSTOOT AVI'S IN VERGELIJKING MET FOSSIELE BRANDSTOFFEN

Zoals aangetoond in het vorige deelhoofdstuk is de bijdrage van AVI's aan de duurzame energieproductie relatief klein. De elektriciteit en warmte-energie die niet hernieuwbaar of duurzaam teruggewonnen kunnen worden kunnen wel een positieve bijdrage hebben in de transitie naar een duurzame energieproductie, gezien er minder fossiele brandstoffen worden gebruikt. Hierbij gaat het om de energierugwinning door verbranding. Zoals aangegeven in deelhoofdstuk 2.5 varieert de uitstoot van broeikasgassen gemeten in CO₂ per ton restafval wegens verschillende redenen. De uitstoot verschilt van 293 kg CO₂ per ton restafval tot 557 kg CO₂ per ton restafval. Bij het verbranden van 7.565 kton zou dit betekenen dat de uitstoot met het meest klimaatvriendelijke scenario, alleen gekeken naar het versterkte broeikaseffect, voor een uitstoot van gelijk aan 2.22 miljard kg CO₂ zorgt en in het minst klimaatvriendelijke scenario voor een uitstoot gelijk aan 4.21 miljard kg CO₂, zoals te zien in tabel 6 (Obermoser, Fellner & Rechberger, 2009).

4.2.1 UITSTOOT BIJ HET PRODUCEREN VAN WARMTE-ENERGIE EN ELEKTRICITEIT MET FOSSIELE BRANDSTOFFEN

De drie meest gebruikte fossiele brandstoffen zijn aardgas, steenkool en stookolie (CBS Statline, 2017). Deze primaire energie heeft bij de omzetting naar secundaire energievormen een uitstoot van broeikasgassen gemeten in CO₂ equivalent. Bij de energierugwinning door verbranding van het restafval is 13.100 TJ aan elektriciteit geproduceerd en 21.300 TJ aan warmte-energie geproduceerd.

4.2.1.1 UITSTOOT BIJ AARDGAS

De uitstoot van broeikasgassen in CO₂ equivalent is 52 kg CO₂ per GJ bij de productie van elektriciteit en warmte-energie door middel van aardgas, zoals aangegeven in deelhoofdstuk 2.5. De efficiëntiefactor η_e van aardgas naar elektriciteit is 0,35 (Blok, 2009). Hierdoor zou voor een productie van 13.100 TJ elektriciteit 37428,57 TJ nodig zijn, wat correspondeert met 1,18 miljoen m³ aardgas. Daarnaast betekent dit dat er een uitstoot van broeikasgassen gelijk aan 1,95 miljard kg CO₂ is bij de productie van de elektriciteit. Gegeven de efficiëntiefactor η_h van 0,50 bij aardgas is er 42.600 TJ, gelijk aan 1,35 miljoen m³, van de primaire energie nodig voor een productie van 21.300 TJ warmte-energie. De bijbehorende uitstoot broeikasgassen bedraagt dan 2,2 miljard kg CO₂, zoals te zien in tabel 6. Gezien de primaire energie omgezet kan worden in elektriciteit en warmte-energie gedurende hetzelfde proces, is 1,35 miljoen m³ aan aardgas voldoende om aan zowel de elektriciteitsproductie als aan de warmte-energieproductie te voldoen.

Hoeveelheid benodigde energie (TJ)	Hoeveelheid bijbehorende primaire energie (TJ)	Hoeveelheid bijbehorende energie (miljoen m ³)	Uitstoot broeikasgassen (miljard kg CO ₂)
13.000 (elektriciteit)	37.428,57	1,18	1,95
21.300 (warmte-energie)	42.600	1,35	2,22

Tabel 6: Overzicht van de benodigde productie van warmte-energie en elektriciteit van aardgas en de bijbehorende uitstoot van broeikasgassen als vervanger van de door AVI's teruggewonnen niet-hernieuwbaar geproduceerde energie. Energie gemeten in TJ of miljoen m³ en de uitstoot van broeikasgassen in miljard kg CO₂ (Rijkswaterstaat, 2016).

4.2.1.2 UITSTOOT BIJ STEENKOOL

De uitstoot van broeikasgassen in CO₂ equivalent is 94 kg CO₂ per GJ bij de productie van elektriciteit en warmte-energie door middel van steenkool, zoals aangegeven in deelhoofdstuk 2.5. De efficiëntiefactor η_e van de steenkool is relatief laag met 0,25 in een gecombineerd systeem voor elektriciteits- en warmte-energieproductie (Blok, 2009). Hierdoor zou voor een productie van 13.100 TJ elektriciteit 52.400 TJ nodig zijn van de primaire energiebron. Dit betekent dat er een uitstoot van broeikasgassen gelijk aan 4,93 miljard kg CO₂ nodig is voor de productie van de elektriciteit. De efficiëntiefactor η_h van steenkool is 0,75 (Blok, 2009) waardoor 28.400 TJ aan steenkool nodig is om 21.300 TJ aan warmte-energie te verkrijgen. Dit komt neer op 2,67 miljard kg CO₂. Ook bij steenkool geldt dat de primaire energie omgezet kan worden in elektriciteit en warmte-energie gedurende hetzelfde proces waardoor 53.250 TJ nodig is om aan zowel benodigde hoeveelheid elektriciteit als de benodigde hoeveelheid warmte-energie te voldoen. Deze gegevens zijn ook te zien in tabel 7.

Hoeveelheid benodigde energie (TJ)	Hoeveelheid bijbehorende primaire energie (TJ)	Uitstoot broeikasgassen (miljard kg CO ₂)
13.000 (elektriciteit)	52.400	4.93
21.300 (warmte-energie)	28.400	2.67

Tabel 7: Overzicht van de benodigde productie van warmte-energie en elektriciteit van steenkool en de bijbehorende uitstoot van broeikasgassen als vervanger van de door AVI's teruggewonnen niet-hernieuwbaar geproduceerde energie. Energie gemeten in TJ en de uitstoot van broeikasgassen in miljard kg CO₂ (Rijkswaterstaat, 2016).

4.2.1.3 UITSTOOT BIJ STOOKOLIE

De uitstoot van broeikasgassen van stookolie in CO₂ equivalent is 77 kg CO₂ per GJ bij de productie van elektriciteit en warmte-energie, zoals aangegeven in deelhoofdstuk 2.5. De productie van elektriciteit vanuit stookolie heeft gebruikelijk een efficiëntiefactor η_e van 0,40 en een efficiëntiefactor η_h van 0,40 bij de productie van warmte-energie in een gecombineerd systeem (Blok, 2009). Hierdoor zou er voor een productie van 13.100 TJ elektriciteit 32750 TJ nodig zijn. Dit zorgt voor een uitstoot van broeikasgassen gelijk aan 2,52 miljard kg CO₂ voor de productie van de elektriciteit. Gegeven de efficiëntiefactor η_h van 0,40 bij stookolie is er 53.250 TJ aan stookolie nodig voor de productie van 21.300 TJ warmte-energie. De bijbehorende uitstoot broeikasgassen bedraagt dan 4,10 miljard kg CO₂. De primaire energie van de stookolie kan omgezet worden in elektriciteit en warmte-energie gedurende hetzelfde proces waardoor 53.250 TJ nodig is om aan zowel benodigde hoeveelheid elektriciteit als de benodigde hoeveelheid warmte-energie te voldoen. Deze gegevens zijn terug te vinden in tabel 8.

Hoeveelheid benodigde energie (TJ)	Hoeveelheid bijbehorende primaire energie (TJ)	Uitstoot broeikasgassen (miljard kg CO ₂)
13.000 (elektriciteit)	32.750	2,52
21.300 (warmte-energie)	53.250	4,10

Tabel 8: overzicht van de benodigde productie van warmte-energie en elektriciteit van stookolie en de bijbehorende uitstoot van broeikasgassen als vervanger van de door AVI's teruggewonnen niet-hernieuwbaar geproduceerde energie. Energie gemeten in TJ en de uitstoot van broeikasgassen in miljard kg CO₂ (Rijkswaterstaat, 2016).

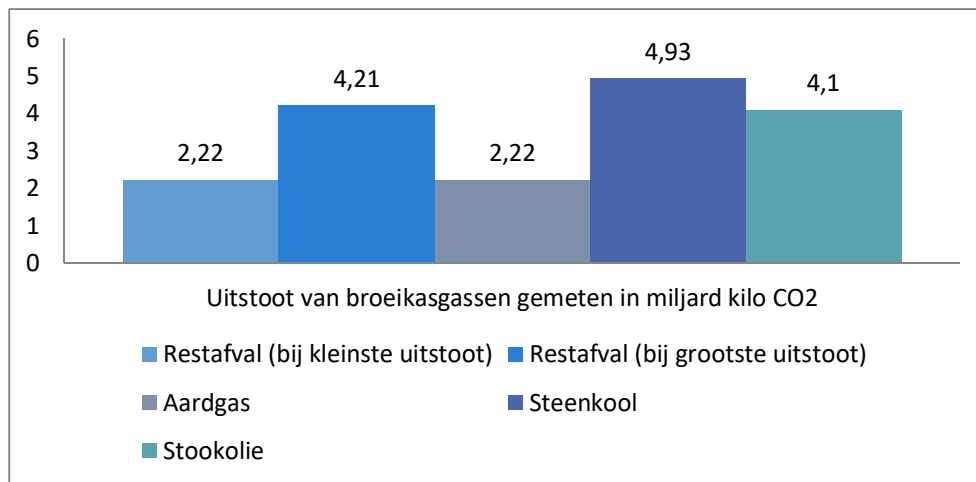
4.2.2 OVERZICHT VAN DE UITSTOOT VAN BROEIKASGASSEN

In de voorgaande deelhoofdstukken is de uitstoot van broeikasgassen getoond die vrijkomt bij de productie van het niet-hernieuwbare deel van de elektriciteitsproductie en warmte-energieproductie met restafval en dezelfde hoeveelheid energie met fossiele brandstoffen. In tabel 9 en figuur 6 is een overzicht te zien van verschillende energiedragers en de bijbehorende uitstoot van de broeikasgassen gemeten in CO₂. Hier is te zien dat energiewinning door afvalverbranding leidt tot een uitstoot van broeikasgassen gelijk aan 2,22 tot 4,21 miljard kg CO₂ afhankelijke van de mate van klimaatvriendelijkheid. De uitstoot van broeikasgassen in het klimaatvriendelijke scenario is gelijk aan die van aardgas en 2,71 miljard kg CO₂ minder dan de uitstoot bij de benodigde elektriciteits- en warmte-energieproductie met steenkool als brandstof. Daarnaast is de uitstoot van broeikasgassen in het klimaatvriendelijke scenario is

1,88 miljard kg CO₂ minder dan bij dezelfde energieproductie door middel van stookolie. Bij de uitstoot van broeikasgassen bij het minder klimaatvriendelijke scenario ligt het anders. Daar was een hogere uitstoot van broeikasgassen van 1,99 miljard kg CO₂ bij het verbranden van het afval in vergelijking met eenzelfde benodigde energieproductie met aardgas. Deze uitstoot was net als het klimaatvriendelijke scenario wel lager bij de benodigde energieproductie met steenkool, namelijk 0,72 miljard kg CO₂. Bij de productie van de benodigde energie door middel van stookolie was er een uitstoot van 4,10 miljard kg CO₂ wat betekent dat de verbranding van afval bij het minder klimaatvriendelijke 0,12 miljard kg CO₂ meer was. Hierbij is er gekeken naar de benodigde energieproductie met fossiele brandstoffen om zowel aan de hoeveelheid elektriciteit als aan de hoeveelheid warmte-energie te voldoen. Dit houdt in dat er extra elektriciteit of extra warmte-energie geproduceerd zou zijn in vergelijking met de energierugwinning vanuit restafval doordat deze brandstoffen andere efficiëntiefactoren hebben voor elektriciteits- en warmte-energieproductie dan de AVI's bij energierugwinning door verbranding.

Energiedragers	Hoeveelheid benodigde (primaire) energie (TJ)	Uitstoot broeikasgassen (miljard kg CO ₂)
Restafval bij kleinste en grootste uitstoot van broeikasgassen	13.100 (elektriciteit) & 21.300 (warme-energie)	2,22 – 4,21
Aardgas	42.600	2,22
Steenkool	52.400	4,93
Stookolie	53.250	4,10

Tabel 9: Overzicht van de benodigde productie van warmte-energie en elektriciteit van de drie meest gebruikte fossiele brandstoffen in Nederland voor elektriciteits- en warmte-energie productie en de bijbehorende uitstoot van broeikasgassen. Ook is de uitstoot van broeikasgassen gegeven van de niet-hernieuwbaar geproduceerde energie door AVI's. Energie gemeten in TJ en de uitstoot van broeikasgassen in miljard kg CO₂ (Rijkswaterstaat, 2016).



Figuur 6: Uitstoot van broeikasgassen gemeten in miljoen kilo CO₂ bij de productie van energie door middel van AVI's of bij eenzelfde benodigde energieproductie door middel van fossiele brandstoffen (Rijkswaterstaat, 2016).

In 2006 (Vroonhof & Croezen) is er een onderzoek gedaan naar de uitstoot van broeikasgassen bij het verbranden van restafval aan de universiteit van Delft. Hieruit werd een schatting gemaakt over de vermindering van broeikasgassen door het verbranden van het restafval in

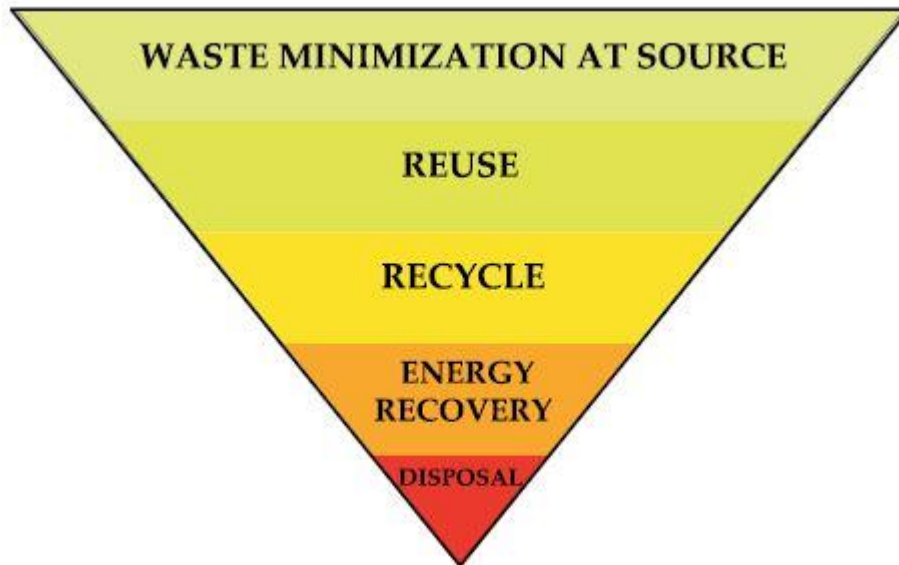
vergelijking met het storten van dit restafval. Het storten van het restafval leidde tot een gemiddelde uitstoot van 415 kg CO₂ per ton verwerkt restafval tegenover 402 kg CO₂ per ton verbrand restafval. Daarnaast werd er berekend dat door de besparing van elektriciteit, warmte-energie, materialen en grondstoffen 364 kg CO₂ per ton restafval vermeden. Dit kon doordat er op deze manier elektriciteit en warmte-energie werd teruggewonnen die niet meer geproduceerd hoefde te worden met fossiele brandstoffen. Zo kwamen zij tot de conclusie dat het verbranden van restafval leidt tot een uitstoot van 41 kg CO₂ per ton restafval.

4.3 VERGROTEN VAN HET AANDEEL DUURZAME ENERGIEPRODUCTIE IN AVI'S

Om de duurzame energie productie met AVI's te vergroten zonder een extra toename in restafval zullen er enkele veranderingen doorgevoerd worden bij het proces van restafval naar energie. In dit deelhoofdstuk zijn enkele belangrijke potentiële veranderingen op het gebied van afvalverwerking uiteengezet.

4.3.1 SCHEIDEN VAN AFVAL EN AFVALVERMINDERING

In Nederland wordt in grote mate huishoudelijk afval gescheiden, maar dit kan nog wel verbeterd worden (Rijkswaterstaat, 2015). Wegens verschillende redenen komt er in het restafval ook afval terecht dat bij het groente- fruit- en tuinafval had gekund. Dit wordt verbrand met het andere restafval. Hierdoor gaat er een deel verloren van wat tot duurzame energie productie had kunnen leiden. Het is moeilijk in te schatten hoeveel dit is, maar het zorgt zeker voor een groot aandeel (AVR, 2017). Gezien Nederland een van de grootste restafvalproducenten per capita in Europa is, zou het nog intensiever scheiden van het restafval een groot effect kunnen hebben. Met 600 kg per persoon aan restafval per jaar produceert een Nederlander 100 kg per jaar meer dan het Europese gemiddelde (Branchini, 2015). Een van de koplopers op het gebied van afvalverwerking is Zweden. De afgelopen decennia heeft het land een enorme toename in de productie van duurzame energie vanuit afval. Behalve dat er veel geïnvesteerd is in het innoveren van de AVI's die ze milieuvriendelijker en efficiënter hebben gemaakt, is de groei met name veroorzaakt door de manier van afvalverwerking. Zo is er een cultuur gecreëerd die afvalvermindering stimuleert en hergebruik stimuleert. Als een product toch tot afval is 'gedegradeerd' wordt er bij de AVI's waar mogelijk gerecycled, voordat er tot het verbranden of storten van het afval wordt overgegaan (Branchini, 2015; Karlsson & Öhman, 2005). Figuur 8 toont de hiërarchie in afvalverwerking met een schematische tekening.



Figuur 8: Schematische hiërarchie van de afvalverwerking met de volgorde zoals het wordt verwerkt in Zweden (Branchini, 2015).

4.3.2 INNOVATIES EN REDUCTIE VAN DE UITSTOOT VAN BROEIKASGASSEN

De AVI's in Nederland kunnen efficiënter worden door verbeteringen in de gebruikte technieken. Er zijn nog veel AVI's die nog een energierugwinningsratio hebben van 0,6 in plaats van 0,65 die de nieuwere AVI's wel moeten behalen (AVR, 2017). Een vermindering van uitstoot van broeikasgassen bij de energierugwinning door afvalverwerking komt niet alleen tot stand door het efficiënter maken van de AVI's, maar ook door het gehele proces er omheen efficiënter te maken. Zo kan er nog veel terrein gewonnen worden door het reduceren van de uitstoot van broeikasgassen. Een voorbeeld hiervan is het vervoer van het afval naar de AVI's. Dit wordt vaak nog gedaan met vervoersmiddelen die op fossiele brandstoffen worden aangevoerd. De uitstoot van broeikasgassen gemeten in CO₂ bij transport over een afstand van 300 km zorgt voor een uitstoot van 20,9 kg CO₂ per ton afval bij het vervoer door een vrachtwagen of 20,1 kg CO₂ per ton afval bij het vervoer door middel van binnenvaart voor dezelfde afstand. Dit terwijl het vervoer met een elektrische trein zorgt voor een uitstoot van 6,0 kg CO₂ per ton bij eenzelfde afstand (Otten & Bergsma, 2010).

5.0 DISCUSSIE

Dit hoofdstuk is onderverdeeld in een analyse van de resultaten en een reflectie op het onderzoek. Eerst wordt de probleem- en vraagstelling kort samengevat, waarna de resultaten worden besproken.

5.1 ANALYSE VAN DE RESULTATEN

In dit onderzoek werd er gekeken in hoeverre de energierugwinning uit restafval bijdraagt aan de duurzame energieproductie in Nederland en hoe deze in de toekomst kan toenemen. Om een

overzicht te krijgen werd het onderzoek onderverdeeld in drie deelvragen die betrekking hadden op de bijdrage van de energierugwinning aan duurzame energieproductie, de uitstoot van broeikasgassen van AVI's bij de productie van elektriciteit en warmte-energie in vergelijking met fossiele brandstoffen en hoe de productie van duurzame energierugwinning met AVI's kan toenemen.

In hoofdstuk 4.1.3 is te zien dat er 1.110,93 TJ aan duurzame energie geproduceerd werd in 2015 in AVI's. Dit was 1,69 procent van de totale duurzame energieproductie van Nederland. Deze bijdrage is relatief klein en om die reden kan er gesteld worden dat het terugwinning van energie uit restafval weinig toegevoegde waarde heeft aan de duurzame energie in Nederland. Dit komt doordat het grootste gedeelte van het afval niet vergist, vergast of bio-afbreekbaar gestort kon worden, maar moest worden verbrand en het terugwinnen van energie uit afval door verbranding kan niet als duurzame energiewinning worden beschouwd. Wel lijkt het bij te dragen aan een transitie naar duurzame energie, gezien er door de terugwinning van energie met verbranding er elektriciteit en warmte-energie worden geproduceerd die niet meer met de fossiele brandstoffen geproduceerd hoeven worden. In hoofdstuk 4.2.3 is te zien dat het veel uitmaakt naar welk scenario van energierugwinning uit restafval gekeken wordt; het meest klimaatvriendelijke scenario of het minst klimaatvriendelijke scenario. Een specifieke uitstoot van broeikasgassen bij de verbranding van restafval in Nederland zou hier een beter inzicht hebben gegeven. Wel laat het zien dat het verbranden van restafval tot minder uitstoot van broeikasgassen leidt dan energiewinning met fossiele brandstoffen. Bovendien zorgt het voor afvalvermindering en een mindere mate van het storten van het afval, wat voor een besparing van uitstoot zorgt van 415 kg CO₂ per ton restafval (Vroonhof & Croezen, 2006), en wordt er iets nuttigs uit het afval gehaald. Om de duurzame energieproductie vanuit AVI's te vergroten moet het afval beter gescheiden worden, zodat een groter deel vergist of vergast kan worden en moet de hele *life cycle* van afval tot energie efficiënter worden, met de nadruk op de uitstoot van broeikasgassen.

5.2 REFLECTIE

Het onderzoek laat de huidige staat van de duurzame energieproductie zien in Nederland, gericht op energie uit afval. Hierdoor is er meer inzicht in de toekomstige stappen die er nog gezet moet worden door Nederland om aan de gemaakte afspraken te voldoen in de strijd tegen klimaatverandering. In het onderzoek is gekeken naar het nuttig gebruiken van restafval. In het onderzoek is niet gekeken naar het voorkomen van afvalproductie of naar alternatieve mogelijkheden voor afvalverwerking die misschien ook toegevoegde waarde kunnen hebben bij het tot stand komen van een duurzamere samenleving. In een vervolgonderzoek zou hier naar gekeken kunnen worden om het gehele concept 'afval' te behandelen. Daarnaast kan er nog veel verbeterd worden bij de terugwinning van energie wat betreft de gebruikte technieken. De gebruikte literatuur maakt het moeilijk om de mogelijke verbeteringen en de bijbehorende gevolgen daarvan in kwantitatieve data uit te drukken, gezien het om toekomstige schattingen en situaties gaat. Wel laat het onderzoek enkele verbeterpunten zien om de duurzame energieproductie met AVI's te vergroten. Dit onderzoek laat zien dat er nog veel moet gebeuren op het gebied van duurzame energieproductie in Nederland en dat energierugwinning uit restafval vooral helpt bij het verkleinen van de gevolgen van het afvalprobleem en niet zozeer bijdraagt aan een duurzame energieproductie.

6.0 CONCLUSIE

In de inleiding werd de hoofdvraag als volgt beschreven: “In hoeverre dragen AVI’s bij aan de duurzame energie productie in Nederland en hoe kan dit vergroot worden?” Deze hoofdvraag werd ondersteund door drie deelvragen. Uit het onderzoek kwam naar voren dat de AVI’s met 1,67 procent relatief weinig bijdragen aan de duurzame energieproductie in Nederland, maar dat het wel bijdraagt aan de transitie naar een duurzamere energieproductie in vergelijking met fossiele brandstoffen en het storten van afval. Daarnaast kan de bijdrage van AVI’s aan de duurzame energieproductie groter worden door het hele proces van afvalverwerking klimaatvriendelijker en efficiënter te maken. Deze beantwoording is tot stand gekomen door de analyse van de resultaten, waaruit is gebleken dat er conclusies kunnen worden getrokken uit het verleden en dat het voorspellen van toekomstige scenario’s afhangt van te veel factoren om er gerechtvaardigde uitspraken over te doen. Nederland moet nog veel doen om de duurzame energieproductie vergroten. Het vergroten van het aandeel van duurzame energie door middel van energierugwinning in AVI’s zal hier geen significante bijdrage aan leveren, maar zorgt er wel voor dat er op andere manieren een vermindering van uitstoot van broeikasgassen zal zijn. De problemen die afval opleveren kunnen gereduceerd worden door efficiënter te werk te gaan en beter te scheiden, maar het afval blijft voor problemen zorgen door de uitstoot van broeikasgassen. Een vermindering van restafval zal leiden tot minder verbranding van het restafval, waardoor de uitstoot van broeikasgassen ook zal dalen. Een vervolgonderzoek kan helpen om inzicht te krijgen hoe deze vermindering van afvalproductie bewerkstelligd kan worden. Afval kan gebruikt worden om van het probleem een deel van een oplossing te maken, maar het voorkomen van een probleem lijkt in dit geval effectiever dan het verhelpen er van.

REFERENTIES

- AVR. (2015). *Waste to Energy: empowering the transition to a more circular economy*. Rotterdam: AVR.
- AVR. (2017). *De resultaten van ons proces*. Retrieved april 30, 2017, from AVR.: <http://www.avr.nl/nl/de-resultaten-van-ons-proces>
- Banos, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F., Gil, C., Alcayde, A., & Gómez, J. (2011). Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1753–1766.
- Blok. (2009). *Introduction to Energy Analysis*. Amsterdam: Techne Press.
- Bojic, M. (1997). Cogeneration of power and heat by using endoreversible Carnot engine. *Energy Conversion and Management*, 1877-1880.
- Branchini, L. (2015). *Waste-to-energy*. Springer: Bologna.
- Brunner, P., & Rechberger, H. (2016). Waste to energy – key element for sustainable waste management. *Waste Management*, 3-12.
- CBS. (2016, maart 31). *Nederland voorlaatste op ranglijst EU hernieuwbare energie*. Retrieved mei 8, 2017, from CBS: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2016/13/nederland-voorlaatste-op-ranglijst-eu-hernieuwbare-energie>
- CBS Statline. (2017, mei 12). *Hernieuwbare elektriciteit; productie en vermogen*. Retrieved mei 13, 2017, from Centraal Bureau voor de Statistiek Statline: <http://statline.cbs.nl/statweb/publication/?dm=slnl&pa=82610ned>
- Cheng, H., & Hu, Y. (2010). Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current. *Bioresource Technology*, 3816–3824.
- Consonni, S., Giugliano, M., & Grosso, M. (2005). Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste Part B: Emission and cost estimates. *Waste Management*, 137–148.
- Diaz, L., Savage, G., & Eggerth, L. (2015). Alternatives for the treatment and disposal of healthcare wastes in developing countries. *Waste Management*, 626–637.
- Dincer, I. (2000). Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157–175.
- EC. (2011). *Guidance Guidelines R1 Energy Efficiency Formula*. Brussel: European Commission.
- Eurostat. (2016, juli). *Renewable energy statistics*. Retrieved mei 7, 2017, from Eurostat statistics explained: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics
- Frey, G., & Linke, M. (2002). Hydropower as a renewable and sustainable energy resource meeting global energy challenges in a reasonable way. *Energy Policy*, 1261–1265.
- Fruergaard, T., Astrup, T., & Ekvall, T. (2009). *Energy use and recovery in waste management and implications for accounting of greenhouse gases and global warming contributions*. Lyngby: Technical University of Denmark.

- Grosso, M., Motta, A., & Rigamonti, L. (2010). Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive. *Waste Management*, 1238–1243.
- Iakovou, E., Karagiannidis, A., Vlachos, D., Toka, A., & Malamakis, A. (2014). Waste biomass-to-energy supply chain management: A critical synthesis. *Waste Management*, 1860-1870.
- Jaramillo, P., Griffin, M., & McCoy, S. (2009). Life Cycle Inventory of CO₂ in an Enhanced Oil Recovery System. *Environmental Science and Technology*, 8027–8032.
- Karlsson, M., & Öhman, D. (2005). Material consumption in the healthcare sector: Strategies to reduce its impact on climate change. The case of Region Scania in South Sweden. *Journal of Cleaner Production*, 1071-1081.
- Lamers, P., Hoefnagels, R., Junginger, M., Hamelinck, C., & Faaij, A. (2014). Global solid biomass trade for energy by 2020: an assessment of potential import streams and supply costs to North-West Europe under different sustainability constraints. *Bioenergy*, 618–634.
- Lund, H. (2007). Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy*, 912–919.
- Miller, G., & Spoolman, S. (2012). *Living in the environment*. Nelson Education.
- Nielsen, M., & Illerup, J. B. (2003). *Emissionsfaktorer og emissionsopgørelse for decentral kraftvarme*. Aarhus: Aarhus Universitet.
- Obermoser, M., Fellner, J., & Rechberger, H. (2009). Determination of reliable CO₂ emission factors for waste-to-energy plants. *Waste Management and Resource*, 907–913.
- Otten, M., & Bergsma, G. (2010). *Beter één AVI met een hoog rendement dan één dichtbij Hoeveel transport van afval is nuttig voor een hoger energierendement?* Delft: CE Delft.
- Rijkswaterstaat. (2016). *Afvalverwerking in Nederland, gegevens 2015*. Utrecht: Werkgroep Afvalregistratie.
- Song, C. (2006). Global challenges and strategies for control, conversion and utilization of CO₂ for sustainable development involving energy, catalysis, adsorption and chemical processing. *Catalysis Today*, 2-32.
- Sterl, S., Höhne, N., & Kuramochi, T. (2016). *What does the Paris Agreement mean for climate policy in the Netherlands*. Nederland: New Climate Institute.
- UNFCCC. (2015). *Paris Agreement*. Parijs: United Nations.
- Vroonhof, J., & Croezen, H. (2006). *Afvalverwerking en CO₂ Quick scan van de broeikasgasemissies van de afvalverwerkingssector in Nederland 1990 - 2004*. Delft: CE Delft.