

Auteursrechterlijke overeenkomst

Opdat de Universiteit Hasselt uw eindverhandeling wereldwijd kan reproduceren, vertalen en distribueren is uw akkoord voor deze overeenkomst noodzakelijk. Gelieve de tijd te nemen om deze overeenkomst door te nemen, de gevraagde informatie in te vullen (en de overeenkomst te ondertekenen en af te geven).

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling met

Titel: Groeideterminanten van Belgische bedrijven : verschillen tussen provincies

Richting: 3de jaar handelsingenieur - major operationeel management en logistiek

Jaar: 2008

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Ik ga akkoord,

GEBOERS, An

Datum: 5.11.2008

Groeideterminanten van Belgische bedrijven : verschillen tussen provincies

An Geboers

promotor :
Prof. dr. Arthur LIMERE

Woord vooraf

Mijn studies Handelsingenieur sluit ik af met deze eindverhandeling. Het onderwerp dat ik gekozen heb, geeft een mooie uitdrukking aan mijn interesse - als studente economie - voor milieu en technologie. Bovendien sluit het onderwerp goed aan bij mijn afstudeerrichting Technologie.

De weg vanaf de keuze van mijn onderwerp tot dit eindresultaat heb ik afgelegd met de begeleiding en de steun van een aantal personen. Een paar woordjes van dank zijn hier dus zeker gepast. Allereerst wil ik graag mijn promotor Prof. dr. Thewys bedanken voor zijn begeleiding, zijn tijd en de kans die hij mij gegeven heeft om een eindverhandeling rond dit onderwerp te kunnen schrijven. Een bijzonder woord van dank gaat uit naar de heer Tom Kuppens. Het is dankzij zijn begeleiding dat ik deze eindverhandeling tot een goed einde heb kunnen brengen. Bij deze dus een welgemeend dankjewel voor de tijd, de verbeteringen, de tips, de artikels en het herhaaldelijk nalezen van mijn eindverhandeling.

Verder wil ik iedereen bedanken die op eender welke manier heeft bijgedragen aan het tot stand komen van deze eindverhandeling. Ik denk hierbij aan de medewerkers van COGEN Vlaanderen voor het beantwoorden van mijn vragen tot de drukker die voor de afwerking zorgt.

Mijn laatste woorden van dank gaan uit naar al de personen uit mijn omgeving die achter mij staan. In het bijzonder mijn ouders voor de kansen die ze mij geven en de vrijheid om in mij studies zelf keuzes te maken. En twee jaar na het dankwoordje van mijn broer Stijn aan mij, is het nu tijd om de rollen om te keren. Dankjewel dus voor de talrijke tips, vooral op momenten dat Excel maar niet deed wat ik verwachtte.

Sofie Ceunen
Mei 2008

Samenvatting

Energie is een basisbehoefte. Het wordt aangewend om zich te verplaatsen, te verwarmen, licht te maken, allerlei toestellen en machines te gebruiken etc. Deze energie kent talrijke vormen waaronder ze kan voorkomen, maar ook de bronnen van energie zijn divers. Zoals Henry Ford in 1925 zei, kan er uit zowat alles energie gehaald worden. Met de groeiende aandacht voor de gezondheid van mens en milieu, de discussie aangaande de opwarming van de aarde (en het eventuele verband met de uitstoot van broeikasgassen) en niet te vergeten de naderende uitputting van de aardolie-, aardgas- en steenkoolreserves is deze stelling van Henry Ford heel relevant geworden. Waar de voorbije eeuw nogal kwistig werd omgesprongen met traditionele energiebronnen, zijn er nu meer dan ooit tevoren vraagtekens geplaatst bij de gevolgen van deze levensstijl voor mens en milieu. Hernieuwbare energie lijkt een oplossing te bieden. Zonne-energie, windenergie en energie uit waterkracht geraken steeds meer ingeburgerd. Maar ook biomassa kan een bron van energie zijn. Onder de term "biomassa" groeperen, naast organische afvalstoffen, heel wat gewassen: koolzaad, maïs, suikerbiet, olifantsgras en korte omloophout om er maar enkele te noemen.

Deze eindverhandeling gaat na of de omzetting van biomassa in energie economisch haalbaar is. Meer specifiek: is de verbranding van korte omloophout voor de productie van elektriciteit (en eventueel warmte) rendabel? Om een antwoord op deze vraag te kunnen formuleren, is er een kosten-batenanalyse uitgevoerd. Er is daarbij vertrokken van de assumptie van een investeringsproject in een verbrandingsinstallatie waarbij korte omloophout omgezet wordt in energie. Het eindresultaat van deze analyse is de netto contante waarde (NCW), dit is de actuele waarde van huidige en toekomstige netto kasstromen gegenereerd door de investering. Deze waarde moet positief zijn. Indien negatief, dan wordt het investeringsproject verworpen. De capaciteit van de installatie varieert hierbij binnen een range van 5 MW tot 50 MW aan elektrische energie.

Als inleiding op deze economische evaluatie, geeft het "technologisch luik" een overzicht van onder andere de bronnen van biomassa en de verschillende typen verbrandingsinstallaties. Daarna volgt een berekening van de energieopbrengst van de teelt van korte omloophout, aangezien dit de brandstof vormt voor de installatie. Volledigheidshalve is hier ook een berekening toegevoegd van het energieverbruik tijdens de teelt en het transport. Op deze manier verkrijgt men de netto energieopbrengst. Opmerkelijk is de lage energieconsumptie tijdens het transport.

Het "economisch luik" bouwt stap voor stap het NCW-model op en vult dit model in met cijfers afkomstig uit de literatuur. In jaar 0 is er enkel een uitgaande kasstroom; i.c. de initiële

investering, bestaande uit de totale investeringskosten verminderd met de ecologiepremie en de verhoogde investeringsaftrek. Gedurende de levensduur van de verbrandingsinstallatie zijn er jaarlijkse netto kasstromen, bestaande uit zowel inkomende als uitgaande kasstromen. Na invulling van het model voor een verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit, is dezelfde analyse uitgevoerd voor een WKK-installatie (gezamenlijke opwekking van elektriciteit en warmte). Naast verschillen in de initiële investering en de jaarlijkse werkingskosten, ligt het belangrijkste verschil tussen beide installaties in de jaarlijkse inkomende kasstroom. Een verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit uit biomassa heeft recht op groenestroomcertificaten. Een WKK-installatie heeft dit recht ook, maar daarnaast is er ook het recht op warmtekrachtcertificaten, weliswaar na voldoening aan een aantal voorwaarden. Deze warmtekrachtcertificaten zorgen er bovendien voor dat de jaarlijkse netto kasstromen bij een WKK-installatie van jaar tot jaar verschillen. Dit komt doordat er gedurende de levensduur van de installatie een afnemend aantal warmtekrachtcertificaten toegekend wordt.

Voor beide installaties geldt de conclusie dat het investeringsproject onder de aangenomen veronderstellingen en over de levensduur ervan economisch haalbaar is. Beide installaties vertonen bovendien schaalvoordelen, zowel in de investeringskosten als in de jaarlijkse werkingskosten. Hierdoor stijgt de netto contante waarde bij een toenemende capaciteit. Als gevolg hiervan stijgt ook de IRR bij een stijgende capaciteit. De IRR is die discontovoet die leidt tot een netto contante waarde van nul. Bij de beide installaties is een NCW-profiel toegevoegd die de IRR voor de verschillende beschouwde capaciteiten weergeeft.

Het theoretisch model van deze eindverhandeling werd mede onderbouwd door voorbeelden uit de praktijk. In een daaropvolgende sensitiviteitsanalyse is de gevoeligheid van de netto contante waarde voor veranderingen in een aantal parameters nagegaan. Beide installaties zijn het gevoeligst voor variaties in de kapitaalkosten voor belastingen. Afhankelijk van de installatie spelen ook variaties in andere parameters een belangrijke rol. Een WKK-installatie waarbij alle warmte nuttig afgezet kan worden (de gebruiksfactor is 100 procent) vertoont in de analyse een positieve netto contante waarde over de hele lijn, zelfs bij erg "ongunstige" combinaties van parameters, zoals een laag elektrisch omzettingsrendement en een hoge kapitaalkost voor belastingen.

Het "economisch luik" besluit met een schatting van de externe baat van het vermijden van CO₂-uitstoot door biomassa te verbranden in plaats van steenkool. De afsluiter is een korte kritische reflectie over de keerzijde van het gebruik van biomassa of meer algemeen biobrandstoffen. Er wordt bijvoorbeeld aandacht besteed aan mogelijke prijsstijgingen van bepaalde voedingsgewassen wegens het aanwenden van traditionele voedingsgewassen als energiegewassen. Ondoordacht gebruik en een gebrek aan aandacht voor externaliteiten kunnen gevolgen hebben voor mens en milieu.

Inhoudsopgave

| | |
|--|-------------|
| Woord vooraf | I |
| Samenvatting | II |
| Inhoudsopgave | IV |
| Lijst van afkortingen en formules | VIII |
| Lijst van tabellen | X |
| Lijst van figuren | XII |
| | |
| Hoofdstuk 1: Probleem | 1 |
| 1.1 Probleemstelling | 1 |
| 1.2 Centrale onderzoeksvraag | 2 |
| 1.3 Deelvragen | 3 |
| 1.4 Onderzoeksplan en methodologie | 3 |
| | |
| TECHNOLOGISCH LUIK | 5 |
| | |
| Hoofdstuk 2: Biomassa en bio-energie | 6 |
| 2.1 Wat is biomassa? | 6 |
| 2.2 Indeling van biomassa | 8 |
| 2.2.1 <i>Volgens herkomst</i> | 8 |
| 2.2.2 <i>Volgens samenstelling</i> | 9 |
| 2.3 Bronnen van biomassa | 10 |
| 2.3.1 <i>Organische fracties</i> | 10 |
| 2.3.1.1 Groenafval en GFT | 10 |
| 2.3.1.2 Houtafval | 11 |
| 2.3.1.3 Mest | 12 |
| 2.3.1.4 Huishoudelijke en daarmee gelijkgestelde bedrijfsafvalstromen | 13 |
| 2.3.1.5 Waterzuiveringsslib | 14 |
| 2.3.1.6 Organische bedrijfsafvalstoffen | 15 |
| 2.3.1.7 Stortgas | 16 |
| 2.3.2 <i>Energieteelten</i> | 16 |
| 2.3.2.1 Koolzaad | 17 |
| 2.3.2.2 Korte omloophout | 18 |
| 2.3.2.3 Olifantsgras | 19 |
| 2.3.2.4 Andere energieteelten | 21 |
| 2.3.3 <i>Overzicht</i> | 22 |

| | | |
|--|---------------------------------|-----------|
| 2.4 | Voorbehandeling van biomassa | 24 |
| 2.4.1 | <i>Verkleinen</i> | 25 |
| 2.4.2 | <i>Verdichten</i> | 25 |
| 2.4.3 | <i>Drogen</i> | 25 |
| 2.4.3.1 | Thermisch drogen | 25 |
| 2.4.3.2 | Biologisch drogen | 26 |
| 2.4.3.3 | Mechanisch drogen | 26 |
| 2.4.3.4 | Drogen door zon en wind | 26 |
| 2.4.4 | <i>Scheiden</i> | 27 |
| 2.4.4.1 | Magnetische scheiding | 27 |
| 2.4.4.2 | Zeven | 27 |
| 2.4.4.3 | Luchtweerstandsscheiding | 27 |
| 2.4.4.4 | Dichtheidsscheiding | 28 |
| 2.4.4.5 | Ballistische scheiding | 28 |
| 2.4.5 | <i>Torrefactie</i> | 28 |
| 2.5 | Conversietechnieken | 29 |
| 2.5.1 | <i>Thermische omzetting</i> | 31 |
| 2.5.1.1 | Verbranding | 32 |
| 2.5.1.2 | Vergassing | 33 |
| 2.5.1.3 | Pyrolyse | 33 |
| 2.5.1.4 | Liquefaction | 34 |
| 2.5.2 | <i>Biologische omzetting</i> | 35 |
| 2.5.2.1 | Anaërobe vergisting | 35 |
| 2.5.2.2 | Fermentatie | 36 |
| 2.5.3 | <i>Fysische omzetting</i> | 36 |
| 2.5.4 | <i>Chemische omzetting</i> | 37 |
| Hoofdstuk 3: Verbranding van biomassa | | 38 |
| 3.1. | Voorbehandeling van de biomassa | 38 |
| 3.2. | Verbrandingsinstallaties | 39 |
| 3.2.1 | <i>Verbranding</i> | 39 |
| 3.2.1.1 | Roosteroven | 40 |
| 3.2.1.2 | Wervelbedoven | 41 |
| 3.2.1.3 | Draaitrommeloven | 43 |
| 3.2.1.4 | Toroïdaal bed | 44 |
| 3.2.2 | <i>Samenvattende tabel</i> | 45 |
| 3.2.3 | <i>Coverbranding</i> | 47 |
| 3.2.3.1 | Kolengestookt | 47 |
| 3.2.3.2 | Cementgestookt | 48 |

| | | |
|---------|--------------------------------------|----|
| 3.2.3.3 | Gasgestookt | 49 |
| 3.3 | Impact van verbranding op het milieu | 50 |
| 3.4 | Fiscale voordelen en subsidies | 51 |
| 3.5 | Vergunningen | 54 |

ECONOMISCH LUIK ----- 55

Hoofdstuk 4: Korte omloophout ----- 56

| | | |
|-----|--------------------|----|
| 4.1 | Inleiding | 56 |
| 4.2 | Veronderstellingen | 58 |
| 4.3 | Energieopbrengst | 59 |

Hoofdstuk 5: Kosten-batenanalyse ----- 67

| | | |
|-----------|---|-----|
| 5.1 | Beschrijving model | 67 |
| 5.2 | Verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit | 72 |
| 5.2.1 | <i>Inleiding</i> | 72 |
| 5.2.2 | <i>Emissies</i> | 73 |
| 5.2.3 | <i>Veronderstellingen</i> | 77 |
| 5.2.4 | <i>De initiële investering I_0</i> | 81 |
| 5.2.4.1 | De totale investeringskosten | 81 |
| 5.2.4.2 | De ecologiepremie | 87 |
| 5.2.4.3 | De verhoogde investeringsaftrek | 90 |
| 5.2.4.4 | De initiële investering I_0 | 92 |
| 5.2.5 | <i>De jaarlijkse kasstroom K</i> | 92 |
| 5.2.5.1 | Opbrengst verkoop elektriciteit | 92 |
| 5.2.5.2 | De jaarlijkse werkingskosten | 94 |
| 5.2.5.2.1 | <i>Onderhoudskosten</i> | 94 |
| 5.2.5.2.2 | <i>Personeelskosten</i> | 94 |
| 5.2.5.2.3 | <i>Aankoopkosten en transportkosten biomassa</i> | 98 |
| 5.2.5.2.4 | <i>Verzekeringskosten en algemene overheadkosten</i> | 100 |
| 5.2.5.2.5 | <i>Transport- en behandelingskosten van de assen</i> | 101 |
| 5.2.5.2.6 | <i>Overzicht jaarlijkse werkingskosten</i> | 101 |
| 5.2.5.3 | Subsidies en steunmaatregelen | 103 |
| 5.2.5.4 | De te betalen vennootschapsbelasting | 104 |
| 5.2.6 | <i>De netto contante waarde</i> | 105 |
| 5.2.7 | <i>De productiekosten</i> | 107 |
| 5.3 | Warmtekrachtkoppeling | 112 |
| 5.3.1 | <i>Inleiding</i> | 112 |
| 5.3.2 | <i>Veronderstellingen</i> | 114 |

| | | |
|--|---|------------|
| 5.3.3 | <i>De initiële investering I_0</i> | 118 |
| 5.3.3.1 | De totale investeringskosten | 119 |
| 5.3.3.2 | De ecologiepremie | 121 |
| 5.3.3.3 | De verhoogde investeringsaftrek | 122 |
| 5.3.3.4 | De initiële investering I_0 | 124 |
| 5.3.4 | <i>De jaarlijkse kasstroom K</i> | 124 |
| 5.3.4.1 | Opbrengst verkoop elektriciteit en warmte | 124 |
| 5.3.4.2 | De jaarlijkse werkingskosten | 125 |
| 5.3.4.3 | Subsidies en steunmaatregelen | 128 |
| 5.3.4.4 | De te betalen vennootschapsbelasting | 132 |
| 5.3.5 | <i>De netto contante waarde</i> | 133 |
| 5.3.6 | <i>De productiekosten</i> | 137 |
| Hoofdstuk 6: Analyse | | 141 |
| 6.1 | Vergelijking met de realiteit | 141 |
| 6.2 | Scenarioanalyse | 143 |
| 6.2.1 | <i>Scenario 1: een gebruiksfactor van 0%</i> | 144 |
| 6.2.2 | <i>Scenario 2: een gebruiksfactor van 25%</i> | 145 |
| 6.2.3 | <i>Scenario 3: een gebruiksfactor van 50%</i> | 146 |
| 6.2.4 | <i>Scenario 4: een gebruiksfactor van 75%</i> | 147 |
| 6.2.5 | <i>Scenario 5: een gebruiksfactor van 100%</i> | 148 |
| 6.2.6 | <i>Grafische samenvatting</i> | 148 |
| 6.3 | Sensitiviteitsanalyse | 149 |
| 6.3.1 | <i>Sensitiviteitsanalyse met een gebruiksfactor van 100% voor de warmte</i> | 151 |
| 6.3.2 | <i>Sensitiviteitsanalyse met een gebruiksfactor van 50% voor de warmte</i> | 152 |
| 6.3.3 | <i>Sensitiviteitsanalyse met een gebruiksfactor van 0% voor de warmte</i> | 154 |
| Hoofdstuk 7: Externe baten en kosten | | 156 |
| 7.1 | Externe kosten | 157 |
| 7.2 | Externe baten | 158 |
| 7.3 | Externaliteiten in deze gevalstudie | 159 |
| 7.4 | Biobrandstoffen en externaliteiten in een ruimer perspectief | 161 |
| Hoofdstuk 8: Conclusies en suggesties voor verder onderzoek | | 163 |
| Literatuurlijst | | 169 |
| BIJLAGEN | | 182 |

Lijst van afkortingen en formules

| <u>Afkorting</u> | <u>Betekenis</u> |
|------------------------------|---|
| NCW | netto contante waarde |
| t | het t-de jaar |
| n | levensduur van het investeringsproject |
| K_t | netto kasstroom in het jaar t (= O - Q) |
| O | inkomende kasstroom |
| Q | uitgaande kasstroom |
| b | belastingvoet |
| c | investeringsaftrekpercentage |
| r | discontovoet of kapitaalkost na belastingen |
| r^* | kapitaalkost voor belastingen |
| r_i | nettovergoeding van het eigen vermogen na roerende voorheffing voor de aandeelhouders |
| r_v | vereist rendement van het vreemd vermogen na belastingen |
| I | totale investeringskosten |
| I_0 | initiële investering in het jaar 0 (= I - ecologiepremie - voordeel verhoogde investeringsaftrek) |
| A | afschrijving |
| A_{t-r} | actualisatiefactor |
| a_{n-r} | geactualiseerde waarde van één annuïteit |
| WACC = GGK | weighted average cost of capital = gewogen gemiddelde kapitaalkost |
| EV | eigen vermogen |
| VV | vreemd vermogen |
| TV | totaal vermogen |
| tds | ton droge stof |
| ∂ | opbrengst droge stof biomassa per ha (tds/ha) |
| M | aantal ton droge stof biomassa |
| $E_{th,pret}$ | thermische input (MW = MJ/s) |
| $W_{NE} = P_e = P_{e,gross}$ | netto elektrische output (MW = MJ/s) |
| E_e | netto elektriciteitsproductie per jaar (MWh/jaar) |
| OH | aantal werkingsuren (h) |
| R | actieradius (km) |
| LHV = H_b | lower heating value (GJ/ton = MJ/kg) |
| HHV | higher heating value (GJ/ton = MJ/kg) |

| | |
|---------------|---|
| η_e | elektrisch omzettingsrendement (%) |
| η_{th} | thermisch omzettingsrendement (%) |
| η_{tot} | totale efficiëntie (%) |
| W | de geproduceerde elektrische energie (MW_e) |
| Q | de geproduceerde thermische energie (MW_{th}) |
| H | energie aanwezig in de biomassa (MW_{th}) |
| σ | power-to-heat ratio (%) |
| PEB | primaire energiebesparing (MWh) |
| E | de binnen de beschouwde periode door de warmtekrachtinstallatie geproduceerde hoeveelheid elektriciteit (MWh) |
| α_{th} | thermisch omzettingsrendement van de referentieketel (%) |
| α_e | elektrisch omzettingsrendement van de referentieketel (%) |
| X | fractie van totaal aantal toe te kennen warmtekrachtcertificaten |
| RPE | relatieve primaire energiebesparing (EUR) |
| T | de tijd in maanden sinds de indienstname van de WKK-installatie |

Formules

$$1 \text{ W} = 1 \text{ Watt}$$

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$$

$$1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}$$

$$1 \text{ GW} = 10^9 \text{ W}$$

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Joule}$$

$$1 \text{ kJ} = 10^3 \text{ J}$$

$$1 \text{ MJ} = 10^6 \text{ J}$$

$$1 \text{ GJ} = 10^9 \text{ J}$$

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

$$1 \text{ GJ} = 278 \text{ kWh}$$

$$1 \text{ kWh} = 1 \text{ kW} \times 1 \text{ h} = 3,6 \text{ MJ}$$

Lijst van tabellen

| | |
|---|----|
| Tabel 1: Organische fracties ----- | 23 |
| Tabel 2: Energieteelten----- | 24 |
| Tabel 3: Samenvattende tabel oventypes----- | 46 |
| Tabel 4: Emissiegrenswaarden voor biomassa-afval, met uitzondering van niet-verontreinigd behandeld hout-afval ----- | 51 |
| Tabel 5: Certificaten ----- | 54 |
| Tabel 6: Overzicht gegevens populier ----- | 57 |
| Tabel 7: Overzicht gegevens wilg ----- | 58 |
| Tabel 8: Gegevens García et al (2003) ----- | 61 |
| Tabel 9: Omrekening MW naar ton biomassa ----- | 62 |
| Tabel 10: Berekening vervoersafstand per lading ----- | 64 |
| Tabel 11: Berekening energieconsumptie tijdens transport----- | 65 |
| Tabel 12: Netto energieopbrengst per ha ----- | 66 |
| Tabel 13: Productieketen ----- | 73 |
| Tabel 14: Emissiegrenswaarden ----- | 75 |
| Tabel 15: Samenstellingsvoorwaarden voor niet-verontreinigd behandeld houtafval ----- | 76 |
| Tabel 16: Standaardwaarden uit verschillende bronnen----- | 77 |
| Tabel 17: Omzettingsrendementen bij verschillende bronnen ----- | 78 |
| Tabel 18: Omzettingstabel ----- | 80 |
| Tabel 19: Totale investeringskosten ----- | 82 |
| Tabel 20: Gewicht investeringscomponenten in totale investeringskosten----- | 83 |
| Tabel 21: Overzicht totale investeringskosten ----- | 84 |
| Tabel 22: Trendlijnen totale investeringskosten ----- | 85 |
| Tabel 23: Investeringskost per MW----- | 86 |
| Tabel 24: Trendlijnen investeringskost per MW----- | 87 |
| Tabel 25: Ecologiepremie----- | 89 |
| Tabel 26: Ecologiepremie met plafond ----- | 90 |
| Tabel 27: Verhoogde investeringsaftrek----- | 91 |
| Tabel 28: Initiële investering----- | 92 |
| Tabel 29: Opbrengst verkoop elektriciteit ----- | 93 |
| Tabel 30: Jaarlijkse onderhoudskosten ----- | 94 |
| Tabel 31: Omzetting naar thermische input----- | 95 |
| Tabel 32: Aantal werknemers verbrandingsgedeelte ----- | 96 |
| Tabel 33: Aantal werknemers stoomcyclus----- | 97 |
| Tabel 34: Personeelskosten op jaarbasis ----- | 98 |

| | |
|--|-----|
| Tabel 35: Overzicht aanvoerkosten bij verschillende bronnen ----- | 99 |
| Tabel 36: Totale aanvoerkosten ----- | 100 |
| Tabel 37: Verzekerings- en algemene overheadkosten ----- | 100 |
| Tabel 38: Transport- en behandelingskosten van de overblijvende assen ----- | 101 |
| Tabel 39: Overzicht jaarlijkse werkingskosten ----- | 102 |
| Tabel 40: Opbrengst verkoop groenestroomcertificaten----- | 104 |
| Tabel 41: Totale netto kasstroom na belastingen----- | 105 |
| Tabel 42: Overzicht gegevens NCW ----- | 106 |
| Tabel 43: NCW ----- | 106 |
| Tabel 44: Productiekost elektriciteitsopwekking onder standaardvoorwaarden ----- | 109 |
| Tabel 45: Omzettingsrendementen WKK bij verschillende bronnen ----- | 114 |
| Tabel 46: Verbrandingsinstallatie <-> WKK-installatie ----- | 115 |
| Tabel 47: Omzettingstabel WKK-installatie----- | 116 |
| Tabel 48: Omzettingstabel voor elektriciteit ----- | 117 |
| Tabel 49: Omzettingstabel voor warmte ----- | 117 |
| Tabel 50: Totale investeringskosten WKK-installatie ----- | 120 |
| Tabel 51: Ecologiepremie met plafond WKK-installatie----- | 121 |
| Tabel 52: Verhoogde investeringsaftrek WKK-installatie ----- | 124 |
| Tabel 53: Initiële investering WKK-installatie ----- | 124 |
| Tabel 54: Opbrengst verkoop elektriciteit en warmte WKK-installatie----- | 125 |
| Tabel 55: Onderhoudskosten WKK-installatie ----- | 126 |
| Tabel 56: Personeelskosten WKK-installatie ----- | 126 |
| Tabel 57: Totale aanvoerkosten WKK-installatie----- | 127 |
| Tabel 58: Verzekerings- en algemene overheadkosten WKK-installatie----- | 127 |
| Tabel 59: Transport- en behandelingskosten van de overblijvende assen WKK-installatie----- | 128 |
| Tabel 60: PEB en aantal toegekende warmtekrachtcertificaten per maand ----- | 130 |
| Tabel 61: Opbrengst verkoop warmtekrachtcertificaten----- | 131 |
| Tabel 62: Opbrengst verkoop groenestroomcertificaten WKK-installatie----- | 132 |
| Tabel 63: Totale netto kasstroom na belastingen WKK-installatie in jaar 1-4 ----- | 133 |
| Tabel 64: Overzicht gegevens NCW WKK-installatie----- | 134 |
| Tabel 65: NCW WKK-installatie ----- | 134 |
| Tabel 66: Productiekosten energie onder standaardvoorwaarden WKK-installatie----- | 138 |
| Tabel 67: NCW bij een gebruiksfactor voor de warmte van 25% ----- | 146 |
| Tabel 68: NCW bij een gebruiksfactor voor de warmte van 50% ----- | 147 |
| Tabel 69: NCW bij een gebruiksfactor voor de warmte van 75% ----- | 148 |
| Tabel 70: Standaardwaarden parameters ----- | 150 |
| Tabel 71: Externe baten op basis van het aantal ton----- | 160 |

Lijst van figuren

| | |
|--|-----|
| Figuur 1: Thermische omzettingsprocessen ----- | 31 |
| Figuur 2: Lambda ----- | 32 |
| Figuur 3: Biologische omzettingsprocessen ----- | 35 |
| Figuur 4: Aandeel investeringscomponenten in totale investeringskosten ----- | 83 |
| Figuur 5: Totale investeringskosten ----- | 85 |
| Figuur 6: Investeringskost per MW ----- | 86 |
| Figuur 7: Aantal werknemers per MW ----- | 98 |
| Figuur 8: Jaarlijkse werkingskosten ----- | 103 |
| Figuur 9: NCW-profiel ----- | 107 |
| Figuur 10: Bereik productiekost per MWh ----- | 111 |
| Figuur 11: WKK-installatie ----- | 113 |
| Figuur 12: Energiestromen in een WKK-installatie----- | 118 |
| Figuur 13: Investeringskost per MW _e WKK-installatie ----- | 121 |
| Figuur 14: Verdeling opbrengsten (capaciteit van 5 MW) ----- | 135 |
| Figuur 15: Verdeling jaarlijkse werkingskosten (capaciteit van 5 MW)----- | 136 |
| Figuur 16: NCW-profiel WKK-installatie ----- | 137 |
| Figuur 17: Bereik productiekost per MWh WKK-installatie ----- | 139 |
| Figuur 18: Samenvatting scenarioanalyse ----- | 149 |

Hoofdstuk 1: Probleem

1.1 Probleemstelling

De algemene opwarming van de aarde is actueler dan ooit. Als grootste boosdoeners voor deze klimaatwijziging worden vaak broeikasgassen aangeduid. Deze gassen, en in het bijzonder koolstofdioxide, komen onder andere vrij bij de verbranding van fossiele brandstoffen. De drie belangrijkste fossiele brandstoffen zijn aardolie, aardgas en steenkool. Vooral in de Westerse Wereld worden deze brandstoffen in grote hoeveelheden verbrand om er elektriciteit en warmte uit te genereren. Onder het Kyoto Protocol heeft de Europese Unie zich geëngageerd om tegen 2012 de emissie van broeikasgassen met 8 procent te verminderen ten opzichte van 1990. (Europa, 2008) Tegen 2020 moet 20 procent van de energie binnen de Europese Unie afkomstig zijn van hernieuwbare energiebronnen. Daarnaast moet de energie-efficiëntie binnen de Europese Unie tegen 2020 stijgen met 20 procent. Ook moet er een daling van de uitstoot van broeikasgassen van 20 procent bereikt worden tegen 2020. Indien er een internationale overeenkomst afgesloten kan worden, stelt de Europese Unie tot doel de uitstoot van broeikasgassen in de industrielanden met 30 procent te doen dalen tegen 2020. Als referentiebasis gebruikt men het jaar 1990. (Europa, 2008)

Steeds meer studies worden uitgevoerd om de gevolgen van de verbranding van fossiele brandstoffen te achterhalen. Men is het er over eens dat de aarde aan het opwarmen is en dat hieraan grote gevolgen verbonden zijn voor zowel mens als natuur. Of deze opwarming het rechtstreekse gevolg is van broeikasgassen in de atmosfeer is nog een punt van discussie. Waar men het wel over eens is, is dat de voorraad fossiele brandstoffen niet onuitputtelijk is. De exacte voorraad die nog aanwezig is van deze traditionele brandstoffen is niet gekend. Over bijvoorbeeld de hoeveelheid aardolie die nog rest, lopen de meningen uiteen. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de bewezen reserves, de verwachte toename in de reserves en de nog niet ontdekte voorraden. De bewezen reserves omvatte alle olie die ontdekt is en waarvan men verwacht dat deze olie op een rendabele manier ontgonnen kan worden. Eind 2005 werden deze bewezen reserves geschat op 1 200,7 miljard vaten (dit komt overeen met 163,6 miljard ton). (Mineco, 2008)

Verder bestaat er een grote onzekerheid omtrent de vraag naar aardolie in de toekomst. Zo verwacht het EIA (Energy Information Administration) dat de vraag naar aardolie in 2030 ongeveer 118 miljoen vaten bedraagt. Dit ligt nog een stuk hoger dan de huidige vraag. Na deze piek zal het aanbod van aardolie wegens uitputting sterk dalen. Over het algemeen kan men stellen dat het

uitputten van de voorraden fossiele brandstoffen wordt versneld door de groeiende energievraag in de opkomende industrielanden zoals China.

Om dit naderend tekort aan fossiele brandstoffen op te vangen en om de uitstoot van broeikasgassen te beperken worden er steeds meer onderzoeken en projecten opgezet omtrent alternatieve energiebronnen. Denken we hierbij maar aan zonnecellen, windturbines, waterkrachtcentrales en de omstreden kerncentrales. Ook biomassa vormt een alternatieve energiebron en er zijn meerdere technieken gekend om biomassa om te zetten naar energie.

Biomassa krijgt steeds meer aandacht als energiebron en dit kent verschillende redenen. Om te beginnen zorgen technologische ontwikkelingen in verband met conversietechnieken en energieteelten ervoor dat energiewinning met biomassa tegen lagere kosten kan en hogere omzettingsrendementen kent. Ten tweede heeft vooral West-Europa te maken met een overaanbod aan landbouwproducten. Denken we hierbij maar aan de spreekwoordelijke boterberg. Dit overaanbod moet worden afgebouwd en hierdoor komt landbouwgrond braak te liggen. Het teveel aan landbouwareaal kan dan gebruikt worden voor energieteelten. Het verplicht braak laten liggen is echter wel sinds 26 september 2007 afgeschaft. (Europees Parlement, 2008) En ten derde kan de potentiële dreiging van een klimaatsverandering een stimulans zijn om meer te investeren in biomassa. Zo is verbranding van biomassa CO₂-neutraal. Bijkomend voordeel is het feit dat biomassabronnen wereldwijd beschikbaar zijn. De conversietechnieken voor biomassa zijn divers en dit kan een aanzet zijn om rationeler met energie om te springen. Ook wat werkgelegenheid betreft kan de productie van biomassa een positief effect hebben. Vooral de arbeidsintensieve energieteelten kunnen banen opleveren. (McKendry, 2002)

1.2 Centrale onderzoeksvraag

In deze eindverhandeling wordt onderzocht wat de mogelijkheden zijn van de verbranding van biomassa en welke voorwaarden en beperkingen hieraan verbonden zijn. Meer bepaald, of het economisch haalbaar is om in de energiebehoeften te voorzien door het verbranden van biomassa. Deze eindverhandeling benadert dit probleem vanuit het standpunt van de investeerder. De centrale onderzoeksvraag is bijgevolg de volgende:

Onder welke voorwaarden is het verbranden van biomassa afkomstig van energieteelten een economisch rendabele conversietechniek vanuit het standpunt van de investeerder?

1.3 Deelvragen

De centrale onderzoeksvraag kan opgesplitst worden in een aantal deelvragen:

1. Welke zijn de voorwaarden waaraan de verbrandingsinstallatie moeten voldoen in verband met verwerkingscapaciteit?
2. Uit welke componenten bestaan de initiële investering en de jaarlijkse netto kasstroom?
3. Is verbranding van biomassa met opwekking van elektriciteit economisch gezien haalbaar? Zo ja, onder welke voorwaarden?
4. Is verbranding van biomassa met opwekking van elektriciteit en warmte economisch gezien haalbaar? Zo ja, onder welke voorwaarden?
5. Is er een verschil in de productiekosten tussen beide typen installaties?
6. In welke mate dragen steunmaatregelen bij tot de rendabiliteit van de installatie?
7. Welke parameters hebben de grootste invloed op de rendabiliteit van de installatie?

1.4 Onderzoeksplan en methodologie

Om een antwoord op bovenstaande deelvragen te vinden, is deze eindverhandeling opgedeeld in twee luiken: een technologisch luik en een economisch luik. Het technologisch luik omvat een literatuurstudie. Aan de hand van artikels uit wetenschappelijke tijdschriften, maar ook wetteksten, studies en publicaties van bijvoorbeeld ODE-Vlaanderen of COGEN-Vlaanderen geeft deze literatuurstudie een overzicht van de relevante informatie in verband met biomassa en verbrandingsinstallaties. Om een ruimer inzicht te krijgen in de materie beperkt de literatuurstudie zich niet alleen tot bijvoorbeeld energieteelten of verbranding. Ook andere bronnen van biomassa en de verschillende manieren om biomassa om te zetten in energie komen aan bod. In een apart hoofdstuk wordt verbranding van biomassa dieper uitgewerkt, met tevens aandacht voor fiscale voordelen, vergunningen en de impact van verbranding op milieu.

Na dit technologisch deel komt het economisch luik aan bod. Het hoofddoel van dit luik is het uitvoeren van een kosten-batenanalyse om te komen tot een netto contante waarde, op basis waarvan de investeringsbeslissing genomen wordt. Om tot deze netto contante waarde te komen, worden huidige en toekomstige netto kasstromen geactualiseerd. Voor de opbouw van de netto

kasstromen en de invulling ervan aan de hand van concrete cijfers, worden gegevens uit de literatuur gebruikt. Er wordt steeds getracht meerdere bronnen te raadplegen voor de invulling van één parameter. Dit verhoogt de betrouwbaarheid van de resultaten van deze gevalstudie.

Doordat er in de literatuur geen éénduidige waarden te vinden zijn voor de gebruikte parameters, variëren de waarden van de belangrijkste parameters binnen een range om zo een sensitiviteitsanalyse uit te voeren. Ook blijkt uit de geraadpleegde literatuur dat er een gebruiksfactor van toepassing is voor de geproduceerde warmte. Om hiervan de invloed op de netto contante waarde na te gaan, wordt er naast de sensitiviteitsanalyse ook een scenarioanalyse uitgevoerd.

De kosten-batenanalyse wordt opgebouwd met behulp van de geraadpleegde literatuur. Het is dus een theoretische analyse. Om aan te tonen dat de resultaten in deze gevalstudie realistisch zijn, wordt er een vergelijking gemaakt met de praktijk. Verder krijgen externe kosten en baten de nodige aandacht. Ook hiervoor wordt een beroep gedaan op de literatuur.

TECHNOLOGISCH LUIK

Hoofdstuk 2: Biomassa en bio-energie

2.1 Wat is biomassa?

Om te beginnen worden er een aantal definities van biomassa weergegeven. Deze zijn terug te vinden in zowel de wetgeving als in wetenschappelijke bronnen. In de richtlijn 2001/77/EG van de Europese Unie vinden we een algemene definitie van biomassa: "Biologisch afbreekbare fractie van producten, afvalstoffen en residuen van de landbouw (met inbegrip van plantaardige en dierlijke stoffen), de bosbouw en aanverwante bedrijfstakken, alsmede de biologisch afbreekbare fractie van industrieel en huishoudelijk afval."

Om verwarring te vermijden bestaat er ook een uitgebreide omschrijving van biomassa. Deze is terug te vinden in de richtlijn 2001/80/EG van de Europese Unie betreffende de beperking van de emissies van bepaalde verontreinigende stoffen in de lucht door grote stookinstallaties: "Producten die geheel of gedeeltelijk bestaan uit plantaardig landbouw- en bosbouw materiaal dat gebruikt kan worden als brandstof om de energetische inhoud ervan te benutten, alsmede de volgende als brandstof gebruikte afvalstoffen:

- a. plantaardig afval uit land- en bosbouw;
- b. plantaardig afval van de levensmiddelenindustrie, indien de opgewekte warmte wordt teruggewonnen;
- c. vezelachtig afval afkomstig van de productie van ruwe pulp en van de productie van papier uit pulp; indien het op de plaats van productie wordt meeverbrand en de opgewekte warmte wordt teruggewonnen;
- d. kurkafval;
- e. houtafval, met uitzondering van houtafval dat ten gevolge van een behandeling met houtbeschermingsmiddelen of door het aanbrengen van een beschermingslaag gehalogeneerde organische verbindingen dan wel zware metalen kan bevatten, wat in het bijzonder het geval is voor afval afkomstig van bouw- en sloopafval." (Bureau voor officiële publicaties der Europese Gemeenschappen, 2007)

In het laatste puntje e is er sprake van gehalogeneerde organische verbindingen. Hiermee worden organische verbindingen bedoeld waaraan bijvoorbeeld broom of chloor is toegevoegd. Zulke verbindingen mogen niet aanwezig zijn in houtafval volgens de Europese Unie omwille van mogelijke verontreiniging. Zo zijn gechloreerde organische verbindingen een veel voorkomende vorm van bodem- en grondwaterverontreiniging. (Dijk, 2005)

Ook in de Vlaamse wetgeving vindt men zowel een beknopte als een uitgebreide definitie terug. De Vlaamse Regering steunt in haar Besluiten op de Europese wetgeving, vandaar de grote gelijkensissen tussen de Vlaamse en de Europese definities. In het Besluit van de Vlaamse Regering van 5 maart 2004 inzake de bevordering van de elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen vindt men de korte versie van de definitie van biomassa terug, die identiek is aan de definitie uit het Europees recht en bijgevolg hierboven al beschreven staat.

In een ander uitvoeringsbesluit, VLAREM (Vlaams Reglement op de Milieuvergunningen), vindt men een uitgebreide definiëring terug van het begrip biomassa-afval: "Producten, bestaande uit plantaardige materialen of delen daarvan van landbouw of bosbouw, die kunnen worden gebruikt om de energie-inhoud terug te winnen, alsmede de volgende afvalstoffen:

- a. plantaardig afval van de land- en bosbouw;
- b. plantaardig afval van de voedingsmiddelenindustrie;
- c. vezelachtig plantaardig afval afkomstig van het sorteren, ziften en wassen bij de rauwe pulp en de papierindustrie;
- d. houtafval, met uitzondering van houtafval dat als gevolg van een behandeling met houtbeschermingsmiddelen of door het aanbrengen van een beschermingslaag gehalogeneerde organische verbindingen dan wel zware metalen kan bevatten en met inbegrip van dergelijk houtafval afkomstig van bouw- en sloopafval;
- e. kurkafval." (Belgisch Staatsblad, 2007)

Ook wetenschappelijke bronnen hanteren gelijkaardige definities voor het begrip biomassa. Zo is volgens ODE-Vlaanderen biomassa "een verzamelnaam voor diverse stoffen en materialen van dierlijke of plantaardige oorsprong, die gebruikt worden voor energieopwekking (warmte, elektriciteit en motorbrandstof)." (ODE-Vlaanderen, 2007) McKendry (2002) omschrijft biomassa als enerzijds organisch restafval en anderzijds als plantenmateriaal dat ontstaat door chemische reacties tussen de CO₂ die aanwezig is in water, lucht en zonlicht. Dit gebeurt via fotosynthese en het resultaat van deze wisselwerking zijn zogenaamde koolstofhydraten, de bouwstenen van biomassa. Het zonlicht, dat de drijfveer is achter het proces van fotosynthese, wordt opgeslagen in chemische bindingen tussen die bouwstenen van de biomassa. Wanneer dit opgeslagen zonlicht, in de vorm van energie, vrijkomt, wordt de aanwezige koolstof in het plantenmateriaal geoxideerd. Hierbij komt water en CO₂ vrij. Het proces is dus een cyclus. De vrijgekomen CO₂ kan opnieuw gebruikt worden om biomassa te produceren. Ook de mens kan van deze opgeslagen energie gebruik maken door het te gebruiken als brandstof.

Een onderscheid moet gemaakt worden tussen de termen biomassaproduct, biomassa-afval en afvalstoffen. Onder de eerste term, biomassaproduct, vallen alle gewassen die speciaal geproduceerd worden om als biomassa gebruikt te worden. Dit zijn dus de energieteelten, zoals populier of koolzaad. Biomassa-afval daarentegen is wat gedefinieerd is door VLAREM II (zie

hierboven). De derde term ten slotte staat omschreven in het Decreet van 2 juli 1981 betreffende de voorkoming en het beheer van afvalstoffen, beter gekend als het Afvalstoffendecreet. De definitie van afvalstof luidt als volgt: "Elke stof of elk voorwerp waarvan de houder zich ontdoet, voornemens zich is te ontdoen of zich moet ontdoen." (Emis, 2007) We kunnen dus concluderen dat de algemene term biomassa zowel biomassaproduct als biomassa-afval omvat. Uit deze biomassa kan er, onder andere door verbranding, warmte en elektriciteit worden gehaald. Afvalstoffen kunnen ook verbrand worden, maar dit heeft niet tot doel er energie uit te halen.

Fossiele brandstoffen zijn ook ooit biomassa geweest. McKendry (2002) spreekt daarom van "oude" biomassa. Bij de verbranding hiervan komt dus CO₂ vrij die miljoenen jaren geleden opgeslagen is. Dit is in tegenstelling tot "nieuwe" biomassa. Het verbranden van deze biomassa is CO₂-neutraal, aangezien de hoeveelheid CO₂ die hierbij vrijkomt door het plantenmateriaal opgenomen is gedurende de groei ervan. Toch moet hierbij een opmerking gemaakt worden. De CO₂ die als emissies vrijkomen bij de verbranding van biomassa worden terug opgenomen door plantenmateriaal om nieuwe biomassa te vormen. Hiertussen ligt echter een lange tijdsperiode. Het kan jaren duren vooraleer de uitgestoten CO₂ omgezet is in biomassa. Vooral in de ontwikkelingswereld kan dit voor problemen zorgen. Tot op de dag van vandaag worden daar massaal biomassabronnen als brandstof gebruikt, maar zelden worden deze vervangen door nieuwe aanplantingen. (McKendry, 2002)

2.2 Indeling van biomassa

2.2.1 *Volgens herkomst*

Biomassa kan op verschillende manieren worden ingedeeld. Een eerste belangrijke indeling is volgens herkomst. Volgens Minnesma en Hisschemöller (2003) zijn er vijf categorieën te onderscheiden. Ten eerste is er biomassa afkomstig van landbouw, bosbouw en veeteelt. Het gaat hier veelal om snoeiafval of mest. Een tweede categorie van biomassa zijn residuen uit een productieproces. Heel wat industrieën komen hierbij in aanmerking, maar de belangrijkste zijn de houtverwerkende industrie en de voedingsindustrie. Vooral zaagsel en resthout worden vaak gebruikt als bron voor de omzetting naar energie. Als derde categorie is er de teelt van biomassa. Deze energieteelten komen in paragraaf 2.3.2 nog aan bod. Ten vierde kan er organisch afval uit het consumentencircuit gebruikt worden als biomassa. Hierbij gaat het meestal over GFT. En ten slotte kan biomassa ook nog afkomstig zijn van allerlei waterplanten. Deze zogenaamde aquatische biomassa kent volgens Reith *et al.* (2006) steeds meer belangstelling. Er kan een indeling gemaakt worden in 4 grote groepen: algen, waterplanten, zeewieren en zoutwater landbouw. Met de laatste groep wordt bijvoorbeeld de kweek van schelpdieren bedoeld.

2.2.2 Volgens samenstelling

Een tweede indeling kan op basis van de samenstelling van biomassa. Afhankelijk van de herkomst van biomassa, kunnen er verschillen zijn wat betreft de samenstelling. De belangrijkste verschillen liggen in het gehalte aan mineralen, de vorm, de dichtheid, de energiedichtheid en het vochtgehalte. (Geurds *et al.*, 2006) Om een gedetailleerde lijst te bekomen van de chemische componenten die aanwezig zijn in een bepaalde soort biomassa, kan men gebruik maken van Phyllis. Dit is een database ontwikkeld door ECN (Energieonderzoek Centrum Nederland) en het bevat naast de chemische samenstelling van tal van biomassastromen ook gegevens betreffende de calorische waarde en het asgehalte. (ECN, 2007)

McKendry (2002) hanteert een eenvoudige indeling van biomassa op basis van de samenstelling. Zo zijn er vier groepen te onderscheiden. Biomassa kan houtachtig, kruidachtig of waterachtig zijn. Als aparte groep is er nog mest. Bomen zijn een voorbeeld van houtachtige biomassa, kruidachtige biomassa omvat onder andere bermmaaisel en onder waterachtige biomassa vallen onder meer algen.

Met het oog op de omzetting van biomassa in energie zijn de belangrijkste eigenschappen het vochtgehalte, de calorische waarde, asgehalte en het gehalte cellulose. Het vochtgehalte omvat twee vormen, namelijk het intrinsieke vochtgehalte en het extrinsieke vochtgehalte. Vooral bij energieteelten zijn deze twee vormen van belang. Met de eerste vorm wordt het aanwezige vochtgehalte in de biomassa bedoeld, zonder dat er invloed is van weersomstandigheden. Met deze invloed wordt wel rekening gehouden bij het extrinsieke vochtgehalte. In de praktijk is enkel het extrinsieke vochtgehalte van belang bij conversietechnieken, aangezien het intrinsieke vochtgehalte alleen bereikt kan worden indien de biomassa onder laboratoriumomstandigheden geteeld wordt. (McKendry, 2002)

De energiewinning tijdens verbranding van biomassa hangt in de eerste plaats af van de calorische waarde van het materiaal. Met deze waarde geeft men een uitdrukking aan de energie-inhoud of warmte die vrijkomt wanneer de biomassa in lucht wordt opgebrand. De calorische waarde wordt normalerwijze uitgedrukt in aantal MJ per kilogram biomassa voor vaste stoffen, aantal MJ per liter voor vloeibare stoffen en aantal MJ per kubieke meter voor gassen. Voor gasvormige stoffen gebruikt men ook wel eens de uitdrukking aantal MJ per Nm³. Twee vormen worden gebruikt om de calorische waarde van een biomassastroom uit te drukken. Er bestaat de bruto calorische waarde en de netto calorische waarde. De bruto calorische waarde is de totale energie-inhoud die vrijkomt wanneer de biomassa verbrand wordt in lucht, hierbij ook de warmte aanwezig in de vrijkomende waterdamp. Dit noemt men ook wel eens de higher heating value (HHV). De bruto calorische waarde is dus de maximale potentiële hoeveelheid energie die uit een bepaalde biomassabron gewonnen kan worden. In werkelijkheid kan de warmte aanwezig in de waterdamp

niet of slechts gedeeltelijk gebruikt worden voor de winning van energie. Hierdoor maakt men meestal gebruik van de netto calorische waarde of lower heating value (LHV). Deze waarde geeft weer hoeveel energie er werkelijk gewonnen kan worden. (McKendry, 2002)

De dichtheid van de biomassa is vaak gerelateerd aan de transportkosten. Bij energieteelten bijvoorbeeld kunnen deze kosten oplopen tot 70 procent van de aankoopkosten van biomassa. In deze aankoopkosten zitten de teelt, de oogst en het transport naar de gebruiker. Daarnaast bepaalt de dichtheid van de biomassa ook de voorwaarden voor opslag en hoe het materiaal zich zal gedragen tijdens het omzettingsproces. Voorbehandeling van de biomassa is daarom ook vaak nodig om een grotere dichtheid te bekomen. Meer biomassa kunnen opslaan op een kleinere oppervlakte kan een positief effect hebben op de vervoers- en opslagkosten. (McKendry, 2002)

2.3 Bronnen van biomassa

2.3.1 *Organische fracties*

Belangrijk is het onderscheid tussen de energie uit reststromen en de energie uit energieteelten. Biomassa uit reststromen komt hoofdzakelijk uit de landbouw en uit de industrie. De meest voorkomende organische afvalstoffen zijn: groenafval en GFT, houtafval, mest, huishoudelijke afvalstromen, waterzuiveringslib, organische bedrijfsafvalstoffen en stortgas.

2.3.1.1 Groenafval en GFT

Alle huishoudens produceren de reststroom GFT (Groente-, Fruit- en Tuinafval). Ook in de landbouw en industrie zijn er GFT- en andere groenafvalstromen. Bij deze laatste stromen horen bijvoorbeeld snoeiafval of de reststroom die overblijft na het maaien van bermen. Volgens OVAM was er in 2002 een totaal aanbod van groenafval van 745 441 ton. Devriendt *et al.* (2004) hebben berekend dat dit totale aanbod van groenafval 841 418 GJ elektriciteit en 1 081 821 GJ warmte kan opbrengen, gebruik makend van een gemiddelde calorische waarde van 3,7 GJ per ton groenafval. Een prognose voor 2010 van OVAM toont aan dat er niet verwacht wordt dat dit aanbod van groenafval zal stijgen. Bovendien zal er volgens OVAM geen groter aandeel van het groenafval gebruikt worden voor de omzetting naar energie omwille van het feit dat er nog steeds voldoende afzet beschikbaar is voor traditionele compost.

Voor GFT kunnen we gelijkaardige conclusies trekken. Volgens OVAM bedroeg het aanbod GFT in 2002 circa 340 000 ton. Tegen 2010 voorspelt OVAM dat het totale aanbod aan GFT op hetzelfde niveau zal blijven als in 2002. Ook voor GFT wordt geen stijging van de verwerking met

energierecuperatie verwacht. Hiervoor kunnen we dezelfde reden aangeven als bij groenafval. Bovendien composteren steeds meer gezinnen thuis zelf hun GFT-reststromen. De verwerking van GFT-afval gebeurt in speciale installaties en hiervan zijn er acht beschikbaar in Vlaanderen. Indien deze acht installaties operationeel zijn kan het aanbod van GFT, met een calorische waarde van 3,4 GJ per ton, volgens Devriendt *et al.* (2004) 383 755 GJ elektriciteit en 493 425 GJ warmte opleveren. Het is echter zo dat de acht beschikbare installaties hoofdzakelijk gebruikt worden voor composteren. Volgens OVAM zal bijgevolg, in 2010, van het totale aanbod van 340 000 ton slechts 95 000 ton gebruikt worden om er elektriciteit en warmte uit te halen. De rest wordt aangewend om te voldoen aan de vraag naar compost.

2.3.1.2 Houtafval

Houtafval bestaat in de eerste plaats uit afval afkomstig van bijvoorbeeld bossen of fruitgaarden. Hierbij hoort echter geen snoeiafval omdat dit afval onder de noemer groenafval valt. Bij houtafval hoort wel het hout dat men verkrijgt door bijvoorbeeld het uitdunnen van bossen. Ook houtverwerkende bedrijven produceren reststromen, zoals zagerijen en schrijnwerkerijen. Houtafval kan ook onderdeel vormen van huishoudelijke afvalstromen of van afvalstromen afkomstig uit de verpakkingindustrie. Om energie uit houtafval te verkrijgen, is verbranding de meest gebruikte techniek. De verbranding van houtafval is net zoals bij energieteelten CO₂-neutraal. De emissies die vrijkomen zijn wel gebonden aan voorwaarden opgelegd door VLAREM II. Vooral bij de verbranding van houtafval dat afkomstig is van hout dat behandeld is, kunnen zware metalen aanwezig zijn in de assen. Vergassing van houtafval is ook mogelijk en heeft het bijkomende voordeel dat de uitstoot van stikstofoxiden gereduceerd wordt in vergelijking met verbranding. Wanneer het houtafval afkomstig is van behandeld hout, zoals gelakte of geverfde houtresten, mag dit houtafval enkel verbrand worden in installaties die onderworpen zijn aan een regelgeving die vergelijkbaar is aan deze voor huisvuilverbrandingsinstallaties. (Ceulemans, 2001)

Bij AMINAL (Administratie Milieu-, Natuur-, Land- en Waterbeheer; sinds 2006 het Departement Leefmilieu, Natuur en Energie) vinden we gegevens over de hoeveelheden houtafval die ter beschikking zijn. Naar schatting wordt jaarlijks voor 300 000 ton gekapt in Vlaanderen. Het overgrote deel van dit hout wordt gebruikt in de houtverwerkende industrie. Het resthout dat overblijft na het kappen is noodzakelijk voor het voortbestaan van het bos (in de vorm van humus) en kan dus ook niet aangewend worden om energie te produceren. Om houtafval als bron van energie te kunnen gebruiken, moet men zich dus richten op afval afkomstig uit de houtverwerkende nijverheid en huishoudelijk houtafval. De verwerking van het houtafval afkomstig van deze laatste twee is opgenomen in het houtafvalplan, opgesteld door OVAM. Hierin wordt de jaarlijkse hoeveelheid houtafval geschat op afgerond anderhalf miljoen ton. Deze hoeveelheid kan in drie groepen opgesplitst worden: onbehandeld hout, niet-verontreinigd behandeld hout en

verontreinigd behandeld hout. Om de potentiële energie-inhoud van het beschikbare houtafval in Vlaanderen te berekenen heeft OVAM in haar houtafvalplan de 300 000 ton hout afkomstig van het kappen van bossen samengeteld met de anderhalf miljoen ton afkomstig van huishoudelijk afval en de houtverwerkende nijverheid. De calorische waarde van houtafval wordt geraamd op 15 GJ per ton. Dit resulteert in een potentiële energie-inhoud van 28 365 TJ per jaar. (Devriendt *et al.*, 2004)

Het verbranden van hout gebeurt niet alleen in grote verbrandingsinstallaties. Ook bij gezinnen thuis wordt vaak een kachel of een open haard gebruikt. Het thermisch rendement van een open haard ligt erg laag, circa 10 procent. Een kachel heeft met 60 procent een hoger rendement. In houtverwerkende bedrijven wordt houtafval ook vaak binnen het bedrijf zelf aangewend om te voorzien in warm water of om stoom op te wekken voor productieprocessen. De installaties die hiervoor worden gebruikt hebben een gemiddeld rendement van 85 procent. Samen zijn de particulieren en de bedrijven goed voor een productie van 5 800 TJ warmte per jaar. (Devriendt *et al.*, 2004)

2.3.1.3 Mest

De grootste afvalstroom vanuit de landbouw is mest. Vlaanderen zit met het probleem van mestoverschot en dus moeten er manieren gevonden worden om al deze mest te verwerken. Bij de verwerking en meer bepaald de verbranding van mest moet men zich aan bepaalde emissievoorwaarden houden. Deze staan opgesomd in VLAREM II. Voor mestverwerking met energierecuperatie richt men zich vooral op mest afkomstig uit de pluimvee-sector en de varkenssector. Vergisting en verbranding van mest zijn de meest gebruikte technieken om energie terug te winnen uit mest. Vooral co-verbranding in steenkoolcentrales is vanuit energetisch standpunt interessant. Een knelpunt bij de verwerking van mest via vergisting of verbranding is de geurhinder. Ook kan co-verbranding van mest in een steenkoolcentrale het materiaal van de installatie aantasten. Andere knelpunten in verband met mestverwerkingsinstallaties zijn de hoge investeringskosten en de doorlopende aanvoer van mest die noodzakelijk is om een constante elektriciteitsproductie te garanderen. Daarnaast schrikken de strenge emissienormen opgelegd door VLAREM II veel initiatiefnemers af. (Ceulemans, 2001)

Omdat er geen raming is gemaakt van de hoeveelheden kippenmest en varkensmest in 2010 worden deze hoeveelheden die ter beschikking zijn in 2010 door Devriendt *et al.* (2004) gelijkgesteld aan de hoeveelheden van 2002, namelijk 8 miljoen ton varkensmest en een half miljoen ton kippenmest. Indien men al deze mest zou vergisten, verkrijgt men een biogas dat gebruikt kan worden voor elektriciteitsproductie en opwekking van warmte in een WKK-installatie. De gemiddelde calorische waarde van het verkregen biogas wordt gesteld op 21,5 MJ per kubieke meter biogas. Een opmerking hierbij is dat men uit één ton kippenmest drie maal zoveel biogas

kan halen dan uit één ton varkensmest. De potentiële energie-inhoud van het totale aanbod mest via de omzetting naar biogas bedraagt afgerond 4 192 000 GJ. (Devriendt *et al.*, 2004)

Na droging kan mest ook verbrand worden in bijvoorbeeld een verbrandingsinstallatie voor biomassa. Wegens de strenge emissievoorwaarden is het noodzakelijk dat de installatie groot genoeg is om de kosten van rookgasreiniging en emissiemetingen te kunnen dragen. MIRA heeft een studie laten uitvoeren om het potentieel van verbranding van mest na te gaan. In de studie is er vanuit gegaan dat er 60 000 ton varkensmest en 150 000 ton kippenmest beschikbaar is voor het proces van drogen en vervolgens verbranden. Rekening houden met de gemiddelde calorische verbrandingswaarde van mest, namelijk 8,5 GJ per ton voor kippenmest en 13,5 GJ per ton voor varkensmest, is er een potentieel van 2 080 000 GJ. Een verbrandingsketel met een rendement van 80 procent kan dus voor 1 670 000 GJ per jaar groene energie opleveren. (Devriendt *et al.*, 2004)

2.3.1.4 Huishoudelijke en daarmee gelijkgestelde bedrijfsafvalstromen

Volgens OVAM zijn huishoudelijke afvalstoffen alle afvalstoffen afkomstig van particulieren. Deze afvalstoffen moeten op een gecontroleerde manier per gemeente verzameld worden. Het gemeentebestuur is hiervoor verantwoordelijk. Selectieve inzameling van het huishoudelijk afval wordt aangemoedigd en we kunnen stellen dat het aandeel selectief ingezameld afval elk jaar stijgt. Voor het jaar 2005 berekende OVAM dat de totale hoeveelheid huishoudelijk afval 549 kilogram per inwoner bedroeg. Dit kunnen we verdelen in 388 kilogram selectief ingezameld afval en 161 kilogram restafval. Vooral het selectief ingezameld huishoudelijk afval is interessant om er biomassastromen uit te halen. De grootste groep biomassa die we kunnen terugvinden in huishoudelijke afvalstromen is groenafval. Deze groep neemt 21,2 procent van het totale selectief ingezamelde huishoudelijk afval voor zijn rekening. Vervolgens heeft GFT ook een aanzienlijk aandeel, namelijk 13,1 procent. Overige biomassastromen zijn papier en karton, die samen goed zijn voor 19,2 procent van de totale hoeveelheid selectief ingezameld huishoudelijk afval. Ten slotte is ook hout een interessante biomassastroom en heeft een aandeel van 6 procent in het totaal. (Putseys *et al.*, 2006)

Het huishoudelijk restafval kan ook een bron zijn van biomassa. Onder dit restafval vallen het niet-selectief ingezameld huisvuil, grofvuil en het afval dat ontstaat bij allerlei gemeentelijke activiteiten. Vroeger werd dit huishoudelijk restafval ofwel verbrand ofwel gestort. Maar uit onderzoek van OVAM is gebleken dat ondanks het stijgend aandeel van selectief ingezameld huishoudelijke afvalstoffen, er toch nog ongeveer 75 procent biologisch materiaal aanwezig is tussen het restafval. OVAM concludeert hieruit dat het groeiend succes van sorteren enkel een

invloed heeft op de totaal aangeboden hoeveelheid restafval, niet zozeer op de samenstelling van het restafval. (Ceulemans, 2001)

Het verbranden van huishoudelijk restafval krijgt vanuit milieuhygiënisch oogpunt de voorkeur op storten. Huisvuilverbrandingsinstallaties kunnen aan energierecuperatie doen door de vrijgekomen warmte te gebruiken om bijvoorbeeld stoom op te wekken en zo elektriciteit te produceren. Toch blijft het verbranden van huishoudelijk restafval een knelpunt. Het restafval is niet gesorteerd waardoor men niet altijd weet wat er verbrand wordt en bijgevolg kunnen er allerlei schadelijke emissies vrijkomen. VLAREM II legt om deze reden strenge emissienormen op aan de huisvuilverbrandingsinstallaties. Ondanks deze strenge regelgeving en ondanks de mogelijkheid tot energierecuperatie komt de opwekking van elektriciteit, gebruik makend van warmte gegenereerd via de verbranding van huishoudelijk restafval, niet in aanmerking voor groenestroomcertificaten. (Ceulemans, 2001)

In Vlaanderen zijn er elf ovens beschikbaar voor de verbranding van huishoudelijk restafval. Tegen het jaar 2010 wordt verwacht dat alle elf huisvuilverbrandingsinstallaties aan energierecuperatie kunnen doen. De gemiddelde calorische waarde van één ton huishoudelijk restafval in 2010 wordt door OVAM op 11,1 GJ geschat. Hieruit concludeert Devriendt *et al.* (2004) dat in 2010 alle huishoudelijk restafval verbrand wordt met energierecuperatie en dit levert per jaar 2212 TJ gerecupereerde warmte en 1644 TJ gerecupereerde elektriciteit op.

Niet enkel huishoudelijke restafvalstoffen komen in aanmerking voor de winning van energie. Bedrijfsafvalstoffen ingedeeld in categorie 2 worden door OVAM gelijkgesteld aan huishoudelijke restafvalstoffen en worden dus ook verbrand in dezelfde huisvuilverbrandingsinstallaties. Indien het aanbod van deze bedrijfsafvalstoffen categorie 2 wordt samengeteld met het aanbod van huishoudelijke restafvalstoffen, komt OVAM tot een schatting voor 2010 van 1 897 000 ton. (OVAM, 2007)

2.3.1.5 Waterzuiveringslib

Slib komt vrij na het zuiveren van afvalwater in rioolwaterzuiveringsinstallaties. In Vlaanderen is de maatschappij Aquafin hier verantwoordelijk voor. Vroeger kon het waterzuiveringslib afgezet worden op landbouwgrond. In Vlaanderen mag dit echter niet meer vanaf 1999. Het slib kan nu wel gebruikt worden als bodemverbeteraar of als secundaire brandstof in een elektriciteitscentrale. VLAREA heeft wel voorwaarden opgelegd waaraan dit slib moet voldoen vooraleer het meegestookt mag worden. Indien het slib niet voldoet aan deze voorwaarden mag het slib niet verbrand worden, zelfs niet met energierecuperatie. (Ceulemans, 2001)

Eventueel kan het waterzuiveringsslib ook vergist worden waarna men een biogas verkrijgt dat gebruikt kan worden om warmte of elektriciteit te produceren. Zo heeft Aquafin in 2002 ongeveer 8 360 ton droog slib gebruikt om het te vergisten tot biogas. Dit gas werd daarna gebruikt in biogasmotoren om meer dan 2 miljoen kWh elektriciteit te produceren. Anderzijds gebruikt Aquafin het verkregen biogas ook om warmte op te wekken, die dan op zijn beurt gebruikt kan worden om waterzuiveringsslib te drogen. Zo werd bijvoorbeeld in 2002 circa 17 000 ton slib gebruikt om het na vergisting te gebruiken om warmte op te wekken. (Devriendt *et al.*, 2004)

Wanneer slib verbrand wordt, moet het eerst goed drogen. Eens gedroogd heeft het slib een calorische waarde van ongeveer 13,5 MJ per kilogram droog slib. Dit maakt gedroogd waterzuiveringsslib bijzonder geschikt om mee te verbranden in een kolengestookte centrale. Eén kilogram steenkool kan namelijk vervangen worden door circa 2,3 kilogram droog slib. Bijkomend voordeel van het gebruik van waterzuiveringsslib in de plaats van steenkool is dat de uitstoot van CO₂ en stikstofoxiden vermindert. Anderzijds zijn er ook een aantal nadelen verbonden aan het verbranden van gedroogd slib, al dan niet in meestook. Waterzuiveringsslib kan namelijk koper, lood en zink bevatten die na verbranding als emissies vrijkomen. Een opmerking die hier gemaakt moet worden is dat de calorische waarde van waterzuiveringsslib enkel in theorie geldt. Om het slib te drogen is er immers veel energie nodig zodat de uiteindelijke energiewinning slechts 2 tot 3 GJ per ton bedraagt. (Ceulemans, 2001)

Er bestaan ook andere bronnen van slib. Naast afvalwater uit rioolwaterzuiveringsslib kan men ook gebruik maken van slib afkomstig uit de papierindustrie of textielindustrie. Bij Devriendt *et al.* (2004) vinden we een raming van het totaal aanbod slib in 2010. Waterzuiveringsslib afkomstig uit rioolwaterzuiveringsinstallaties, papierindustrie, textielindustrie en voedingsindustrie zou tegen 2010 goed zijn voor 269 000 ton droog slib. Aangezien het storten van slib vanuit ecologisch standpunt het minst interessant is, werd er een plan opgesteld, genoemd plan-T, waarin vooropgesteld wordt van het totaal aanbod droog slib 263 600 ton te gebruiken voor verbranding en slechts 5 400 ton te storten.

2.3.1.6 Organische bedrijfsafvalstoffen

Onder de noemer organische bedrijfsafvalstoffen vallen een groot aantal soorten afvalstoffen. Deze afvalstoffen kunnen van plantaardige of van dierlijke oorsprong zijn. En ze kunnen afkomstig zijn van industriële, ambachtelijke of wetenschappelijke activiteiten. In het verleden werden deze afvalstoffen gestort of verbrand zonder winning van energie. Soms werden organische bedrijfsafvalstoffen aangewend als veevoeder of als bodemverbeteraar. Recent wordt vergisting steeds meer toegepast om deze bedrijfsafvalstoffen te verwerken en energie te produceren. (Ceulemans, 2001)

OVAM heeft voor organische bedrijfsafvalstoffen een uitvoeringsplan opgemaakt. Hierin wordt een schatting gemaakt van de totale aangeboden hoeveelheid organisch bedrijfsafval. Deze zou net geen 4 miljoen ton bedragen. De gemiddelde calorische waarde bedraagt 2,7 GJ per ton. De potentiële energie-inhoud van de organische bedrijfsafvalstoffen in Vlaanderen is dus gelijk aan circa 10 402 TJ per jaar. In de praktijk gaat een groot deel van het beschikbare aanbod naar veevoeding en compostering zodat er maar een klein aanbod aan organische bedrijfsafvalstoffen voor omzetting naar energie overblijft. Volgens OVAM kan er met dit kleine aanbod per jaar slechts voor 770 TJ aan energie geproduceerd worden. (Devriendt *et al.*, 2004)

2.3.1.7 Stortgas

Stortgas is een brandbaar gas dat voornamelijk terug te vinden is op stortplaatsen. Het gas komt vrij als gevolg van een spontaan proces van vergisting van organische fracties die terug te vinden zijn op de stortplaats. Stortgas bestaat in de eerste plaats uit methaan en draagt bijgevolg bij tot het broeikaseffect. Bovendien kan stortgas geurhinder voor de omgeving veroorzaken. Men heeft er dus alle voordeel bij het stortgas op te vangen en te gebruiken in een gasmotor om elektriciteit op te wekken. De investeringskosten voor stortgasonttrekking en transport liggen echter wel hoog. Bovendien is het voor de opwekking van elektriciteit noodzakelijk dat er ofwel een continue aanvoer is van het stortgas ofwel een overschakeling mogelijk is op een alternatieve brandstof om aan de elektriciteitsvraag te kunnen voldoen. Eventueel kan bij een vraagoverschot het reguliere distributienet voor elektriciteit ingeschakeld worden. (Ceulemans, 2001)

Voor 2010 wordt de beschikbare hoeveelheid stortgas geschat op afgerond 25 miljoen m³. De calorische waarde van een kubieke meter stortgas bedraagt 18 MJ. Hierdoor heeft de beschikbare 25 miljoen m³ stortgas een potentiële energie-inhoud van 450 000 GJ. Om dit theoretisch potentieel optimaal te benutten wordt het stortgas het best gebruikt in een WKK-installatie, waarbij elektriciteit en warmte gezamenlijk worden opgewekt en het totale omzettingsrendement hoger ligt dan bij gescheiden opwekking. (Devriendt *et al.*, 2004)

2.3.2 *Energieteelten*

Bij energieteelten worden gewassen speciaal geteeld voor de opwekking van energie. De kenmerken van een ideaal energiegewas zijn de volgende: een hoog rendement van droog materiaal per hectare, een lage energie input bij de productie, lage kosten en weinig behoefte aan extra voedingsstoffen. De keuze voor een bepaalde energieteelt hangt voor een groot deel af van welke conversietechniek men uiteindelijk kiest. Sommige energieteelten lenen zich voor bijna alle conversietechnieken. Koolzaad kan in principe verwerkt worden via verbranding, vergassing,

pyrolyse of mechanische extractie. Toch is bijvoorbeeld de verwerking van koolzaad via pyrolyse in de praktijk niet gangbaar. (McKendry, 2002)

Volgens Berndes *et al.* (2003) zullen energieteelten in de toekomst wereldwijd de belangrijkste bron van biomassa zijn met tot doel energieproductie. Onder de noemer energieteelten vallen veel gewassen. Hieronder worden de belangrijkste besproken: koolzaad, korte omloophout, olifantsgras en nog enkele andere energiegewassen geschikt voor vergisting.

2.3.2.1 Koolzaad

Het meest bekende gewas is koolzaad. Dit gewas wordt vooral geteeld voor de productie van bio-olie en biodiesel. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen zomerkoolzaad en winterkoolzaad. De zaadopbrengst van winterkoolzaad ligt hoger dan die van zomerkoolzaad. Toch wordt er vaak gekozen voor zomerkoolzaad omdat de teeltkosten een stuk lager liggen dan bij winterkoolzaad. Zo worden de veranderlijke teeltkosten door het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, beleidsdomein landbouw en visserij, voor zomerkoolzaad geschat op 348 EUR per hectare terwijl deze kosten voor winterkoolzaad geraamd worden op 604 EUR per hectare. Het grootste verschil ligt bij de grotere vereisten met betrekking tot bemesting bij winterkoolzaad. Dit maakt zomerkoolzaad meer geschikt voor een "lage kosten productie" van bio-olie of biodiesel.

Voor België kan men vaststellen dat er overwegend winterkoolzaad wordt geteeld. De reden hiervoor zijn vooral de zachte winters. Indien men de productie van koolzaad in België vergelijkt met andere Europese landen, ziet men dat België een vrij lage productie kent. Zo bedroeg bijvoorbeeld de totale productie in 2004 in België 5 550 hectare. Dit lijkt verwaarloosbaar indien men Frankrijk met een productie in 2004 van 1 200 000 hectare koolzaad er langs legt. Uiteraard is Frankrijk een heel stuk groter dan België, maar toch bedraagt de productie van koolzaad in België nog niet eens een half procent van de productie in Frankrijk. Binnen België is er bovendien een ongelijke verdeling tussen Vlaanderen en Wallonië. Zo kan de productie van 5 550 hectare van het jaar 2004 opgesplitst worden in 5 470 hectare voor Wallonië en slechts 80 hectare voor Vlaanderen. (Lamont *et al.*, 2005)

Om bio-olie of biodiesel te verkrijgen moet het koolzaad geperst worden. Per hectare verkrijgt men circa 3 500 kilogram zaad dat naar de pers kan gaan. Afhankelijk van het eindproduct kiest men voor warme of koude persing. Zo verkrijgt men na een koude persing van één hectare koolzaad ongeveer 1 485 liter olie en een warme persing van één hectare levert zo een 1 600 liter biodiesel op. (Lamont *et al.*, 2005)

2.3.2.2 Korte omloophout

Recent worden er ook houtachtige gewassen geteeld, zoals populier en wilg. Men spreekt hier dan ook van korte omloophout omdat er snelgroeiende boomsoorten worden geplant in een hoge dichtheid. Om de drie tot vijf jaar kan er geoogst worden. (Geurds *et al.*, 2006) Om het aanplanten van korte omloophout economisch rendabel te houden, maakt men vaak gebruik van enkele traditionele landbouwtechnieken, zoals grondvoorbereiding of bemesting. Dit noemt men intensieve biomassabouw en hierdoor kunnen er opbrengsten van zo een 25 ton droog stof per hectare verkregen worden. Om de belasting voor het milieu minimaal te houden, kan men kiezen voor extensieve biomassabouw waarbij er niet wordt bemest of geïrrigeerd. Hierdoor ligt de opbrengst per hectare een stuk lager, ongeveer 8 tot 12 ton droog stof. (Ceulemans, 2001)

Een tijd lang was de wetgeving een knelpunt. Zo werd er de vraag gesteld of korte omloophout onder het Bosdecreet valt of niet. Indien dit wel zo is, moet er rekening worden gehouden met de regels en voorschriften van dit Decreet met betrekking tot bijvoorbeeld bemesting. Sinds 20 juni 2006 is er duidelijkheid. De teelt van korte omloophout valt niet onder het Bosdecreet. In artikel 23 van het Decreet houdende diverse bepalingen inzake leefmilieu en energie staat: "In artikel 3 van het Bosdecreet van 13 juni 1990 worden volgende wijzigingen aangebracht: in § 2 worden aan het einde van het vierde punt de volgende woorden toegevoegd: « ,uitgezonderd de korte-omloophoutteelt waarvan de aanplant plaatsgevonden heeft op gronden die op dat ogenblik gelegen zijn buiten de ruimtelijk kwetsbare gebieden zoals bedoeld in artikel 146 van het decreet van 18 mei 1999 houdende de organisatie van de ruimtelijke ordening »". Verder staat in artikel 24 van datzelfde Decreet een omschrijving van de teelt van korte omloophout: "teelt van snelgroeiende houtachtige gewassen waarbij de bovengrondse biomassa periodiek tot maximaal 8 jaar na de aanplanting of na de vorige oogst, in zijn totaliteit wordt geoogst". (Vlaamse Codex, 2008)

In Vlaanderen kent korte omloophout, net zoals andere energieteelten, nog geen echte doorbraak. Zo meldt het VILT (Vlaams Informatiecentrum over Land- en Tuinbouw) dat "In tegenstelling tot de ons omringende landen staan in Vlaanderen quasi geen energieteelten, proefprojecten uitgezonderd." De belangrijkste knelpunten zijn de eerder beperkte beschikbare ruimte, beperkte kennis aangaande de rendabiliteit van de teelt en de hoge productiekosten in vergelijking met de lage biomassaopbrengsten. De Europese Unie heeft als stimulans in verordening 2080/92 een programma uitgewerkt om landbouwgronden die niet gebruikt worden een alternatieve bestemming te geven en te bebossen. Deze zogenaamde natuurverwervingsgebieden beslaan in Vlaanderen ongeveer 10 000 hectare. Indien men in Vlaanderen deze volledige oppervlakte zou gebruiken voor de aanplanting van korte omloophout, beschikt men over een potentiële elektriciteitsproductie van 130 GWh. Hiermee kunnen naar schatting 37 000 gezinnen in hun elektriciteitsbehoefte worden voorzien. (Biomassa, 2007)

Landbouwers zijn vaak echter niet bereid om hun beste landbouwgrond op te offeren voor korte omloophout. Dit heeft gevolgen voor de keuze van de aan te planten bomen. De grond is meestal eerder arm en de groeicondities zijn dus zeker niet optimaal. Intensieve biomassabouw is hierdoor meestal noodzakelijk, hoewel dit vanuit milieuhygiënisch standpunt niet te verkiezen is. De opbrengst droog stof per hectare kan door deze arme grond bovendien sterk beïnvloed worden. Een voorbeeldje om dit te illustreren: de opbrengst van populier bedraagt onder normale omstandigheden tussen 10 en 15 ton per hectare. In Zweden werd er een project opgezet waarbij men een populierensoort onder de meest optimale condities liet groeien. De grond was rijk en bovendien werd er flink bemest en intensief geïrrigeerd. De opbrengst droog stof bedroeg hierdoor 36 ton per hectare. Dit is tot drie keer zoveel de normale opbrengst. (Vande Walle *et al.*, 2007)

Populier en wilg zijn niet de enige soorten die geschikt zijn als energieteelt. Er zijn ook al proeven opgezet met berk en esdoorn. De resultaten bij esdoorn vielen volgens Vande Walle *et al.* (2007) tegen. Bij de verschillende experimenten rond esdoorn bedroeg de gemiddelde opbrengst per ha ongeveer 1/3 van de opbrengst bij populier of wilg. Berk heeft doorgaans ook een lagere opbrengst per hectare en daarnaast kan berk niet geoogst worden om de drie tot vijf jaar, zoals bij wilg en populier. Om een opbrengst te verkrijgen die vergelijkbaar is met die van wilg of populier, moet de berk eerst acht tot twaalf jaar groeien. Toch kan berk het overwegen waard zijn omdat deze boomsoort zich kan aanpassen aan arme gronden. Populier is bovendien in vergelijking met berk erg vatbaar voor ziektes. Alles in overweging genomen is berk als energieteelt een interessant alternatief voor populier of wilg. (Vande Walle *et al.*, 2007)

2.3.2.3 Olifantsgras

Nog een gewas dat frequent wordt geteeld is olifantsgras (*miscanthus*). Dit gewas behoort net als suikerriet en maïs tot de zogenaamde C4-gewassen. Dit is een groep van planten met een beperkte ademhaling en een zeer hoge koolstofopname. Deze opname kan oplopen tot bijna 13 ton CO₂ per hectare per jaar. In vergelijking met C3-gewassen, zoals wilg en populier, zijn C4-gewassen efficiënter bij het opnemen van water, stikstof en zonlicht. De keerzijde hiervan is dat C4-gewassen hogere temperaturen vereisen in de lente om de groei op te starten. (Lewandowski *et al.*, 2000)

Het verschil tussen C3-gewassen en C4-gewassen vraagt een hele uitleg. In deze alinea volgt een beknopte versie. Alles heeft te maken met fotosynthese. De bedoeling van fotosynthese in planten is dat de energie van het licht gebruikt wordt om organische stoffen (zoals suikers) aan te maken in de plant. Dit gebeurt grotendeels in twee stappen. Eerst wordt de lichtenergie gebruikt om chemische energie te produceren in de plant (de zogenaamde "lichtreacties"). Die chemische energie wordt vervolgens opgebruikt om CO₂ om te zetten in suikers (de zogenaamde "donkere

reacties"). Dit omzetten van CO₂ noemt men CO₂-fixatie. De C van CO₂ wordt gefixeerd of vastgelegd in de suikermoleculen. De suikermoleculen bevatten vier tot zeven C's. Terwijl de lichtreacties in bijna elke plant hetzelfde zijn, zijn er verschillende manieren waarop een plant aan CO₂-fixatie kan doen. En dit vormt het verschil tussen C3 en C4-gewassen. Bij C3-gewassen reageert de verzamelde CO₂ met een suiker met vijf koolstoffen, ter vorming van twee C3-suikers. (3-fosforglyceraat, vandaar C3-gewassen). Bij een C4-gewas gebeurt dit anders. Het proces van CO₂-fixatie wordt opgesplitst in twee verschillende cellen. In de eerste cel reageert CO₂ eerst met een C3-molecule ter vorming van een C4-molecule. In de tweede cel splitst de CO₂ af. Vanaf dan verloopt het proces weer analoog met C3-gewassen en wordt CO₂ omgezet in verschillende suikers. Bij C4-gewassen gebeurt dus een indirecte fixatie. Dit blijkt het rendement van de CO₂-fixatie te verhogen. (Taiz en Zeiger, 2002)

Olifantsgras kan elk jaar worden geoogst. Meer nog, in het derde jaar bereikt een aangelegd veld olifantsgras de maximale opbrengst, waarna de productie nog zeker 7 jaar op peil kan blijven. Bovendien heeft olifantsgras doorgaans een veel lagere stikstofbehoefte in vergelijking met de traditionele landbouwgewassen. Het gewas kan dus geteeld worden op een stikstofarme grond. Dit heeft als voordeel dat de landbouwer nauwelijks hoeft te bemesten. Ook is er bij de teelt van olifantsgras weinig behoefte aan insecticiden en pesticiden. (Kennislink, 2007)

Olifantsgras wordt wel eens het ideale energiegewas genoemd omwille van de vele voordelen, zoals hierboven aangegeven. Vooral in de meer natte gebieden is deze plant geschikt. Olifantsgras verdraagt veel water en is bovendien tolerant wat pH betreft. Zure regen vormt dus geen probleem. Het vochtgehalte bij olifantsgras bedraagt in de lente ongeveer 15 procent. Hierdoor verkrijgt men een grote opbrengst aan droog stof per hectare, zo een 10 tot 30 ton per hectare, afhankelijk van hoe oud de gewassen zijn. Olifantsgras dat drie jaar oud is brengt meer op dan olifantsgras van tien jaar oud. In warmere gebieden kunnen opbrengsten van meer dan 30 ton droog stof per hectare verkregen worden, maar enkel onder de voorwaarde dat er voldoende geïrrigeerd wordt. Eén enkele kilogram droog stof levert een energie-inhoud op van 17 MJ. (McKendry, 2002)

Ondanks de vele voordelen die dit gewas biedt, zijn er een aantal nadelen. Olifantsgras is oorspronkelijk afkomstig uit tropische en subtropische gebieden. Het gewas wordt gewaardeerd voor de grote aanpasbaarheid aan andere klimaten. Toch overwintert olifantsgras niet altijd goed in gebieden zoals West-Europa. Voornamelijk tijdens de eerste winter na de aanplanting kunnen er problemen optreden. De daaropvolgende winters vormen geen probleem. In streken waar het niet voldoende regent, zoals het zuiden van Europa, kunnen de opbrengsten laag uitvallen. Bovendien kunnen de kosten voor het aanleggen van een veld olifantsgras hoog uitvallen. Dit heeft voornamelijk te maken met het feit dat er voor energieteelten meestal een hybride soort van olifantsgras gebruikt wordt. Deze soort vormt geen zaaadjes en om nieuwe aanplantingen te kunnen

doen moet de wortelstok van een plantje dus manueel of machinaal gedeeld worden. Meestal wordt dit niet op het veld zelf gedaan maar wat men noemt via in vitro micro-voortplanting. De kosten hiervan bedragen 0,3 EUR per plant. Indien men één of twee planten per m² plant, komt men op een totale kost van 3 000 tot 6 000 EUR per hectare. Er bestaat ook een methode om de wortelstok machinaal op het veld zelf te delen en te planten. Dit noemt men macro-voortplanting en deze methode heeft de kosten om een nieuw veld olifantsgras aan te leggen doen dalen tot ongeveer 350 EUR per hectare. (Lewandowski *et al.*, 2000)

Het oogsten van olifantsgras wordt meestal in de lente gedaan omdat in deze periode het vochtgehalte in het gewas het laagst is. De periode die men heeft om te oogsten in de lente is echter vrij kort omdat in dit seizoen de groei van de plant terug opstart. Daarom oogst men ook soms in een ander seizoen en laat men het olifantsgras drogen tot een vochtgehalte van ongeveer 15 procent vooraleer het op te slaan. Deze droging is belangrijk om schimmels te voorkomen. Indien het drogen niet op een natuurlijke manier kan gebeuren, moet er externe energie gebruikt worden. Dit brengt kosten met zich mee die afhankelijk zijn van hoeveel vocht er nog aanwezig is in het geoogste olifantsgras. Indien er bijvoorbeeld nog 70 procent vocht aanwezig is en men droogt tot de vereiste 15 procent, kost dat circa 31,2 EUR per ton. Is er aanvankelijk een vochtgehalte van slechts 30 procent en men droogt tot 15 procent, dan brengt dit een kost met zich mee van ongeveer 3,7 EUR per ton. Olifantsgras wordt meestal in de vorm van balen opgeslagen. De opslagkosten hierbij worden geschat op 3,3 EUR per ton indien men de balen onder een eenvoudig plastic zeil opslaat. Indien men de balen olifantsgras onder in een opslagruimte wil opslaan, moet men rekenen op gemiddeld 8,1 EUR per ton. Deze kosten omvatten arbeidskosten voor onderhoud en in het geval van de opslagruimte ook de afschrijvingskosten van de ruimte. (Lewandowski *et al.*, 2000)

De totale kost die de energieteelt olifantsgras met zich meebrengt is moeilijk te schatten. Er spelen te veel factoren een rol die een rechtstreekse invloed hebben op de verschillende kosten. Deze factoren zijn onder andere: de gebruikte soort olifantsgras, de opbrengst per hectare, de methode van voortplanting van het olifantsgras, manier van oogsten en opslaan, het gebruik van externe energie voor droging of niet, enz. (Lewandowski *et al.*, 2000)

2.3.2.4 Andere energieteelten

Naast de drie energieteelten die hierboven besproken zijn, bestaan er nog heel wat gewassen die in het bijzonder geschikt zijn voor anaërobe vergisting en fermentatie om zo biogas of bio-ethanol te produceren. Ten eerste is er maïs. Er bestaan verschillende maïsoorten die kunnen gebruikt worden als energieteelt. Zo bestaat er onder andere kuilmaïs, snijmaïs, korrelmaïs en energimaïs. Net zoals het hierboven besproken olifantsgras behoort maïs tot de C4-gewassen en neemt dus

veel CO₂ op. De opbrengst per hectare maïs varieert tussen 8 en 30 ton droog stof, afhankelijk van de soort maïs die geteeld wordt. Doorgaans behoeft maïs bijkomende bemesting, zoals stikstof en fosfaat. Maar het belangrijkste onderdeel van de teelt is de vochtvoorziening. Indien het niet voldoende regent, is extra irrigatie noodzakelijk. Snijmaïs kan beter tegen droogte dan energiemais en is dus te verkiezen in droge gebieden. Gemiddeld genomen vraagt één kilogram droog stof afkomstig van maïs 240 liter water tijdens de teelt. (Biogas International, 2007)

Vervolgens wordt suikerbiet ook gebruikt als energieteelt. De opbrengst droog stof per hectare bedraagt 14 ton. Dit is relatief weinig als men de opbrengst droog stof vergelijkt met het vers gewicht. Deze bedraagt 61 ton per hectare. Suikerbiet heeft dus een percentage aan droog stof van slechts 23 procent. Dan heeft wintertarwe een veel hoger percentage aan droog stof, ongeveer 83 procent. De opbrengst vers gewicht bij wintertarwe is vrij beperkt, waardoor het aantal ton droog stof dat men uit één hectare kan winnen maar 6,8 ton bedraagt. Ten slotte kan men ook aardappel telen als energiegewas. Net zoals bij suikerbieten ligt het percentage droog stof laag, namelijk 21 procent. Eén hectare aardappel levert net geen 10 ton droog stof op. (García *et al.*, 2003)

2.3.3 Overzicht

In onderstaande tabellen staat een overzicht van een aantal gegevens van de verschillende bronnen van biomassa. Voor de organische fracties wordt het geschat aanbod in 2010 in Vlaanderen weergegeven. Bij dit aanbod wordt geen rekening gehouden met mogelijk andere bestemmingen van het biomassa-afval en is dus louter theoretisch. Zo wordt het grootste deel van de organische bedrijfsafvalstoffen in de werkelijkheid verwerkt in veevoeder. De gemiddelde calorische waarden die bij de energieteelten vermeld staan komen uit García *et al.* (2003) en Groten (2003).

Tabel 1: Organische fracties

| | Gemiddelde calorische waarde | Geschat aanbod in 2010 |
|--|------------------------------|---|
| Groenafval | 3,7 GJ per ton | 745 441 ton |
| GFT | 3,4 GJ per ton | 340 000 ton |
| Houtafval | 15 GJ per ton | 1 891 000 ton |
| Mest | 8,5 GJ per ton | 8 000 000 ton varkensmest 500 000 ton kippenmest |
| Huishoudelijke restafvalstromen en daarmee gelijkgestelde bedrijfsafvalstromen | 11,1 GJ per ton | 1 897 000 ton |
| Waterzuiveringslib (na droging) | 2-3 GJ per ton | 269 000 ton |
| Organische bedrijfsafvalstoffen | 2,7 GJ per ton | 3 800 000 ton |
| Stortgas | 18 MJ per m ³ | 25 000 000 m ³ |

Tabel 2: Energieteelten

| | Gemiddelde opbrengst per hectare | Gemiddelde calorische waarde |
|------------------|---|------------------------------|
| Koolzaad | <ul style="list-style-type: none">• 3,1-3,5 tds• Na koude persing: 1 485 liter bio-olie• Na warme persing: 1 600 liter bio-diesel | 27,6 GJ per tds |
| Korte omloophout | <ul style="list-style-type: none">• Intensieve biomassa-bouw: 25 tds• Extensieve biomassa-bouw: 8-12 tds | 18 GJ per tds |
| Olifantsgras | 10-30 tds | 17 GJ per tds |
| Maïs | <ul style="list-style-type: none">• Korrelmaïs: 8-9 tds• Kuilmaïs: 15,2 tds• Snijmaïs: 18 tds• Energiemaïs: 30 tds | ± 17 GJ per tds |
| Suikerbiet | 14 tds | 18,5 GJ per tds |
| Wintertarwe | 6,8 tds | 17 GJ per tds |
| Aardappel | 9,8 tds | 15,2 GJ per tds |

2.4 Voorbehandeling van biomassa

De verschillende soorten biomassa vereisen een aangepaste behandeling bij de omzetting naar energie. Sommige biomassastromen moeten voorbehandeld worden vooraleer ze bruikbaar zijn voor energieomzetting. De voorbehandeling is nodig om transport en opslag te vereenvoudigen, maar ook om het rendement van de uiteindelijke energieomzetting te verbeteren. Soms is voorbehandelen zelfs nodig gewoon om conversie mogelijk te maken. (Geurds *et al.*, 2005)

Er zijn verschillende soorten voorbehandelingstechnieken. De gebruikte techniek is afhankelijk van twee factoren. Ten eerste is de aard van het materiaal een bepalende factor. En ten tweede speelt ook het omzettingsproces een rol. (Geurds *et al.*, 2006)

2.4.1 *Verkleinen*

De eerste soort voorbehandeling is verkleinen. Vooral biomassa-afval uit de bosbouw moet verkleind worden vooraleer het ingezet kan worden voor de omzetting in energie. Meestal wordt hierbij gebruik gemaakt van een houtversnipperaar of een houthakselaar. Er zijn verschillende types, afhankelijk van de dikte van de te versnipperen takken. Verkleinen wordt in de eerste plaats gedaan om het transport van de biomassa te vergemakkelijken. (Geurds *et al.*, 2006)

2.4.2 *Verdichten*

Een tweede belangrijke voorbehandeling is verdichten. Op deze manier wordt het volume van de biomassa verminderd. Bovendien verhoogt tegelijkertijd de energiedichtheid van het materiaal. Wanneer men biomassa wil verdichten is het essentieel dat het materiaal goed droog is, anders bestaat de kans dat het gaat rotten. Een vorm van verdichten die steeds meer gebruikt wordt, is pelletiseren. De meest gebruikte pellets zijn gemaakt uit hout. Houtpellets zijn kleine, lichte staafjes gemaakt uit geperst houtafval van zagerijen. Ze bieden een hoger gebruiksgemak dan brandhout en de structuur van houtpellets is erg positief voor de verbranding. Vooral voor huishoudelijke verbranding zijn houtpellets gebruiksvriendelijk. (Houtpellets, 2007)

Buiten pelletiseren bestaan er ook andere technieken om biomassa te verdichten. Het maaisel dat achterblijft in bermen bijvoorbeeld kan men verpakken in balen om zo het transport te vereenvoudigen. In het geval van houtzaagsel wordt er vaak gebruik gemaakt van briketten. Hierbij wordt de biomassa geperst in de vorm van kleine bakstenen. (Geurds *et al.*, 2006)

2.4.3 *Drogen*

Een derde belangrijke vorm van voorbehandeling is het drogen. Deze voorbehandeling is vaak nodig omdat de meeste biomassa aanvankelijk te nat is voor zowel gebruik als voor transport. Er zijn vier methoden die het drogen van biomassa mogelijk maken, namelijk thermisch, biologisch en mechanisch drogen en drogen door zon en wind.

2.4.3.1 Thermisch drogen

Bij de eerste methode, het thermisch drogen, wordt er warme lucht doorheen de biomassa geblazen. Hiervoor worden bijvoorbeeld hete rookgassen gebruikt. Ook wordt er soms gebruik

gemaakt van een heet contactoppervlak om de biomassa thermisch te drogen. Er bestaan verschillende drogers om het vocht uit de biomassa te halen. Het meest gebruikte type droger voor biomassa is de rotary dryer. De biomassa bevindt zich in een ronddraaiende trommel en wordt in contact gebracht met hete gassen. Een ander veel gebruikt type droger is de zogenaamde flash dryer. Hierbij wordt een hete stroom lucht onder hoge druk met de biomassa gemengd. Door die hoge druk droogt de biomassa zeer snel. Flash dryers vereisen wel hogere investeringskosten. (Amos, 1998)

2.4.3.2 Biologisch drogen

Bij het biologisch drogen maakt men gebruik van de vrijkomende warmte uit de omzetting van organisch materiaal door micro-organismen. Dit proces gebeurt in de aanwezigheid van lucht, het is dus een aëroob proces. Vaak maakt men hierbij gebruik van installaties die normaal voor compostering dienen. Na het proces blijft nog slechts 20 tot 30 procent van het oorspronkelijke vocht aanwezig. De calorische waarde van de biomassa stijgt hierdoor met 10 tot 12 kJ per kilogram biomassa. (Dach, 2006)

2.4.3.3 Mechanisch drogen

Het mechanisch drogen kost veel minder energie dan bijvoorbeeld het thermisch drogen, maar het natte materiaal wordt dan ook niet zo goed gedroogd als bij thermisch drogen. Via mechanisch drogen haalt men tot 50 procent van het vocht uit de biomassa. Indien het materiaal na het mechanisch drogen nog te vochtig is, moet men overschakelen op een andere techniek. De natte biomassa wordt bij mechanische droging eenvoudig drooggeperst. Soms wordt er ook gebruik gemaakt van een centrifuge. Omwille van de lagere efficiëntie van deze methode, wordt mechanisch drogen vaak als eerste stap in het droogproces gebruikt. (Biomass Energy Technology, 2007)

2.4.3.4 Drogen door zon en wind

Ten slotte hebben we nog het drogen door zon en wind. Dit is allicht de eenvoudigste en goedkoopste methode. Het materiaal wordt gewoon gedroogd door het in de openlucht te leggen. Een nadeel bij deze methode is dat er geuroverlast kan ontstaan in bepaalde gevallen. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

2.4.4 *Scheiden*

Vooraleer biomassa omgezet kan worden in energie is scheiding van de verschillende componenten aanwezig in de biomassa vaak nodig. Dit is zeker het geval indien men biomassa-afval gebruikt, zoals huishoudelijke restafvalstromen. Er zijn vijf methodes om te scheiden: magnetische scheiding, zeven, luchtweerstandsscheiding, dichtheidsscheiding en ballistische scheiding.

2.4.4.1 Magnetische scheiding

Deze techniek wordt gebruikt om metalen aanwezig in de biomassa op te sporen en te scheiden. De magnetische eigenschappen van de metalen worden hierbij gebruikt om ze te verwijderen. Hiervoor gebruikt men heel eenvoudig magneten in bijvoorbeeld een magneettrommel of op een magneetband. Indien er zich metalen bevinden in de biomassa die geen magnetische eigenschappen bezitten en dus niet op te sporen zijn door middel van magneten, kan er een andere techniek gebruikt worden. Zo bestaat er de wervelstromscheiding. Hierbij worden de niet-magnetische metalen, zoals zink of aluminium even magnetisch gemaakt door er een elektrische stroom in op te wekken. Op dat moment hebben de magneten wel effect en op deze manier kunnen ook niet-magnetische metalen verwijderd worden uit de biomassa. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

2.4.4.2 Zeven

Een heel eenvoudige manier om verschillende componenten te scheiden is door de biomassa te zeven. Hierdoor worden de grotere en de kleinere deeltjes van elkaar gescheiden. Een voorbeeld van een veelgebruikte zeef is de trommelzeef. Dit is een ronddraaiende zeef. Aan het begin zijn de openingen in de wand klein waardoor enkel de kleinere deeltjes erdoor vallen. Meer naar het einde van de zeef toe worden de openingen steeds groter en hierdoor kunnen ook grotere fracties worden afgescheiden. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

2.4.4.3 Luchtweerstandsscheiding

Deze techniek maakt gebruik van de eigenschap dat sommige fracties in de biomassa gemakkelijker kunnen afgezogen worden dan andere fracties. Zo worden lichte papierdeeltjes gemakkelijk afgezogen, terwijl dit voor stenen heel wat moeilijker is. Twee processen worden hiervoor gebruikt. Als eerste is er de zogenaamde windzifter. De biomassa komt in een soort trechter terecht. Een opwaartse luchtstroom neemt de lichte deeltjes mee en de zwaardere deeltjes

vallen naar de bodem. Ten tweede kan men scheiden in een cycloon. Het principe is gelijkaardig aan die van de windzifter, maar bij deze techniek maakt de opwaartse luchtstroom een draaibeweging. In deze werveling botsen de zwaardere deeltjes in de biomassa tegen de wand van de cycloon waardoor hun snelheid wordt afgeremd. Als gevolg hiervan vallen ze naar beneden in een verzamelvat. Een toepassing van cyclonen is vaak bij luchtzuivering te vinden. Hierdoor stelt men de opwaartse luchtstroom zo af dat alle aanwezige deeltjes naar beneden vallen en er enkel zuivere lucht naar boven stroomt. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

2.4.4.4 Dichtheidsscheiding

De afzonderlijke componenten in de biomassa hebben een andere dichtheid. Bijgevolg is het drijfvermogen van de verschillende deeltjes niet hetzelfde. Hiervan maakt men gebruik bij dichtheidsscheiding. De biomassa brengt men in een bassin met water om de fracties te scheiden. Sommige deeltjes zullen immers zinken terwijl andere blijven drijven. De deeltjes die zinken, komen terecht op een soort transportband in het water en worden hiermee afgevoerd. De drijvende deeltjes worden aan de rand van het bassin uit het water gehaald. In plaats van dichtheidsscheiding maakt men ook wel eens gebruik van de benaming drijf-zink scheiding. Een nadeel van deze scheidingstechniek is dat de biomassa in het water wordt gelaten en dus nat is na de scheiding. Bijkomende droging na het scheiden is hierdoor soms noodzakelijk. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

2.4.4.5 Ballistische scheiding

Een laatste scheidingstechniek is de ballistische scheiding. De eigenschap waarvan men hier gebruik maakt is de hardheid van de verschillende deeltjes. Steentjes bijvoorbeeld zijn veel harder dan papierdeeltjes. Men kan de voeding van op een bepaalde hoogte laten vallen op een ketsplaats. De harde deeltjes ketsen af. Afhankelijk van hoe hard een deeltje is, zal het minder ver of juist verder afketsen. Zachte deeltjes daarentegen ketsen niet af maar glijden gewoon van de ketsplaat af. Op deze manier krijgt men een scheiding tussen harde en zachte componenten aanwezig in de biomassa. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

2.4.5 *Torrefactie*

Een laatste voorbehandelingstechniek is de torrefactie. Hierbij wordt de biomassa voorbehandeld bij een temperatuur van 200°C tot 300°C en in de afwezigheid van zuurstof. Vooral houtachtig materiaal komt in aanmerking voor torrefactie. De biomassa valt voor een groot deel uit elkaar

tijdens het proces en hierbij worden allerlei vluchtige gassen losgelaten, waardoor de hoeveelheid biomassa vermindert. De reacties die optreden zorgen ervoor dat de vezelstructuur van de biomassa wordt afgebroken terwijl het vochtgehalte daalt. Bovendien stijgt de calorische waarde van de biomassa na een torrefactie-behandeling. Dit alles zorgt ervoor dat de biomassa geschikt wordt voor vergassing of verbranding. Daarnaast wordt ook het transport van de biomassa vergemakkelijkt door torrefactie, vooral indien de techniek van torrefactie gecombineerd wordt met pelletiseren. Door deze combinatie worden pellets met een hoge energiedichtheid bekomen. (Bergman en Kiel, 2005)

De techniek torrefactie is nog vrij recent en nog niet gecommmercialiseerd. Onder andere het ECN in Nederland voert onderzoeken uit om deze techniek economisch en technologisch haalbaar te maken.

2.5 Conversietechnieken

Biomassaproduct en biomassa-afval kunnen op veel verschillende manieren worden omgezet in bruikbare energievormen zoals elektriciteit, warmte en gasvormige of vloeibare brandstoffen. (Duurzame energie, wegwijzer 2007) De belangrijkste conversietechnieken zijn: thermische, biologische, fysische en chemische conversietechnieken. Binnen de thermische omzettingsprocessen bestaan er vier alternatieven, namelijk verbranding, vergassing, pyrolyse en liquefaction. De eerste drie zijn de meest gebruikte methodes. De laatste is nog in de ontwikkelingsfase. De biologische conversietechnieken kunnen in twee groepen opgedeeld worden: anaërobe vergisting en fermentatie.

Welke biomassa geschikt is voor welke conversietechniek hangt in grote mate af van het aanwezige vochtgehalte in de biomassa. Biomassa met een hoge vochtigheidsgraad, zoals mest of aquatische biomassa, is meer geschikt voor biologische omzettingsprocessen. De drogere biomassa, zoals hout, leent zich meer voor thermische omzetting. In het algemeen kan men stellen dat men moet kiezen voor een biologische conversietechniek indien de biomassa een hoge vochtigheidsgraad heeft en het drogen ervan te veel energie zou vragen in vergelijking met de energie die het via een thermische conversietechniek zou kunnen opbrengen. Naast de vochtigheidsgraad van de biomassa spelen uiteraard ook andere factoren een rol in de keuze van een geschikte conversietechniek. Welk eindproduct wenst men bijvoorbeeld? Welke conversietechniek men ook kiest, het is belangrijk om te weten dat de potentiële energie-inhoud van een bepaalde biomassabron steeds hetzelfde blijft. Wat verandert indien men van conversietechniek wisselt, is de werkelijke hoeveelheid gewonnen energie en de vorm van deze energie (olie, warmte...). De potentiële energie-inhoud van de biomassa verandert dus niet bij een verandering van conversietechniek. (McKendry, 2002)

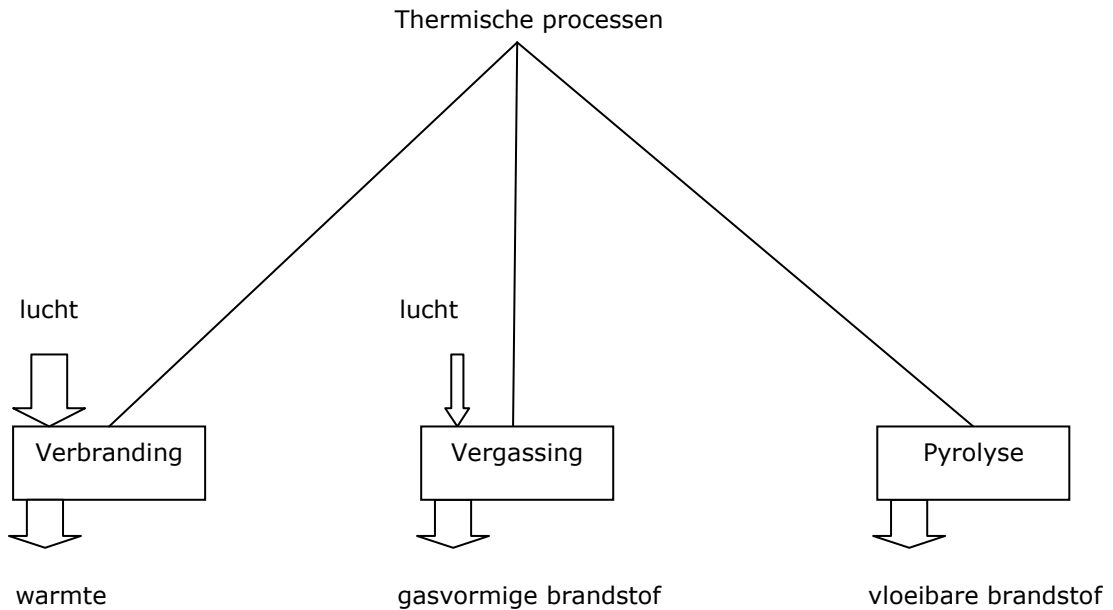
Om de prestaties van een bepaalde conversietechniek te kunnen evalueren, moet men rekening houden met de gehele productieketen, de zogenaamde bio-energieketen. Deze keten begint, in het geval van energieteelten, bij de productie van de biomassa en eindigt bij de eindgebruiker van de geproduceerde energie. Eén van de belangrijkste criteria om verschillende conversietechnieken met elkaar te kunnen vergelijken, is het netto energierendement per hectare. Men spreekt van netto energierendement omdat het bruto energierendement moet worden verminderd met de benodigde energie verkregen uit fossiele brandstoffen om bijvoorbeeld de biomassa te kunnen oogsten, transporteren of drogen. Indien het netto energierendement laag is, wil dit zeggen dat men veel land nodig heeft om een bepaalde hoeveelheid netto energie te produceren. Andersom geldt ook: indien het netto energierendement hoog is, heeft men maar weinig land nodig om een bepaalde hoeveelheid energie te winnen. Het spreekt voor zich dat een hoog netto energierendement economisch het meest rendabel is. Zeker in het Westen, waar land voor energieteelten schaars is. Het hoogste netto energierendement wordt gehaald bij de productie van elektriciteit uit de verbranding van hout. Hierbij kunnen netto energierendementen van meer 110 GJ per hectare per jaar behaald worden. (McKendry, 2002)

Een ander criterium voor de evaluatie van conversietechnieken is de energieratio. Deze ratio meet de verhouding tussen de energie output van een bio-energieketen ten opzichte van de energie input. Deze ratio wordt dan vergeleken met die van een traditionele energieketen. Een energieratio van minder dan één wil zeggen dat de input van energie hoger is dan de output. De productie van ethanol uit tarwe of suikerbieten geeft bijvoorbeeld ratio's tussen 0,9 en 1,5. Bij sommige processen kan het dus voorkomen dat er geen netto energieproductie is. Ter vergelijking: de energieratio voor de productie van elektriciteit na het verbranden van hout ligt tussen zes en vijftien. Hier is dus duidelijk wel sprake van een netto energieproductie. De energie output ligt er een stuk hoger dan de energie input. (McKendry, 2002)

Uit de bovenstaande bespreking van de prestaties van conversietechnieken lijkt verbranding van hout met tot doel elektriciteitsproductie een rendabele techniek te zijn. Om dit in perspectief te plaatsen heeft McKendry (2002) aan de hand van gegevens van de Transport Studies Group een vergelijking gemaakt tussen de energiedichtheid van hout, met een vochtgehalte van 50 procent, en fossiele brandstoffen. Zo bedraagt de energiedichtheid van natuurlijk gas ongeveer 56 GJ per ton en die van kool om en bij 28 GJ per ton. Het hout, met 50 procent vochtgehalte, heeft slechts een energiedichtheid van 8 GJ per ton. Dit brengt hout in vergelijking met fossiele brandstoffen in het nadeel als het op transport en opslag aankomt.

2.5.1 Thermische omzetting

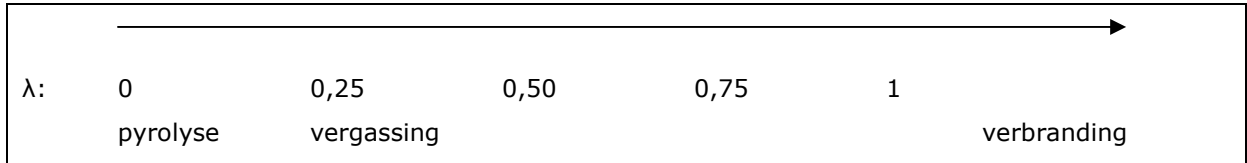
De thermische omzettingsprocessen kunnen verschillende vormen aannemen. De belangrijkste drie zijn: verbranding, vergassing en pyrolyse. Samengevat kunnen we deze drie thermische omzettingsprocessen weergeven aan de hand van volgende figuur:



Bron: INDAVER

Figuur 1: Thermische omzettingsprocessen

Zoals op de figuur wordt aangegeven ligt het belangrijkste verschil tussen de drie thermische omzettingsprocessen in de hoeveelheid lucht, en meer specifiek zuurstof, die wordt toegevoegd. Als gevolg hiervan verkrijgt men telkens een ander eindproduct. Zo wordt er bij verbranding veel zuurstof toegevoegd, bij vergassing slechts een beperkte hoeveelheid zuurstof en pyrolyse ten slotte vindt plaats in afwezigheid van zuurstof. Deze hoeveelheden zuurstof die worden toegevoegd, worden weergegeven door het begrip lambda (λ). Hiermee wordt de verhouding bedoeld tussen de hoeveelheid zuurstof die aan het proces wordt toegevoegd en de hoeveelheid zuurstof die nodig is om de biomassa volledig om te zetten. Om te bepalen hoeveel zuurstof er nodig is om de omzetting volledig op te laten gaan, berekent men de benodigde hoeveelheid zuurstof om het materiaal volledig om te zetten in enerzijds water en anderzijds kooldioxide. (ECN, 2007) In de volgende figuur wordt een voorstelling gegeven van lambda bij de verschillende thermische conversietechnieken.



Figuur 2: Lambda

2.5.1.1 Verbranding

Verbranding van biomassa is een thermisch proces waarbij deze biomassa met een overmaat aan zuurstof wordt verhit. Lambda is bijgevolg groter dan één. De verbrandingstemperaturen variëren doorgaans tussen 800°C en 1000°C. Bij dit proces ontstaat er CO₂ en H₂O. Als gevolg van de chemische reacties die er plaatsvinden, wordt er voldoende warmte geproduceerd om de verbranding te onderhouden en tegelijkertijd extra warmte te produceren om energie op te wekken. In de praktijk zal er wel een klein deel van de energie verloren gaan ten gevolge van warmteverlies naar de omgeving. Om nu uit de geproduceerde warmte elektriciteit op te wekken, wordt er gebruik gemaakt van een stoomturbine. De vrijgekomen warmte warmt water op en produceert op deze manier stoom. Deze stoom drijft dan een turbine aan en een generator wekt elektriciteit op. Verbranding is op dit moment de meest gebruikte techniek om warmte en elektriciteit op te wekken. (McKendry, 2002)

In principe kan elke vorm van biomassa verbrand worden, maar economisch gezien is de verbranding van biomassa enkel rendabel indien het materiaal een vochtgehalte heeft van minder dan 50 procent. Anders gaat er te veel energie verloren aan de verdamping van het aanwezige vocht. (McKendry, 2002)

Het rendement van verbranding is afhankelijk van de gebruikte techniek en kan dus variëren van 10 procent tot wel 90 procent. Zo heeft een open haard slechts een rendement van circa 15 procent. Een veel hoger rendement kan gehaald worden met bijvoorbeeld een speksteenkachel. Een belangrijk nadeel van verbranding van biomassa is dat er rookgassen ontstaan. Deze moeten gereinigd worden en dit kan hoge kosten met zich mee brengen. Bovendien blijven er assen over na de verbranding. De reglementering hier rond is terug te vinden in VLAREM II, meer bepaald in het Besluit van de Vlaamse Regering van 1 juni 1995 houdende algemene en sectorale bepalingen inzake milieuhygiëne. (Biomassa, 2007)

2.5.1.2 Vergassing

Bij de tweede vorm, vergassing, wordt biomassa in vaste vorm omgezet in een gasvormige brandstof. Deze brandstof kan dan eventueel verder verbrand worden in een gasturbine of gasmotor om elektriciteit of warmte op te wekken. Hierbij kunnen elektrische rendementen worden gehaald van ongeveer 30 procent. In dit geval spreekt men dan ook van stookgas in plaats van gasvormige brandstof. Indien de verkregen gasvormige brandstof niet verder wordt verbrand, spreekt men niet van stookgas, maar van synthesegas. Dit synthesegas kan gebruikt worden voor de productie van methanol. (Vlaams Energieagentschap, 2007) De calorische waarde van het geproduceerde gas schommelt meestal tussen 4 en 6 MJ/Nm³. Hogere waarden in de orde van 9 tot 11 MJ/Nm³ zijn mogelijk. (McKendry, 2002)

Het proces van vergassing gebeurt bij een temperatuur tussen 700°C en 900°C en er wordt slechts een kleine hoeveelheid lucht toegevoegd. Wanneer men geen lucht toevoegt, maar enkel zuurstof, wordt er met hogere temperaturen gewerkt. Meestal worden de temperaturen zo hoog mogelijk gekozen zodat er een maximale conversie en een minimale teervorming wordt verkregen. In de praktijk wordt er bovendien gekozen voor een hoeveelheid zuurstof die net voldoende is om het hele proces gaande te houden. Lambda schommelt meestal rond 0,25. (Vlaams Energieagentschap, 2007)

De belangrijkste voordelen van het werken met een vergasser is dat er doorgaans een hoger rendement wordt bereikt en bovendien moeten er minder rookgassen worden gezuiverd dan bij bijvoorbeeld verbranding. Het rendement van de vergasser alleen kan ook bepaald worden. Hiervoor berekent men de verhouding tussen de energie-inhoud van het geproduceerde gas en de energie-inhoud van het vaste inputmateriaal. Om dit rendement te onderscheiden van de elektrische rendementen die ontstaan na het verder verbranden van het verkregen gas, noemt men het rendement van een vergasser ook wel het koud gas rendement. Net zoals bij verbranding gaat er bij vergassing ook een deel van de energie verloren naar de omgeving. Daarnaast kan het voorkomen dat een deel van de biomassa niet wordt omgezet. Hierdoor schommelt het koud gas rendement doorgaans tussen 75 en 80 procent. (ECN, 2007)

2.5.1.3 Pyrolyse

Een derde belangrijke vorm van thermische omzettingsprocessen is pyrolyse. Dit is het thermisch ontleden van organisch materiaal in afwezigheid van zuurstof. Er wordt dus wel warmte toegevoegd, maar geen zuurstof. De temperatuur bedraagt meestal circa 500°C. (McKendry, 2002)

Als gevolg van het pyrolyse-proces ontstaan er cokes, gassen en oliën. De verhouding tussen de productfracties die ontstaan is afhankelijk van het gebruikte uitgangsmateriaal, de techniek en de procesomstandigheden. Zo ontstaan er bijvoorbeeld cokes indien de verblijftijd lang is en de temperatuur laag. De producten die voortkomen uit pyrolyse kunnen op verschillende manieren worden gebruikt om elektriciteit op te wekken. Zo kunnen cokes verbrand worden om stoom te produceren die dan geleid wordt in een stoomturbine. Ook kunnen deze cokes vergast worden. Hierdoor ontstaat er een gas dat gelijkwaardig is aan de gasvormige brandstof die vrijkomt bij vergassing. Een belangrijk voordeel van pyrolyse is dat er geen rookgassen vrijkomen en dit in tegenstelling tot verbranding en vergassing. Bovendien kan de ontstane olie efficiënter getransporteerd en opgeslagen worden dan biomassa doordat olie een grotere energie-inhoud heeft. (Biomassa, 2007) De calorische waarde bedraagt volgens Bridgwater *et al.* (2002) ongeveer 17,5 MJ/kg (lower heating value).

Een aparte vorm van pyrolyse is de zogenaamde flash pyrolyse. Hierbij wordt het materiaal zeer snel verwarmd en is de verblijftijd erg kort. De temperaturen kunnen oplopen tot 900°C en de verblijftijd kan minder dan één seconde bedragen. Bij flash pyrolyse ontstaan er vloeistoffen en gassen en is bovendien in het bijzonder geschikt voor toepassing bij biomassa. (Biomassa, 2007)

De rendementen die gehaald kunnen worden bij pyrolyse hangen af van welk eindproduct men wenst. Langzame pyrolyse geeft als eindproduct cokes en hier gaat een rendement van ongeveer 35 procent mee gepaard. Bij flash pyrolyse daarentegen verkrijgt men ofwel bio-olie ofwel gas. Het rendement hierbij kan oplopen tot 80 procent. (McKendry, 2002)

2.5.1.4 Liquefaction

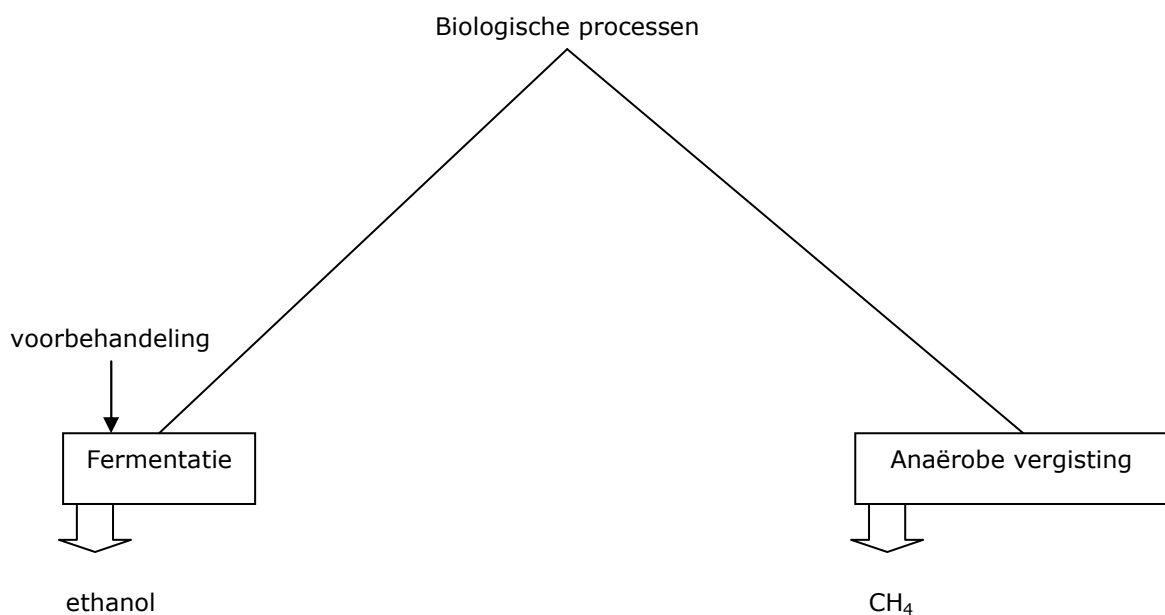
Een laatste thermisch omzettingsproces is de liquefaction. Letterlijk vertaald betekent dit het vloeibaar maken van biomassa. Deze techniek wordt nog getest en is bijgevolg nog niet gecommmercialiseerd. Bovendien is de interesse in liquefaction aan de lage kant omdat het hele proces complex is. Er moet daarom meer geïnvesteerd worden in reactorsystemen in vergelijking met pyrolyse. Het eindproduct van liquefaction van biomassa is een stabiele vloeibare koolwaterstof. Bij het proces worden lage temperaturen gebruikt en de waterstof wordt onder hoge druk gebracht. (McKendry, 2002)

Liquefaction en pyrolyse worden vaak verward met elkaar. Beide processen leveren een vloeibaar product, maar het proces verloopt anders. Bij liquefaction wordt tijdens het proces een katalysator gebruikt, terwijl bij pyrolyse een katalysator doorgaans niet nodig is. De temperatuur ligt bij liquefaction (250°C tot 350°C) een stuk lager dan bij pyrolyse, maar er wordt onder hogere druk gewerkt (5 tot 20 MPa). Ter vergelijking: pyrolyse gebeurt bij een druk van 0,1 tot 0,5 MPa. Het

drogen van de voeding is bij liquefaction niet nodig. Bij pyrolyse kan droging wel nodig zijn. (Demirbas, 2000)

2.5.2 Biologische omzetting

De tweede categorie van omzettingsprocessen zijn de biologische omzettingsprocessen. De belangrijkste vorm van een biologisch omzettingsproces is vergisting. Daarnaast bestaat er nog fermentatie. Onderstaande figuur geeft beide technieken weer:



Bron: INDAVER

Figuur 3: Biologische omzettingsprocessen

2.5.2.1 Anaërobe vergisting

Bij het vergisten van biomassa worden er micro-organismen gebruikt. Deze organismen zetten de biomassa om in biogas, een mengsel van methaan en CO₂. Dit gebeurt in afwezigheid van zuurstof. Vandaar dat men ook spreekt van anaërobe vergisting. De temperatuursomstandigheden zijn belangrijk voor de gistcultuur. Doorgaans ligt de temperatuur tussen 10°C en 60°C, afhankelijk van het te volgen proces en de grootte van de installatie. Vergisting is interessant in zowel grote als kleinere installaties. Men spreekt van een grote installatie indien er per dag meer dan honderd

ton biomassa vergist wordt. Een kleine installatie begint vanaf tien ton per dag. Doorgaans ligt de terugverdientijd van een vergistingsinstallatie tussen twee en vijf jaar. (Biomassa, 2007)

Er bestaat natte en droge vergisting. Natte vergisting wordt op dit moment meer toegepast dan droge vergisting. Dit komt voornamelijk omdat natte vergisting zeer eenvoudig is. De biomassa wordt in een luchtdichte tank omgezet. De temperatuur moet optimaal gehouden worden voor de gist en de biomassa moet gemixt worden om bezinklagen te voorkomen. Natte vergisting heeft voornamelijk betrekking op mestvergisting. Biologisch gezien werkt droge vergisting hetzelfde als natte vergisting, maar technisch gezien zijn er verschillen. Zo wordt er bijvoorbeeld niet met een tank gewerkt, maar met afzonderlijke cellen. (Biomassa, 2007)

Met het verkregen biogas heeft men verschillende alternatieven. Zo kan het gas direct gebruikt worden in een gasturbine of gasmotor of het biogas kan gezuiverd worden tot een kwaliteit vergelijkbaar met natuurlijk gas. Hiervoor moet onder andere de aanwezige CO₂ uit het biogas verwijderd worden. Indien men kiest voor de eerste mogelijkheid, gebruik in een gasturbine of gasmotor, om elektriciteit op te wekken, dan bedraagt het omzettingsrendement van biomassa naar elektriciteit tussen 10 en 16 procent. (McKendry, 2002) Het biogas heeft een calorische waarde van gemiddeld 25 MJ/Nm³. (Biomassa installaties, 2007)

2.5.2.2 Fermentatie

Fermentatie is vergelijkbaar met vergisting. Deze techniek wordt op grote schaal gebruikt om ethanol te genereren uit gewassen zoals suikerriet, suikerbiet, maïs en tarwe. Voorbehandeling van de biomassa is vaak noodzakelijk om zo de suikers in de gewassen vrij te maken, die dan omgezet worden in ethanol. De verkregen ethanol moet hierna meestal nog gezuiverd worden via destillatie. Dit vraagt veel energie. Bovendien blijft er na de fermentatie nog een residu achter. Dit wordt in sommige gevallen gebruikt als veevoeder. Indien het residu afkomstig is van suikerriet, kan dit gebruikt worden als brandstof voor vergassingsprocessen. (McKendry, 2002)

2.5.3 *Fysische omzetting*

Een voorbeeld van een fysisch omzettingsproces werd al aangehaald bij de bespreking van de energieteelten in Paragraaf 2.3.2. Uit koolzaad wordt namelijk door middel van persing bio-olie gewonnen. Er kan gekozen worden voor persing met of zonder toevoer van warmte. Bij koude persing wordt geen warmte toegevoerd en loopt de temperatuur in de pers op tot ongeveer 50°C. Warme persing vereist een opwarming van de koolzaad voor het de pers in gaat. Hierbij worden temperaturen bereikt van 80°C tot 140°C. (Lamont *et al.*, 2006)

2.5.4 *Chemische omzetting*

Een vierde categorie van omzettingsprocessen is de chemische omzetting. Bij McKendry (2002) wordt deze techniek ook mechanische extractie genoemd. Ook hier wordt vooral gebruik gemaakt van koolzaad. Andere gewassen die in aanmerking komen zijn katoen en bepaalde noten. Een voorbeeld van een chemische omzetting is de zogenaamde verestering. Nadat men bio-olie via persing van bijvoorbeeld koolzaad verkregen heeft, laat men deze olie reageren met methanol. Hierdoor ontstaat er een vloeistof die vergeleken kan worden met diesel en vormt bijgevolg een prima alternatief voor de traditionele diesel. (Mina-Raad, 2007)

Deze bio-diesel vormt echter nog geen concurrentie voor fossiele brandstoffen. De kosten van de chemische omzetting liggen hoog, wat de prijs van bio-diesel opdrijft. De toenemende druk om de luchtkwaliteit (bijvoorbeeld: minder uitstoot van roet) in vooral grote steden te verbeteren kan deze situatie veranderen. Voorlopig wordt bio-diesel voornamelijk als supplementaire brandstof in de transportsector gebruikt. (McKendry, 2002)

Hoofdstuk 3: Verbranding van biomassa

3.1. Voorbehandeling van de biomassa

In Paragraaf 2.4 werden de verschillende voorbehandelingstechnieken van biomassa in het algemeen al besproken. Voor verbranding van biomassaströmen is een aangepaste voorbehandeling noodzakelijk. Verkleinen en verdichten kunnen aangewezen zijn om het transport en de opslag efficiënt te laten verlopen. Droging is nodig om de invloed van vocht in de biomassa op de verbrandingstemperatuur te minimaliseren. Het verdampen van vocht vereist immers energie. Indien de biomassa te vochtig in de verbrandingsinstallatie gaat, zal een deel van de verbrandingswarmte verloren gaan aan het verdampen van het aanwezige vocht. Hierdoor bestaat de kans dat de verbrandingstemperatuur te laag blijft, wat kan resulteren in een onvolledige verbranding van de biomassa. Bovendien kan het verdampende vocht condenseren. Dit is nefast voor het materiaal van de verbrandingsinstallatie. (Biomass Energy Centre, 2007)

Het drogen van biomassa kan plaatsvinden voor of na het oogsten van de biomassa. Bij het drogen na de oogst kan men kiezen voor zeer eenvoudige methodes, zoals het drogen door zon en wind. Soms wordt dit ook wel passief drogen genoemd. Deze vorm van drogen brengt de minste kosten met zich mee, vereist weinig tot geen externe energie maar het kan wel een lange periode duren vooraleer het materiaal droog is. De droogtijd is afhankelijk van het soort materiaal en de opslagomstandigheden. Passief drogen is vaak voldoende voor verbrandingsinstallaties, maar indien men bijvoorbeeld de biomassa wil pelletiseren om redenen van transport, is actief drogen noodzakelijk. Bovendien is er vaak niet voldoende tijd beschikbaar om de biomassa op een passieve manier te laten drogen. Bij een actieve droging is er energie van een externe bron nodig. Dit brengt extra kosten met zich mee. De meest efficiënte manier om biomassa op een actieve manier te drogen is door het uit te spreiden over een groot oppervlak waar een goede ventilatie aanwezig is. De aanvoer van luchtstroming of warmte droogt het materiaal. De warmte kan eventueel gegenereerd worden uit de warmte-uitstoot van een proces. (Biomass Energy Centre, 2007)

Voor de oogst kan er ook gedroogd worden. Vooral bij bomen wordt dit gedaan. Alvorens de boom te rooien kan er een chemische stof in de stam geïnjecteerd worden waardoor de boom afsterft. Dit zorgt ervoor dat een groot deel van het vocht verdwijnt. Bij het rooien van de boom is het hout dus al goed gedroogd. (Biomass Energy Centre, 2007)

3.2. Verbrandingsinstallaties

Verbrandingsinstallaties worden in de eerste plaats gebruikt om afvalstoffen te verbranden. Naast verbrandingsinstallaties zijn er ook meeverbrandingsinstallaties. Beide types zijn gedefinieerd in VLAREM II. Een verbrandingsinstallatie is "een vaste of mobiele technische eenheid of inrichting die specifiek bestemd is voor de thermische behandeling van afval, al dan niet met terugwinning van de geproduceerde verbrandingswarmte. Dit bevat onder meer de verbranding door oxidatie van afval alsmede andere thermische behandelingenprocessen zoals pyrolyse, vergassing en plasmaproces, voorzover de producten van de behandeling vervolgens worden verbrand. Deze definitie omvat het terrein en de gehele verbrandingsinstallatie met inbegrip van alle verbrandingslijnen en de voorzieningen voor ontvangst, opslag en voorbehandeling ter plaatse van het afval, de systemen voor de toevoer van afval, brandstof en lucht, de stoomketel, de voorzieningen voor het behandelen van rookgassen, de voorzieningen voor de behandeling of opslag ter plaatse van residuen en afvalwater, de schoorsteen, alsook de apparatuur en de systemen voor de regeling van het verbrandingsproces en voor de registratie en bewaking van de verbrandingsomstandigheden." (VLAREM II, 2007)

De definitie van een meeverbrandingsinstallatie is analoog, maar er zijn enkele verschillen. Zo moet het gaan om een installatie "die in hoofdzaak bestemd is voor de opwekking van energie of de fabricage van materiële producten waarin afval als normale of aanvullende brandstof wordt gebruikt, of waarin afval thermisch wordt behandeld voor verwijdering". Bovendien vermeldt de definitie: "Indien meeverbranding zodanig plaatsvindt dat de installatie niet in hoofdzaak voor de opwekking van energie of de fabricage van materiële producten maar wel voor thermische behandeling van afval bestemd is, wordt de installatie beschouwd als een verbrandingsinstallatie." (VLAREM II, 2007)

Biomassa kan verbrand worden in speciale verbrandingsinstallaties om energie te verkrijgen. In VLAREM II is er een aparte rubriek opgenomen voor de definiëring van verbrandings- en meeverbrandingsinstallaties voor biomassa-afval. Ook de voorwaarden voor verbrandings- en meeverbrandingsinstallaties van biomassa-afval staan vermeld. Eén van de belangrijkste voorwaarden betreffen de emissiegrenswaarden (zie Paragraaf 3.3).

3.2.1 *Verbranding*

Voor de verbranding van biomassa zijn er verschillende verbrandingsinstallaties beschikbaar. Uit 'Energie uit afval en biomassa' (2007) halen we vier soorten verbrandingsinstallaties. Van de installaties is telkens een figuur terug te vinden in de bijlagen (Bijlage 1 tot en met 4).

3.2.1.1 Roosteroven

Om te beginnen is er de roosteroven. Het principe van roosterverbranding is vrij eenvoudig. De brandstof, in dit geval dus biomassa, wordt op een rooster gestort en vervolgens wordt dit ontstoken. Bij verbranding is er zuurstof nodig, deze wordt door het rooster heen naar de brandstof gevoerd. De feitelijke verbranding vindt plaats aan de bovenkant van de laag met brandstof. Hierbij worden er vier fases doorlopen: om te beginnen wordt het afval gedroogd, vervolgens vindt vergassing plaats, daarna ontvlammen de vluchtige koolwaterstoffen en ten slotte branden de asresten uit. (Jacobs *et al.*, 2003)

Het resultaat van roosterverbranding zijn volgende producten: de gerecupereerde warmte, rookgassen en residuen zoals bodemassen en vliegassen. De rookgassen kunnen na het verbrandingsproces gebruikt worden in een stoomketel voor de opwekking van elektriciteit en/of verwarming. Om luchtverontreiniging te beperken moeten de rookgassen die vrijkomen gereinigd worden. Bovendien zijn deze rookgassen enkel toegestaan als ze voldoen aan de opgelegde eisen en richtlijnen. Deze emissiegrenswaarden staan voor Vlaanderen vermeld in VLAREM II. Indien nodig wordt de rookgaszuivering aangevuld met een zogenaamde natte gaswassing en dit om zure componenten verder te verwijderen. Er blijft natuurlijk na de verbranding ook as over, bestaande uit bodemassen en vliegassen. De bodemassen kunnen afgezet worden in de wegenbouw. De resterende vliegassen worden na immobilisatie gestort. (Jacobs *et al.*, 2003)

De eisen die worden gesteld aan de biomassa voor gebruik in een roosteroven zijn de volgende: de voeding moet een vaste vorm hebben en er moet voldoende lucht doorheen de voeding kunnen stromen. De meest geschikte voeding zijn huishoudelijk restafvalstoffen, bedrijfsrestafvalstoffen en hout. Volgens Jacobs *et al.* (2003) moet men wel opletten dat de calorische waarde van de voeding niet hoger is dan 12 MJ per kilogram voeding. Indien men toch vaste biomassa met een hoge calorische waarde wil verbranden in een roosteroven, moet men deze mengen met biomassa met een lage calorische waarde, zoals groenafval of GFT. De deeltjes die verbrand worden mogen echter niet te groot zijn. De dikte ervan mag maximaal dertig centimeter bedragen. Voorbehandeling kan dus noodzakelijk zijn. Een bijkomend voordeel van roosterverbranding van huishoudelijke restafvalstoffen is dat dit nuttige restproducten kan opleveren. Zo kan er 65 procent van het ijzer uit de verbrandingsvoeding en 30 procent van de andere metalen worden teruggewonnen om het daarna te verkopen als schroot. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

Het rendement van een roosteroven varieert met de gebruikte voeding en de grootte van de oven. Wat warmteproductie betreft, wordt er ongeveer 85 procent van de voeding omgezet. Voor de opwekking van elektriciteit bedraagt het rendement heel wat minder. Dit schommelt tussen 13 en 17 procent voor kleine installaties tot ongeveer 23 procent voor grotere installaties. Men spreekt van grote installaties indien er meer dan 100 000 ton biomassa en/of afval per jaar verbrand

wordt. Volgens Caputo *et al.* (2005) produceert een grote installatie minstens 35 MW elektriciteit. Een grote installatie kan aangepast worden om het elektrisch rendement op te drijven. Deze aanpassingen brengen wel hoge kosten met zich mee. Indien men in een grote installatie hout verbrandt, kan men zonder aanpassingen rendementen van 30 procent halen. Een voorbeeld uit de Gids Afvalverwerkingstechnieken (2003) om deze omzettingsrendementen te illustreren: indien de energie-inhoud een bepaalde hoeveelheid biomassa-afval 9 MJ per kilogram bedraagt, dan resulteert dit in een netto elektriciteitsproductie van 450 kWh per ton. Dit is gelijk aan een elektrisch rendement van 18 procent.

De investeringskosten in een roosteroven hangen in grote mate af van de capaciteit ervan. Een grote installatie, met een verwerkingscapaciteit van 280 000 ton per jaar brengt een investering van circa 235 miljoen EUR met zich mee. Een investering in een kleinere houtgestookte installatie met een capaciteit van 14 000 ton per jaar kost ongeveer 2,7 miljoen EUR. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

3.2.1.2 Wervelbedoven

Een tweede installatie is de wervelbedoven. Belangrijk bij deze oven is dat de vaste deeltjes niet groot mogen zijn. De gemiddelde grootte is vijf centimeter, de maximale grootte die een wervelbedoven kan verwerken is vijftien centimeter. Meestal is dus een voorbehandeling vereist. Wel kan er gebruik gemaakt worden van slib of pasteuze stoffen als voeding. En dit in tegenstelling tot een roosteroven. Pasteuze stoffen zijn taaie vloeibare stoffen. Bij een wervelbedoven ligt de thermische capaciteit hoger dan bij een roosteroven. De voeding kan een calorische waarde hebben tot 30 MJ per kilogram. (Jacobs *et al.*, 2003)

Een wervelbed bestaat uit een bed van zand, waar van onderaf lucht doorheen wordt geblazen. De zandkorrels mogen hierbij niet worden weggeblazen maar ze mogen ook niet blijven liggen. Ze zweven dus in de luchtstroom. Een interessante eigenschap van zwevende zandkorrels is dat er het verschijnsel fluïdisatie optreedt. Dit wil zeggen dat de korrels zich als het ware als een vloeistof gaan gedragen. Net als water, heeft een gefluïdiseerd zandbed de neiging om naar het laagste punt toe te stromen. Dus een voorwerp dat zich in het zandbed bevindt, zal zinken als het een hogere dichtheid heeft dan het zandbed zelf. Indien het voorwerp een kleinere dichtheid heeft, zal het blijven drijven. En een object met een gelijke dichtheid zal blijven zweven. Dit is weer hetzelfde principe als in water. Nu is het mogelijk om in zo een wervelbed allerlei brandstoffen te verbranden. Dit is mogelijk door die zogenaamde fluïdisatie. De fluïdisatielucht gaat namelijk optreden als verbrandingslucht indien de zandkorrels worden opgewarmd. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

Over het algemeen is de temperatuur in een wervelbed gelijkmatig verdeeld. Hierdoor is een gecontroleerde verbranding mogelijk. Afzettingen op de wand worden verhinderd door de schurende werking van de zandkorrels en de voortdurende beweging van het bed. Nog een voordeel van het gebruik van een wervelbed is dat het mogelijk is om de samenstelling van de verbrandingsproducten te beïnvloeden door aan het bed stoffen toe te voegen die reageren met ongewenste elementen, zoals zwavel. Belangrijk is wel dat men erop let dat het bedmateriaal niet gaat klonten of verglazen. Om dit te vermijden, moeten er beperkingen worden gesteld aan de temperatuur, de samenstelling van de biomassa en die van het bedmateriaal. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

Net zoals een roosteroven genereert een wervelbed warmte die dan benut kan worden om stoom te produceren in een stoomturbine en op deze manier elektriciteit op te wekken. Ongeveer 92 procent van de voeding wordt omgezet in warmte. Het rendement voor de opwekking van elektriciteit bedraagt ongeveer 23 procent indien er huishoudelijke restafvalstoffen worden verbrand en 30 procent indien er bijvoorbeeld hout wordt verbrand. Dit is vergelijkbaar met een roosteroven. Ter vergelijking met een roosteroven: indien men dezelfde biomassa-afval met een energie-inhoud van 9 MJ per kilogram zou verbranden in een wervelbedoven, levert dit een netto elektriciteitsproductie op van ongeveer 430 kWh per ton. Het elektrisch rendement bedraagt in dit geval dus 17 procent. Dit is zelfs één procent minder dan bij een roosteroven. Wervelbedovens halen hogere elektrische rendementen bij hoog calorische voeding. In plaats van voeding te gebruiken met een energie-inhoud van 9 MJ per kilogram, kan men beter kiezen voor voeding met een energie-inhoud van bijvoorbeeld 20 MJ per kilogram. Dit zou resulteren in een elektrisch rendement van 27 procent. (Jacobs *et al.*, 2003)

Een opmerking hierbij is dat de mogelijkheid tot slibverbranding nadelig kan zijn voor het omzettingsrendement. Een groot deel van de geproduceerde warmte moet immers worden ingezet om het slib te drogen. De netto energieproductie die men uiteindelijk overhoudt kan daardoor negatief zijn. Dit wil zeggen dat er meer energie input vereist is voor de droging ten opzichte van de energie die geproduceerd wordt door de verbranding van het gedroogde slib. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

Net zoals bij een roosteroven zijn de eindproducten bij een wervelbedoven, naast de gerecupereerde warmte, rookgassen en assen. De samenstelling van deze rookgassen hangt af van welke voeding verbrand wordt. Indien de voeding en de aangevoerde lucht goed gemengd worden en de verbrandingstemperatuur stabiel kan worden gehouden, heeft dit een positief effect op de samenstelling van de rookgassen. De concentraties aan bijvoorbeeld stikstofoxiden zal dan tot een minimum gereduceerd worden. De bodemassen kunnen ook bij dit oventype normalerwijze hergebruikt worden. De vliegassen echter komen meestal niet in aanmerking om verwerkt te

worden, omwille van de hoge concentraties aan metalen. Storten is hier vaak de enige uitweg. (Jacobs *et al.*, 2003)

Een investering in een wervelbedoven brengt een kleinere uitgave met zich mee dan bij een roosteroven. Indien een wervelbedoven ongeveer 250 000 ton biomassa per jaar kan verbranden, moet men rekenen op een uitgave van circa 41 miljoen EUR. (Jacobs *et al.*, 2003)

3.2.1.3 Draaitrommeloven

Een derde mogelijke verbrandingsinstallatie is een draaitrommeloven. Deze oven bestaat uit een horizontale stalen cilinder die kan draaien om haar eigen as. Dit is de trommel en deze wordt gevuld met de voeding. De oven wordt dan verhit met branders die gestookt kunnen worden met gas, stookolie en brandbaar afval. De trommel draait langzaam rond om zo te voorkomen dat er een neerslag van vaste stoffen in de oven ontstaat. Bovendien staat de trommel lichtjes schuin zodat de voeding doorschuift van de voorkant naar de achterkant van de trommel. Aan de uitgang van de oven komen twee stromen vrij. De eerste is een mengeling van gesmolten metaaloxiden en verglaasde asdeeltjes. Dit noemt men slakken. De tweede stroom is een gas dat bestaat uit waterdamp, as en brandbare gasresten. Omdat dit gas milieuvervuilend is, wordt ze naar een naverbrandingskamer gevoerd waar de stoffen die zich in het gas bevinden de tijd krijgen om volledig te verbranden. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

In een draaitrommeloven kan een breed gamma aan voedingen gebruikt worden. De voeding kan vast, vloeibaar of pasteus zijn. De calorische waarde van de te verbranden biomassa of biomassa-afval kan variëren tot maximaal 30 MJ per kilogram. Vaak wordt er in een draaitrommeloven gevaarlijk afval verbrand, zoals voeding dat zwavel bevat. In dit geval moet de procestemperatuur minimaal 1100°C zijn. (Jacobs *et al.*, 2003)

Net zoals bij de twee vorige verbrandingsinstallaties zijn er drie eindproducten, namelijk rookgassen, de gerecupereerde warmte en assen die opgedeeld kunnen worden in bodemassen en vliegassen. De hete rookgassen worden ook hier gebruikt om stoom te produceren die dan geleid wordt naar een stoomturbine. Bij de verbranding van gevaarlijk afval worden eventuele zware metalen bijna volledig geconcentreerd in de bodemassen, vliegassen en eventueel in een filterkoek die ontstaat na het zuiveren van het afvalwater. Dit afvalwater is het gevolg van het zuiveren van de rookgassen. Indien deze assen en filterkoek vervuild zijn met zware metalen worden ze na immobilisatie gestort. (Jacobs *et al.*, 2003)

Het thermisch rendement van een draaitrommeloven ligt rond 80 procent, in het geval van het verbranden van voeding met een hoge calorische waarde. Het elektrisch rendement daarentegen

ligt lager dan bij de vorige twee oventypes. Dit komt doordat een draaitrommel in de eerste plaats wordt gebruikt om gevaarlijke restafvalstoffen op een gecontroleerde manier te verwijderen. (Jacobs *et al.*, 2003)

Een draaitrommeloven heeft twee belangrijke voordelen ten opzichte van andere verbrandingsinstallaties. De trommel is van staal en heeft een vuurvaste bekleding. Dit maakt de oven robuust. Het systeem kan hierdoor ook een brede range aan stoffen in verschillende vormen verwerken. Daarnaast is het bij een draaitrommeloven mogelijk om, met een redelijke stabiliteit, een proces op vrij hoge temperatuur uit te voeren. Toch heeft de oven een belangrijk nadeel. De onderhoudskosten zijn namelijk vrij hoog. De onderhoudswerkzaamheden zijn noodzakelijk juist omwille van de gevaarlijke restafvalstoffen die er in verbrand worden. Ook de vervuilende emissies die het verbranden van gevaarlijk afval met zich meebrengen en het zuiveren van deze emissies vragen meer onderhoud dan bij andere verbrandingsinstallaties. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

3.2.1.4 Toroïdaal bed

Verbranding van biomassa is ook mogelijk in een toroïdaal bed. Als voeding wordt er best gebruik gemaakt van deeltjes die niet groter zijn dan 15 centimeter en die goed gedroogd zijn. Meestal wordt er gebruik gemaakt van organisch afval dat bestaat uit minstens 85 procent droog stof. De reactor van een toroïdaal bed is een cilindervormige ruimte. De bodem van deze ruimte bestaat uit schuingestelde bladen. Doordat de bladen schuin staan, ontstaan er aan de bodem smalle spleten. Hierdoor wordt lucht aan een hoge snelheid de reactieruimte ingeblazen. Door de uitvoering van de bladen komt de lucht met een draaiende beweging in de cilinder. Hierdoor ontstaat er een soort van kleine windhoos. De brandstof wordt van bovenuit toegevoerd en wordt door de ronddraaiende lucht opgetild en naar boven gesleept. Dus er ontstaat een ronddraaiend, bewegend bed van lucht en zwevende brandstofdeeltjes. Dit wordt dan ontstoken bij een temperatuur van om en bij 850°C tot 1000°C. Deeltjes zijn die niet helemaal verbrand de bovenkant van de reactor bereiken, worden daar afgescheiden. De hete rookgassen die het toroïdaal bed verlaten worden benut voor de productie van elektriciteit en/of warmte. Maar ook hier blijven assen over die gestort moeten worden. Het zuiveren van de rookgassen kan ook een residu opleveren. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

Het rendement voor de opwekking van elektriciteit bedraagt ongeveer 30 procent, voor de productie van warmte is dit rendement circa 92 procent. Toch is een toroïdaal bed economisch gezien enkel interessant indien er minstens 2 000 ton per jaar in wordt verbrand. Een interessant voordeel bij deze techniek is dat er in het rookgas weinig koolmonoxide en koolwaterstoffen zitten. Bovendien kan het elektrisch rendement van een toroïdaal bed verhoogd worden door de

geproduceerde hete rookgassen te koppelen aan een kolengestookte elektriciteitscentrale. Hierdoor kunnen bij bepaalde biomassasoorten elektrische rendementen van 40 procent worden gehaald. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

Een toroïdaal bed met een verwerkingscapaciteit van ongeveer 1 000 ton biomassa per jaar brengt een investeringsuitgave met zich mee van 150 000 EUR tot 300 000 EUR, onder de voorwaarde dat men geen elektriciteit wil produceren en dus enkel warmte wil winnen uit de biomassa. Indien men de hete rookgassen koppelt aan een kolengestookte elektriciteitscentrale met een capaciteit tussen 100 000 en 200 000 ton per jaar, moet men rekenen op een investering van 6 tot 10 miljoen EUR. (Energie uit afval en biomassa, 2007)

3.2.2 Samenvattende tabel

In de volgende tabel worden de belangrijkste kenmerken van de verschillende oventypes weergegeven. In de tweede kolom staat het gemiddeld elektrisch rendement en in de derde kolom het gemiddeld thermisch rendement.

Tabel 3: Samenvattende tabel oventypes

| Type | η_e | η_t | Voordelen | Nadelen |
|------------------|----------|----------|---|--|
| Roosteroven | 13%-30% | 85% | <ul style="list-style-type: none"> - Afzetting bodemas - Nuttige rest-producten, zoals ijzer | <ul style="list-style-type: none"> - Laag elektrisch rendement - Voeding moet een vaste vorm hebben - Enkel verbranding laag calorische voeding |
| Wervelbedoven | 23%-30% | 92% | <ul style="list-style-type: none"> - Afzetting bodemas - Samenstelling van de verbrandingsproducten kan veranderd worden - Mogelijkheid tot verbranding hoog calorische voeding - Ook slibverbranding is mogelijk | <ul style="list-style-type: none"> - Laag elektrisch rendement bij verbranding laag calorische voeding - Voeding heeft voorbehandeling nodig |
| Draaitrommeloven | < 20% | 80% | <ul style="list-style-type: none"> - Geschikt voor brede range aan voedingen; ook gevaarlijk afval - Mogelijk om met zeer hoge T te werken - Mogelijkheid tot verbranden van zowel laag als hoog calorische voeding | <ul style="list-style-type: none"> - Laag elektrisch rendement - Hoge onderhoudskosten - Milieu-vervuilende emissies |
| Toroïdaal bed | 30%-40% | 92% | <ul style="list-style-type: none"> - Weinig koolmonoxide en koolwaterstoffen in het rookgas aanwezig - Koppeling mogelijk met kolengestookte elektriciteitscentrale | <ul style="list-style-type: none"> - De voeding moet in de vorm van kleine deeltjes + voldoende droog zijn |

3.2.3 Coverbranding

Bij de volgende technieken worden bestaande installaties gebruikt.

3.2.3.1 Kolengestookt

Allereerst kan men meestoken in een kolengestookte elektriciteitscentrale. Meestoken wil zeggen dat een biomassa-stroom gelijktijdig met fossiele brandstoffen wordt verbrand in de ketel van een elektriciteitscentrale. Hieraan zijn enkele technische uitdagingen verbonden. De gebruikte biomassa moet vaak eerst worden voorbehandeld. Een eerste reden hiervoor is dat biomassa doorgaans veel meer vocht bevat dan steenkool. Daarnaast wordt de steenkool doorgaans eerst fijngemalen tot een soort steenkoolpoeder dat dan door middel van een sterke luchtstroom naar de branders wordt geblazen. Ook de gebruikte biomassa moet in dit opzicht meestal worden voorbehandeld om tot een deeltjesgrootte te komen, zodat het materiaal in dezelfde tijd verbrandt als het poederkool. Dit is het meest gunstige voor de energieopwekking, want hoe beter de brandstof verbrandt, hoe meer energie er kan worden opgewekt. Ook wat opslag en transport betreffen moet er een goede organisatie zijn. Biomassa heeft vaak een lage energiedichtheid in vergelijking met steenkool (bijvoorbeeld: hout: ± 18 GJ/ton en steenkool: ± 30 GJ/ton). Andere uitdagingen hebben betrekking op de emissies die vrijkomen of mogelijk corrosie van het materiaal van de steenkoolcentrale. Het vlieggas dat als reststof achterblijft na verbranding van steenkool wordt normalerwijze afgezet in de betonsector. Co-verbranding zorgt ervoor dat de samenstelling van het vlieggas verandert. De betonindustrie hanteert standaarden waaraan het vlieggas moet voldoen en hierbij houdt men enkel rekening met vlieggas afkomstig van de verbranding van steenkool. De gehanteerde standaarden voor vlieggas zouden dus moeten worden aangepast aan co-verbranding, maar tot op de dag van vandaag is het voor de betonindustrie niet duidelijk welke concrete veranderingen er doorgevoerd zouden moeten worden. (Baxter, 2005)

De toevoeging van biomassa in een steenkoolcentrale heeft algemeen genomen weinig invloed op de efficiëntie van de centrale. Toch is er meestal een lichte afname van de efficiëntie in plaats van een toename. Dit komt onder andere door een toename van vocht in de brandstof en de nood aan een energie-intensieve voorbehandeling van de biomassa. Het omzettingsrendement van de biomassa bij co-verbranding ligt tussen 30 en 38 procent. In vergelijking met conversietechnieken die werken op basis van enkel biomassa ligt het omzettingsrendement van biomassa bij co-verbranding hoger. (Baxter, 2005)

Het gebruik van biomassa-stromen in een kolengestookte centrale brengt hogere kosten met zich mee dan wanneer men in de centrale enkel kolen blijft stookt. Ten eerste zijn er de installatiekosten die een omschakeling naar co-verbranding met zich meebrengen. Deze variëren

van 30 EUR tot 180 EUR per kW aan biomassacapaciteit. Voor kolen bedragen deze installatiekosten ongeveer 550 EUR per kW aan steenkoolcapaciteit. De vergelijking tussen deze kosten gaat echter niet op omdat men voor co-verbranding gebruik maakt van een bestaande installatie zonder de capaciteit uit te breiden. De installatiekosten voor de steenkool zijn in het verleden al gemaakt en bijgevolg niet meer relevant. Indien de overschakeling naar co-verbranding wel gepaard gaat met een capaciteitsuitbreiding liggen de installatiekosten uiteraard een stuk hoger. Ten tweede vergt co-verbranding hogere werkingskosten dan wanneer men enkel steenkool gebruikt. Biomassa is in vergelijking met steenkool duur, zeker wanneer deze biomassa afkomstig is van energieteelten. En zelfs indien men biomassa-afval gebruikt, wat in principe geen aankoopkosten met zich meebrengt, dan nog brengen transport, opslag en voorbehandeling van de biomassa kosten met zich mee. Kosten, die gemiddeld hoger liggen dan deze voor de steenkool. (Baxter, 2005)

Financieel gezien is het omschakelen naar co-verbranding dus niet interessant. Enkel om redenen van CO₂-reductie lijkt het zinvol om over te schakelen van steenkoolverbranding naar co-verbranding. Volgens de International Energy Agency Bioenergy Task group 32 biedt het meeverbranden van biomassa in een steenkoolcentrale toch enkele opmerkelijke voordelen in vergelijking met hernieuwbare energietechnologieën. Zo heeft co-verbranding een korte ontwikkelingsperiode nodig, brengt de techniek weinig risico's met zich mee en is in vergelijking met andere groene technologieën niet duur.

3.2.3.2 Cementgestookt

Vervolgens kan men biomassa ook meestoken in een cementoven. In een cementoven wordt gemalen klinker met allerlei toeslagstoffen vermengd tot men cement verkrijgt. Ook de klinker zelf wordt in de cementoven gevormd. Hiervoor worden grondstoffen gebruikt zoals kalk en ijzeroxide. Om deze grondstoffen om te vormen tot de benodigde klinkers moeten er verschillende temperatuurfasen doorlopen worden. De grondstoffen worden hierbij opgewarmd door middel van rookgassen. Het is dus belangrijk dat de temperatuur in elke fase goed gecontroleerd kan worden en dat de grondstoffen tot de juiste temperatuur kunnen opgewarmd worden. Als gevolg hiervan vraagt de productie van cement veel energie. In de praktijk heeft één ton klinker nood aan 3 000 MJ en bij sommige processen zelfs tot 7 000 MJ energie. In theorie is er echter maar nood aan ongeveer 1 800 MJ energie per ton klinker. Het energetisch rendement ligt dus vrij laag, variërend tussen 25 en 60 procent. De energiekosten bij een cementoven kunnen tot 40 procent bedragen van de totale productiekosten. (Jacobs *et al.*, 2003)

Cementovens worden vaak met fossiele brandstoffen gestookt, voornamelijk cokes en steenkool. Maar het is in principe mogelijk om aan dit mengsel een grote variëteit aan alternatieve

brandstoffen toe te voegen, zonder nadelige invloed te hebben op de kwaliteit van het cement. Biomassa-afval kan dus meegestookt worden. Maar omwille van de hoge temperatuureisen is de keuze voor afvalstoffen met een hoge calorische waarde aangewezen. De energie-inhoud van de afvalstoffen moet minstens 6 MJ per ton zijn. Houtafval bijvoorbeeld is dus een goed alternatief voor fossiele brandstoffen in een cementoven. Waterzuiveringsslib heeft een niet zo hoge calorische waarde, maar kan toch meegestookt worden in een cementoven omdat in het slib grondstoffen aanwezig zijn die nodig zijn voor de vorming van de klinkers, zoals kalk. (Jacobs *et al.*, 2003)

De productie van cement zorgt ervoor dat er allerlei emissies vrijkomen. Een cementoven produceert geen afvalwater, maar zorgt wel voor luchtverontreiniging. Zo komen er heel wat stikstofoxiden en dioxines vrij. In de praktijk is het mogelijk om cement te produceren zonder dat er restafvalstoffen achterblijven. In de rookgassen die gebruikt worden om de grondstoffen op temperatuur te krijgen zodat er klinkers gevormd worden, kunnen fijne stofdeeltjes zitten. Dit zijn vaak resten van kalk of klei. Deze stofdeeltjes kunnen uit de rookgassen gewassen worden en terug als grondstof in de cementoven gebracht worden. (Jacobs *et al.*, 2003)

Het gebruik van biomassa-afval ter vervanging van fossiele brandstoffen in een cementoven levert een kostenbesparing op. De Technische Universiteit van Delft heeft berekend wat deze besparing kan zijn per ton gebruikt afval. Indien men bijvoorbeeld houtafval zou gebruiken dat een calorische waarde heeft van 15 MJ per ton, levert dit een kostenbesparing op van circa 25 EUR per ton houtafval.

3.2.3.3 Gasgestookt

Biomassa kan omgezet worden in warmte of gas om daarna elektriciteit te produceren. Er zijn hierbij twee mogelijkheden. Ten eerste kan men biomassa omzetten naar een gas via vergassing of pyrolyse en dit gas daarna verbranden in een gasmotor of gasturbine. Dit noemt men interne verbranding. Biomassa kan ook extern verbrand worden. Dit wordt bijvoorbeeld gedaan in Stirling motoren. Bij dit soort motoren wordt waterstofgas of heliumgas achtereenvolgens gecomprimeerd, verwarmd en geëxpandeerd. Hierbij komt er een kracht vrij die een elektromotor aandrijft. De benodigde warmte voor het waterstofgas of heliumgas kan men halen uit de warmte die vrijkomt bij de verbranding van biomassa. Interne verbranding kan hoge rendementen halen, maar de rookgassen die hierbij vrijkomen, moeten gereinigd worden. Externe verbranding heeft maar beperkte omzettingsrendementen, maximaal 30 tot 35 procent. Hier moeten er echter geen rookgassen gereinigd worden. De voordelen van externe en interne verbranding kunnen gecombineerd worden door natuurlijk gas en biomassa samen te stoken. Hierbij worden dus hogere rendementen gehaald en rookgasreiniging is niet nodig. (De Ruyck *et al.*, 2007)

Biomassa wordt extern verbrand en de warmte die hierbij vrijkomt, wordt gebruikt om het natuurlijk gas te transformeren in hoofdzakelijk waterstof en koolstofmonoxide. De energie-inhoud van de biomassa wordt dus aangewend om het natuurlijk gas om te zetten naar een synthetisch gas. De maximale hoeveelheid biomassa die ingezet kan worden zonder een effect te hebben op de efficiëntie van het proces is 5 procent van de totale energie input. (De Ruyck *et al.*, 2007)

3.3 Impact van verbranding op het milieu

Zoals eerder al vermeld is de verbranding van biomassa CO₂-neutraal, vanwege het hernieuwbare karakter van het materiaal. Niet-neutrale of indirecte CO₂-emissies zijn over het algemeen vrij beperkt. (Mineco, 2007) Daarnaast kunnen bij het gebruik van vervuilde biomassa milieubelastende restproducten vrijkomen zoals stikstofoxiden, kwik, stof en overige emissies (zoals zware metalen), afhankelijk van de samenstelling van de biomassa, het omzettingsproces en de eventueel aanwezige rookgasreiniging. (Bio-energy, 2007)

De emissies die vrijkomen bij het verbranden van biomassa zijn in Vlaanderen gebonden aan bepaalde voorwaarden. Een onderscheid wordt niet gemaakt tussen de emissievoorwaarden voor biomassa-afval en biomassa, met uitzondering van onbehandeld houtafval en de strengere emissievoorwaarden voor niet-verontreinigd behandeld houtafval. Uit VLAREM II halen we ter illustratie volgende tabel met emissiegrenswaarden. In de tabel staan de maximaal toelaatbare concentraties van bepaalde stoffen in de rookgassen. De verbrandingsinstallaties worden telkens ingedeeld in drie groepen al naargelang het nominaal thermisch vermogen van de installatie.

Tabel 4: Emissiegrenswaarden voor biomassa-afval, met uitzondering van niet-verontreinigd behandeld hout-afval

| Emissiegrenswaarden in mg/Nm ³ in functie van het nominaal thermisch vermogen van de verbrandingsinstallatie | | | |
|---|-----------------|---|---------------|
| | tot en met 5 MW | meer dan 5 MW tot 50 MW | 50 MW en meer |
| 1. totaal stof | 150 | 30 | 10 |
| 2. koolmonoxide (CO) | 250 | 200 | 100 |
| 3. stikstofoxiden (NO _x) uitgedrukt als NO ₂ | 400 | - 400 voor installaties tot en met 30 MW - 200 voor installaties vanaf 30 MW | 200 |
| 4. zwaveldioxide (SO ₂) | 300 | 300 | 50 |
| 5. dioxinen en furanen uitgedrukt in ng TEQ/Nm ³ | - | 0,1 | 0,1 |

Bron: VLAREM II

3.4 Fiscale voordelen en subsidies

De overheid biedt ecologiepremies aan voor investeringen in installaties die een vermindering van de milieubelasting opleveren, voor zover deze installaties een meerkost hebben ten opzichte van klassieke installaties. De premie bedraagt 25 tot 30 procent van de meerkost. De premie is bedoeld als financiële stimulans voor ondernemingen die in het Vlaamse Gewest volgende ecologie-investeringen willen realiseren: milieu-investeringen of investeringen op energiegebied. (Vlaams Energieagentschap, 2007)

Daarnaast bestaat er een fiscaal voordeel in de vorm van een verhoogde investeringsaftrek op de belastbare winst voor energiebesparende investeringen. De aftrek wordt verricht op de winst van het belastbare tijdperk waarbinnen de vaste activa zijn verkregen of tot stand zijn gebracht. Voor de energiebesparende investeringen, gedaan tijdens een bepaald inkomstenjaar is er een verhoogde aftrek. Voor inkomstenjaar 2007 bedraagt de verhoogde aftrek 13,5 procent. (Vlaams Energieagentschap, 2007)

Er kunnen voor de productie van elektriciteit uit biomassa bovendien groenestroomcertificaten worden aangevraagd. Deze aanvraag moet worden gedaan door de eigenaar van de elektriciteit uit hernieuwbare bronnen en dit op het moment van de productie ervan. Groenestroomcertificaten komen in aanmerking bij bedrijven die met een overschot aan elektriciteit zitten en dit overschot aan het elektriciteitsnet willen verkopen. In geval van goedkeuring van de aanvraag wordt er één certificaat per 1 000 kWh netto groenestroomproductie uitgereikt. Met netto groenestroomproductie wil men zeggen dat van de bruto groenestroomproductie alle gebruikte energie tijdens het produceren van deze groene energie moet worden afgetrokken. Er moet wel aan een aantal voorwaarden voldaan zijn, vooraleer de aanvraag goedgekeurd kan worden. Zo moet er een keuringsverslag worden toegevoegd bij de aanvraag voor installaties die meer dan 100 000 kWh elektriciteit per jaar opwekken. Enkel erkende organismen voor het gelijkvormigheidsonderzoek of de controle van de elektrische installaties zijn bevoegd om zo een keuringsverslag op te stellen.

Wanneer een installatie meer dan 1 000 000 kWh per jaar aan elektriciteit produceert, moet er om de twee jaar een nieuw keuringsverslag worden opgesteld. Alleen op deze manier kan het bedrijf groenestroomcertificaten blijven krijgen voor de installatie. Daarnaast kan de VREG (Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt) op eender welk moment bijkomende controles uitvoeren om na te gaan of de vaststellingen in het keuringsrapport wel overeenkomen met de werkelijkheid. Deze bijkomende controles kunnen door de VREG zelf worden uitgevoerd of door een bevoegde instantie. (VREG, 2007)

Indien de aanvraag van een bedrijf goedgekeurd is, ontvangt het dus groenestroomcertificaten. Deze certificaten kunnen dan verkocht worden aan elektriciteitsproducenten. Zij zijn immers verplicht voor een bepaald aandeel van hun verkochte stroom zo een certificaat voor te leggen. Dit aandeel loopt van 2 procent in 2004 tot 6 procent in 2010. Aan deze opgelegde verplichting kan op twee manieren worden voldaan. Ofwel produceert de elektriciteitsproducent zelf stroom uit hernieuwbare energiebronnen. Ofwel kopen de producenten groenestroomcertificaten aan op de markt. De prijs van de certificaten op deze markt wordt bepaald door vraag en aanbod. Bij de VREG (2008) kunnen we vinden dat er in de periode van 1 april 2007 tot en met 31 maart 2008 in Vlaanderen 974 862 groenestroomcertificaten verhandeld werden aan een gemiddelde prijs van 108,56 EUR per certificaat. Indien er een tekort is op de markt aan groenestroomcertificaten, dan zal de marktwaarde ervan aanleunen bij de waarde van de boete. Indien er echter een overschot is aan groenestroomcertificaten, dan zal de marktwaarde dalen. Dit laatste probeert de overheid te vermijden door de mogelijkheid te geven aan de eigenaars van groenestroomcertificaten om hun certificaten in te leveren tegen een minimumwaarde van 80 EUR in het geval van biomassa bij de distributienetbeheerders. Als elektriciteitsproducenten het aantal vereiste groenestroomcertificaten niet kunnen voorleggen, worden ze beboet. Deze boete bedraagt 125 EUR per ontbrekend certificaat. (Vlaams Energieagentschap, 2007)

Naast groenestroomcertificaten bestaan er ook warmtekrachtcertificaten. Deze laatste certificaten worden uitgereikt voor primaire energiebesparing met kwalitatieve warmtekrachtkoppeling. De twee certificaten systemen zijn gelijkaardig, maar toch zijn er enkele belangrijke verschillen. Net zoals bij groenestroomcertificaten worden warmtekrachtcertificaten uitgereikt door de VREG. De eigenaar van de certificaten kan dan vervolgens deze certificaten verkopen aan elektriciteitsleveranciers. Ook hier wordt de prijs bepaald door vraag en aanbod op de markt. Het boetesysteem voor ontbrekende certificaten bij de elektriciteitsleveranciers is ook hier geldig. Het grootste verschil tussen groenestroomcertificaten en warmtekrachtcertificaten ligt in de berekening van het aantal toegekende certificaten. Bij groenestroomcertificaten krijgt men één certificaat toegekend per 1 000 kWh netto groenestroomproductie. Het systeem van toekenning bij WKK-installaties ligt ingewikkelder. Een WKK-installatie produceert tegelijk warmte en elektriciteit en bespaart hierdoor primaire brandstof in vergelijking met een gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit. Het is die besparing van primaire energie die de basis vormt voor de toekenning van warmtekrachtcertificaten. Er wordt namelijk één certificaat toegekend per gerealiseerde MWh primaire energiebesparing. En dit wordt maandelijks door de VREG gedaan. De concrete formules die hierbij gebruikt worden, komen in Paragraaf 5.3.4.3 aan bod. (Mertens, 2007)

Een opmerking is dat de WKK-installatie een kwalitatieve WKK-installatie moet zijn om in aanmerking te komen voor warmtekrachtcertificaten. Dit wil zeggen dat de WKK-installatie gemiddeld over de laatste twaalf maanden een relatieve primaire energiebesparing heeft gerealiseerd van minimaal 10 procent. En dit in vergelijking met installaties voor een gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit. (Vlaamse Codex, 2008)

De boete voor de elektriciteitsleveranciers per ontbrekend warmtekrachtcertificaat ligt niet zo hoog als bij groenestroomcertificaten. Vanaf 31 maart 2007 is deze boete vastgesteld op 45 EUR per ontbrekend certificaat. Ook bij deze warmtekrachtcertificaten bepaalt de boete de maximale marktprijs. Toch kan hier een uitzondering optreden. Het aankopen van warmtekrachtcertificaten is namelijk aftrekbaar van de belastingen. Het betalen van een boete per ontbrekend certificaat is dit uiteraard niet. Dit kan ervoor zorgen dat de uiteindelijke marktprijs iets hoger ligt dan het bedrag van de boete. Een schaarste aan warmtekrachtcertificaten is in ieder geval nodig om ervoor te zorgen dat de marktprijs van één certificaat ongeveer gelijk is aan het bedrag van de boete. Een te groot aanbod van certificaten op de markt doet de prijs immers dalen. De schaarste aan certificaten kan verzekerd worden door de quota met betrekking tot het aantal verplicht voor te leggen warmtekrachtcertificaten voor de elektriciteitsleveranciers voldoende hoog vast te leggen. Voor 2012 is dit quotum vastgesteld op 5,23 procent van de totale elektriciteitsleveringen in Vlaanderen. (Mertens, 2007) Daarnaast is er sinds 2006 een minimumwaarde vastgesteld voor één warmtekrachtcertificaat. Deze bedraagt 27 EUR. (Vlaamse Codex, 2008)

Om het verschil tussen groenestroomcertificaten en warmtekrachtcertificaten duidelijk te houden zijn de belangrijkste kenmerken van beide certificaten terug te vinden in volgende tabel. De cijfers zijn afkomstig van VREG (2008) en Vlaamse Codex (2008).

Tabel 5: Certificaten

| | Groenestroomcertificaten | Warmtekrachtcertificaten |
|-----------------------------------|--|---|
| Toekenning certificaten door VREG | 1 certificaat per 1 000 kWh netto groenestroomproductie | 1 certificaat per gerealiseerde MWh primaire energiebesparing |
| Prijs | Bepaald door vraag en aanbod → gemiddelde prijs: 108,56 EUR per certificaat (periode 1 april 2007 - 31 maart 2008) | Bepaald door vraag en aanbod → gemiddelde prijs: 41,48 EUR per certificaat (periode 1 april 2007 - 31 maart 2008) |
| Aantal verhandelde certificaten | 974 862 certificaten (periode 1 april 2007 - 31 maart 2008) | 978 728 certificaten (periode 1 april 2007 - 31 maart april) |
| Minimumwaarde | 80 EUR | 27 EUR |
| Boete per ontbrekend certificaat | 125 EUR | 45 EUR |

3.5 Vergunningen

Voor het uitbaten van een biomassa omzettingcentrale is een stedenbouwkundige en een milieuvergunning noodzakelijk. Dit valt onder de wetgeving inzake milieuvergunning en haar uitvoeringsdecreet VLAREM I en VLAREM II. Voor de vergunningen wordt er een onderscheid gemaakt tussen biomassa en biomassa-afval. Zo wordt de verbranding van biomassa vergund als een stookinstallatie. De verbranding van biomassa-afval daarentegen wordt vergund als afvalverbranding. Voor de emissievergunningen wordt er geen onderscheid gemaakt tussen biomassa en biomassa-afval. Vlarem I beschrijft welke procedure gevolgd moet worden om een milieuvergunning te verkrijgen. Ook is er een lijst beschikbaar van alle activiteiten waarvoor men een vergunning moet aanvragen. Wat betreft de emissievergunningen moet men rekening houden met een uitzondering. Houtafval wordt wel opgesplitst in onbehandeld, niet verontreinigd behandeld en verontreinigd behandeld houtafval. Hiervoor gelden verschillende emissievergunningen. (Geurds *et al.*, 2006)

ECONOMISCH LUIK

Hoofdstuk 4: Korte omloophout

4.1 Inleiding

In Hoofdstuk 5: Kosten-batenanalyse wordt een model uitgewerkt om na te gaan of de investering in een verbrandingsinstallatie voor de productie van elektriciteit (en eventueel warmte) rendabel is. Deze rendabiliteit hangt voor een stuk af van de gekozen brandstof voor de installatie. In deze gevalstudie werken we met korte omloophout als brandstof. Korte omloophout is al besproken bij de energieteelten (zie 2.3.2). Dit hoofdstuk gaat hier dieper op in, vooral dan vanuit het standpunt van de landbouwer. Vragen zoals: "Hoeveel korte omloophout levert één hectare op?" en "Hoeveel bedraagt de energieconsumptie per hectare?" krijgen een antwoord in dit hoofdstuk.

Het totale landbouwareaal in België bedraagt 1 382 390 hectare in het jaar 2006. In totaal waren er in datzelfde jaar 49 850 land- en tuinbouwbedrijven. (ADSEI, 2007) Dit geeft dus een gemiddelde oppervlakte per bedrijf van afgerond 27,7 hectare. Volgens het Vlaams Informatiecentrum over Land- en Tuinbouw bedraagt de gemiddelde oppervlakte aan cultuurgrond per bedrijf in Vlaanderen 17,4 ha in het jaar 2005. (VILT, 2008) De Vlaamse Overheid (Landbouw en Visserij) geeft aan dat de oppervlakte aan cultuurgrond in het jaar 2005 in Vlaanderen 629 684 ha bedroeg, terwijl het aantal bedrijven 34 410 bedroeg. Dit geeft een gemiddelde oppervlakte per bedrijf van ca. 18,3 ha. (Vlaamse Overheid - Landbouw en Visserij, 2008)

Veronderstel dat een landbouwer met 27,7 hectare beschikbare landbouwgrond beslist om korte omloophout te telen. Een landbouwer zal niet beslissen om volledig over te schakelen op korte omloophout, omdat de energieteelten nog steeds als risicovol worden gepercipieerd. Bovendien levert korte omloophout slechts om de drie jaar (dit is de oogstfrequentie) inkomsten op. We nemen daarom naar analogie met García *et al.* (2003) aan dat één landbouwer slechts één tiende van zijn areaal zal bezetten met korte omloophout. Populier en wilg worden het meest gebruikt als korte omloophout. De gegevens te vinden in de geraadpleegde bronnen voor wilg lopen uiteen ten opzichte van de gegevens van populier. Deze case werkt daarom met de gegevens van populier.

Extensieve biomassabouw houdt in dat er niet bemest of geïrrigeerd wordt. Wel kan er eventueel aan onkruidbestrijding gedaan worden. Onder de term gematigd intensieve biomassabouw verstaat men het gebruiken van een minimale stikstofbemesting en een eventuele onkruidbestrijding, maar geen irrigatie. Bij intensieve biomassabouw is de bemesting intensief en past men irrigatie toe bij droogte. Daarna wordt onkruid actief bestreden.

Tabel 6: Overzicht gegevens populier

| Bron | Extensieve biomassabouw - Opbrengst in ton droge stof (= tds) per ha en per jaar | Gematigd intensieve biomassabouw - Opbrengst in ton droge stof (= tds) per ha en per jaar | Intensieve biomassabouw - Opbrengst in ton droge stof (= tds) per ha en per jaar | Plantdichtheid per hectare (stekken per ha) | Rotatielengte (aantal jaar) |
|----------------------------------|--|---|--|---|-----------------------------|
| Vande Walle <i>et al.</i> (2007) | 3,5 | - | - | 20 000 | 4 |
| Nonhebel (2002) | 5 | - | 10 - 20 | 10 000 | - |
| Laureysens <i>et al.</i> (2004) | 1,1 - 14,3 | 10 - 15 | 20 - 25 | 10 000 | 4 |
| Deckmyn <i>et al.</i> (2004) | - | 12,4 | 22,45 | 10 000 | 3 - 4 |
| Ceulemans en Deraedt (1999) | - | - | 20 - 25 | 10 000 | - |
| Mitchell <i>et al.</i> (1999) | - | 8 - 12 | - | - | - |
| García <i>et al.</i> (2003) | - | 9,4 - 10,8 | - | 10 000 - 20 000 | 3 - 5 |

Tabel 7: Overzicht gegevens wilg

| Bron | Extensieve biomassabouw - Opbrengst in ton droge stof (= tds) per ha en per jaar | Gematigd intensieve biomassabouw - Opbrengst in ton droge stof (= tds) per ha en per jaar | Intensieve biomassabouw - Opbrengst in ton droge stof (= tds) per ha en per jaar | Plantdichtheid per hectare (stekken per ha) | Rotatielengte (aantal jaar) |
|----------------------------------|--|---|--|---|-----------------------------|
| Vande Walle <i>et al.</i> (2007) | 3,4 | - | - | 20 000 | 4 |
| Bergkvist en Ledin (1998) | - | 14,2 - 18 | - | 4 400 - 25 000 | 5 |
| Nordh en Verwijst (2004) | - | - | 23,6 - 37,2 | 20 000 | 4 |
| García <i>et al.</i> (2003) | - | 10,4 - 10,8 | - | 10 000 - 20 000 | 3 - 5 |

4.2 Veronderstellingen

In deze case worden volgende veronderstellingen aangenomen:

- 10 000 stammen per hectare
- er wordt om de 4 jaar geoogst
- gematigd intensieve landbouw; de opbrengst per oogst = 8 - 12 tds/ha
- geen bijkomende irrigatie
- wel een minimale stikstofbemesting; populier neemt veel stikstof op uit de bodem; bij het oogsten gaat een deel van die stikstof verloren en dus daalt op lange termijn de gemiddelde opbrengst indien er niet met stikstof wordt bemest

Korte omloophout wordt geoogst in de winter, bij voorkeur wanneer de ondergrond bevroren is, om de schade veroorzaakt door de oogstmachine te beperken. Dat betekent dat het vallen van de bladeren in de herfst voorafgaat aan de oogst. Deze bladeren bevatten stikstof, waardoor een gedeelte van de door het hout opgenomen nutriënten terug in de bodem terechtkomen. Dat beperkt de noodzakelijke stikstofbemesting tot de hoeveelheid stikstof die bij het oogsten verloren gaat, d.i. de stikstof vervat in de biomassa zonder bladeren.

4.3 Energieopbrengst

De berekeningen worden uitgevoerd per ha. Na 4 jaar kan er een eerste keer geoogst worden. De opbrengst per ha is 8 tot 12 ton droog stof. De calorische waarde van hout bedraagt 18 GJ per ton droog stof. Dit geeft een bruto energieopbrengst van **144 - 216 GJ per ha**.

Deze energieopbrengst is bruto, aangezien er geen rekening wordt gehouden met het energieverbruik tijdens teelt, oogst en transport. Bij García *et al.* (2003) vinden we een schatting van het energieverbruik tijdens de teelt en de oogst per hectare. Er wordt hierbij een onderscheid gemaakt tussen populier geteeld met en zonder kunstmest. Er worden geen organische meststoffen gebruikt, enkel kunstmeststoffen om in de bemestingsbehoeften van populier te voorzien. Verder vermelden García *et al.* (2003) dat "het gebruik van kunstmest en plantenbeschermingsmiddelen relatief bescheiden is". In de veronderstellingen hierboven vermeld, wordt er van uitgegaan dat er aan gematigd intensieve landbouw wordt gedaan. De cijfers uit García *et al.* (2003) behorend bij het geval waar de populier wel kunstmeststoffen toegediend krijgt, vullen deze veronderstelling het best in.

Daarnaast maken García *et al.* (2003) ook nog een onderscheid tussen het oogsten met velddroging of het oogsten met een onmiddellijke verkleining. Beide methodes hebben hun voor- en nadelen. Wanneer men oogst en het hout daarna op het veld laat drogen, bespaart men veel energie omdat er geen bijkomende energie wordt gebruikt om het hout bijvoorbeeld mechanisch te drogen. Dit heeft echter een keerzijde. Het drogen op het veld heeft voor populier een verlies aan droog stof tot gevolg van 13 procent. Dit percentage is ook terug te vinden bij Sintzoff *et al.* (2001). Langs de andere kant vraagt het onmiddellijk verkleinen wel extra energie voor het drogen van het hout. Het verlies aan droog stof als gevolg van velddroging speelt hier geen rol. In deze case wordt er van uitgegaan dat het hout op het veld wordt gedroogd en daarna pas verkleind.

Samenvattend worden volgende veronderstellingen aangenomen: populier wordt geteeld met kunstmeststoffen en na het oogsten wordt het hout op het veld gedroogd. Het totaal energieverbruik tijdens de teelt volgens García *et al.* (2003) bedraagt 11,178 GJ/ha. De totale netto energieopbrengst wordt bijgevolg als volgt berekend: er is een opbrengst van 8 - 12 ton droog stof per hectare. Volledigheidshalve verminderen we deze opbrengst met 13 procent omwille van het drogen van het hout na de oogst op het veld. De opbrengst droog stof per hectare is dus gereduceerd tot 6,96 - 10,44 ton. In verdere berekeningen vertrekken we van de middelste waarde uit deze range, met name 8,7 tds/ha. De energie-inhoud of calorische waarde van hout bedraagt 18 GJ/tds. De bruto energieopbrengst per hectare bedraagt bijgevolg 156,6 GJ per hectare. Deze bruto energieopbrengst wordt verminderd met het energieverbruik tijdens de teelt en de oogst om een energieopbrengst te bekomen van 145,42 GJ per hectare. Ter vergelijking: bij García *et al.* (2003) vinden we als netto energieopbrengst bij populier met kunstmest en met

velddroging na het oogsten een waarde van 158 GJ per hectare. Eén hectare levert dus een energieopbrengst op van **145,42 GJ**. Dit is nog niet de netto energieopbrengst omdat transport tot nu toe buiten beschouwing bleef.

Na de oogst moet het hout van het veld naar de verbrandingsinstallatie vervoerd worden. Ook dit vraagt energie. Een belangrijke parameter hierbij is uiteraard de afstand van het veld tot de installatie. García *et al.* (2003) hebben op basis van een aantal veronderstellingen een schatting gemaakt van de gebruikte hoeveelheid energie tijdens het transport. Hun methode is als volgt. Op basis van statistische gegevens wordt het percentage landbouwareaal berekend in Vlaanderen. Daarnaast wordt verondersteld dat wanneer men ergens willekeurig een installatie bouwt, 10 procent van de omliggende landbouwgrond gebruikt wordt voor energieteelten. Deze omliggende gronden vormen het gebied van waaruit hout naar de installatie gevoerd kan worden en wordt bijgevolg het aanvoergebied genoemd. Indien we de veronderstelling van García *et al.* (2003) voor deze gevalstudie volgen krijgt men dus het volgende: de omgeving van een installatie, het aanvoergebied genoemd, bestaat voor een bepaald percentage uit landbouwgrond en 10 procent hiervan wordt aangewend voor de teelt van energiegewassen.

Om het percentage landbouwareaal te berekenen wordt in deze case gewerkt met cijfers voor België en dus niet enkel Vlaanderen. Zoals hierboven werd gedaan voor het berekenen van het gemiddelde landbouwareaal per landbouwer worden ook hier statistische gegevens gebruikt voor het jaar 2006. Het totale landbouwareaal in België bedraagt dat betreffende jaar 1 382 390 hectare. Het totale grondgebied in België beslaat een oppervlakte van 30 528 km² of 3 052 800 hectare. (ADSEI, 2007) Het percentage landbouwgrond in België is dus 1 382 390 ha / 3 052 800 ha of 45 procent. Indien men ergens willekeurig in België een verbrandingsinstallatie bouwt, is 45 procent van de omliggende gronden landbouwgebied en hiervan wordt 10 procent gebruikt om energiegewassen te telen. Of kortweg kan men zeggen dat 4,5 procent van het aanvoergebied rond een installatie bestemd is voor energieteelten.

Vertrekkend van de capaciteit van de verbrandingsinstallatie en gegeven de opbrengst droog stof per hectare, kan de benodigde landbouwoppervlakte berekend worden. Daarnaast kan ook het totale aanvoergebied berekend worden, gebruik makend van het percentage landbouwgrond in het aanvoergebied gebruikt voor energieteelten, hier dus berekend op 4,5 procent. Om het eenvoudig te houden wordt verondersteld dat het aanvoergebied zich in een cirkel rondom de verbrandingsinstallatie bevindt. Op deze manier kan de actieradius berekend worden. De veronderstelling van een cirkelvormig aanvoergebied vinden we niet alleen bij García *et al.* (2003) terug. Ook Fiala *et al.* (1997) en Dornburg en Faaij (2001) maken gebruik van deze veronderstelling. Na het berekenen van de actieradius kan dan ten slotte de vervoersafstand per lading berekend worden. Logischerwijze wordt hierbij de actieradius vermenigvuldigd met twee. De

vervoersafstand per lading is namelijk de som van de afstand afgelegd om de lading hout te halen en terug te keren naar de installatie.

In onderstaande tabel staan de gegevens zoals terug te vinden in García *et al.* (2003).

Tabel 8: Gegevens García et al (2003)

| Gewas/ Techniek | Capaciteit fabriek (ton grondstof per jaar) | Oppervlakte energiegewas (ha) | Oppervlakte aanvoer- gebied (ha) | Actie- radius (km) | Vervoers- afstand per lading (km) |
|--------------------------|--|-------------------------------------|--|--------------------------|---|
| Populier/ Verbranding | 80 000 ton droog stof | 7 407 ha | 155 292 ha | 22 km | 44 km |

Om de berekeningen specifiek voor deze gevalstudie uit te voeren, moeten we eerst weten wat de capaciteit van de verbrandingsinstallatie is. De range van capaciteiten in deze case varieert tussen 5 MW elektriciteitsoutput en 50 MW elektriciteitsoutput. Deze waarden zijn netto, met andere woorden, een verbrandingsinstallatie met een output van 5 MW kan deze 5 MW aan elektriciteit ook effectief afzetten op het elektriciteitsnet. Er is dus al rekening gehouden met de elektrische efficiëntie waarbij volgens Fiala *et al.* (1997) de energieconsumptie tijdens het conversieproces verrekend is in het percentage elektrische efficiëntie. Deze verschillende mogelijke capaciteiten moeten vervolgens vertaald worden in aantal ton droog stof per jaar. Een formule die we hiervoor kunnen gebruiken is terug te vinden bij Caputo *et al.* (2005). De formule stelt dat de netto elektrische output (W_{NE}) gelijk is aan het aantal ton droge stof biomassa (M) maal de elektrische efficiëntie (η_e) maal de lower heating value (LHV). Dit product wordt gedeeld door het aantal werkingsuren voor de productie van elektriciteit (OH) maal 3 600. In formulevorm geeft dit:

$$W_{NE} = \frac{M \times \eta_e \times LHV}{3\,600 \times OH} \quad (1)$$

Met:

- W_{NE} = netto elektrische output (MW = MJ/s);
- M = aantal ton droge stof biomassa (tds);
- η_e = elektrische efficiëntie;
- LHV = lower heating value (MJ/tds);
- OH = aantal werkingsuren (h)

Omgerekend kan uit deze formule dus het aantal ton droge stof biomassa per jaar worden gehaald:

$$M = \frac{W_{NE} \times 3\,600 \times OH}{\eta_e \times LHV} \quad (2)$$

Uitgedrukt in de overeenkomende eenheden blijkt deze formule te kloppen.

$$\begin{aligned} \text{ton} &= (\text{MJ/s} \times \text{s/h} \times \text{h/jaar}) / (\text{MJ/tds}) \\ &= (\text{MJ/jaar}) / (\text{MJ/tds}) \\ &= \text{tds/jaar} \end{aligned}$$

Het aantal werkingsuren voor de productie van elektriciteit wordt bepaald op 7 000 uren en de elektrische efficiëntie op 30 procent. De LHV van het hout bedraagt 18 GJ/tds. Dit is dus gelijk aan 18 000 MJ/tds of 18 MJ/kg. (zie later) Door de formule in te vullen bekomt men Tabel 9.

Tabel 9: Omrekening MW naar ton biomassa

| Aantal MW | $M = \frac{W_{NE} \times 3\,600 \times 7\,000}{0,30 \times 18\,000}$ |
|-----------|--|
| 5 MW | 23 333 tds per jaar |
| 10 MW | 46 667 tds per jaar |
| 20 MW | 93 333 tds per jaar |
| 50 MW | 233 333 tds per jaar |

Vervolgens worden deze getallen in de tweede kolom van Tabel 10 herhaald, omdat ze de basis zijn voor de berekening van de vervoersafstand per lading volgens de methode van García *et al.* (2003). De benodigde oppervlakte voor energiegewassen staat in kolom [3] en wordt berekend door het aantal ton hout per jaar te delen door de opbrengst droog stof per hectare. Zoals hierboven al vermeld, wordt in deze case, na aanpassing met betrekking tot verlies van droog stof door velddroging, gewerkt met een gemiddelde van 8,7 ton droge stof per hectare. In kolom [4] wordt de benodigde oppervlakte van het aanvoergebied berekend. Als men weet wat de benodigde oppervlakte voor energiegewassen is en men vertrekt van de veronderstelling dat 4,5 procent van het aanvoergebied rond een verbrandingsinstallatie bestemd is voor energiegewassen, kan men hieruit eenvoudig de oppervlakte van het aanvoergebied berekenen aan de hand van volgende formule:

$$\text{Oppervlakte aanvoergebied} = \frac{\text{oppervlakte energiegewas}}{0,045} \quad (3)$$

De actieradius in de voorlaatste kolom is in feite de straal van een cirkel. Dit komt voort uit de veronderstelling dat het aanvoergebied een cirkel beschrijft rondom de installatie. De oppervlakte van een cirkel wordt berekend met de formule $\Pi \times R^2$, waarbij R de straal van de cirkel voorstelt. Omgerekend kan de actieradius berekend worden als volgt:

$$R = \sqrt{(\text{oppervlakte aanvoergebied} / \Pi)} \quad (4)$$

In de laatste kolom ten slotte staat de vervoersafstand per lading. Dit is de actieradius vermenigvuldigd met twee. Ter illustratie worden hieronder de berekeningen uitgevoerd voor een capaciteit van 5 MW. Het aantal ton hout per jaar om een elektriciteitsoutput van 5 MW te produceren is 23 333 ton droge stof. Gegeven het aantal ton droge stof per hectare, namelijk 8,7 ton, bedraagt de benodigde oppervlakte voor energiegewassen:

$$\frac{23\,333 \text{ tds}}{8,7 \text{ tds/ha}} = 2\,682 \text{ ha}$$

De oppervlakte van het aanvoergebied bedraagt bijgevolg:

$$\frac{2\,682 \text{ ha}}{0,045} = 59\,600 \text{ ha}$$

Hieruit wordt de actieradius als de straal van een cirkel berekend:

$$\sqrt{596 \text{ km}^2 / \Pi} = 13,8 \text{ km}$$

De vervoersafstand per lading is het dubbele van de actieradius:

$$13,8 \text{ km} \times 2 = 27,6 \text{ km}$$

De resultaten van de overige capaciteiten staan in de tabel weergegeven.

Tabel 10: Berekening vervoersafstand per lading

| Aantal MW [1] | Aantal ton hout per jaar (tds) [2] | Oppervlakte energiegewas (ha) [3] | Oppervlakte aanvoergebied (ha) [4] | Actie- radius (km) [5] | Vervoers- afstand per lading (km) [6] |
|------------------|---|--|---|---------------------------------|--|
| 5 MW | 23 333 | 2 682 | 59 600 | 13,8 | 27,6 |
| 10 MW | 46 667 | 5 364 | 119 200 | 19,5 | 39 |
| 15 MW | 70 000 | 8 046 | 178 800 | 23,9 | 47,8 |
| 20 MW | 93 333 | 10 728 | 238 400 | 27,5 | 55 |
| 25 MW | 116 667 | 13 410 | 298 000 | 30,8 | 61,6 |
| 30 MW | 140 000 | 16 092 | 357 600 | 33,7 | 67,4 |
| 35 MW | 163 333 | 18 774 | 417 200 | 36,4 | 72,8 |
| 40 MW | 186 667 | 21 456 | 476 800 | 39 | 78 |
| 45 MW | 210 000 | 24 138 | 536 400 | 41,3 | 82,6 |
| 50 MW | 233 333 | 26 820 | 596 000 | 43,6 | 87,2 |

De energieconsumptie tijdens het transport wordt door Biewinga en van der Bijl (1996) geschat op 0,8 MJ per ton en per kilometer. Dit cijfer wordt door García *et al.* (2003) overgenomen en ook voor deze gevalstudie gebruikt. Bij het berekenen van de verbruikte energie tijdens transport wordt ook vaak de energieconsumptie meegerekend van het drogen van het hout. Dit is hier echter niet van toepassing omdat er aan natuurlijk drogen op het veld wordt gedaan. Het nadeel hiervan is al eerder aan bod gekomen, namelijk bij de berekening van het aantal ton droog stof per hectare. Het voordeel van velddroging komt bij het transport tot uiting. Er is enerzijds geen extra energie nodig voor droging en anderzijds verminderen ook de transportkosten per GJ door een verschil in energiedichtheid. Na velddroging kan men droog hout aanvoeren naar de installatie. De energiedichtheid van droog hout is hoger dan de energiedichtheid van vers, niet gedroogd hout. Uit één lading droog hout kan men meer energie halen dan uit één lading vers hout.

De totale energie verbruikt in de aanvoerketen bestaat in dit geval enkel uit transportkosten en wordt weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 11: Berekening energieconsumptie tijdens transport

| Aantal MW [1] | Vervoers- afstand per lading (km) [2] | Opbrengst per hectare (tds/ha) [3] | Energieconsumptie tijdens transport (GJ/ha) [4] = 0,0008 x [2] x [3] |
|------------------|--|--|--|
| 5 MW | 27,6 | 8,7 | 0,19 |
| 10 MW | 39 | 8,7 | 0,27 |
| 15 MW | 47,8 | 8,7 | 0,33 |
| 20 MW | 55 | 8,7 | 0,38 |
| 25 MW | 61,6 | 8,7 | 0,43 |
| 30 MW | 67,4 | 8,7 | 0,47 |
| 35 MW | 72,8 | 8,7 | 0,51 |
| 40 MW | 78 | 8,7 | 0,54 |
| 45 MW | 82,6 | 8,7 | 0,57 |
| 50 MW | 87,2 | 8,7 | 0,61 |

Uit de laatste kolom van Tabel 11 stellen we vast dat de energieconsumptie tijdens het transport zeer gering is. De totale energieconsumptie tijdens de aanvoerketen bestaat uit de energie verbruikt tijdens de oogst en tijdens het transport, indien we uitgaan van velddroging. Als het drogen op een niet natuurlijke manier gebeurt, vraagt dit volgens García *et al.* (2003) een extra energieconsumptie tussen 19,44 GJ per ha en 29,16 GJ per ha. Hierdoor kent de totale energieconsumptie tijdens de aanvoerketen een niet onbelangrijke stijging.

Dat de invloed van de energieconsumptie tijdens het transport minimaal is, valt ook af te leiden uit de volgende tabel. De netto energieopbrengst per ha na vermindering van de energieconsumptie tijdens het transport is te vinden in kolom [4] en het verschil met kolom [2] is verwaarloosbaar.

Tabel 12: Netto energieopbrengst per ha

| Aantal MW [1] | Energieopbrengst per ha (GJ/ha) [2] | Energieconsumptie tijdens transport (GJ/ha) [3] | Netto energieopbrengst per ha (GJ/ha) [4] |
|------------------|---|--|--|
| 5 MW | 145,42 | 0,19 | 145,23 |
| 10 MW | 145,42 | 0,27 | 145,15 |
| 15 MW | 145,42 | 0,33 | 145,09 |
| 20 MW | 145,42 | 0,38 | 145,04 |
| 25 MW | 145,42 | 0,43 | 144,99 |
| 30 MW | 145,42 | 0,47 | 144,95 |
| 35 MW | 145,42 | 0,51 | 144,91 |
| 40 MW | 145,42 | 0,54 | 144,88 |
| 45 MW | 145,42 | 0,57 | 144,85 |
| 50 MW | 145,42 | 0,61 | 144,81 |

Hoofdstuk 5: Kosten-batenanalyse

5.1 Beschrijving model

De rendabiliteit van een investering, i.c. in een verbrandingsinstallatie, wordt geëvalueerd aan de hand van de NCW-methode. De NCW of de netto contante waarde van de kasstromen over de levensduur van het project moet positief zijn, opdat de verbrandingsinstallatie rendabel is. Zoals Mercken (2004) vermeldt, kan een investeringsproject voorgesteld worden als een verzameling verwachte kasstromen en gebeurt de economische evaluatie van dat investeringsproject op basis van die kasstromen of cashflows. Bij de netto contante waarde worden deze inkomende en uitgaande kasstromen eerst geactualiseerd en daarna opgeteld.

Het feit dat er met kasstromen gewerkt wordt, impliceert dat enkel de inkomsten en uitgaven relevant zijn, niet de opbrengsten en kosten. Opbrengsten en inkomsten kunnen gelijk zijn aan elkaar maar dat is niet altijd het geval. Bij een klant die bijvoorbeeld uitstel van betaling krijgt, is er op het moment van verkoop wel sprake van een opbrengst voor de verkoper maar niet van een inkomende kasstroom. Hetzelfde geldt voor kosten en uitgaven. Zo zijn afschrijvingen boekhoudkundig gezien wel kosten, hoewel er geen uitgaande kasstromen mee gepaard gaan.

In deze gevalstudie wordt ook enkel gewerkt met inkomsten en uitgaven. Indien er sprake is van kosten of opbrengsten wordt hierbij verondersteld dat er geen uitstel van betaling wordt toegestaan. Bij de opbrengsten uit de verkoop van de geproduceerde elektriciteit bijvoorbeeld betalen de klanten contant en zijn de opbrengsten gelijk aan de inkomsten. Afschrijvingen zijn enkel een boekhoudkundige kost, zoals net vermeld. Toch worden deze kosten relevant indien er belastingen betaald moeten worden. Dit komt verder nog aan bod.

De formule voor de netto contante waarde ziet eruit als volgt (Mercken, 2004):

$$NCW = \sum_{t=1}^n (K_t \times A_{t-r}) - I_0 \quad (5)$$

Met:

- $t = 1 \rightarrow n$ = het t-de jaar;
- n = levensduur van het project;
- K_t = netto kasstroom in het jaar t ;
- A_{t-r} = actualisatiefactor;
- r = kapitaalkost na belastingen;

- I_0 = investering in het jaar 0

K_t stelt de netto kasstroom voor die het investeringsproject genereert in jaar t . Met andere woorden K_t is het verschil tussen de inkomende kasstromen en de uitgaande kasstromen die het project veroorzaakt in jaar t . De term A_{t-r} wordt gebruikt om de netto kasstroom van jaar t te actualiseren, uit te drukken in termen van nu. Een bedrag K_t dat pas in jaar t ontvangen wordt, heeft nu een actuele waarde van $(K_t \times A_{t-r})$, of anders genoteerd $[K_t / (1+r)^t]$. De investering in het jaar 0 wordt voorgesteld door I_0 . De discontovoet r wordt ook wel eens aangeduid met de termen rentevoet of kapitaalkost. Deze term vertegenwoordigt de tijds waarde van het geld. Zoals Mercken (2004) verwoordt: "geld heeft een tijds waarde: één euro nu is meer waard dan één euro die ik later zal ontvangen", omdat je één euro nu kan beleggen tegen een bepaalde interestvoet waardoor die euro van vandaag na een tijds spanne t in waarde gestegen is. Daarom is het nodig de toekomstige verwachte kasstromen te actualiseren of te verdisconteren om ze te vergelijken met kasstromen van nu.

Als de jaarlijkse netto kasstromen hetzelfde zijn over de levensduur van het project, kan met annuïteiten gewerkt worden. Een annuïteit is volgens Mercken (2004) "een rij van gelijke bedragen die met gelijke tussenpauzen worden ontvangen of uitgegeven". De netto kasstromen moeten niet elk jaar afzonderlijk geactualiseerd worden, in de plaats daarvan moet slechts éénmaal de jaarlijkse netto kasstroom vermenigvuldigd worden met de geactualiseerde waarde van de annuïteit van één eenheid. In formulevorm:

$$NCW = (K \times a_{n-r}) - I_0 \quad (6)$$

$$\text{waarbij } a_{n-r} = \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r}$$

Zoals nog duidelijk zal worden, kan in deze gevalstudie niet altijd met annuïteiten gewerkt worden. Indien de verbrandingsinstallatie enkel elektriciteit produceert, kan de jaarlijkse kasstroom wel dezelfde zijn over de levensduur van de installatie. Maar als naast de geproduceerde elektriciteit ook de gegenereerde warmte verkocht wordt, spreekt men van WKK (warmtekrachtkoppeling) en heeft de producent van deze energie recht op warmtekrachtcertificaten. De jaarlijkse inkomsten zijn door deze certificaten niet aan elkaar gelijk als gevolg van een afnemend aantal warmtekrachtcertificaten gedurende de levensduur van de installatie. Om de netto contante waarde te berekenen zal in dit geval gewerkt moeten worden met formule (5), waarbij elke jaarlijkse netto kasstroom afzonderlijk geactualiseerd wordt en dit over de levensduur van de installatie. Dit wordt verder nog uitgewerkt.

De inkomende en uitgaande kasstromen in deze gevalstudie bestaan uit:

- de initiële investering I_0 :
 - de totale investeringskosten (de aankoop van de installatie + de bouw van een opslagplaats + leveringskosten + constructiekosten...)
 - ecologiepremie
 - verhoogde investeringsaftrek

- de jaarlijkse cashflow K :
 - de opbrengsten van de verkoop van de geproduceerde energie
 - de jaarlijkse werkingskosten van de installatie
 - + subsidies en steunmaatregelen
 - de te betalen vennootschapsbelasting

-> de jaarlijkse werkingskosten bestaan hierbij uit:

 - onderhoudskosten
 - + personeelskosten
 - + verzekeringskosten
 - + aankoopkosten en transportkosten van de biomassa
 - + transportkosten en behandelingskosten van de assen

Bij de jaarlijkse cashflow K staat de te betalen vennootschapsbelasting vermeld na de toevoeging van subsidies en steunmaatregelen. Sommige overheidssubsidies en steunmaatregelen zijn belastingvrij voor de vennootschap. In deze gevalstudie komen de steunmaatregelen echter uit de verkoop van groenestroomcertificaten en/of warmtekrachtcertificaten. Deze certificaten worden verhandeld op de markt en zijn dus geen steunmaatregel zoals bijvoorbeeld de ecologiepremie. Als gevolg daarvan genieten de opbrengsten die voortkomen uit de verkoop van groenestroomcertificaten en/of warmtekrachtcertificaten geen vrijstelling van belastingen. De ecologiepremie krijgt die vrijstelling wel en wordt verrekend in de initiële investering zonder rekening te houden met vennootschapsbelastingen. De overdracht van groenestroomcertificaten is wel vrijgesteld van BTW. Dit staat vermeld in art. 44, § 3, 10° van het BTW-Wetboek. In de praktijk maakt dit uiteraard geen verschil, aangezien de te betalen BTW geen inkomstenstroom vormt voor de vennootschap. (Fisconet, 2007)

Een belangrijke opmerking is dat er bij de NCW-methode enkel projectstromen relevant zijn. Financieringsstromen worden niet mee opgenomen. Indien er in deze gevalstudie vanuit wordt

gegaan dat het investeringsproject gefinancierd wordt met een lening, moet er geen rekening worden gehouden met jaarlijkse interestbetalingen. Interesten maken immers geen deel uit van de projectstroom. Bovendien worden deze interesten wel meegerekend door het actualiseren van de netto kasstromen tegen de discontovoet r . Als men er voor kiest de te betalen interesten toch expliciet mee in rekening te brengen, moeten andere financieringsstromen, zoals het ontvangen en het terugbetalen van de lening, ook in rekening worden gebracht. Zoniet, bestaat de kans dat de tijdswaarde tweemaal verrekend wordt: éénmaal via de interesten die opgenomen zijn in de netto kasstroom en een tweede maal via de verdiscontering van diezelfde netto kasstroom. Op deze manier geeft de netto contante waarde een vertekend beeld. Zoals Mercken (2004) vermeldt, heeft de totale kasstroom (de som van de projectstroom en de financieringsstroom) dezelfde netto contante waarde als de projectstroom zelf, eenvoudig omwille van het feit dat de netto contante waarde van de financieringsstroom alleen gelijk is aan nul. Om de kans op interpretatiefouten te vermijden worden financieringsstromen niet beschouwd in deze gevalstudie.

Interesten hebben een invloed op de kapitaalkost of discontovoet via het belastingschild van de interesten. Hierbij wordt volgende formule uit Mercken (2004) gebruikt:

$$\text{Kapitaalkost na belastingen: } r = (1 - b) \times r^* \quad (7)$$

Met:

- b = belastingvoet;
- r^* = kapitaalkost voor belastingen

Ook afschrijvingen (voorgesteld door de letter A) worden opgenomen via het belastingschild, hoewel ze geen uitgaande kasstroom genereren. De reden hiervoor is te vinden bij Mercken (2004): "een afschrijving is een boekhoudkundige kost die leidt tot minder winst, dus minder belastingen en minder uitgaande kasstromen". Netto kasstromen voor belastingen werden eerder voorgesteld door K , namelijk het verschil tussen inkomende en uitgaande kasstromen (respectievelijk voorgesteld door de symbolen O en Q). Netto kasstromen na belastingen worden na uitwerking en in de veronderstelling dat er met annuïteiten gewerkt wordt:

$$\text{Kasstromen na belastingen} = (1 - b) \times (O - Q) + (b \times A) \quad (8)$$

Na verwerking van dit belastingschild in de algemene NCW-formule (6) bekomt men:

$$\begin{aligned} \text{NCW} &= (K \times a_{n-r}) - I_0 \\ &= [(1 - b) \times (O - Q) + (b \times A)] \times a_{n-r} - I_0 \\ &= [(1 - b) \times K + (b \times A)] \times a_{n-r} - I_0 \end{aligned} \quad (9)$$

De installatie wordt in deze gevalstudie over de levensduur ervan lineair afgeschreven. Dit wil zeggen dat elk jaar hetzelfde bedrag wordt afgeschreven. De term A in bovenstaande formule kan dus vervangen worden door (I_0 / n) . Dit geeft de formule die voor deze case (voor het eerste gedeelte waarbij alleen de elektriciteitsproductie telt) toegepast zal worden:

$$NCW = [(1 - b) \times K + b \times (\frac{I_0}{n})] \times a_{n-r} - I_0 \quad (10)$$

waarbij $r = (1 - b) \times r^*$

De kapitaalkost of discontovoet na belastingen (r) die tot hiertoe gebruikt werd, veronderstelt een financiering van het investeringsproject met vreemd vermogen. Mercken (2004) vermeldt dat een volledige financiering van een dergelijk project met behulp van een lening kan leiden tot een zwakke financiële structuur. Het aandeel vreemd vermogen ten opzichte van het totaal vermogen stijgt immers, terwijl de verhouding eigen vermogen ten opzichte van vreemd vermogen daalt. De solvabiliteit (d.i. de verhouding van het eigen vermogen ten opzichte van het vreemd vermogen) vermindert en dit kan bijvoorbeeld kredietverstrekkers afschrikken. Het andere uiterste, namelijk het investeringsproject volledig financieren met eigen vermogen, is ook geen interessante optie. Aandeelhouders vereisen een bepaald rendement op hun geïnvesteerd vermogen. Deze rendementseis zal hoger liggen dan de interestvergoeding. Eigen vermogen houdt immers meer risico in dan vreemd vermogen en bijgevolg moet er naast de rendementseis rekening gehouden worden met een risicotoeslag. De kapitaalkost kan hierdoor een stuk hoger uitkomen.

De WACC (Weighted Average Cost of Capital) of GGK (Gewogen Gemiddelde Kapitaalkost) probeert een evenwicht te vinden tussen deze twee uitersten. De financiering van het investeringsproject gebeurt hierbij aan de hand van een combinatie van eigen vermogen en vreemd vermogen. De overeenkomende formule hiervoor is (Mercken, 2004):

$$GGK = (\frac{EV}{TV} \times r_i) + (\frac{VV}{TV} \times r_v) \quad (11)$$

Met:

- EV = eigen vermogen;
- VV = vreemd vermogen;
- TV = totaal vermogen;
- r_i = netto vergoeding van het eigen vermogen na roerende voorheffing voor de aandeelhouders;
- r_v = vereist rendement van het vreemd vermogen na belastingen

Ter verduidelijking van de GGK: stel dat het investeringsproject voor 40 procent gefinancierd wordt met eigen vermogen en voor de overige 60 procent wendt de onderneming zich tot vreemd vermogen. De netto vergoeding van het eigen vermogen na roerende voorheffing is 20 procent en het vereist rendement van het vreemd vermogen na belastingen bedraagt 10 procent. Deze waarden zijn enkel ter illustratie. Invulling van formule (11) geeft:

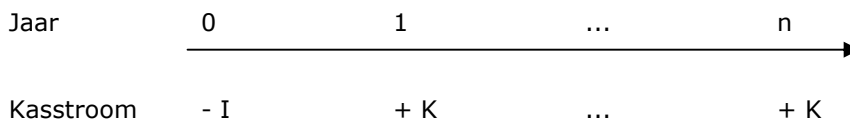
$$GGK = (0,40 \times 0,20) + (0,60 \times 0,10) = 0,14 = 14 \%$$

Dit betekent dat de jaarlijkse kasstromen onder de gemaakte veronderstellingen verdisconteerd worden tegen een kapitaalkost van 14 procent.

Indien we formule (11) invullen onder de eerder vermelde veronderstelling, met name volledige financiering via een lening, wordt de GGK:

$$\begin{aligned} GGK &= (0 \times r_i) + (1 \times r_v) = r_v \\ &= \text{vereist rendement van het vreemd vermogen na belastingen} \\ &= \text{kapitaalkost na belastingen} \\ &= r \text{ uit formule (7)} \end{aligned}$$

De verwachte inkomende en uitgaande kasstromen van het investeringsproject kunnen visueel worden voorgesteld op een tijdsas:



Paragraaf 5.2: Verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit vult dit NCW-model in voor de investering in een verbrandingsinstallatie.

5.2 Verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit

5.2.1 *Inleiding*

Korte omloophout wordt volgens García *et al.* (2003) het best verbrand in een wervelbed. De verbrandingsinstallatie voor deze gevalstudie is bijgevolg een wervelbedoven. De rookgassen die door de verbranding van de biomassa vrijkomen worden gebruikt om water om te zetten tot stoom. Deze stoom wordt vervolgens afgeleid naar een stoomturbine, waar deze stoom aangewend wordt om elektriciteit op te wekken door aandrijving van een generator. Deze elektriciteit kan dan

afgezet worden op een elektriciteitsnet. De stoom condenseert daarna terug tot water. Hierbij komt verdampingswarmte vrij. Deze warmte kan ook aangewend worden om bijvoorbeeld een nabijgelegen gebouw te verwarmen. Indien zowel elektriciteit als warmte geproduceerd worden door de installatie, spreekt men van een WKK-installatie (warmtekrachtkoppeling). In deze gevalstudie veronderstellen we in eerste instantie dat de niet-aangewende warmte vrij wordt gelaten in de lucht en dus niet benut wordt. Enkel de elektriciteitsproductie speelt bijgevolg een rol. Later in deze case berekenen we of het wel benutten van de warmte voordeel oplevert en gaan we na wat de verschillen zijn tussen wel of geen WKK wat betreft investeringskosten en jaarlijkse netto kasstromen.

“A guide to cogeneration” (2001) vermeldt dat de voordelen van een stoomturbine de grote variëteit aan capaciteiten en de lange levensduur zijn. Daarnaast kan zowat elke energiebron als input gebruikt worden. Het omzettingsrendement ligt hoog, net zoals de betrouwbaarheid. Een belangrijk nadeel zijn de hoge investeringskosten.

De productieketen die gevolgd wordt, ziet er als volgt uit.

Tabel 13: Productieketen

| Gewas | Conversie | | | Bruikbare energie |
|----------|-------------|---------------|--------------------|--------------------------|
| | Techniek | Tussenproduct | Omzetting | |
| Populier | Verbranding | Stoom | Aandrijven turbine | Elektriciteit (+ warmte) |

Bron: García *et al.*, 2003

5.2.2 Emissies

De verbranding van biomassa brengt rookgassen met zich mee. Deze gassen zijn onderworpen aan emissienormen. Op Europees niveau is er wel een definiëring terug te vinden van biomassa, maar geen regelgeving betreffende de emissies als gevolg van de verbranding. Deze taak ligt bij de lidstaten. Bijgevolg is er enkel op nationaal niveau een emissienormering. Voor Vlaanderen zijn deze normen vastgelegd in VLAREM II: het Besluit van de Vlaamse Regering van 1 juni 1995 houdende algemene en sectorale bepalingen inzake milieuhygiëne.

Een indeling van verschillende houtstromen is terug te vinden in VLAREM I: het Besluit van de Vlaamse Regering van 6 februari 1991 houdende vaststelling van het Vlaams reglement

betreffende de milieuvergunning. In VLAREM I is in de bijlage een lijst opgenomen met alle als hinderlijk beschouwde inrichtingen. In rubriek 2.3.4.1 van deze lijst vinden we de opslag en verbranding van enerzijds biomassa-afval en anderzijds verontreinigd behandeld houtafval. Houtafval valt ook onder de noemer "biomassa-afval", voor zover dit houtafval niet verontreinigd is. Indien het houtafval wel verontreinigd is, moet het behandeld worden om nog onder rubriek 2.3.4.1 te vallen. Verontreinigd hout dat geen behandeling ondergaat, valt niet onder deze rubriek. Overige afvalstromen die tot rubriek 2.3.4.1 behoren zijn onder andere niet-gevaarlijke huishoudelijke afvalstoffen, maar andere houtstromen dan de hierboven vermelde staan niet in deze rubriek. De verbranding van korte omloophout valt bijgevolg onder een andere rubriek. In rubriek 43 staan de verbrandingsinstallaties. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen verbrandingsinstallaties met of zonder elektriciteitsproductie. Een verdere indeling wordt gemaakt op basis van het totaal warmtevermogen van de installatie (tussen 300 en 500 kW, tussen 500 kW en 5 000 kW en meer dan 5 000 kW). Rubriek 43 vermeldt geen specifieke omschrijving aangaande de voeding van deze verbrandingsinstallaties. Er staat wel dat het niet om afvalstoffen mag gaan, aangezien deze onder rubriek 2.3.4.1 vallen. We kunnen stellen dat korte omloophout onder deze rubriek valt aangezien het niet om afvalstoffen gaat. Het verschil tussen rubriek 2.3.4.1 en rubriek 43 ligt onder andere in het al dan niet verplicht indienen van een milieujaarverslag. Dit moet niet voor inrichtingen die onder rubriek 2.3.4.1 vallen, maar wel voor verbrandingsinstallaties met een totaal warmtevermogen van meer dan 5 000 kW uit rubriek 43. (VLAREM I, 1991)

VLAREM II geeft meer informatie over de normen omtrent de emissies van de verbranding van de verschillende categorieën houtafval. Een apart artikel is niet opgenomen voor de verbranding van bijvoorbeeld korte omloophout. Voor de emissienormering is het dus niet relevant of het hout al dan niet onder de term "afval" valt. Korte omloophout behoort bijgevolg voor wat betreft de emissienormen uit VLAREM II tot biomassa-afval. In artikel 5.2.3.bis.4. staan de voorwaarden voor verbrandings- en meeverbrandingsinstallaties van biomassa-afval. Zoals eerder al aangehaald, valt volgens VLAREM I verontreinigd houtafval niet onder de noemer "biomassa-afval". Niet-verontreinigd houtafval wordt wel gerekend bij biomassa, maar strengere normen zijn opgelegd voor het niet-verontreinigd behandeld houtafval. Voor beide categorieën (niet-verontreinigd onbehandeld en niet-verontreinigd behandeld houtafval) is er vastgelegd hoeveel de maximale concentratie van bepaalde stoffen in de rookgassen mag bedragen. Deze stoffen zijn onder andere koolmonoxide, zwaveldioxide, dioxinen en stikstofoxiden. De emissiegrenswaarden zijn uitgedrukt in functie van het nominaal thermisch vermogen van de verbrandingsinstallatie. In de veronderstelling dat korte omloophout tot het niet-verontreinigd onbehandeld houtafval behoort, gelden de volgende emissiegrenswaarden.

Tabel 14: Emissiegrenswaarden

| Emissiegrenswaarden in mg/Nm ³ in functie van het nominaal thermisch vermogen van de verbrandingsinstallatie | | | |
|---|-----------------|-------------------------|---------------|
| | tot en met 5 MW | meer dan 5 MW tot 50 MW | 50 MW en meer |
| 1. totaal stof | 150 | 30 | 10 |
| 2. koolmonoxide (CO) | 250 | 200 | 100 |
| 3. stikstofoxiden (NO _x) uitgedrukt als NO ₂ | 400 | 400/200(*) | 200 (**) |
| 4. zwaveldioxide (SO ₂) | 300 | 300 | 50 |
| 5. dioxinen en furanen uitgedrukt in ng TEQ/Nm ³ (***) | - | 0,1 | 0,1 |

(*) Voor installaties met een nominaal thermisch vermogen tot en met 30 MW geldt voor stikstofoxiden (NO_x), uitgedrukt als NO₂, een emissiegrenswaarde van 400 mg/Nm³. Voor installaties met een nominaal thermisch vermogen groter dan 30 MW geldt een emissiegrenswaarde van 200 mg/Nm³.

(**) Voor installaties met een nominaal thermisch vermogen van meer dan 300 MW geldt voor stikstofoxiden (NO_x), uitgedrukt als NO₂, een emissiegrenswaarde van 130 mg/Nm³.

(***) De gemiddelden worden bepaald over een bemonsteringsperiode van minimaal zes uur en maximaal acht uur. De emissiegrenswaarde heeft betrekking op de totale concentratie van dioxine en furanen, berekend aan de hand van het begrip 'toxische equivalentie'.

Bron: VLAREM II, 2005

Artikel 5.2.3bis.4.8. vermeldt dat deze emissiegrenswaarden gelden onder volgende omstandigheden: een temperatuur van 273 K, een druk van 101,3 kPa en 11 procent zuurstof. Vooral dit laatste is belangrijk voor de verbranding van korte omloophout. Dit gebeurt namelijk in een overmaat aan zuurstof, dus meer dan 11 procent. Hetzelfde artikel houdt hier rekening mee en vermeldt verder dat indien de atmosfeer verrijkt wordt met zuurstof de meetresultaten herleid mogen worden tot een tot in de milieuvergunning vastgesteld zuurstofgehalte. Hiervoor moet dus ieder geval individueel behandeld worden. (VLAREM II, 2005)

Voor het niet-verontreinigd behandeld houtafval zijn er extra stoffen opgenomen in de lijst met emissiegrenswaarden, zoals arseen, koper en lood. Ter illustratie staan in volgende tabel de normen zoals terug te vinden in Vlarem II voor wat betreft de samenstellingsvoorwaarden voor niet-verontreinigd behandeld houtafval. Zoals vermeld staat onderaan de tabel zijn deze samenstellingsvoorwaarden slechts richtwaarden. (VLAREM II, 2005)

De waarden die in kolom B staan liggen een stuk hoger dan deze in kolom A. Afhankelijk van de grootte van de verbrandingsinstallatie worden er jaarlijkse, zesmaandelijkse of driemaandelijkse controles uitgevoerd. Op deze manier moet een installatie met een nominaal thermisch vermogen

van meer dan 5 MW een zesmaandelijke controle ondergaan indien het houtafval afkomstig is van de eigen productie van houtmaterialen terwijl een driemaandelijke controle vereist is indien het houtafval afkomstig is van derden. Indien de verbrandingsinstallatie een jaarlijkse of zesmaandelijke controle moet ondergaan, mogen de concentraties zoals vermeld in kolom B nooit overschreden worden. Ook bij een driemaandelijke controle mag geen van de concentraties uit kolom B overschreden worden, maar daarnaast moeten er per kalenderjaar minstens drie van de vier controles voldoen aan de strengere normen van kolom A. Indien er ten slotte meer dan vier controles per kalenderjaar uitgevoerd worden, moeten al deze controles onder de concentraties van kolom B blijven en bovendien moeten per kalenderjaar minstens 80 procent van deze controles ook onder de concentraties uit kolom A blijven. Kort samengevat kunnen we stellen dat de concentraties uit kolom B nooit overschreden mogen worden, ongeacht hoeveel controles er ook uitgevoerd worden. (VLAREM II, 2005)

Tabel 15: Samenstellingsvoorwaarden voor niet-verontreinigd behandeld houtafval

| Samenstellingsvoorwaarden in mg/kg DS | | |
|---|-----|------|
| Verontreinigende stof | A | B |
| 1. arseen en arseenverbindingen, uitgedrukt als arseen (As) | 2 | 4 |
| 2. koper en koperverbindingen, uitgedrukt als koper (Cu) | 20 | 40 |
| 3. lood en loodverbindingen, uitgedrukt als lood (Pb) | 90 | 180 |
| 4. chroom en chroomverbindingen, uitgedrukt als chroom (Cr) | 30 | 60 |
| 5. fluor en fluorverbindingen, uitgedrukt als F | 30 | 60 |
| 6. chloor en chloorverbindingen, uitgedrukt als Cl | 600 | 1200 |
| 7. pentachloorfenol | 3 | 6 |
| 8. benzo-a-pyreen | 0,5 | 1 |

Deze samenstellingsvoorwaarden gelden als richtwaarden.
Bron: VLAREM II, 2005

5.2.3 Veronderstellingen

De range aan capaciteiten waarmee we werken is nog steeds tussen 5 MW en 50 MW elektriciteitsoutput. Om het overzichtelijk te houden worden vanaf nu de berekeningen en resultaten weergegeven voor een beperkt aantal capaciteiten (5 MW, 10 MW, 20 MW en 50 MW).

Deze gevalstudie is opgebouwd rond een aantal hypothesen. Een deel hiervan werd bij enkele berekeningen in het hoofdstuk over korte omloophout al aangehaald. In wat volgt worden de veronderstellingen op een rijtje gezet met daarbij een verantwoording waarom juist deze veronderstellingen aangenomen zijn.

Een eerste belangrijke veronderstelling is hoeveel de verbrandingswaarde van de houtsnippers bedraagt. Deze calorische waarde is voor deze gevalstudie nog steeds 18 GJ/tds. Onder andere García *et al.* (2003) en McKendry (2002) gebruiken deze waarde. De calorische waarde wordt ook wel eens de LHV (lower heating value) genoemd. Het verschil met de HHV (higher heating value) is dat er bij de LHV geen rekening wordt gehouden met de verdampingswarmte aanwezig in de waterdamp als gevolg van de verbranding. Biomassa heeft immers een bepaald vochtpercentage en dit vocht geeft waterdamp bij verbranding. Bij de LHV verlaat deze waterdamp de verbrandingsinstallatie via een schoorsteen zonder dat de verdampingswarmte erin aanwezig terug wordt gewonnen. In het geval van HHV gaat men ervan uit dat de verdampingswarmte in de waterdamp wel gerecupereerd kan worden.

Bij verschillende geraadpleegde bronnen zijn standaardwaarden terug te vinden aangaande de levensduur van de verbrandingsinstallatie en het aantal werkingsuren voor de productie van elektriciteit.

Tabel 16: Standaardwaarden uit verschillende bronnen

| | Dornburg en Faaij (2001) | Fiala <i>et al.</i> (1997) | Caputo <i>et al.</i> (2005) | Mitchell <i>et al.</i> (1995) |
|--|--------------------------|----------------------------|---|---|
| Levensduur | 25 jaar | 20 jaar | 20 jaar | 20 jaar |
| Werkingsuren voor de productie van elektriciteit | 7 000 h per jaar | 7 000 h per jaar | 8 000 h/jaar -> MAAR: conversie-beschikbaarheid van 90% => 7 200 h/jaar beschikbaar | 8 640 h/jaar -> MAAR: conversie-beschikbaarheid van 90% => 7 776 h/jaar beschikbaar |

Bij Caputo *et al.* (2005) en Mitchell *et al.* (1995) vindt men een groter aantal werkingsuren per jaar van de installatie voor de productie van elektriciteit. Dit wordt gecompenseerd door een conversiebeschikbaarheid op te nemen van 90 procent bij beide bronnen. Caputo *et al.* (2005) omschrijven dit percentage als het gedeelte van de netto elektriciteitsoutput dat beschikbaar is voor verkoop. De overige 10 procent van de elektriciteitsproductie wordt geconsumeerd door allerhande toestellen en gereedschappen. Dit is vergelijkbaar met het verschil tussen de bruto en netto energieopbrengst van korte omloophout. De netto energieopbrengst is gelijk aan de bruto energieopbrengst verminderd met de energieconsumptie tijdens onder andere oogst en transport.

Als we dus een verbrandingsinstallatie hebben met een netto elektriciteitsoutput van 5 MW is er volgens Caputo *et al.* (2005) maar 4,5 MW effectief beschikbaar voor verkoop. De resterende 0,5 MW aan elektriciteit wordt aangewend om aan de energiebehoeften te voldoen binnen de installatie zelf en kan dus niet afgezet worden op het elektriciteitsnet. Dit is hetzelfde als stellen dat er geen 8 000 h/jaar beschikbaar zijn voor de conversie van biomassa in "verkoopbare" elektriciteit, maar slechts 90 procent van deze tijd. Met andere woorden er is slechts 7 200 h/jaar beschikbaar. Immers:

$$(5 \text{ MW} \times 0,90) \times 8\,000 \text{ h/jaar} = 4,5 \text{ MW} \times 8\,000 \text{ h/jaar} = 36\,000 \text{ MWh/jaar}$$

of

$$5 \text{ MW} \times (8\,000 \text{ h/jaar} \times 0,90) = 5 \text{ MW} \times 7\,200 \text{ h/jaar} = 36\,000 \text{ MWh/jaar}$$

In deze case bedraagt de levensduur van de verbrandingsinstallatie 20 jaar, net zoals in drie van de vermelde bronnen uit Tabel 16. Per jaar is de verbrandingsinstallatie 7 000 h operationeel.

Een andere parameter van deze kosten-batenanalyse is de efficiëntie van omzetting van de biomassa in elektriciteit en/of warmte. Een overzicht van de omzettingsrendementen zoals terug te vinden in verschillende bronnen staat in Tabel 17.

Tabel 17: Omzettingsrendementen bij verschillende bronnen

| | Jacobs <i>et al.</i> (2003) | Caputo <i>et al.</i> (2005) | Bridgwater (1995) | Dornburg en Faaij (2001) |
|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| Elektrische efficiëntie | 30 % | 25 - 30 % | 18 - 27 % | 43 % |
| Thermische efficiëntie | 92% | - | - | 90 % |

De vermelde thermische efficiëntie geeft aan hoeveel procent er van de biomassa omgezet wordt in warmte alleen. Hetzelfde geldt voor de elektrische efficiëntie. Deze geeft weer hoeveel procent er van de oorspronkelijke biomassa omgezet wordt in elektriciteit. Zoals voorheen al aangehaald is, produceert de verbrandingsinstallatie in eerste instantie enkel elektriciteit. Met de thermische efficiëntie hoeft bijgevolg nog geen rekening gehouden te worden. De elektrische efficiëntie speelt wel een rol en bedraagt 30 procent in deze gevalstudie.

Vooraleer het analytisch model in te vullen staan hieronder een aantal berekeningen waarbij de range aan mogelijke capaciteiten uitgedrukt wordt in verschillende eenheden, om zo verdere berekeningen te vereenvoudigen. Zoals eerder al vermeld, wordt in deze case gewerkt met een range van 5 MW tot 50 MW netto elektriciteitsoutput. In Tabel 9 staan deze waarden omgerekend naar aantal ton biomassa. Hierbij werd gebruik gemaakt van een formule van Caputo *et al.* (2005). Ter controle wordt hieronder de berekening opnieuw gedaan volgens de methode van Fiala *et al.* (1997). Via deze methode vertrekt men van het aantal ton biomassa om zo de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit in MW te verkrijgen. De berekening wordt dus in omgekeerde richting uitgevoerd ten opzichte van de methode van Caputo *et al.* (2005). De formule die hierbij gebruikt wordt, is als volgt:

$$E_e = (\Pi \times R^2) \times \vartheta \times H_b \times \eta_e \quad (12)$$

Hierbij is E_e de netto elektriciteitsproductie op jaarbasis, $(\Pi \times R^2)$ stellen samen de benodigde oppervlakte van het energiegewas voor, ϑ is de opbrengst droge stof biomassa per ha, H_b is de LHV of de netto calorische waarde van de biomassa en η_e stelt de elektrische efficiëntie voor. Een bemerking hierbij is dat het product $(\Pi \times R^2 \times \vartheta)$ het aantal ton biomassa per jaar voorstelt. De ingevulde formule, volgens de eerder gemaakte veronderstellingen en voor een jaarlijkse hoeveelheid van 23 333 ton biomassa, ziet er als volgt uit:

$$\begin{aligned} E_e &= 2\,682 \text{ ha} \times 8,7 \text{ tds/ha per jaar} \times 18 \text{ GJ/tds} \times 0,30 \\ \rightarrow E_e &= 23\,333 \text{ tds/jaar} \times 18 \text{ GJ/tds} \times 0,30 \\ \rightarrow E_e &= 125\,998 \text{ GJ/jaar} \end{aligned}$$

In 1 GW zit 1 GJ/s. Rekening houdend met het feit dat er 7 000 h per jaar beschikbaar zijn voor de productie van elektriciteit, kan men 125 998 GJ/jaar omzetten naar aantal MW:

$$\begin{aligned} 125\,998 \text{ GJ/jaar} &= \frac{125\,998 \text{ GJ}}{7\,000 \text{ h}} \\ &= 0,005 \text{ GJ/s} \\ &= 0,005 \text{ GW} \\ &= 5 \text{ MW} \end{aligned}$$

We kunnen dus concluderen dat de omzetting van aantal MW naar aantal ton biomassa en omgekeerd hetzelfde resultaat oplevert via de methode van Caputo *et al.* (2005) en Fiala *et al.* (1997).

Vervolgens wordt het aantal MW ook omgerekend in aantal kWh. Bij Fiala *et al.* (1997) wordt volgende formule gegeven:

$$P_e = \frac{E_e}{t} \rightarrow E_e = P_e \times t \quad (13)$$

P_e stelt hierbij de elektriciteitsoutput van de installatie voor, uitgedrukt in aantal MW. E_e is de netto elektrische energie die geproduceerd wordt per jaar. De eenheid hierbij is MWh per jaar. En t geeft het aantal werkingsuren per jaar van de installatie weer. Om de elektriciteitsoutput uit te drukken in aantal MWh vermenigvuldigt men dus het aantal MW met het aantal werkingsuren per jaar. Onderstaande tabel geeft een overzicht. Alle waarden zijn uitgedrukt op jaarbasis.

Tabel 18: Omzettingstabel

| MW | Ton biomassa (tds) | ha | MJ | MWh | kWh |
|----|--------------------|--------|---------------|---------|-------------|
| 5 | 23 333 | 2 682 | 126 000 000 | 35 000 | 35 000 000 |
| 10 | 46 667 | 5 364 | 252 000 000 | 70 000 | 70 000 000 |
| 20 | 93 333 | 10 728 | 504 000 000 | 140 000 | 140 000 000 |
| 50 | 233 333 | 26 820 | 1 260 000 000 | 350 000 | 350 000 000 |

Ter verduidelijking van Tabel 18: onder de aangenomen veronderstellingen wat betreft opbrengst per ha (gemiddeld 8,7 tds/ha), calorische waarde (18 GJ/tds), aantal werkingsuren per jaar (7 000 h) en elektrische efficiëntie (30%), kan men stellen dat 5 MW netto elektriciteitsoutput overeenkomt met 23 333 tds benodigde biomassa. Om deze hoeveelheid biomassa te kunnen telen is 2 682 ha grond nodig. Daarnaast kan men deze 5 MW ook uitdrukken als 126 000 000 MJ ofwel 35 000 000 kWh. Dit laatste bevestigt de algemene regel dat 1 GJ gelijk is aan afgerond 278 kWh of anders gezegd 1 kWh is gelijk aan 3,6 MJ:

$$\frac{126\,000\,000\text{ MJ}}{3,6\text{ MJ/kWh}} = 35\,000\,000\text{ kWh}$$

of

$$\frac{35\,000\,000\text{ kWh}}{278\text{ kWh/GJ}} = 126\,000\text{ GJ} = 126\,000\,000\text{ MJ}$$

Bovenstaande tabel kan nu als hulpmiddel gebruikt worden bij het invullen van het netto contante waarde model, zoals al eerder beschreven.

5.2.4 De initiële investering I_0

Eerst berekenen we de totale investeringskosten in het conversieproces, d.i. de verbrandingsinstallatie met nageschakelde stoomturbine voor de opwekking van elektriciteit. Vervolgens berekenen we de hoogte van de subsidies waarop de elektriciteitsproducent recht heeft als hij investeert in een verbrandingsinstallatie voor korte omloophout. In deze gevalstudie houden we rekening met de verhoogde investeringsaftrek en de ecologiepremie. Deze subsidies trekken we ten slotte af van de totale investeringskosten om de werkelijke initiële investering I_0 uit formule (5) te berekenen.

5.2.4.1 De totale investeringskosten

De investeringskosten kunnen opgedeeld worden in een aantal categorieën. Een eerste indeling is te vinden bij Bridgwater *et al.* (2002). De directe kosten bestaan onder andere uit elektriciteitswerken, civiele werken, pijpleidingen, gebouwen, isolatie en instrumenten. Deze directe kosten vormen samen met engineering, ontwerp, toezicht en overheadkosten de geïnstalleerde kosten. Hierbij worden commissielonen, lonen van aannemers en interesten opgeteld om de totale investeringskosten te verkrijgen. Een gelijkaardige, maar meer gedetailleerde indeling van de investeringskosten is te vinden bij Caputo *et al.* (2005). Deze is te vinden in Bijlage 5.

Caputo *et al.* (2005) hebben de investeringskosten berekend aan de hand van correlaties tussen de verschillende kostencomponenten en de elektriciteitsoutput. In de bijlagen (Bijlage 6) is een overzicht ervan te vinden. Deze correlaties zijn volgens het artikel betrouwbaar omdat ze vergeleken zijn met actuele kostdata verkregen bij verkopers. Hieronder worden de berekeningen aan de hand van de correlaties van Caputo *et al.* (2005) nagerekend voor een aantal mogelijke capaciteiten. Deze capaciteiten worden in de eerste rij uitgedrukt in MW, in rij twee worden deze capaciteiten vertaald in de benodigde aantal ha korte omloophout om deze capaciteit aan elektriciteit te kunnen produceren. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van Tabel 10.

Enkel de geaggregeerde kostencategorieën worden in onderstaande tabel weergegeven. Een gedetailleerde berekening is terug te vinden in de bijlagen (Bijlage 7 en 8). Daarnaast zit in de bijlagen (Bijlage 9) ook een afdruk van een excel-werkblad waarbij men een willekeurige waarde kan invullen bij het aantal ha. Om het verschil duidelijk te maken tussen velddroging en mechanische droging moet gekozen worden tussen twee scenario's: oogsten met velddroging of oogsten met mechanische droging. Deze keuze heeft immers een invloed op het aantal ton droog stof dat één hectare netto kan opbrengen. Afhankelijk van velddroging of mechanische droging wordt de ingevulde waarde omgezet in aantal MW en in de laatste rij van het werkblad vindt men de overeenkomstige totale investeringskost. Ter illustratie is in de bijlagen een willekeurige waarde ingevuld.

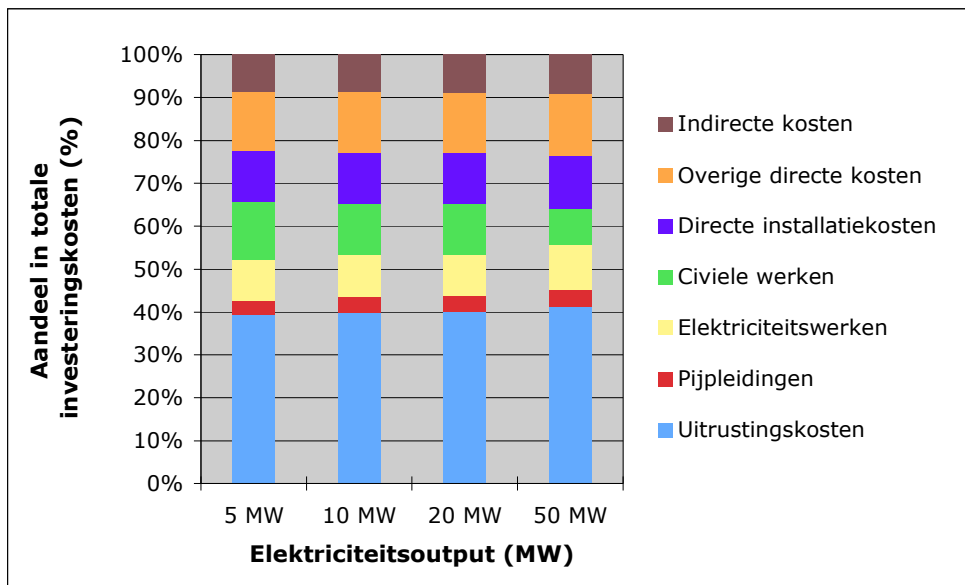
Tabel 19: Totale investeringskosten

| Aantal MW -> | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Aantal ha -> | 2 682 ha | 5 364 ha | 10 728 ha | 26 820 ha |
| Totaal directe investeringskosten | 19 557 | 29 094 | 43 820 | 76 687 |
| * Uitrustingskosten | 8 421 | 12 751 | 19 517 | 34 805 |
| - <i>Opwekken elektriciteit</i> | 6 702 | 10 137 | 15 473 | 27 398 |
| - <i>Opslagplaats biomassa</i> | 575 | 931 | 1 548 | 3 147 |
| - <i>Rookbehandeling</i> | 1 144 | 1 683 | 2 496 | 4 260 |
| * Pijpleidingen | 751 | 1 153 | 1 811 | 3 394 |
| * Elektriciteitswerken | 1 984 | 3 077 | 4 795 | 8 671 |
| * Civiele werken | 2 928 | 3 825 | 5 010 | 7 193 |
| * Directe installatiekosten | 2 526 | 3 825 | 5 855 | 10 442 |
| * Hulpdiensten | 1 263 | 1 913 | 2 928 | 5 221 |
| * Instrumenten/controles | 842 | 1 275 | 1 952 | 3 481 |
| * Terreinvoorbereiding | 842 | 1 275 | 1 952 | 3 481 |
| | | | | |
| Totaal indirecte investeringskosten | 1 853 | 2 805 | 4 294 | 7 657 |
| * Constructiekosten | 1 010 | 1 530 | 2 342 | 4 177 |
| * Opstartkosten | 842 | 1 275 | 1 952 | 3 481 |
| | | | | |
| Totaal investeringskosten (kEUR) | 21 409 | 31 899 | 48 114 | 84 344 |
| Investeringskost per MW (kEUR/MW) | 4 282 | 3 190 | 2 406 | 1 687 |

Om weer te geven hoe zwaar de verschillende investeringscomponenten doorwegen in de totale investeringskosten worden deze componenten uitgedrukt als percentage van de totale investeringskosten en vervolgens weergegeven in een figuur.

Tabel 20: Gewicht investeringscomponenten in totale investeringskosten

| Aantal MW -> | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|--------------------------------|----------|----------|-----------|-----------|
| Aantal ha -> | 2 682 ha | 5 364 ha | 10 728 ha | 26 820 ha |
| Totaal directe kosten | 91,35% | 91,21% | 91,08% | 90,92% |
| * Uitrustingskosten | 39,33% | 39,97% | 40,56% | 41,27% |
| * Pijpleidingen | 3,51% | 3,61% | 3,76% | 4,02% |
| * Elektriciteitswerken | 9,27% | 9,65% | 9,97% | 10,28% |
| * Civiele werken | 13,67% | 11,99% | 10,41% | 8,53% |
| * Directe installatiekosten | 11,80% | 11,99% | 12,17% | 12,38% |
| * Hulpdiensten | 5,90% | 6,00% | 6,08% | 6,19% |
| * Instrumenten/controles | 3,93% | 4,00% | 4,06% | 4,13% |
| * Terreinvoorbereiding | 3,93% | 4,00% | 4,06% | 4,13% |
| Totaal indirecte kosten | 8,65% | 8,79% | 8,92% | 9,08% |
| * Constructiekosten | 4,72% | 4,80% | 4,87% | 4,95% |
| * Opstartkosten | 3,93% | 4,00% | 4,06% | 4,13% |
| Totaal | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |



Figuur 4: Aandeel investeringscomponenten in totale investeringskosten

Figuur 4 geeft weer dat de investeringskosten in een verbrandingsinstallatie niet ophouden bij de uitrustingskosten. Deze kostencategorie maakt "slechts" circa 40 procent uit van de totale investeringskosten. De overige investeringscomponenten die, naast de uitrustingskosten, het zwaarste doorwegen in de totale investeringskosten zijn de civiele werken, de directe

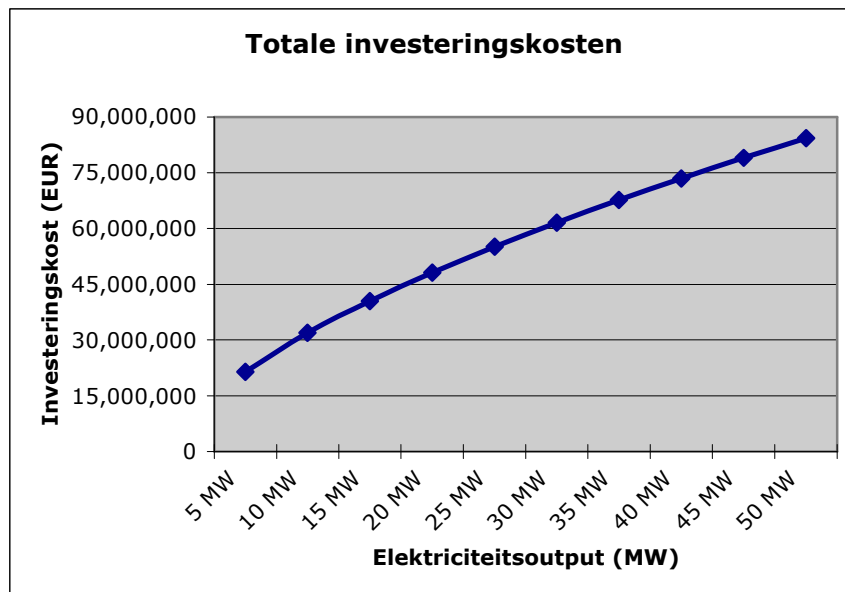
installatiekosten en de overige directe kosten (hulpdiensten, instrumenten/controles en terreinvoorbereiding).

Caputo *et al.* (2005) hebben een overzicht gemaakt van de totale investeringskosten die met een verbrandingsinstallatie voor biomassa gepaard gaan. Deze worden weergegeven in onderstaande tabel in kolom [3]. Daarnaast wordt in kolom [2] een overzicht gegeven van de investeringskosten die ter vergelijking door Caputo *et al.* (2005) afgeleid zijn uit verschillende bronnen. In de laatste kolom staan de eigen berekeningen vermeld, afkomstig uit Tabel 19.

Tabel 21: Overzicht totale investeringskosten

| Elektriciteitsoutput [1] | Overzicht data literatuur (Caputo <i>et al.</i> , 2005) [2] | Berekeningen Caputo <i>et al.</i> (2005) [3] | Eigen berekeningen aan de hand van correlaties van Caputo <i>et al.</i> (2005) [4] |
|-----------------------------|---|---|--|
| 5 MW | - | - | 21,4 miljoen EUR |
| 10 MW | 33,7 miljoen EUR | 32,5 miljoen EUR | 31,9 miljoen EUR |
| 20 MW | 41,3 miljoen EUR | 48,9 miljoen EUR | 48,1 miljoen EUR |
| 50 MW | 89,9 miljoen EUR | 85,4 miljoen EUR | 84,3 miljoen EUR |

De totale investeringskosten liggen dus bij de verschillende bronnen en bij de eigen berekeningen in dezelfde grootteorde. De investeringskosten uit de laatste kolom worden weergegeven op de figuur. Hieruit kan afgeleid worden dat deze investeringskosten niet lineair stijgen. Een verdubbeling van de elektriciteitsoutput brengt geen verdubbeling van de investeringskosten met zich mee. De weergegeven investeringskosten stijgen minder dan evenredig met de elektriciteitsoutput. Schaalvoordelen liggen aan de basis daarvan.



Figuur 5: Totale investeringskosten

Indien er een trendlijn en de bijhorende vergelijking toegevoegd worden, krijgt men het volgende:

$$y = 8E+06x^{0,5969} = 8 * 10^6 * x^{0,5969}$$

De R^2 bedraagt in dit geval 99,98 procent. R^2 is de determinatiecoëfficiënt en geeft aan hoeveel procent van de variatie in Y verklaard kan worden door de variatie in X. (Gujarati, 2003) In dit geval wordt de variatie in Y (de totale investeringskosten) voor 99,98 procent verklaard door de variatie in X (de elektriciteitsoutput). De trendlijn verloopt als een machtsfunctie. Dit is ook logisch aangezien de correlaties, waarop de investeringskosten en de grafieken gebaseerd zijn, machtsfuncties zijn. Andere trendlijnen kunnen ook een hoge R^2 vertonen.

Tabel 22: Trendlijnen totale investeringskosten

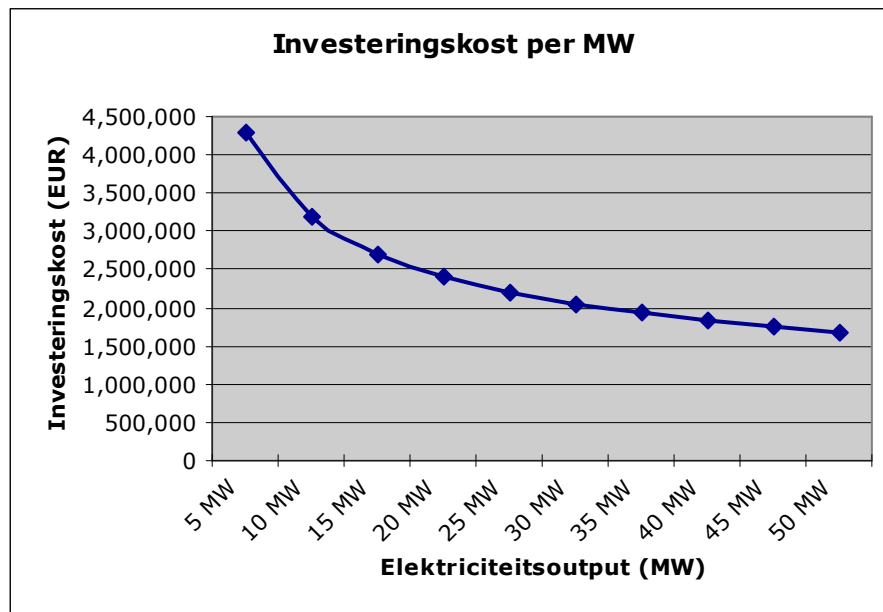
| Trendlijn | Vergelijking | R^2 |
|--------------|----------------------------------|---------|
| Lineair | $y = 1E+06x + 2E+07$ | 98,94 % |
| Logaritmisch | $y = 3E+07\ln(X) - 3E+07$ | 95,65 % |
| Polynoom | $y = -10790x^2 + 2E+06x + 1E+07$ | 99,93% |
| Exponentieel | $y = 2E+07e^{0,0276x}$ | 91,37% |

De investeringskost per MW wordt weergegeven in onderstaande tabel. Hiervoor worden de data gebruikt van eigen berekeningen aan de hand van de correlaties gevonden bij Caputo *et al.* (2005).

Tabel 23: Investeringskost per MW

| Aantal MW | Investeringskost per MW |
|-----------|-------------------------|
| 5 MW | 4 282 kEUR |
| 10 MW | 3 190 kEUR |
| 20 MW | 2 406 kEUR |
| 50 MW | 1 687 kEUR |

Ook deze kosten worden weergegeven in een figuur. Het is duidelijk dat de investeringskost per MW daalt naarmate de elektriciteitsoutput stijgt. Dit betekent dat de investering in een verbrandingsinstallatie schaalvoordelen met zich meebrengt. Deze schaalvoordelen worden ook bevestigd door Sintzoff *et al.* (2001).



Figuur 6: Investeringskost per MW

Men kan net zoals bij de totale investeringskosten een trendlijn en de bijhorende vergelijking toevoegen:

$$y = 8E+06x^{-0,4031} = 8 * 10^6 * x^{-0,4031}$$

Hiermee komt een R² overeen van 99,95 procent. Ook hier volgt de trendlijn een machtsfunctie. De andere mogelijke trendlijnen met hun vergelijkingen en de overeenkomende R² staan in de volgende tabel.

Tabel 24: Trendlijnen investeringskost per MW

| Trendlijn | Vergelijking | R ² |
|--------------|-----------------------------------|----------------|
| Lineair | $y = -47627x + 4E+06$ | 79,6% |
| Logaritmisch | $y = -1E+06\ln(x) + 6E+06$ | 97,44% |
| Polynoom | $y = 1687,9x^2 - 140459x + 5E+06$ | 95,59% |
| Exponentieel | $y = 4E+06e^{-0,0185x}$ | 89,31% |

Indien de investeringskost per MW omgerekend wordt naar een investeringskost per kW zou volgens Sintzoff *et al.* (2001) bij capaciteiten boven 10 MW aan elektriciteitsoutput een kost tussen 1 500 en 2 700 EUR per kW bereikt moeten worden. Dit klopt in deze gevalstudie inderdaad voor capaciteiten van 20 MW en 50 MW waarbij de investeringskost per kW respectievelijk 2 406 EUR en 1 687 EUR bedragen.

Een gedeelte van deze totale investeringskost komt in aanmerking voor een ecologiepremie en een verhoogde investeringsaftrek.

5.2.4.2 De ecologiepremie

Sinds 1 oktober 2007 is er een nieuw systeem, nl ecologiepremie-call. De ecologiepremie bedraagt 10% voor grote ondernemingen en 20% voor KMO's. De premie kan oplopen tot maximaal 1,5 miljoen EUR per aanvraag. De premie wordt berekend op basis van de ecologische meerkosten van de in aanmerking komende investeringscomponenten. (Agentschap Economie, 2007)

In de lijst met in aanmerking komende technologieën vinden we terug: "Techniek: Productie van energie (WKK/elektriciteit) op basis van de verbranding van biomassa"

MK = 50%

PF = 0,76

De MK is het meerkostpercentage. Dit geeft aan welk gedeelte van het investeringsbedrag in aanmerking komt voor de steunberekening. Hier bedraagt MK 50%. PF is de performantiefactor. Deze geeft weer hoe groot de kans is om gunstig gerangschikt te zijn. In dit geval dus 76%.

De limitatieve lijst vermeldt ook de essentiële investeringscomponenten. De technologie waarvoor een subsidieaanvraag wordt gedaan komt enkel in aanmerking indien er ook effectief geïnvesteerd wordt in deze vermelde essentiële investeringscomponenten. De niet-essentiële investeringscomponenten zijn facultatief en komen niet in aanmerking voor de subsidie. Dit werd beslist bij Ministerieel Besluit van 17 juni 2005.

De essentiële investeringscomponenten voor een verbrandingsinstallatie van biomassa zijn:

- installatie voor de afhandeling van reststoffen
- meet- en regelapparatuur
- verbrandingsapparatuur en aangepaste branders of vuurhaarden, voorzien van luchtvoorverwarmers en rookgascirculatie
- schoorstenen en apparatuur om rookgas/stookgas te reinigen, met inbegrip van apparatuur voor injectie van additieven en apparatuur voor afvoer en opslag van vliegassen
- elektrotechnische uitrusting voor aansluiting op interne en/of externe elektriciteitsnetten
- installatie van krachtwerktuigen (turbines, diesel- of Stirling- of stoom- of gasmotoren of ORC)

(Agentschap Economie, 2007)

De indeling in investeringscomponenten die we bij Caputo *et al.* (2005) vinden, bevat deze essentiële investeringscomponenten, namelijk:

- opwekken van elektriciteit
- rookbehandeling
- pijpleidingen
- elektriciteitswerken
- instrumenten en controles

Een aantal investeringscomponenten uit de lijst van Caputo *et al.* (2005) zijn dus niet-essentieel en komen niet in aanmerking voor een ecologiepremie:

- biomassa opslag en (voor)behandeling
- civiele werken

- directe installatiekosten
- hulpdiensten
- terreinvoorbereiding
- constructiekosten
- opstartkosten

Onderstaande berekening is dus enkel uitgevoerd met inbegrip van de essentiële investeringscomponenten.

Subsidiepercentage = 20 %

Steun = bedrag x subsidiepercentage x meerkostpercentage (14)

$$= \text{bedrag} \times 0,20 \times 0,50 = \text{bedrag} \times 0,1$$

Dit wil dus zeggen 10 % van de kosten van de essentiële investeringscomponenten gesubsidieerd worden.

In onderstaande tabel wordt de ecologiepremie voor verschillende elektriciteitsoutputs berekend. In de tweede rij staat de som van de kosten van de in aanmerking komende investeringscomponenten, zoals hierboven opgesomd. De ecologiepremie in de derde rij wordt berekend volgens bovenstaande formule.

Tabel 25: Ecologiepremie

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|---|------------|------------|------------|------------|
| In aanmerking komende investeringscomponenten (EUR) | 11 423 560 | 17 324 894 | 26 527 077 | 47 203 562 |
| Ecologiepremie (EUR) | 1 142 356 | 1 732 489 | 2 652 708 | 4 720 356 |

Er is echter een plafond verbonden aan de ecologiepremie. Deze bedraagt 1,5 miljoen EUR per aanvraag. Vanaf een elektriciteitsoutput van 10 MW is de premie dus beperkt tot 1,5 miljoen EUR. Bovenstaande tabel wordt bijgevolg vervangen door Tabel 26.

Tabel 26: Ecologiepremie met plafond

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|---|------------|------------|------------|------------|
| In aanmerking komende investeringscomponenten (EUR) | 11 423 560 | 17 324 894 | 26 527 077 | 47 203 562 |
| Ecologiepremie (EUR) | 1 142 356 | 1 500 000 | 1 500 000 | 1 500 000 |

5.2.4.3 De verhoogde investeringsaftrek

De verhoogde investeringsaftrek voor het aanslagjaar 2008 (inkomsten 2007) bedraagt 13,5%. Dit betekent dat men een vrijstelling krijgt voor een deel van de winst en baten van de onderneming. Op dit deel moeten dus geen belastingen worden betaald. Deze vrijstelling bedraagt 13,5% van de aanschaffingswaarde van de verbrandingsinstallatie. Belangrijk is dat het gaat om de winst of baten van het belastbare tijdperk waarin de vaste activa tot stand gebracht zijn. Indien we veronderstellen dat de verbrandingsinstallatie tot stand wordt gebracht in het jaar 2007, dan komen bijgevolg enkel de winsten of baten van het inkomstenjaar 2007 in aanmerking voor de vrijstelling. (Energiesparen, 2007)

Net als bij de ecologiepremie komen niet alle investeringscomponenten in aanmerking bij de verhoogde investeringsaftrek. De verbranding van biomassa behoort tot categorie 10: "Productie en gebruik van energie door chemische, thermo-chemische of biochemische omzetting van biomassa en afvalstoffen". De betrokken investeringscomponenten zijn:

- uitrusting uitsluitend voor het bewerken, opslaan en transporteren van de in- en uitgaande stoffen
- reactoren gebruikt voor de chemische, thermo-chemische of biochemische omzetting van de biomassa en de afvalstoffen met inbegrip van verbrandingsapparaten en aangepaste branders of vuurhaarden
- recuperatiestookketels aangesloten op verbrandingsapparaten; ketels of het verbouwen ervan en krachtwerktuigen om de verkregen brandstof te gebruiken
- warmtewisselaars
- meet-, tel- en regelapparatuur
- schoorstenen en apparatuur om rookgas en gasvormige of vloeibare effluenten te reinigen

(Vlaams Energieagentschap, 2007)

Indien deze lijst van investeringscomponenten vergeleken wordt met de indeling van de totale investeringskosten van Caputo *et al.* (2005) kan men besluiten dat volgende investeringscomponenten niet meegerekend mogen worden bij de verhoogde investeringsaftrek:

- civiele werken
- directe installatiekosten
- hulpdiensten
- terreinvoorbereiding
- constructiekosten
- opstartkosten

Dit is net hetzelfde als bij de ecologiepremie, met uitzondering van de kosten in verband met biomassa opslag en (voor)behandeling. In de lijst met in aanmerking komende investeringscomponenten voor de verhoogde investeringsaftrek staat vermeld dat "uitrusting uitsluitend voor het bewerken, opslaan en transporteren van de in- en uitgaande stoffen" wel meegerekend mogen worden. Dit is niet het geval bij de ecologiepremie.

Om nu het voordeel van de verhoogde investeringsaftrek te berekenen kan een eenvoudige formule gebruikt worden:

$$\text{Voordeel investeringsaftrek} = b \times c \times I \quad (15)$$

Hierbij is b het belastingtarief, dat voor deze case gelijk gesteld wordt aan een winstbelasting van afgerond 33 procent. Het investeringsaftrekpercentage wordt voorgesteld door de letter c en I zijn de totale investeringskosten. (Mercken, 2004) Dit geeft onderstaande tabel voor de verschillende capaciteiten.

Tabel 27: Verhoogde investeringsaftrek

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|---|------------|------------|------------|------------|
| In aanmerking komende investeringscomponenten (EUR) | 11 998 115 | 18 255 689 | 28 074 958 | 50 350 611 |
| Verhoogde investeringsaftrek (EUR) | 534 516 | 813 291 | 1 250 739 | 2 243 120 |

5.2.4.4 De initiële investering I_0

De totale kosten die gepaard gaan met de investering kunnen nu berekend worden door de investeringskosten te verminderen met de baten, bestaande uit de ecologiepremie en de verhoogde investeringsaftrek.

Tabel 28: Initiële investering

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Totale investeringskosten (EUR) | 21 409 469 | 31 898 733 | 48 113 560 | 84 343 812 |
| Ecologiepremie (EUR) | 1 142 356 | 1 500 000 | 1 500 000 | 1 500 000 |
| Verhoogde investeringsaftrek (EUR) | 534 516 | 813 291 | 1 250 739 | 2 243 120 |
| Initiële investering I_0 (EUR) | 19 732 597 | 29 585 442 | 45 362 820 | 80 600 692 |

5.2.5 *De jaarlijkse kasstroom K*

Bij de jaarlijkse cashflow worden onder andere gegevens gebruikt uit Fiala *et al.* (1997). Deze zijn uitgedrukt in ECU. Voor de invoering van de Euro is beslist één ECU gelijk te stellen aan één Euro. In verordening nr. 1103/97 van de Raad over enkele bepalingen betreffende de invoering van de Euro, gebaseerd op artikel 235 van het EG-Verdrag staat: "... de vervanging in de rechtsinstrumenten van verwijzingen naar de ecu door die naar de euro, tegen een koers van 1 euro voor 1 ecu". (Euramis, 2008) De bedragen in ECU van Fiala *et al.* (1997) kunnen dus ook in Euro worden uitgedrukt volgens de verhouding 1:1.

5.2.5.1 Opbrengst verkoop elektriciteit

De jaarlijkse cashflow omvat in de eerste plaats de opbrengsten van de verkoop van de geproduceerde energie. Indien de veronderstelling wordt aangenomen dat er enkel elektriciteit verkocht wordt, zijn de jaarlijkse opbrengsten het product van het aantal geproduceerde kWh en de prijs per kWh. In de literatuur worden verschillende prijzen gehanteerd. Dornburg en Faaij (2001) gebruiken een elektriciteitsprijs van 6,5 EUR/GJ of equivalent een prijs van 0,023

EUR/kWh. Bij deze elektriciteitsprijs werd rekening gehouden met een vergoeding vanwege de overheid van 95,3 EUR per geïnstalleerde kW. Fiala *et al.* (1997) houden het op een elektriciteitsprijs tussen 40 EUR/MWh en 140 EUR/MWh, overeenkomstig met een prijs tussen 0,04 EUR/kWh en 0,14 EUR/kWh. De gemiddelde elektriciteitsprijs bedraagt hierbij 55 EUR/MWh, ofwel 0,055 EUR/kWh. Oh *et al.* (2007) gebruiken een verschillende elektriciteitsprijs voor verschillende tijdstippen van het jaar. Gemiddeld genomen bedraagt de elektriciteitsprijs 0,0733 \$/kWh. Tegen de huidige wisselkoers (1 EUR = 1,53 \$) komt deze prijs overeen met 0,048 EUR/kWh. (De Tijd, 2008)

Volgens Caputo *et al.* (2005) bedraagt de marktprijs per geproduceerde kWh elektriciteit 0,103 EUR. Hierbij vermelden de auteurs dat deze aangenomen marktprijs "in lijn is met de gemiddelde distributieprijs voor consumenten, consistent is met de competitieve generatiekosten van biomassatechnologieën en bovendien representatief is voor het effect van mogelijke subsidies van overheidswege of groene prijsbeleid". Biezma en San Cristól (2006) hanteren een verkoopprijs van 0,057 EUR/kWh. Coenen en Schlatmann (2007) ten slotte maken gebruik van een elektriciteitsprijs van 0,051 EUR/kWh.

Een kleine opmerking moet gemaakt worden in verband met deze elektriciteitsprijzen. Indien de factuur van een gemiddeld Vlaams huisgezin vergeleken wordt met de gegevens uit de verschillende bronnen lijkt het alsof de elektriciteitsprijzen uit de literatuur wel erg laag zijn. Het bedrag dat op een elektriciteitsfactuur staat, kan opgedeeld worden in de eigenlijke elektriciteitsprijs, de prijs voor het gebruik van het distributienetwerk en een aantal heffingen en taksen van de overheid. Bij de verkoop van elektriciteit zijn de prijs voor gebruik van het distributienetwerk en de heffingen en taksen geen bron van inkomsten voor de producent van de elektriciteit. Deze bedragen worden dus verder niet in beschouwing genomen, enkel de elektriciteitsprijs zelf is relevant.

Uit de bovenstaande opsomming van de gehanteerde elektriciteitsprijzen in de literatuur blijkt dat de meeste auteurs zich aan een prijs van rond 0,050 EUR/kWh houden. In deze case wordt daarom gewerkt met de elektriciteitsprijs van 0,050 EUR/kWh. De opbrengst van de verkoop van de geproduceerde elektriciteit staat in Tabel 29.

Tabel 29: Opbrengst verkoop elektriciteit

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|-------------------------|------------|------------|-------------|-------------|
| Aantal kWh | 35 000 000 | 70 000 000 | 140 000 000 | 350 000 000 |
| Opbrengst verkoop (EUR) | 1 750 000 | 3 500 000 | 7 000 000 | 17 500 000 |

5.2.5.2 De jaarlijkse werkingskosten

De jaarlijkse werkingskosten bestaan uit verschillende componenten: onderhoudskosten, personeelskosten, aankoopkosten en transportkosten van de biomassa, verzekeringskosten en algemene overheadkosten. Volledigheidshalve worden ook de transport- en behandelingskosten voor de overblijvende assen in rekening gebracht.

5.2.5.2.1 *Onderhoudskosten*

In verschillende bronnen worden deze kosten uitgedrukt als een percentage van de totale investeringskosten. Fiala *et al.* (1997) gebruiken als gemiddeld percentage 3 procent. Maar de range waarbinnen dit kostenpercentage kan variëren loopt van 2 procent tot 6 procent. Volgens Mitchell *et al.* (1995) bedragen de jaarlijkse onderhoudskosten 2,5 procent van de investeringskosten. Ook Bridgwater *et al.* (2002) maken gebruik van een percentage van 2,5 procent. Caputo *et al.* (2005) drukken de jaarlijkse onderhoudskosten uit als een percentage van slechts 1,5 procent. In deze case wordt gewerkt met een jaarlijkse onderhoudskostenpercentage van 2,5 procent.

Tabel 30: Jaarlijkse onderhoudskosten

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Totale investeringskosten (EUR) | 21 409 469 | 31 898 733 | 48 113 560 | 84 343 812 |
| Jaarlijkse onderhoudskosten (EUR) | 535 237 | 797 468 | 1 202 839 | 2 108 595 |

5.2.5.2.2 *Personeelskosten*

Deze kostencategorie wordt berekend aan de hand van het loon van één werknemer en het totaal aantal werknemers in dienst. Volgens Fiala *et al.* (1997) bedraagt het loon van één werknemer tussen 20 000 en 40 000 EUR per jaar met een gemiddelde van 30 000 EUR per jaar. Hierbij moet men rekenen op gemiddeld twaalf werknemers in dienst, met een range van twee tot twintig werknemers. Hetzelfde gemiddelde brutoloon van 30 000 EUR per jaar is te vinden bij Mitchell *et al.* (1995). Caputo *et al.* (2005) gebruiken een gemiddeld loon van 26 000 EUR per jaar waarbij er twaalf tot zesendertig werknemers aangenomen zijn. Bij Bridgwater *et al.* (2002) vindt men een

gemiddeld loon per werknemer van 25 000 EUR per jaar. In de literatuur ligt het gemiddelde loon per werknemer dus binnen een range van 25 000 tot 30 000 EUR per jaar per werknemer. Om het eenvoudig te houden bedraagt het loon van één werknemers voor deze gevalstudie het gemiddelde van de gevonden range, d.i. 27 500 EUR op jaarbasis.

Om het aantal werknemers in dienst te bepalen gebruiken we formules van Bridgwater *et al.* (2002). Deze formules geven het aantal werknemers weer in functie van de capaciteit van de verbrandingsinstallatie. De capaciteiten zijn hierbij uitgedrukt in thermische input, dus niet in elektriciteitsoutput zoals in deze case. De thermische input wordt door Bridgwater *et al.* (2002) omschreven als de thermische energie die aanwezig is in de biomassa. De volgende tabel geeft de omzetting weer van elektriciteitsoutput naar thermische input.

Tabel 31: Omzetting naar thermische input

| | | | | |
|----------------------|----------|----------|----------|-----------|
| Elektriciteitsoutput | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
| Thermische input | 16,67 MW | 33,33 MW | 66,67 MW | 166,67 MW |

De omzetting gebeurt als volgt. Voor een capaciteit aan 5 MW elektriciteitsoutput is 23 333 tds biomassa per jaar nodig. Op jaarbasis zijn er 7 000 werkingsuren beschikbaar, dit komt overeen met 25 200 000 seconden per jaar. We kunnen met deze gegevens berekenen hoeveel ton er per seconde omgezet kan worden indien de capaciteit 5 MW bedraagt:

$$\frac{23\,333\text{ ton/jaar}}{25\,200\,000\text{ s/jaar}} = 0,000926\text{ ton/s}$$

De calorische waarde van hout is 18 000 MJ/ton. Dit geeft:

$$18\,000\text{ MJ/ton} \times 0,000926\text{ ton/s} = 16,67\text{ MJ/s} = 16,67\text{ MW}$$

Een alternatieve en eenvoudigere berekening maakt gebruik van de elektrische efficiëntie. Deze werd eerder op 30 procent vastgesteld. Als de output aan elektriciteit 5 MW bedraagt, dan moet de input gelijk zijn aan:

$$\frac{5\text{ MW}}{0,30} = 16,67\text{ MW}$$

Hierbij vertrekt men van de output aan elektriciteit om uit te komen bij de input aan thermische energie. Dit lijkt tegenstrijdig maar of de input nu uitgedrukt is in elektrische of thermische eenheden, maakt geen verschil. Het gaat om de energie die aanwezig is in de biomassa vooraleer deze de verbrandingsinstallatie ingaat. Of de biomassa na de verbranding omgezet wordt in elektriciteit en/of warmte heeft geen invloed op de thermische input.

Met behulp van Tabel 31 kunnen we de formules van Bridgwater *et al.* (2002) invullen. Het berekenen van het benodigde aantal werknemers wordt in twee stappen opgesplitst. De eerste stap levert het aantal werknemers voor het verbrandingsgedeelte van de installatie, de tweede stap berekent het aantal werknemers voor de stoomcyclus, waar de elektriciteit geproduceerd wordt.

Het verbrandingsgedeelte komt als eerste aan bod. De formules hiervoor zijn (Bridgwater *et al.*, 2002):

$$\text{Labour} = (-0,0488 \times \ln(E_{\text{th,pret}}) + 0,3001) \times E_{\text{th,pret}} \quad (16)$$

waarbij $E_{\text{th,pret}} < 140 \text{ MW}_{\text{th}}$ input

$$\text{Labour} = (0,9098 \times (E_{\text{th,pret}})^{-0,5539}) \times E_{\text{th,pret}} \quad (17)$$

waarbij $E_{\text{th,pret}} > 140 \text{ MW}_{\text{th}}$ input

De term $E_{\text{th,pret}}$ stelt de thermische input voor. Voor een elektriciteitsoutput van 5 MW, 10 MW en 20 MW is formule (16) toepasbaar, voor 50 MW moet formule (17) gebruikt worden. Dit geeft Tabel 32.

Tabel 32: Aantal werknemers verbrandingsgedeelte

| | | | | |
|--|----------|----------|----------|-----------|
| Aantal MW _e output | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
| Aantal MW _{th} input | 16,67 MW | 33,33 MW | 66,67 MW | 166,67 MW |
| Aantal werknemers per MW _{th} input | 0,16 | 0,13 | 0,10 | 0,05 |
| Aantal werknemers verbrandingsgedeelte | 2,71 | 4,30 | 6,34 | 8,91 |

De tweede stap, namelijk de berekening van het aantal werknemers voor de stoomcyclus, is gelijkaardig. Het verschil met het verbrandingsgedeelte ligt in de uitdrukking van de formules. Daar waar bij het verbrandingsgedeelte de berekeningen steunen op de thermische input, steunen deze bij de stoomcyclus op de elektriciteitsoutput. Tabel 31 is voor deze stap niet nodig. De gebruikte formules uit Bridgwater *et al.* (2002) zijn als volgt:

$$\text{Labour} = (-0,1951 \times \ln(P_{e,\text{gross}}) + 0,9298) \times P_{e,\text{gross}} \quad (18)$$

waarbij $P_{e,\text{gross}} < 35 \text{ MW}_e$ output

$$\text{Labour} = (1,6887 \times (P_{e,\text{gross}})^{-0,5539}) \times P_{e,\text{gross}} \quad (19)$$

waarbij $P_{e,\text{gross}} > 35 \text{ MW}_e$ output

Hierbij is $P_{e,\text{gross}}$ de elektriciteitsoutput van de installatie. Net zoals voor het verbrandingsgedeelte worden er verschillende formules gebruikt voor kleine en grote capaciteiten. Formule (18) is toepasbaar voor capaciteiten van 5 MW, 10 MW en 20 MW. Voor een capaciteit van 50 MW wordt formule (19) gebruikt.

Tabel 33: Aantal werknemers stoomcyclus

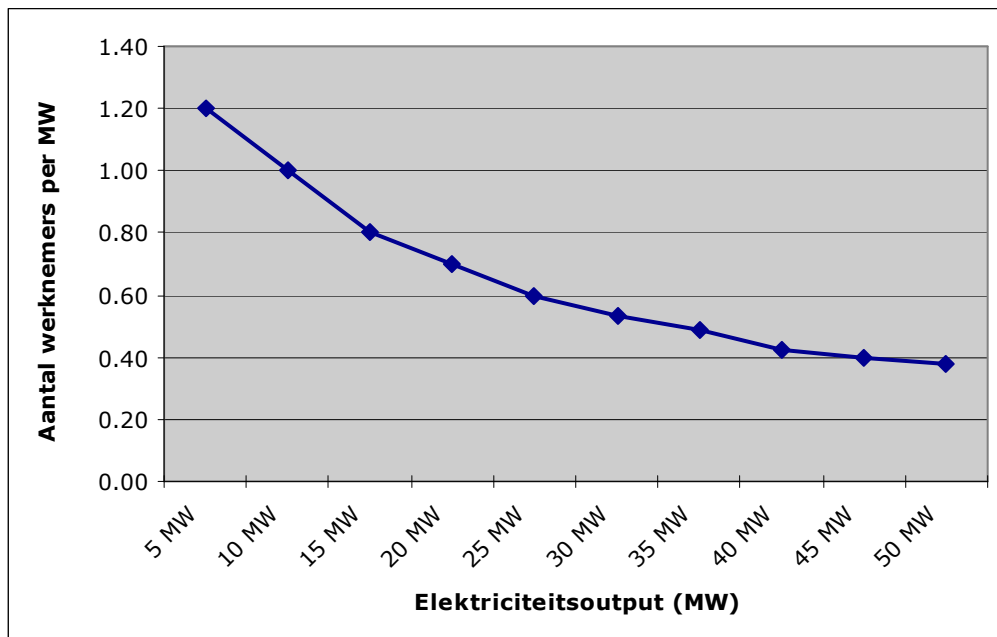
| Aantal MW_e output | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|--|----------|----------|----------|-----------|
| Aantal MW_{th} input | 16,67 MW | 33,33 MW | 66,67 MW | 166,67 MW |
| Aantal werknemers per MW_e output | 0,62 | 0,48 | 0,35 | 0,19 |
| Aantal werknemers stoomcyclus | 3,08 | 4,81 | 6,91 | 9,67 |

Als we Tabel 32 en Tabel 33 samenvoegen, bekomen we het totaal aantal benodigde werknemers van de verbrandingsinstallatie in functie van de elektriciteitsoutput. De verkregen aantallen moeten daarna nog afgerond worden. Deze afronding gebeurt steeds naar boven toe. Zoals eerder vermeld, ligt het loon van één werknemers vast op 27 500 EUR per jaar. De loonkosten op jaarbasis staan in de laatste rij van Tabel 34.

Tabel 34: Personeelskosten op jaarbasis

| Aantal MW _e output | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|--|---------|---------|---------|---------|
| Totaal aantal werknemers verbrandingsinstallatie | 5,79 | 9,10 | 13,25 | 18,59 |
| Totaal aantal werknemers verbrandingsinstallatie met afronding | 6 | 10 | 14 | 19 |
| Personeelskosten (EUR) | 165 000 | 275 000 | 385 000 | 522 500 |

Figuur 7 geeft duidelijk weer dat het aantal werknemers per MW daalt indien de capaciteit van de verbrandingsinstallatie toeneemt. Zo heeft men 1,20 werknemers per MW nodig bij een capaciteit van 5 MW. Bij een elektriciteitsoutput van 50 MW is dit nog slechts 0,38 werknemers per MW.



Figuur 7: Aantal werknemers per MW

5.2.5.2.3 Aankoopkosten en transportkosten biomassa

De kosten in verband met de aankoop en het transport van biomassa worden samen de aanvoerkosten genoemd, zoals bij García *et al.* (2003) terug te vinden is. Om volledig te zijn

worden voor deze case de aanvoerkosten in volgende kostencomponenten opgedeeld: aankoop, drogen, opslag, verkleinen en transport. De data die terug te vinden zijn in de literatuur lopen bij deze kostencategorie uiteen. Sommige auteurs rekenen bij de aankoopkosten ook de transportkosten, anderen dan weer niet. Ook staan in bepaalde bronnen de kosten voor behandeling en/of opslag apart vermeld, bij andere bronnen staan deze kosten helemaal niet vermeld. Een overzicht van verschillende bronnen staat in onderstaande tabel. Kolom [3] van deze tabel omschrijft wat door de verschillende auteurs onder de term "aankoopkost" gerekend wordt.

Tabel 35: Overzicht aanvoerkosten bij verschillende bronnen

| Bron [1] | Aankoopkost [2] | Inbegrepen in deze kost [3] | Transportkost [4] |
|--|---|---|--|
| Fiala <i>et al.</i> (1997) | 20 - 140 EUR/tds (gemiddeld: 50 EUR/tds) | niet exact aangegeven -> wel dat in de aankoopkost ook de opslag inbegrepen is | 0,10 - 0,90 EUR/tds en per km (gemiddeld 0,30 EUR/tds en per km) |
| Caputo <i>et al.</i> (2005) | 26 EUR/tds | niet exact aangegeven -> de aankoopkost wordt omschreven als "een algemene geleverde biomassakost exclusief transportkosten" | som van de vervoerskosten en het loon van de transporteurs: <ul style="list-style-type: none"> • vervoerskosten = product van de afstand en de specifieke vervoerskost van 1,14 EUR per km • loon van 1 transporteur = 21 080 EUR per jaar |
| García <i>et al.</i> (2003) en Sintzoff <i>et al.</i> (2001) | geen aankoopkost gegeven, wel: <ul style="list-style-type: none"> • kosten verkleinen: 40 - 60 EUR/tds • kosten drogen en opslaan: afhankelijk van de techniek tussen 0 en 30 EUR/tds | <ul style="list-style-type: none"> • verkleinen • drogen • opslag | 4,2 EUR/tds |
| INBO (2007) | 35 EUR/tds of 48,5 EUR/tds | <ul style="list-style-type: none"> • teelt • oogst • verkleinen • drogen • transport • opslag | niet apart gegeven |

Een presentatie van INBO (2007) (Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek) vermeldt een aankoopprijs van 35 EUR/tds. Hierbij is rekening gehouden met de terreinvoorbereiding, de aankoop van het plantgoed en de planting zelf, de oogst en ten slotte het ontstronken op het einde van de levensduur van de plantage. Tijdens het oogsten wordt het hout verkleind en daarnaast houdt de oogst ook het transport, het opslaan en drogen in. In de prijs van 35 EUR/tds is geen winsttoeslag meegerekend, deze prijs is dus een kostprijs indien een landbouwer de houtsnippers produceert voor eigen gebruik. De marktprijs voor houtsnippers ligt een stuk hoger en bedraagt 48,5 EUR/tds. Zoals blijkt uit Tabel 35 is de informatie uit deze bron het meest compleet. De gehanteerde aanvoerkosten omvatten alle kostencomponenten. Om deze reden gebruikt deze gevalstudie de gegevens van INBO (2007). We veronderstellen dat de houtsnippers op de markt aangekocht worden tegen een prijs van 48,5 EUR/tds.

Tabel 36: Totale aanvoerkosten

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Aantal ton biomassa (tds) | 23 333 | 46 667 | 93 333 | 233 333 |
| Totale aanvoerkosten (EUR) | 1 131 667 | 2 263 333 | 4 526 667 | 11 316 667 |

5.2.5.2.4 Verzekeringskosten en algemene overheadkosten

De verzekeringskosten en algemene overheadkosten bedragen volgens Caputo *et al.* (2005) 1 procent van de totale investeringskosten. Voor de verschillende capaciteiten geeft dit volgende tabel.

Tabel 37: Verzekerings- en algemene overheadkosten

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|--|------------|------------|------------|------------|
| Totale investeringskosten (EUR) | 21 409 469 | 31 898 733 | 48 113 560 | 84 343 812 |
| Verzekerings- en algemene overheadkosten (EUR) | 214 095 | 318 987 | 481 136 | 843 438 |

5.2.5.2.5 Transport- en behandelingskosten van de assen

Om de jaarlijkse productiekosten zo volledig mogelijk in kaart te brengen wordt er in deze case ook rekening gehouden met de assen die overblijven na verbranding en die verwijderd en behandeld moeten worden. Caputo *et al.* (2005) hebben deze kosten apart berekend. Wat betreft de atransportkosten wordt een waarde van 62 EUR per ton assen toegepast. De jaarlijkse hoeveelheid geproduceerde assen bedragen volgens Caputo *et al.* (2005) 2 procent van de totale hoeveelheid biomassa die verbrand wordt op jaarbasis. Op een gelijkaardige manier worden vervolgens de asbehandelingskosten berekend. Hiervoor wordt een waarde van 24 EUR per ton assen gebruikt. Toegepast op deze case geeft dit het volgende.

Tabel 38: Transport- en behandelingskosten van de overblijvende assen

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|------------------------------------|--------|--------|---------|---------|
| Aantal ton biomassa (tds) | 23 333 | 46 667 | 93 333 | 233 333 |
| Jaarlijkse hoeveelheid assen (ton) | 467 | 933 | 1 867 | 4 667 |
| Transportkosten assen (EUR) | 28 933 | 57 867 | 115 733 | 289 333 |
| Behandelingskosten assen (EUR) | 11 200 | 22 400 | 44 800 | 112 000 |

5.2.5.2.6 Overzicht jaarlijkse werkingskosten

Om de jaarlijkse werkingskosten af te sluiten volgt een samenvattende tabel met de verschillende kostencategorieën voor de veronderstelde capaciteiten. Alles is uitgedrukt in EUR op jaarbasis.

Tabel 39: Overzicht jaarlijkse werkingskosten

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|---|-----------|-----------|-----------|------------|
| Onderhoudskosten | 535 237 | 797 468 | 1 202 839 | 2 108 595 |
| Personeelskosten | 165 000 | 275 000 | 385 000 | 522 500 |
| Aankoopkosten biomassa | 1 131 667 | 2 263 333 | 4 526 667 | 11 316 667 |
| Verzekeringskosten en algemene overheadkosten | 214 095 | 318 987 | 481 136 | 843 438 |
| Transportkosten assen | 28 933 | 57 867 | 115 733 | 289 333 |
| Behandelingskosten assen | 11 200 | 22 400 | 44 800 | 112 000 |
| Totale jaarlijkse werkingskosten | 2 086 131 | 3 735 056 | 6 756 175 | 15 192 533 |

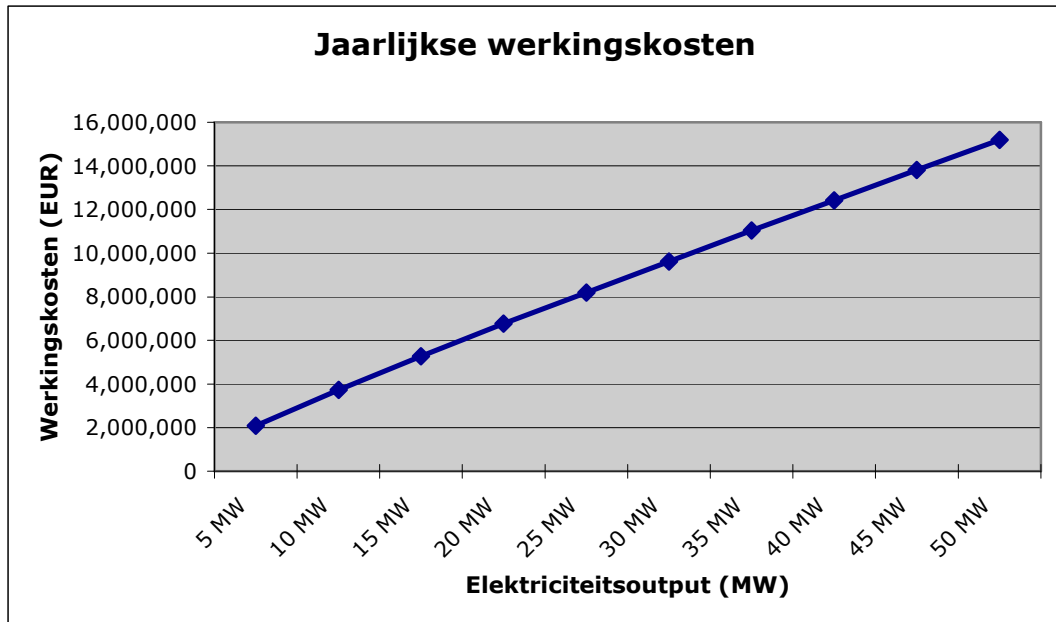
Volgens Dornburg et Faaij (2001) zijn de jaarlijkse onderhoudskosten, verzekeringskosten en personeelskosten samen goed voor 3 tot 6 procent van de totale investeringskosten. Indien men voor deze case de som van de drie betreffende kostencategorieën uitdrukt als een percentage van de totale investeringskosten voor een capaciteit van bijvoorbeeld 20 MW krijgt men:

| | |
|--|-----------|
| jaarlijkse onderhoudskosten | 1 202 839 |
| + verzekeringskosten (inclusief algemene overheadkosten) | 481 136 |
| + personeelskosten | 385 000 |
| = totaal | 2 068 975 |

Het totaal van de drie betreffende kostencategorieën van 2 068 975 EUR bedraagt 4,3% van de totale investeringskosten van 48,1 miljoen EUR. Dit ligt binnen de range gebruikt door Dornburg en Faaij (2001).

De jaarlijkse werkingskosten worden op een grafiek weergegeven ten opzichte van de netto elektriciteitsoutput. Op het eerste zicht lijkt het alsof de jaarlijkse werkingskosten lineair stijgen met de capaciteit. Indien we een lineaire trendlijn afleiden uit deze grafiek heeft deze een hoge R^2 van 99,94 procent. Maar de cijfers geven aan dat er toch schaalvoordelen zijn. Zo stijgen de

jaarlijkse werkingskosten van 2 086 131 EUR naar 3 735 056 EUR bij een verdubbeling van de capaciteit van 5 MW naar 10 MW.



Figuur 8: Jaarlijkse werkingskosten

5.2.5.3 Subsidies en steunmaatregelen

Twee steunmaatregelen werden bij de investering al besproken, namelijk de ecologiepremie en de verhoogde investeringsaftrek. Deze twee steunmaatregelen worden éénmalig toegekend. In het NCW-model betekent dit dus dat de ecologiepremie en verhoogde investeringsaftrek in jaar 0 doorgerekend worden.

Er bestaat ook een jaarlijkse steunmaatregel voor de opwekking van elektriciteit uit biomassa, namelijk de groenestroomcertificaten. Per geproduceerde MWh groene stroom wordt één certificaat uitgereikt. De certificaten kunnen door de producent van de groene stroom dan verkocht worden aan leveranciers van elektriciteit. De gemiddelde jaarprijs van één groenestroomcertificaat in de periode 1 april 2007 - 31 maart 2008 bedraagt 108,23 EUR. (VREG, 2008)

De jaarlijkse opbrengsten van de verbrandingsinstallatie in deze case bestaan uit de verkoop van de geproduceerde elektriciteit. Dit wil zeggen dat de geproduceerde elektriciteit niet voor eigen gebruik is, maar bestemd voor consumenten. De elektriciteit wordt afgezet op het elektriciteitsnet maar niet rechtstreeks verkocht aan eindgebruikers. Indien dit wel zo zou zijn, is de verbrandingsinstallatie zelf een leverancier en moet dan dus ook voldoen aan de

certificatenregelgeving. Voor een bepaald percentage van de totale elektriciteitsoutput moet de verbrandingsinstallatie dan groenestroomcertificaten kunnen voorleggen. Enkel de overblijvende certificaten kunnen verkocht worden op de markt. (VREG, 2008) In deze case is de verbrandingsinstallatie enkel producent van elektriciteit en geen leverancier. Bijgevolg moet de installatie niet voldoen aan de certificatenregeling en kan het alle verworven groenestroomcertificaten verkopen op de markt.

Tabel 40: Opbrengst verkoop groenestroomcertificaten

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|---|-----------|-----------|------------|------------|
| Aantal MWh | 35 000 | 70 000 | 140 000 | 350 000 |
| Aantal toegekende certificaten (1 per MWh) | 35 000 | 70 000 | 140 000 | 350 000 |
| Opbrengst verkoop certificaten tegen prijs van 108,23 EUR/certificaat | 3 788 050 | 7 576 100 | 15 152 200 | 37 880 500 |

5.2.5.4 De te betalen vennootschapsbelasting

Zoals al eerder aangehaald bedraagt de vennootschapsbelasting in deze case 33 procent. Om te weten hoeveel belastingen er moeten betaald worden, moet de netto jaarlijkse kasstroom berekend worden. In het hoofdstuk waarin het analytisch model beschreven wordt, is deze formule (8) terug te vinden:

$$\text{Kasstromen na belastingen} = (1 - b) \times (O - Q) + (b \times A)$$

De belastingvoet b is 0,33. De jaarlijkse afschrijving A is, onder de assumptie van een lineaire afschrijvingmethode, gelijk aan de totale investeringskosten gedeeld door de levensduur van 20 jaar. De inkomende kasstroom O bestaat uit de verkoop van de geproduceerde elektriciteit en de verkoop van groenestroomcertificaten. De uitgaande kasstroom Q bestaat de jaarlijkse werkingskosten. Onderstaande tabel vult de bovenstaande formule in voor de verschillende capaciteiten. Alle getallen zijn uitgedrukt op jaarbasis.

Tabel 41: Totale netto kasstroom na belastingen

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|---|-----------|------------|------------|------------|
| Inkomende kasstroom (EUR) = O | 5 538 050 | 11 076 100 | 22 152 200 | 55 380 500 |
| Uitgaande kasstroom (EUR) = Q | 2 086 131 | 3 735 056 | 6 756 175 | 15 192 533 |
| Netto kasstroom voor belastingen (EUR) = (O - Q) | 3 451 919 | 7 341 044 | 15 396 025 | 40 187 967 |
| Netto kasstroom na belastingen (EUR) = (1 - b) x (O - Q) | 2 312 785 | 4 918 500 | 10 315 337 | 26 925 938 |
| Belastingenschild afschrijvingen (EUR) = (b x A) | 353 256 | 526 329 | 793 874 | 1 391 673 |
| Totale netto kasstroom na belastingen (EUR) = (1 - b) x (O - Q) + (b x A) | 2 666 042 | 5 444 829 | 11 109 211 | 28 317 611 |

5.2.6 De netto contante waarde

De netto contante waarde voor het investeringsproject kan nu berekend worden aan de hand van de totale netto kasstroom na belastingen en de investering. Vooraleer de berekeningen te maken, worden alle relevante gegevens op een rij gezet.

Tabel 42: Overzicht gegevens NCW

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|--|------------|------------|------------|------------|
| Investering (EUR) | 19 732 597 | 29 585 442 | 45 362 820 | 80 600 692 |
| Levensduur (jaar) | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Kapitaalkost voor belastingen (%) | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Belastingvoet (%) | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Totale jaarlijkse netto kasstroom na belastingen (EUR) | 2 666 042 | 5 444 829 | 11 109 211 | 28 317 611 |

De netto contante waarde voor de verschillende capaciteiten staat in onderstaande tabel. In eerste instantie wordt de NCW berekend uitgaande van een kapitaalkost voor belastingen van 10 procent. Dit geeft een kapitaalkost na belastingen van:

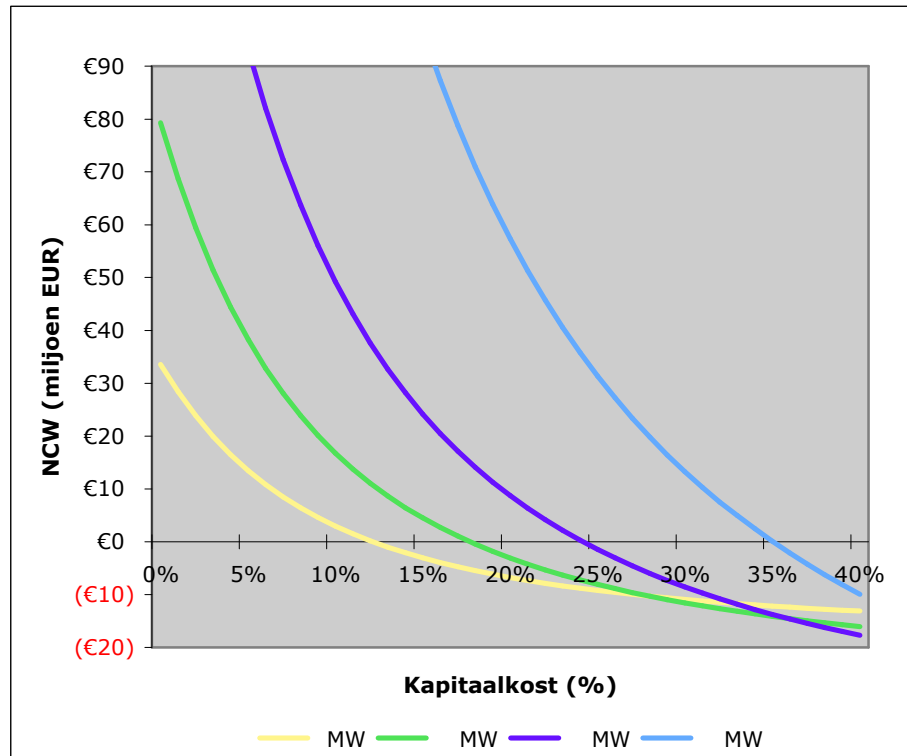
$$r = (1 - b) \times r^* = (1 - 0,33) \times 0,10 = 6,7 \%$$

Tabel 43: NCW

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|-----------|-----------|------------|------------|-------------|
| NCW (EUR) | 9 182 204 | 29 466 953 | 75 123 153 | 226 520 573 |

De netto contante waarde is voor alle capaciteiten positief. Het investeringsproject is economisch haalbaar onder de aangenomen veronderstellingen. Caputo *et al.* (2005) kwamen tot andere bevindingen. In hun berekeningen bleef de netto contante waarde negatief tot een capaciteit van 25 MW. Een verklaring hiervoor is dat in deze case rekening gehouden wordt met de opbrengst van de verkoop van groenestroomcertificaten, bij Caputo *et al.* (2005) niet. Daarnaast bedraagt de kapitaalkost na belastingen bij Caputo *et al.* (2005) 9 procent. Bij de investering wordt er ook geen rekening gehouden met een ecologiepremie of verhoogde investeringsaftrek en er is geen sprake van afschrijvingen, dus ook geen belastingschild.

De netto contante waarde is sterk afhankelijk van de gebruikte discontovoet. Dit kan het best weergegeven worden aan de hand van een netto-contante-waarde-profiel. Hierbij wordt de NCW uitgezet ten opzichte van een range aan kapitaalkosten na belastingen.



Figuur 9: NCW-profiel

Deze figuur toont aan dat de netto contante waarde negatief wordt bij een kapitaalkost van 13 procent in het geval van een capaciteit van 5 MW. Algemeen kan men stellen dat hoe hoger de capaciteit, hoe hoger de netto contante waarde en hoe hoger de kapitaalkost bij een netto contante waarde van nul.

5.2.7 De productiekosten

De productiekost van de elektriciteitsopwekking door verbranding van biomassa kan vergeleken worden met andere technieken om elektriciteit te genereren. Stel dat de capaciteit van de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit 5 MW bedraagt. Over de levensduur van de verbrandingsinstallatie zijn de jaarlijkse werkingskosten in deze gevalstudie elk jaar hetzelfde, namelijk 2 086 131 EUR per jaar. Bij deze jaarlijkse werkingskosten komen de jaarlijkse kapitaalkosten om de totale productiekosten op jaarbasis te verkrijgen. Om de jaarlijkse

kapitaalkosten te berekenen, vermenigvuldigen we de initiële investering met de annuïteitenfactor. De formule die hiervoor gebruikt wordt, is de volgende (Geurds *et al.*, 2006):

$$\text{Jaarlijkse kapitaalkosten} = \text{initiële investering} \times \frac{r^* \times (1 + r^*)^n}{(1 + r^*)^n - 1}$$

De kapitaalkost voor belastingen bedraagt in deze gevalstudie 10 procent. We nemen de kapitaalkost voor belastingen omdat het belastingschild van de interesten niet behoort tot de productiekosten. De initiële investering bedraagt 19 732 597 EUR. De jaarljkse kapitaalkosten zijn bijgevolg gelijk aan:

$$\text{Jaarlijkse kapitaalkosten} = 19\,732\,597 \times \frac{(0,10) \times (1,10)^{20}}{(1,10)^{20} - 1} = 2\,317\,783 \text{ EUR}$$

De totale productiekost op jaarbasis is gelijk aan 4 403 914 EUR. Een capaciteit van 5 MW houdt in dat er per jaar 35 000 MWh geproduceerd kan worden. De productiekost per MWh bedraagt hierbij 126 EUR, ofwel 0,126 EUR/kWh.

Ter vergelijking wordt dezelfde berekening gemaakt voor een capaciteit van 50 MW. De jaarlijkse werkingskosten bedragen in dit geval 15 192 533 EUR. De jaarlijkse kapitaalkosten zijn gelijk aan 9 467 327 EUR. De totale productiekost op jaarbasis bedraagt 24 659 860 EUR. De elektriciteitsproductie is per jaar 350 000 MWh. Voor een capaciteit van 50 MW is de productiekost voor de opwekking van elektriciteit bijgevolg 70 EUR/MWh of 0,070 EUR/kWh. Dit is een stuk lager dan bij een capaciteit van 5 MW. De verklaring hiervoor ligt bij de schaalvoordelen aangaande de investeringskosten. Bij een stijgende capaciteit daalt immers de kost per MW. Tabel 23 en Figuur 6 maken dit duidelijk. Daarnaast zijn een aantal kostencomponenten van de jaarlijkse werkingskosten gebaseerd op de investeringskosten. De onderhoudskosten, verzekeringskosten en algemene overheads zijn uitgedrukt als percentage van de investeringskosten. Deze kosten stijgen bijgevolg minder dan evenredig met een stijgende capaciteit. Ook de personeelskosten stijgen niet evenredig met de capaciteit. Het aantal werknemers per MW daalt bij een stijgende capaciteit (zie Figuur 7) en dit vertaalt zich in personeelskosten die minder dan evenredig stijgen met de capaciteit van de installatie. De jaarlijkse werkingskosten stijgen niet lineair, hoewel Figuur 8 weergeeft dat het verloop van de jaarlijkse werkingskosten wel benaderd kan worden door een lineaire trendlijn met een waarde van 99,94 procent voor R^2 .

In de volgende tabel staat de productiekost per MWh voor de opwekking van elektriciteit voor de verschillende capaciteiten onder standaardvoorwaarden. Hieruit blijkt dat de productiekost per MWh afneemt met een stijgende capaciteit. Net zoals bij de investeringskosten vertonen productiekosten voor de opwekking van elektriciteit schaalvoordelen. In de vorige alinea is al

aangehaald dat er een verband bestaat tussen de investeringskosten en een aantal kostencomponenten van de jaarlijkse werkingskosten. Dit is dan, samen met de opbouw van de personeelskosten, de verklaring van de schaalvoordelen.

Tabel 44: Productiekost elektriciteitsopwekking onder standaardvoorwaarden

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|---------------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| Totale productiekosten per jaar (EUR) | 4 403 914 | 7 210 151 | 12 084 475 | 24 659 860 |
| Productiekost per MWh (EUR/MWh) | 126 | 103 | 86 | 70 |

Bovenstaande berekeningen aangaande de productiekost voor de opwekking van elektriciteit zijn gebaseerd op de standaardwaarden voor deze gevalstudie. In de sensitiviteitsanalyse van Hoofdstuk 6 variëren een aantal parameters om de invloed ervan op de NCW na te gaan. Zonder nu al in detail te gaan op deze sensitiviteitsanalyse kan er van de parameters toch al gebruik gemaakt worden om een onder- en bovengrens af te leiden betreffende de productiekost per MWh. We zoeken met andere woorden de twee combinaties van parameters waarbij de productiekost per MWh het laagst en het hoogst is. De verkoopprijs van de geproduceerde elektriciteit of warmte genereren opbrengsten en geen kosten en deze parameters komen niet in aanmerking. De kapitaalkost voor belastingen heeft een invloed via de jaarlijkse kapitaalkosten. In de sensitiviteitsanalyse van Hoofdstuk 6 varieert de kapitaalkost voor belastingen binnen een range van 5 procent tot 25 procent. Hoge kapitaalkosten voor belastingen zijn het meest waarschijnlijk bij financiering met eigen vermogen.

De resterende parameters zijn het elektrisch en thermisch omzettingsrendement en de aankoopprijs van de biomassa. Met een gebruiksfactor voor de warmte moet geen rekening gehouden worden, deze bedraagt voor een verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit 0 procent en dus heeft ook het thermisch omzettingsrendement geen invloed. De parameters die wel in aanmerking komen zijn het elektrisch omzettingsrendement, de aankoopprijs van de biomassa en de kapitaalkost voor belastingen. Bij de berekening van de onder- en bovengrens worden enkel die combinaties weerhouden waarbij de netto contante waarde van het investeringsproject positief is. De productiekost berekenen van een onrendabel investeringsproject lijkt immers weinig zinvol.

Een verandering in de waarde van één parameter is mogelijk, maar verschillende combinaties met telkens twee van de drie besproken parameters zijn ook mogelijk. De combinatie die de laagste

productiekosten oplevert, is deze waarbij de aankoopprijs van de biomassa 28,5 EUR en de kapitaalkost voor belastingen 5 procent bedraagt. Bij deze combinatie zijn de jaarlijkse werkingskosten 1 619 465 EUR en de jaarlijkse kapitaalkosten 1 583 395 EUR. Dit resulteert in een productiekost van 92 EUR/MWh ofwel 0,092 EUR/kWh. De combinatie van een aankoopprijs van de biomassa van 68,5 EUR/tds en een kapitaalkost voor belastingen van 15 procent levert de hoogste jaarlijkse productiekost op, namelijk 163 EUR/MWh. Dit is gelijk aan 0,163 EUR/kWh.

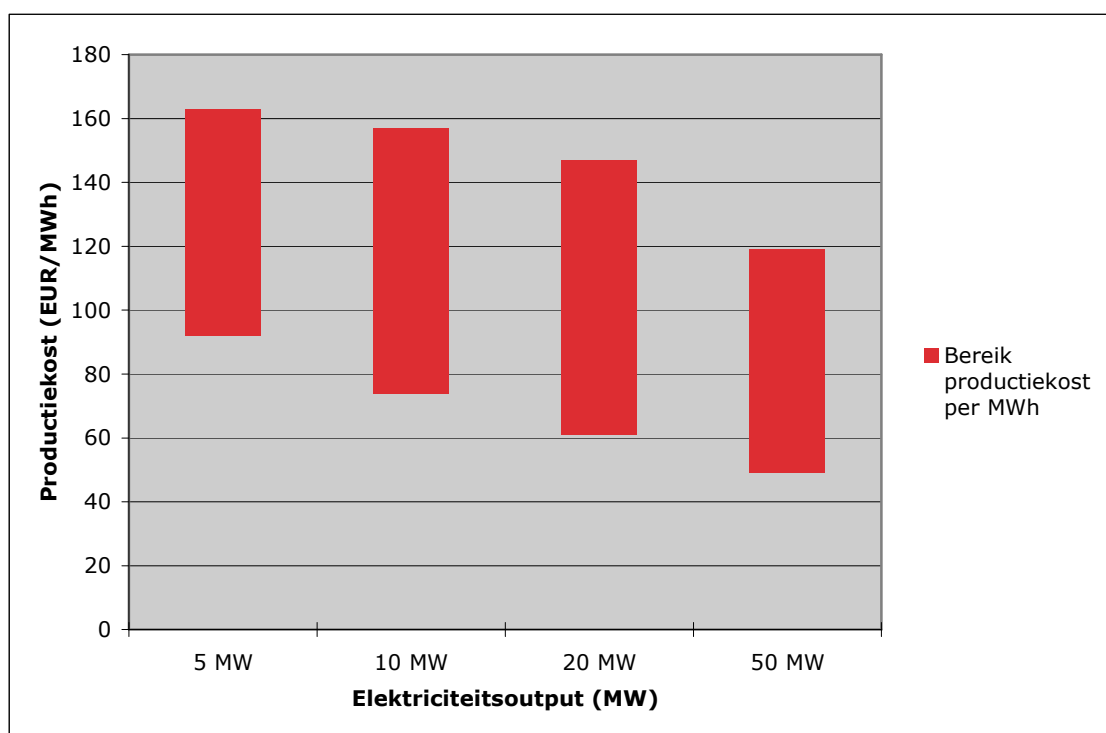
Voor een capaciteit van 5 MW valt af te leiden dat onder de veronderstellingen voor deze gevalstudie de ondergrens gevormd wordt door een productiekost van 92 EUR/MWh, terwijl de bovengrens een productiekost is van 163 EUR/MWh. Dezelfde vergelijkingen kunnen gemaakt worden voor andere capaciteiten, om zo een onder- en bovengrens te verkrijgen betreffende de productiekost. Figuur 10 geeft deze grenzen weer voor de verschillende capaciteiten.

Deze grenzen liggen voor de kleinst beschouwde capaciteiten (5 MW en 10 MW) een stuk hoger als de waarden die in de literatuur te vinden zijn. Volgens Bolhàr-Nordenkampf (2006) ligt de productiekost tussen 75 EUR en 100 EUR per MWh voor een verbrandingsinstallatie voor biomassa met nageschakelde stoomcyclus. De specifieke productiekost per MWh onder standaardwaarden zoals in Tabel 44 vallen voor een capaciteit van 20 MW en 50 MW wel binnen de range van Bolhàr-Nordenkampf (2006). In deze bron staat bovendien vermeldt dat de verschillende technieken vergeleken zijn voor een capaciteit van 20 MW aan elektriciteitsproductie. De hogere productiekosten bij capaciteiten van 5 MW en 10 MW kan dus voor een stuk verklaard worden door schaalvoordelen. De specifieke productiekost per MWh daalt immers bij een stijgende capaciteit.

In deze laatste bron is er bovendien een vergelijking terug te vinden met andere hernieuwbare energietechnologieën. Een vergassingsinstallatie voor biomassa bijvoorbeeld brengt een productiekost van 70 EUR tot 110 EUR per MWh met zich mee. De duurste technologie voor wat betreft productiekosten die Bolhàr-Nordenkampf (2006) vermeldt, is zonne-energie. Hierbij bedraagt de productiekost tussen 350 EUR en 440 EUR per MWh. De laagste productiekosten zijn te vinden bij waterkracht, namelijk 49 EUR tot 73 EUR voor één MWh. Ook windenergie heeft met een bereik van 48 EUR tot 84 EUR per MWh een lagere productiekost dan de verbranding van biomassa.

Demirbas en Urkmez (2006) geven voor biomassa aan dat de productiekost varieert tussen 4,2 cEUR en 7,9 cEUR per kWh. Per MWh ligt de productiekost dus tussen 42 en 79 EUR. Voor steenkool geven Demirbas en Urkmez (2006) een productiekost aan tussen 45 EUR en 70 EUR per MWh. Gas heeft een lagere productiekost per MWh, namelijk 44 EUR tot 50 EUR. De auteurs vermelden bij geen van de energiebronnen welke omzettingsprocessen gevolgd worden of welke componenten vervat zitten in de productiekost per MWh. Dit maakt het moeilijk om te vergelijken met de gevonden bereiken uit Figuur 10.

De bereiken in deze gevalstudie zijn breder dan die uit de literatuur. Dit heeft te maken met de variaties in de waarden van de parameters die gebruikt zijn in de sensitiviteitsanalyse en die hier overgenomen zijn om de onder- en bovengrens te berekenen. De ondergrens bijvoorbeeld wordt voor alle capaciteiten gevormd door de specifieke productiekost per MWh te berekenen onder de veronderstelling dat de aankoopkost van de biomassa 28,5 EUR/tds bedraagt en de kapitaalkost voor belastingen 5 procent. De combinatie van deze twee parameters heeft een zeer "gunstige" invloed op de productiekosten. Om de bovengrens te berekenen zijn telkens zeer "ongunstige" combinaties gebruikt. De onder- en bovengrenzen zijn berekend aan de hand van de uiterste waarden voor de beschouwde parameters. Dit geeft telkens een groot bereik voor de verschillende capaciteiten.



Figuur 10: Bereik productiekost per MWh

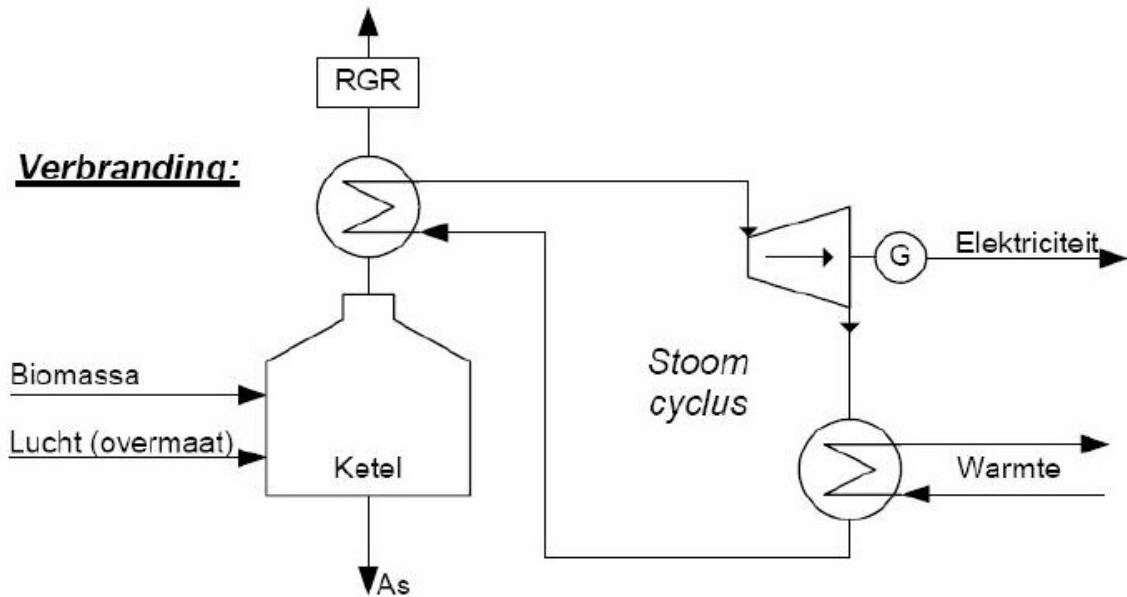
De invloed van de toekenning van groenestroomcertificaten op de productiekosten kan berekend worden door de totale productiekosten over de levensduur van de installatie te verminderen met de opbrengsten van de verkoop van de certificaten. Onder de standaardvoorwaarden voor deze gevalstudie en bij een capaciteit van 5 MW bedragen de totale productiekosten 4 403 914 EUR per jaar (zie Tabel 44). De verkoop van groenestroomcertificaten levert jaarlijks 3 788 050 EUR op. De totale productiekosten verminderen tot 615 864 EUR. Per MWh bedraagt de specifieke productiekost nog 18 EUR.

Voor andere capaciteiten wordt hetzelfde gedaan en dat levert een opmerkelijk resultaat op. Bij een capaciteit van 10 MW daalt de specifieke productiekost per MWh dankzij de verkoop van groenestroomcertificaten tot een negatieve waarde. De opbrengsten van de verkoop van groenestroomcertificaten is met andere woorden hoger dan de totale productiekosten. In cijfers: de jaarlijkse productiekosten bedragen 7 210 151 EUR en de verkoop van groenestroomcertificaten levert per jaar 7 576 100 EUR op. De specifieke productiekost per MWh is gelijk aan "-5 EUR". Onder de veronderstellingen van deze gevalstudie en bij een capaciteit van 10 MW is de verkoop van groenestroomcertificaten voldoende om de productiekosten te dekken. Bij een capaciteit van 20 MW en 50 MW geldt dezelfde conclusie. De verkoop van groenestroomcertificaten levert telkens een opbrengst op die de productiekosten meer dan volledig kunnen dekken.

5.3 Warmtekrachtkoppeling

5.3.1 *Inleiding*

In de berekeningen werd er tot nu toe alleen rekening gehouden met de productie en verkoop van elektriciteit. De warmte die vrijkomt doordat de stoom op het einde van de cyclus terug condenseert tot water wordt in dat geval niet benut en vrijgelaten in de lucht. Biezma en San Cristóbal (2006) vermelden dat de gecombineerde productie van elektrische en thermische energie significante energiebesparingen kan opleveren. Daarnaast maakt deze methode het ook mogelijk om de algemene efficiëntie van de installatie te verbeteren in vergelijking met het geval waarbij elektriciteit en warmte apart worden geproduceerd. Een dergelijk systeem waarbij warmte en elektriciteit samen geproduceerd worden, noemt men CHP (combined heat and power) of WKK (warmtekrachtkoppeling). Bij Coenen en Schlatmann (2007) is een figuur te vinden van een WKK-installatie. Deze figuur laat zien hoe de biomassa in aanwezigheid van een overmaat aan lucht verbrand wordt in een ketel. Hierbij komen rookgassen vrij die stoom produceren door water op te warmen. In de stoomcyclus zorgt deze stoom voor het aandrijven van een generator (aangeduid door de letter G). Op deze manier wordt elektriciteit geproduceerd. De stoom condenseert hierna en de verdampingswarmte kan dan verder in de stoomcyclus ingezet worden om gebouwen van warmte te voorzien. Ten slotte sluit de stoomcyclus doordat de gecondenseerde stoom, water dus, terug ingezet wordt om stoom te produceren en op deze manier een nieuwe cyclus te beginnen.



Bron: Coenen en Schlatmann, 2007

Figuur 11: WKK-installatie

De elektrische en thermische efficiëntie voor de aparte opwekking van elektriciteit en warmte staan in Tabel 17. Voor een WKK-installatie zijn andere efficiënties van toepassing. De totale efficiëntie van een WKK-installatie is gedefinieerd als de ratio van de bruikbare energie ten opzichte van de energie-input. In formulevorm geeft dit (Nesheim en Ertesvåg, 2007):

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{(W + Q)}{H} \quad (20)$$

Met:

- η_{tot} = de totale efficiëntie;
- W = geproduceerde elektrische energie (MW_e);
- Q = geproduceerde thermische energie (MW_{th});
- H = energie aanwezig in de biomassa -> afhankelijk van de LHV (MW_{th})

De fracties van de energie die aanwezig is in de biomassa die omgezet worden in elektrische energie enerzijds en thermische energie anderzijds, worden voorgesteld door de volgende uitdrukkingen (Nesheim en Ertesvåg, 2007):

$$\eta_e = \frac{W}{H} \quad (21)$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{Q}{H} \quad (22)$$

Met:

- η_e = de elektrische efficiëntie;
- η_{th} = de thermische efficiëntie;
- W, Q en H zijn gedefinieerd zoals in formule (20)

De som van de omzettingsrendementen uit formule (21) en (22) is gelijk aan de totale efficiëntie uit formule (20). Een andere veel gebruikte uitdrukking is de "power to heat ratio", d.i. de verhouding van de geproduceerde elektriciteit ten opzichte van de geproduceerde warmte. Deze ratio geeft in formulevorm de volgende uitdrukking (Nesheim en Ertesvåg, 2007):

$$\sigma = \frac{W}{Q} = \frac{\eta_e}{\eta_{th}} \quad (23)$$

5.3.2 Veronderstellingen

In Tabel 45 staan de omzettingsrendementen zoals terug te vinden in de geraadpleegde bronnen.

Tabel 45: Omzettingsrendementen WKK bij verschillende bronnen

| | Fiala <i>et al.</i> (1997) | Coenen en Schlatmann (2007) | Keppo en Savola (2007) | Papadopoulos en Katsigiannis (2002) |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---|
| Elektrische efficiëntie | 22% | 25% | 28% - 31% | 20% |
| Thermische efficiëntie | 62% | 60% | 62% - 78 % | 66,7% |

In deze gevalstudie gebruiken we de cijfers zoals terug te vinden bij Coenen en Schlatmann (2007), namelijk een elektrische efficiëntie van 25 procent en een thermische efficiëntie van 60 procent. Dit geeft een totale efficiëntie van de WKK-installatie van 85 procent. De "power to heat ratio" is gelijk aan 42 procent (0,25/0,60).

In het hoofdstuk "de verbrandingsinstallatie" werd geen rekening gehouden met de productie van thermische energie. Bijgevolg was het eenvoudig om de capaciteit van de installatie te definiëren. Deze werd namelijk uitgedrukt in aantal MW elektriciteitsoutput. Een WKK-installatie heeft twee outputstromen en dus kan de capaciteit van een dergelijke installatie op verschillende manieren uitgedrukt worden: in aantal MW elektriciteitsoutput, aantal MW warmteoutput, aantal MW totale

output of zelfs aantal MW input. Om vergelijkingen met het vorige hoofdstuk te vereenvoudigen worden ook de capaciteiten van de WKK-installatie uitgedrukt in aantal MW elektriciteitsoutput. Dezelfde range is van toepassing, namelijk van 5 MW tot 50 MW. Om het verschil aan te geven tussen de productie van enkel elektriciteit en de gecombineerde productie van elektriciteit en warmte, krijgen de capaciteiten van de WKK-installatie er een subscript bij. De range verandert in 5 MW_e tot 50 MW_e. Hierbij staat MW_e voor aantal MW elektriciteit. Het aantal MW thermische energie wordt analoog voorgesteld door MW_{th} en indien de totale output van de installatie uitgedrukt wordt, krijgt dit de eenheid MW. Tabel 46 zet deze gegevens op een rijtje.

Tabel 46: Verbrandingsinstallatie <-> WKK-installatie

| Soort installatie | Totale output | Elektrische output | Thermische output |
|--|---|----------------------|-------------------|
| Verbrandingsinstallatie: productie van elektriciteit | MW = MW _e | MW _e = MW | - |
| WKK-installatie: productie van elektriciteit en warmte | MW = MW _e + MW _{th} | MW _e | MW _{th} |

De mogelijke capaciteiten voor de WKK-installatie in deze case kunnen uitgedrukt worden in verschillende eenheden. Doordat er bij een WKK-installatie met een andere elektrische efficiëntie gewerkt wordt, is het aantal tds biomassa dat nodig is om een bepaalde elektriciteitsoutput te kunnen produceren niet hetzelfde als in het vorige hoofdstuk. De omzettingen uit Tabel 18 gelden dus niet voor een WKK-installatie.

Een nieuwe omzettingstabel is te vinden in Tabel 47. De berekeningen zijn als volgt. Indien de WKK-installatie een elektriciteitsoutput van 5 MW_e heeft, is de benodigde hoeveelheid biomassa:

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{5 \text{ MW}_e \times 3\,600 \text{ s/h} \times 7\,000 \text{ h/jaar}}{0,25 \times 18\,000 \text{ MJ/tds}} \\
 &= \frac{5 \text{ MJ/s} \times 3\,600 \text{ s/h} \times 7\,000 \text{ h/jaar}}{0,25 \times 18\,000 \text{ MJ/tds}} \\
 &= \frac{126\,000\,000 \text{ MJ/jaar}}{4\,500 \text{ MJ/tds}} \\
 &= 28\,000 \text{ tds/jaar}
 \end{aligned}$$

De formule die hierbij gebruikt is, is dezelfde als formule (2). Bij het invullen zijn alle veronderstellingen behouden (het aantal werkingsuren is 7 000 h/jaar en de LHV van de biomassa is 18 000 MJ/tds), behalve de elektrische efficiëntie (0,25 in plaats van 0,30).

De benodigde hoeveelheid biomassa om 5 MW_e te produceren is dus 28 000 tds. Deze hoeveelheid kunnen we vervolgens vertalen in aantal MW input op jaarbasis:

$$\frac{28\,000 \text{ tds} \times 18\,000 \text{ MJ/tds}}{7\,000 \text{ h/jaar} \times 3\,600 \text{ s/h}} = 20 \text{ MW}$$

Deze 20 MW stelt de energie voor die aanwezig is in de biomassa op het moment dat deze de WKK-installatie ingaat. Met een totale efficiëntie van 85 procent wordt van deze 20 MW aan input 17 MW omgezet. De 17 MW kan opgesplitst worden in 5 MW_e en 12 MW_{th}. Immers:

$$20 \text{ MW} \times 0,25 = 5 \text{ MW}_e$$

$$20 \text{ MW} \times 0,60 = 12 \text{ MW}_{th}$$

Met deze gegevens kunnen dan het aantal MJ en kWh elektriciteit berekend worden, net zoals voor Tabel 18. Daarnaast kan ook het aantal MJ en kWh warmte uitgerekend worden. Voor andere capaciteiten zijn de berekeningen analoog. De volgende tabellen geven de resultaten van deze omzettingen voor capaciteiten van 5 MW_e, 10 MW_e, 20 MW_e en 50 MW_e.

Tabel 47: Omzettingstabel WKK-installatie

| MW _e | MW _{th} | Totale output (MW) | Input (MW) | Ton biomassa (tds) | ha |
|-----------------|------------------|--------------------|------------|--------------------|--------|
| 5 | 12 | 17 | 20 | 28 000 | 3 218 |
| 10 | 24 | 34 | 40 | 56 000 | 6 437 |
| 20 | 48 | 68 | 80 | 112 000 | 12 874 |
| 50 | 120 | 170 | 200 | 280 000 | 32 184 |

Specifiek voor de geproduceerde elektriciteit staan nog enkele omzettingen in Tabel 48. Merk op dat deze cijfers hetzelfde zijn als in Tabel 18. Dit is ook logisch aangezien we met dezelfde capaciteiten aan elektriciteitsoutput werken.

Tabel 48: Omzettingstabel voor elektriciteit

| MW _e | MJ | MWh | kWh |
|-----------------|---------------|---------|-------------|
| 5 | 126 000 000 | 35 000 | 35 000 000 |
| 10 | 252 000 000 | 70 000 | 70 000 000 |
| 20 | 504 000 000 | 140 000 | 140 000 000 |
| 50 | 1 260 000 000 | 350 000 | 350 000 000 |

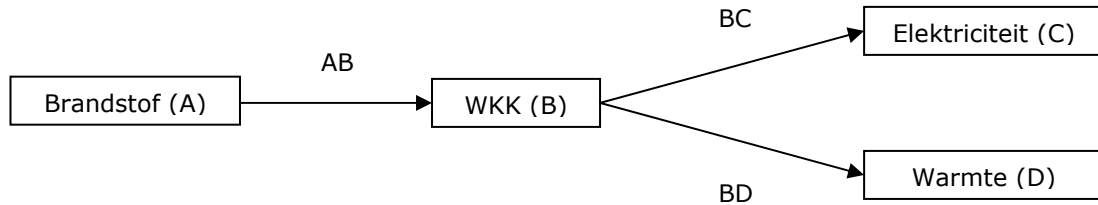
Ook voor de geproduceerde thermische energie volgt een omzettingstabel. Thermische energie wordt meestal uitgedrukt in aantal MJ of GJ. De omzetting naar kWh is niet toepasselijk voor warmte, maar voor verdere berekeningen wordt de warmte ook uitgedrukt in aantal kWh. De volgende tabel geeft in de tweede kolom weer hoeveel thermische energie er geproduceerd wordt indien de capaciteit van de WKK-installatie respectievelijk 5 MW_e, 10 MW_e, 20 MW_e en 50 MW_e is, onder de veronderstelling dat de elektrische efficiëntie 25 procent is en de thermische efficiëntie 60 procent. Daarnaast staan in de derde kolom de overeenkomstige hoeveelheden MJ, in de vierde kolom het aantal MWh en in de vijfde kolom het aantal kWh.

Tabel 49: Omzettingstabel voor warmte

| MW _e | MW _{th} | MJ | MWh | kWh |
|-----------------|------------------|---------------|---------|-------------|
| 5 | 12 | 302 400 000 | 84 000 | 84 000 000 |
| 10 | 24 | 604 800 000 | 168 000 | 168 000 000 |
| 20 | 48 | 1 209 600 000 | 336 000 | 336 000 000 |
| 50 | 120 | 3 024 000 000 | 840 000 | 840 000 000 |

Bij Sundberg en Henning (2002) vinden we een schematische voorstelling van de energiestromen binnen een WKK-installatie. Deze wordt hieronder weergegeven in een vereenvoudigde voorstelling. Sundberg en Henning (2002) maken de productie van warmte en elektriciteit tijdsafhankelijk, d.w.z. dat ze het jaar opdelen in seizoenen en de vraag naar elektriciteit en warmte laten variëren naargelang het seizoen. Bijgevolg verandert de productie van zowel warmte

als energie van seizoen tot seizoen. Deze tijdsafhankelijkheid wordt in deze gevalstudie achterwege gelaten.



Figuur 12: Energiestromen in een WKK-installatie

AB, BC en BD stellen telkens de energiestromen voor, uitgedrukt in MWh of MJ. De elektrische en thermische efficiëntie in een WKK-installatie kunnen aan de hand van de schematische voorstelling in een formule uitgedrukt worden (Sundberg en Henning, 2002):

$$BC + BD - \eta AB = 0 \tag{24}$$

Hierbij stelt η de algemene efficiëntie van de installatie voor. Bovenstaande uitdrukking stelt vast dat de som van de twee outputstromen (elektriciteit en warmte) gelijk is aan de inputstroom maal de algemene efficiëntie van de installatie. Dit klopt inderdaad voor deze gevalstudie. Indien men formule (24) invult voor een capaciteit van 5 MW_e, dan bekomt men het volgende:

$$126\,000\,000\text{ MJ} + 302\,400\,000\text{ MJ} - (0,85 \times 504\,000\,000\text{ MJ}) = 0$$

Nu we deze gegevens hebben, kunnen we ook voor een WKK-installatie het al eerder beschreven NCW-model invullen. Dezelfde stappen in de berekening van de netto contante waarde worden hierbij gevolgd. Dit wil zeggen: eerst de initiële investering, vervolgens de jaarlijkse netto kasstroom en ten slotte de netto contante waarde.

5.3.3 De initiële investering I_0

De initiële investering I_0 is ook in het geval van een WKK-installatie gelijk aan de totale investeringskosten min met de ecologiepremie en de verhoogde investeringsaftrek.

5.3.3.1 De totale investeringskosten

De totale investeringskosten voor de WKK-installatie zijn dezelfde als voor de verbrandingsinstallatie met productie van elektriciteit. De enige extra investeringskosten houden verband met de aanleg van het distributienet voor de thermische energie. Deze thermische energie kan aan verschillende gebruikers geleverd worden: bedrijventerreinen, woonwijken, kantoren etc. In de meeste geraadpleegde bronnen is er sprake van "district heating", het verwarmen van een woonwijk. Ook in deze gevalstudie werken we daarom met een woonwijk om de thermische energie af te zetten.

De veronderstelling die we hier maken, namelijk dat de investeringskosten van de installatie zelf hetzelfde zijn als in Paragraaf 5.2 berusten op het volgende: in "A guide to cogeneration" (2001) staat vermeld dat de energie geproduceerd door een installatie voor co-generatie op verschillende manieren aangewend kan worden. Zo kan de thermische energie binnen de installatie zelf aangewend worden of het kan ook geëxporteerd worden naar een woonwijk. Een bijkomende mogelijkheid is het aanwenden van enkel de elektriciteit en de warmte vrijlaten in de lucht via de warmtewisselaar die normaal de schakel vormt tussen de installatie en het warmtenet. Deze warmtewisselaar is te zien in Figuur 11. Dit bevestigt dat de installatie voor het omzetten van de biomassa in energie en de nageschakelde stoomcyclus hetzelfde verondersteld mogen worden, ongeacht of de warmte via de warmtewisselaar op een warmtenet afgezet of in de lucht vrijgelaten wordt. Als we de lijn nog doortrekken kan de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit uit Paragraaf 5.2 in principe ook beschouwd worden als een WKK-installatie, maar krijgt deze naam niet omwille van de niet nuttige aanwending van de warmte.

De extra investeringskosten bij een WKK-installatie met nuttige aanwending van warmte zijn dus voor rekening van het warmtenet. In een haalbaarheidsstudie betreffende de aanleg van een warmtenet in Twente werden deze investeringskosten opgesplitst in de investeringen voor de transportleidingen enerzijds en de investeringen voor de distributieleidingen anderzijds. De transportleidingen dienen om de afstand tussen de installatie en de gebruikers van de warmte te overbruggen. In de haalbaarheidsstudie is er sprake van afstanden tot 65 km. In deze gevalstudie gaan we ervan uit dat de thermische energie geleverd wordt aan een nabijgelegen woonwijk. De investeringskosten in verband met de transportleidingen zijn bijgevolg niet significant. We houden enkel rekening met de investeringskosten om het distributienet binnen de woonwijk aan te leggen. Voor een nieuwe woonwijk bedragen deze investeringskosten 2 400 EUR per aansluiting. (Hoogsteen *et al.*, 2003)

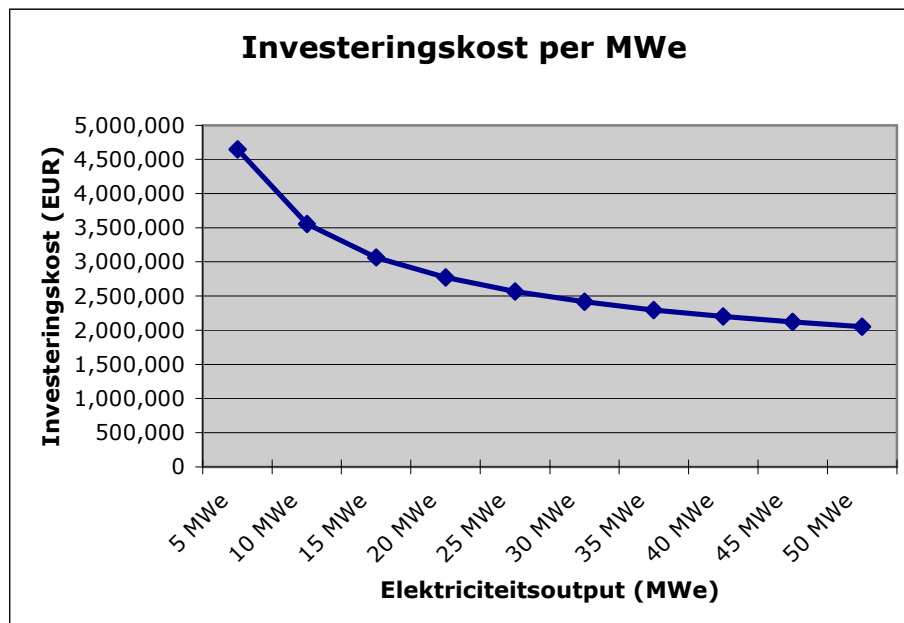
Dornburg en Faaij (2001) vermelden dat de gemiddelde vraag naar warmte in een woonwijk 2,2 MW per km² bedraagt. Verder is bij Statbel te vinden dat er in het jaar 2001 circa 4 249 000 particuliere woningen in België zijn. Als de oppervlakte van België 30 528 km² bedraagt, geeft dit

dus 139 woningen per km². (ADSEI, 2008) Voor een WKK-installatie met een thermische energieoutput van 12 MW_{th} wil dit zeggen dat deze installatie een woonwijk van 5,45 km² kan voorzien van warmte. Onder de veronderstelling dat er per km² 139 woningen zijn, telt een woonwijk van 5,45 km² afgerond 758 woningen. Per aansluiting op het distributienet gaat een investeringkost gepaard van 2 400 EUR. Voor een woonwijk waarvan 758 woningen aangesloten zijn op dat net geeft dit een investeringskost van 1 822 kEUR. De investeringskosten voor de andere capaciteiten staan in Tabel 50.

Tabel 50: Totale investeringskosten WKK-installatie

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|--|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Totale investeringskosten uit Tabel 19 (kEUR) | 21 409 | 31 899 | 48 114 | 84 344 |
| Bijkomende investeringskosten warmtenet (kEUR) | 1 822 | 3 644 | 7 288 | 18 220 |
| Totale investeringskosten WKK-installatie (kEUR) | 23 232 | 35 542 | 55 402 | 102 564 |
| Investeringskost per MW _e (kEUR/MW _e) | 4 646 | 3 554 | 2 770 | 2 051 |

Ook hier is er sprake van schaalvoordelen. De investeringskost per MW daalt immers met een stijgende capaciteit. De volgende figuur geeft dit weer.



Figuur 13: Investeringskost per MWe WKK-installatie

5.3.3.2 De ecologiepremie

Aangaande de ecologiepremie zijn de berekeningen zoals voor de verbrandingsinstallatie met productie van elektriciteit ook geldig voor de WKK-installatie. In de lijst met de in aanmerking komende technologieën staat immers: "Techniek: Productie van energie (WKK/elektriciteit) op basis van de verbranding van biomassa". Hiermee gaat een meerkostpercentage van 50 procent en een performantiefactor van 76 procent gepaard. Ook de essentiële investeringscomponenten blijven dezelfde voor de WKK-installatie. En het plafond van 1 500 000 EUR als maximum voor de ecologiepremie geldt ook in dit geval. Tabel 51 geeft de hoogte van de steun weer voor de verschillende capaciteiten.

Tabel 51: Ecologiepremie met plafond WKK-installatie

| | 5 MWe | 10 MWe | 20 MWe | 50 MWe |
|---|------------|------------|------------|------------|
| In aanmerking komende investeringscomponenten (EUR) | 11 423 560 | 17 324 894 | 26 527 077 | 47 203 562 |
| Ecologiepremie (EUR) | 1 142 356 | 1 500 000 | 1 500 000 | 1 500 000 |

5.3.3.3 De verhoogde investeringsaftrek

De investeerder in een WKK-installatie heeft ook recht op een verhoogde investeringsaftrek. In de limitatieve lijst van de in aanmerking komende investeringen valt een WKK-installatie onder categorie 7: "Warmte-kracht-koppelingsapparatuur". Enkele bijkomende voorwaarden om recht te hebben op de verhoogde investeringsaftrek hebben te maken met de omzettingsrendementen. Deze rendementen moeten voldoen aan (Vlaams Energieagentschap, 2007):

$$\eta_e + (2/3 \times \eta_{th}) \geq 50\%$$

$$\text{en } \frac{\eta_e}{\eta_e + \eta_{th}} \geq 25\%$$

$$\text{en } \frac{\eta_{th}}{\eta_e + \eta_{th}} \geq 25\%$$

Hierbij is η_e het elektrisch omzettingsrendement en η_{th} geeft het thermisch omzettingsrendement weer. Ingevuld voor deze gevalstudie geven bovenstaande relaties:

$$0,25 + (2/3 \times 0,60) = 0,65 \geq 50\%$$

$$\frac{0,25}{0,25 + 0,60} = 0,29 \geq 25\%$$

$$\frac{0,60}{0,25 + 0,60} = 0,71 \geq 25\%$$

De drie voorwaarden zijn voldaan en bijgevolg heeft de WKK-installatie in deze gevalstudie recht op een verhoogde investeringsaftrek in het belastbare jaar waarin de investering tot stand gebracht wordt. De in aanmerking komende investeringscomponenten zijn hierbij:

- installatie van krachtwerktuigen (gasturbines, diesel- en gasmotoren evenals stoomketels gecombineerd met tegendrukstoomturbines of aftapcondensatieturbines) waarin thermische energie wordt omgezet in mechanische energie;
- installatie van generatoren, met inbegrip van snelheidsreductoren, waarin opgewekte mechanische energie wordt omgezet in elektrische energie;
- installatie van warmtewisselaars of recuperatieketels (met inbegrip van branders voor verhoging van de stoomproductie) die met uitlaatgassen werken;
- installatie van warmtewisselaars voor het terugwinnen van de warmte van krachtwerktuigen;

- investeringen voor:
 - het opslaan van brandstof binnen de inrichting;
 - het transport van brandstoffen, verbrandingslucht, uitlaatgassen, koelwater, koellucht of ketelvoedingswater binnen de inrichting;
- installatie van:
 - geluidsisolatie;
 - rookgasreinigingsapparatuur;
 - apparatuur ter behandeling van ketelvoedingswater;
 - elektrische en elektronische apparatuur voor aansluiting op het interne elektriciteitsnet.

(Vlaams Energieagentschap, 2007)

Indien deze lijst van de in aanmerking komende investeringscomponenten vergeleken wordt met de indeling van de totale investeringskosten van Caputo *et al.* (2005) kan men besluiten dat volgende investeringscomponenten niet meegerekend mogen worden bij de verhoogde investeringsaftrek:

- civiele werken
- directe installatiekosten
- hulpdiensten
- instrumenten en controles
- terreinvoorbereiding
- constructiekosten
- opstartkosten
- investeringen in het distributienetwerk voor de thermische energie

Dit komt in grote mate overeen met de investeringscomponenten die niet in aanmerking komen voor de verhoogde investeringsaftrek bij de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit (zie 5.2.4.3). Het verschil ligt bij de instrumenten en controles en uiteraard bij de investeringen in het distributienet voor de thermische energie. De lijst met in aanmerking komende investeringscomponenten vermeldt geen investeringen in een dergelijk warmtenetwerk. Enkel de investeringen voor het transport van brandstoffen, verbrandingslucht, uitlaatgassen, koelwater, koellucht of ketelvoedingswater binnen de inrichting zelf komen in aanmerking.

Het voordeel van de verhoogde investeringsaftrek kan ook hier berekend worden aan de hand van formule (15):

$$\text{Voordeel investeringsaftrek} = b \times c \times I$$

Invullen van deze formule geeft de volgende tabel voor de verschillende capaciteiten.

Tabel 52: Verhoogde investeringsaftrek WKK-installatie

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|---|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| In aanmerking komende investeringscomponenten (EUR) | 11 156 059 | 16 980 638 | 26 123 256 | 46 870 079 |
| Verhoogde investeringsaftrek (EUR) | 497 002 | 756 487 | 1 163 791 | 2 088 062 |

5.3.3.4 De initiële investering I₀

Met de totale investeringskosten I, de ecologiepremie en de verhoogde investeringsaftrek kan de initiële investering I₀ berekend worden.

Tabel 53: Initiële investering WKK-installatie

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|---|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Totale investeringskosten (EUR) | 23 231 511 | 35 542 815 | 55 401 724 | 102 564 224 |
| Ecologiepremie (EUR) | 1 142 356 | 1 500 000 | 1 500 000 | 1 500 000 |
| Verhoogde investeringsaftrek (EUR) | 497 002 | 756 487 | 1 163 791 | 2 088 062 |
| Initiële investering I ₀ (EUR) | 21 592 152 | 33 286 327 | 52 737 933 | 98 976 162 |

5.3.4 *De jaarlijkse kasstroom K*

5.3.4.1 Opbrengst verkoop elektriciteit en warmte

Bij de WKK-installatie worden zowel elektriciteit als warmte geproduceerd die dan verkocht worden. Wat de elektriciteit betreft gebruiken we dezelfde verkoopprijs als in het vorige hoofdstuk, namelijk 0,050 EUR/kWh. Voor de verkoop van warmte zijn volgende gegevens te vinden in de literatuur: Fiala *et al.* (1997) gebruiken een verkoopprijs van gemiddeld 0,020 EUR/kWh, Dornburg

en Faaij (2001) hanteren een verkoopprijs van 3,6 EUR/GJ (wat overeenkomt met 0,013 EUR/kWh). De Paepe en Mertens (2007) gebruiken als referentie de prijs van gas om de verkoopprijs van de thermische energie te bepalen. Op deze manier komt men op een prijs van 0,018 EUR/kWh. Het is deze laatste waarde die gebruikt wordt om de opbrengst van de verkoop van de geproduceerde thermische energie in deze gevalstudie te berekenen.

Tabel 54: Opbrengst verkoop elektriciteit en warmte WKK-installatie

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|---------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Aantal kWh elektriciteit | 35 000 000 | 70 000 000 | 140 000 000 | 350 000 000 |
| Opbrengst verkoop elektriciteit (EUR) | 1 750 000 | 3 500 000 | 7 000 000 | 17 500 000 |
| Aantal kWh warmte | 84 000 000 | 168 000 000 | 336 000 000 | 840 000 000 |
| Opbrengst verkoop warmte (EUR) | 1 512 000 | 3 024 000 | 6 048 000 | 15 120 000 |
| Totaal (EUR) | 3 262 000 | 6 524 000 | 13 048 000 | 32 620 000 |

5.3.4.2 De jaarlijkse werkingskosten

Ook bij een WKK-installatie bestaan de jaarlijkse werkingskosten uit:

- de onderhoudskosten
- de personeelkosten
- de aankoopkosten en transportkosten van de biomassa
- de verzekeringskosten en algemene overheadkosten
- de transportkosten van de overblijvende assen
- de behandelingskosten van de overblijvende assen

In wat volgt worden deze werkingskosten kort besproken. Alle kosten zijn uitgedrukt op jaarbasis.

De onderhoudskosten van de installatie bedragen 2,5 procent van de totale investeringskosten, exclusief de investeringskosten aangaande de aanleg van het distributienet voor de thermische energie. Dit distributienet vraagt ook onderhoud en deze kosten bedragen volgens Hoogsteen *et al.* (2003) 2 procent van de investeringskosten van het distributienet. Dit geeft de volgende tabel.

Tabel 55: Onderhoudskosten WKK-installatie

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|--|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Onderhoudskosten WKK-installatie (EUR) | 535 237 | 797 468 | 1 202 839 | 2 108 595 |
| Onderhoudskosten warmtenet (EUR) | 36 441 | 72 882 | 145 763 | 364 408 |
| Totale onderhoudskosten (EUR) | 571 678 | 870 350 | 1 348 602 | 2 473 003 |

De personeelkosten worden op dezelfde manier berekend als voor de gescheiden opwekking van enkel elektriciteit, namelijk met de formules (16), (17), (18) en (19). Voor de WKK-installatie liggen de personeelskosten iets hoger omdat een deel van de berekeningen van deze kosten gebaseerd zijn op de input aan energie. Deze input ligt hoger bij de WKK-installatie dan bij de verbrandingsinstallatie voor de opwekking van elektriciteit. De oorzaak hiervan ligt in de lagere elektrische efficiëntie. Om een bepaald aantal MW elektriciteit te kunnen genereren, is er meer biomassa nodig bij een lager elektrisch omzettingsrendement. Dit vertaalt zich in meer personeel. Per jaar bedraagt het loon van één werknemer 27 500 EUR. Tabel 56 geeft de personeelskosten weer voor de WKK-installatie.

Tabel 56: Personeelskosten WKK-installatie

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|--|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Totaal aantal werknemers verbrandingsinstallatie | 6,16 | 9,61 | 13,81 | 19,34 |
| Totaal aantal werknemers verbrandingsinstallatie met afronding | 7 | 10 | 14 | 20 |
| Personeelskosten (EUR) | 192 500 | 275 000 | 385 000 | 550 000 |

Ook de aankoopkosten en transportkosten (samen de aanvoerkosten genoemd) per tds biomassa blijven hetzelfde. Zoals berekend in Tabel 47 bedragen de benodigde hoeveelheden biomassa bij de WKK-installatie meer dan bij de verbrandingsinstallatie met enkel elektriciteitsproductie,

omwille van de lagere elektrische efficiëntie. Onderstaande tabel geeft de aanvoerkosten voor de WKK-installatie, waarbij dezelfde eenheidskost van 48,5 EUR/tds biomassa gebruikt wordt.

Tabel 57: Totale aanvoerkosten WKK-installatie

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|--------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Aantal ton biomassa (tds) | 28 000 | 56 000 | 112 000 | 280 000 |
| Totale aanvoerkosten WKK (EUR) | 1 358 000 | 2 716 000 | 5 432 000 | 13 580 000 |

De verzekerings- en algemene overheadkosten bedragen 1 procent van de totale investeringskosten, net zoals bij de productie van enkel elektriciteit. In tegenstelling tot de jaarlijkse onderhoudskosten wordt er bij deze kosten geen onderscheid gemaakt tussen de WKK-installatie en het warmtenet.

Tabel 58: Verzekerings- en algemene overheadkosten WKK-installatie

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|--|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Verzekerings- en algemene overheadkosten (EUR) | 232 315 | 355 428 | 554 017 | 1 025 642 |

Wat betreft de transportkosten en behandelingskosten van de overblijvende assen, zijn dezelfde eenheidskosten per ton assen van toepassing als in het vorige hoofdstuk. De volgende tabel verkrijgt men op dezelfde manier als Tabel 38. Dit wil zeggen dat de jaarlijkse hoeveelheid geproduceerde assen 2 procent bedraagt van de totale hoeveelheid biomassa die verbrand wordt op jaarbasis. De atransportkosten hebben een waarde van 62 EUR per ton assen en de asbehandelingskosten zijn goed voor 24 EUR per ton assen. Deze cijfers zijn afkomstig uit Caputo *et al.* (2005).

Tabel 59: Transport- en behandelingskosten van de overblijvende assen WKK-installatie

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Aantal ton biomassa (tds) | 28 000 | 56 000 | 112 000 | 280 000 |
| Jaarlijkse hoeveelheid assen (ton) | 560 | 1 120 | 2 240 | 5 600 |
| Transportkosten assen (EUR) | 34 720 | 69 440 | 138 880 | 347 200 |
| Behandelingskosten assen (EUR) | 13 440 | 26 880 | 53 760 | 134 400 |

5.3.4.3 Subsidies en steunmaatregelen

Bij een WKK-installatie heeft men recht op warmtekrachtcertificaten. Deze certificaten worden toegekend op basis van de primaire energiebesparing met kwalitatieve warmtekrachtkoppeling. Net zoals bij groenestroomcertificaten kan de eigenaar van de WKK-installatie deze certificaten verkopen aan elektriciteitsleveranciers tegen de marktprijs. De leveranciers van elektriciteit zijn immers verplicht om voor een bepaald percentage van de totale elektriciteitsproductie warmtekrachtcertificaten voor te leggen. Voor het jaar 2012 is dit percentage vastgelegd op 5,23 procent. Per ontbrekend certificaat krijgen de elektriciteitsleverancier een boete opgelegd van 45 EUR. (Mertens, 2007)

De berekening van het aantal toegekende certificaten is ingewikkelder dan bij groenestroomcertificaten. Het criterium waarop de toekenning gebaseerd is, is de besparing van primaire energie door een WKK-installatie ten opzichte van de gescheiden opwekking van elektriciteit en warmte. Om nu deze energiebesparing te berekenen maakt men gebruik van de rendementen van zogenaamde "referentie-installaties". Dit zijn installaties waarvan de efficiënties vastgelegd zijn in een uitvoeringsbesluit van de Vlaamse Regering en in samenwerking met VREG. Het rendement van een de referentie-installatie voor de gescheiden opwekking van warmte bedraagt op dit moment 85 procent, indien de warmte geleverd wordt onder de vorm van stoom. Voor de gescheiden opwekking van elektriciteit wordt een rendement van 55 procent gehanteerd voor de referentie-installatie, indien de installatie de geproduceerde elektriciteit afzet op een elektriciteitsnet met een nominale spanning van meer dan 15 kV. Maar voor het gebruik van hernieuwbare energiebronnen worden andere referentierendementen gebruikt betreffende de geproduceerde elektriciteit. Voor hout is dit 34 procent. (COGEN Vlaanderen, 2008) De absolute

energiebesparing wordt berekend aan de hand van volgende formule uit Mertens (2007). Na aanpassing van de symbolen zoals ze in deze gevalstudie voorkomen, krijgen we volgende formule:

$$PEB = E \times \left(\frac{1}{\alpha_e} + \frac{\eta_{th}}{\eta_e \times \alpha_{th}} - \frac{1}{\eta_e} \right) \quad (25)$$

Met:

- PEB = primaire energiebesparing;
- E = de binnen de beschouwde periode door de warmtekrachtinstallatie geproduceerde hoeveelheid elektriciteit (MWh);
- α_{th} = het thermisch rendement van de referentieketel;
- η_{th} = het thermisch rendement van de warmtekrachtinstallatie;
- α_e = het elektrisch rendement van de referentieketel;
- η_e = het elektrisch rendement van de warmtekrachtinstallatie

De warmtekrachtcertificaten worden maandelijks toegekend. De beschouwde periode is dus één maand. De hoeveelheid geproduceerde elektriciteit per maand is de productie op jaarbasis gedeeld door twaalf.

De WKK-installatie moet aan een aantal voorwaarden voldoen om recht te hebben op warmtekrachtcertificaten. Ten eerste moet de installatie een kwalitatieve WKK-installatie zijn. Dit wil zeggen dat de installatie over de laatste twaalf maanden gemiddeld een relatieve energiebesparing heeft gerealiseerd van minstens 10 procent ten opzichte van de referentie-installaties met gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit. (Vlaamse Codex, 2008) In formulevorm geeft dit (Mertens, 2007):

$$1 - \frac{1}{(\eta_{th}/\alpha_{th}) + (\eta_e/\alpha_e)} \geq 10\% \quad (26)$$

Nog een voorwaarde voor het verkrijgen van warmtekrachtcertificaten is dat de installatie gelegen moet zijn op het grondgebied van het Vlaams Gewest en daarnaast moet de WKK-installatie in dienst zijn genomen ofwel ingrijpend gewijzigd zijn vanaf 1 januari 2002.

Een beperking op het toekennen van warmtekrachtcertificaten is dat in de loop van de levensduur van de installatie het aantal toe te kennen certificaten afneemt. Gedurende de eerste vier jaar dat de WKK-installatie operationeel is, worden nog alle certificaten toegekend. Vanaf maand 49 wordt nog slechts een fractie (X) toegekend en deze fractie neemt nog verder af. De formule van X is (Mertens, 2007):

$$X = \frac{RPE - 0,2 \times (T - 48)}{RPE} \quad (27)$$

$$\text{waarbij } RPE = 1 - \frac{1}{(\eta_{th}/\alpha_{th}) + (\eta_e/\alpha_e)} \quad (28)$$

Met:

- RPE = de relatieve energiebesparing;
- T = de tijd in maanden sinds de indienstname van de installatie;
- α_{th} , η_{th} , α_e en η_e zijn gedefinieerd zoals in formule (25)

In deze gevalstudie bedraagt de elektrische efficiëntie 25 procent en de thermische efficiëntie 60 procent, wat een RPE geeft van:

$$RPE = 1 - \frac{1}{(0,60/0,85) + (0,25/0,34)} = 0,3061 = 30,61 \%$$

De relatieve primaire energiebesparing bedraagt 30,61 procent. Dit is meer dan de vereiste 10 procent en dus kan de WKK-installatie beschouwd worden als een kwalitatieve WKK-installatie. Bijgevolg komt de installatie in aanmerking voor warmtekrachtcertificaten. In de volgende tabel staan de berekeningen voor de primaire energiebesparing bij de verschillende capaciteiten. In de laatste rij staan het aantal certificaten dat de WKK-installatie toegekend krijgt per maand (1 certificaat per gerealiseerde MWh primaire energiebesparing per maand).

Tabel 60: PEB en aantal toegekende warmtekrachtcertificaten per maand

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|--|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Elektriciteitsoutput op jaarbasis (MWh) | 35 000 | 70 000 | 140 000 | 350 000 |
| Elektriciteitsoutput op maandbasis (MWh) | 2 917 | 5 833 | 11 667 | 29 167 |
| PEB (MWh) | 5 148 | 10 293 | 20 589 | 51 471 |
| Aantal toegekende certificaten (1 per gerealiseerde MWh PEB) | 5 148 | 10 293 | 20 589 | 51 471 |

Gedurende de eerste 48 maanden krijgt de WKK-installatie de volledige hoeveelheid certificaten waarop het recht heeft. Vanaf maand 49 krijgt de installatie telkens maar een fractie X van de certificaten toegekend. Deze fractie bedraagt (met RPE = 0,3061):

$$X = \frac{0,3061 - 0,2 \times (T - 48)}{0,3061}$$

Deze fracties worden eerst per maand berekend en daarna gemiddeld op jaarbasis. De gemiddelde fracties per jaar vanaf het vijfde jaar van de levensduur van de installatie zijn te vinden in Bijlage 10. De drie laatste jaren van de levensduur van de installatie worden de fracties gedurende elke maand van het jaar negatief en kunnen er geen warmtekrachtcertificaten verkregen worden.

De fracties kunnen nu gebruikt worden om per capaciteit te berekenen hoeveel warmtekrachtcertificaten de WKK-installatie op jaarbasis toegekend krijgt. In de eerste vier jaren zijn de fracties niet van toepassing. De bijhorende tabel staat eveneens in Bijlage 10.

De gemiddelde maandprijs voor één warmtekrachtcertificaat in februari 2008 bedroeg 41,44 EUR. (VREG, 2008) Deze prijs is ook van toepassing in deze gevalstudie. Tabel 61 geeft weer wat de opbrengsten zijn voor de WKK-installatie per jaar door de verkoop van de toegekende warmtekrachtcertificaten.

Tabel 61: Opbrengst verkoop warmtekrachtcertificaten

| Jaar | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 2 559 529 | 5 119 059 | 10 238 118 | 25 595 294 |
| 2 | 2 559 529 | 5 119 059 | 10 238 118 | 25 595 294 |
| 3 | 2 559 529 | 5 119 059 | 10 238 118 | 25 595 294 |
| 4 | 2 559 529 | 5 119 059 | 10 238 118 | 25 595 294 |
| 5 | 2 450 835 | 4 901 669 | 9 803 339 | 24 508 347 |
| 6 | 2 250 168 | 4 500 335 | 9 000 670 | 22 501 676 |
| 7 | 2 049 501 | 4 099 001 | 8 198 002 | 20 495 005 |
| 8 | 1 848 833 | 3 697 667 | 7 395 334 | 18 488 334 |
| 9 | 1 648 166 | 3 296 333 | 6 592 665 | 16 481 663 |
| 10 | 1 447 499 | 2 894 998 | 5 789 997 | 14 474 992 |
| 11 | 1 246 832 | 2 493 664 | 4 987 328 | 12 468 321 |
| 12 | 1 046 165 | 2 092 330 | 4 184 660 | 10 461 650 |
| 13 | 845 498 | 1 690 996 | 3 381 992 | 8 454 979 |
| 14 | 644 831 | 1 289 662 | 2 579 323 | 6 448 308 |
| 15 | 444 164 | 888 327 | 1 776 655 | 4 441 637 |
| 16 | 243 497 | 486 993 | 973 986 | 2 434 966 |
| 17 | 67 913 | 135 826 | 271 651 | 679 128 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 |

In principe heeft een WKK-installatie ook recht op groenestroomcertificaten indien de installatie werkt op hernieuwbare energiebronnen. Mertens (2007) vermeldt dat een combinatie van warmtekrachtcertificaten en groenestroomcertificaten in de meeste gevallen enkel mogelijk is als alle geproduceerde warmte nuttig aangewend wordt, anders is het moeilijk om aan de vereiste 10 procent relatieve primaire energiebesparing te komen om recht te hebben op warmtekrachtcertificaten. In deze gevalstudie is dit het geval (de relatieve primaire energiebesparing is 30,61 procent). Bijgevolg kan de WKK-installatie zowel warmtekrachtcertificaten als groenestroomcertificaten aanvragen.

Per geproduceerde MWh groene stroom wordt één groenestroomcertificaat uitgereikt. De certificaten kunnen, net zoals bij de warmtekrachtcertificaten, door de producent van de groene stroom dan verkocht worden aan elektriciteitsleveranciers. De gemiddelde jaarprijs van één groenestroomcertificaat in de periode 1 april 2007 - 31 maart 2008 bedraagt 108,23 EUR. (VREG, 2008) Zoals eerder vermeld, is in deze case de installatie enkel producent van elektriciteit en geen leverancier. Bijgevolg moet de installatie niet voldoen aan de certificatenregeling en kan het alle verworven groenestroomcertificaten verkopen op de markt. Tabel 62 geeft de opbrengsten van de verkoop van groenestroomcertificaten. Deze cijfers zijn dezelfde als in Tabel 40 aangezien we met dezelfde capaciteiten aan elektriciteitsoutput werken.

Tabel 62: Opbrengst verkoop groenestroomcertificaten WKK-installatie

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|---|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Aantal MWh | 35 000 | 70 000 | 140 000 | 350 000 |
| Aantal toegekende certificaten (1 per MWh) | 35 000 | 70 000 | 140 000 | 350 000 |
| Opbrengst verkoop certificaten tegen prijs van 108,23 EUR/certificaat | 3 788 050 | 7 576 100 | 15 152 200 | 37 880 500 |

5.3.4.4 De te betalen vennootschapsbelasting

Tabel 41 kan ook ingevuld worden voor een WKK-installatie. Aan de hand van deze tabel berekent men de totale netto kasstroom na belastingen, die dan gebruikt wordt voor de berekening van de netto contante waarde. Een belangrijk verschil met Tabel 41 is dat de veronderstelling van gelijke jaarlijkse netto kasstromen niet opgaat voor een WKK-installatie. De reden hiervoor is het dalend

aantal te ontvangen warmtekrachtcertificaten. Gedurende de 20 jaren dat de WKK-installatie afgeschreven wordt, is er met andere woorden een andere jaarlijkse netto kasstroom. Alleen de eerste 4 jaren is de netto kasstroom identiek. Vanaf jaar 5 vermindert deze kasstroom. Om het overzichtelijk te houden staan in Tabel 63 enkel de netto kasstromen van de eerste vier jaren voor de verschillende capaciteiten.

Tabel 63: Totale netto kasstroom na belastingen WKK-installatie in jaar 1-4

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|--|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Inkomende kasstroom (EUR) = O | 9 609 579 | 19 219 159 | 38 438 318 | 96 095 794 |
| Uitgaande kasstroom (EUR) = Q | 2 402 653 | 4 313 098 | 7 912 260 | 18 110 246 |
| Netto kasstroom voor belastingen (EUR) = (O - Q) | 7 206 927 | 14 906 061 | 30 526 058 | 77 985 548 |
| Netto kasstroom na belastingen (EUR) = (1 - b) x (O - Q) | 4 828 641 | 9 987 061 | 20 452 459 | 52 250 317 |
| Belastingenschild afschrijvingen (EUR) = (b x A) | 383 320 | 586 456 | 914 128 | 1 692 310 |
| Totale netto kasstroom na belastingen (EUR) = (1 - b) x (O - Q) + (b x A) | 5 211 961 | 10 573 517 | 21 366 587 | 53 942 627 |

5.3.5 De netto contante waarde

Om de netto contante waarde te berekenen zijn onderstaande gegevens nodig. De kapitaalkost na belastingen berekent men aan de hand van formule (7).

Tabel 64: Overzicht gegevens NCW WKK-installatie

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|--|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Initiële investering I ₀ (EUR) | 21 592 152 | 33 286 327 | 52 737 933 | 98 976 162 |
| Levensduur (jaar) | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Kapitaalkost voor belastingen (%) | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Belastingvoet (%) | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Totale jaarlijkse netto kasstroom na belastingen (EUR) | 5 211 961 | 10 573 517 | 21 366 587 | 53 942 627 |

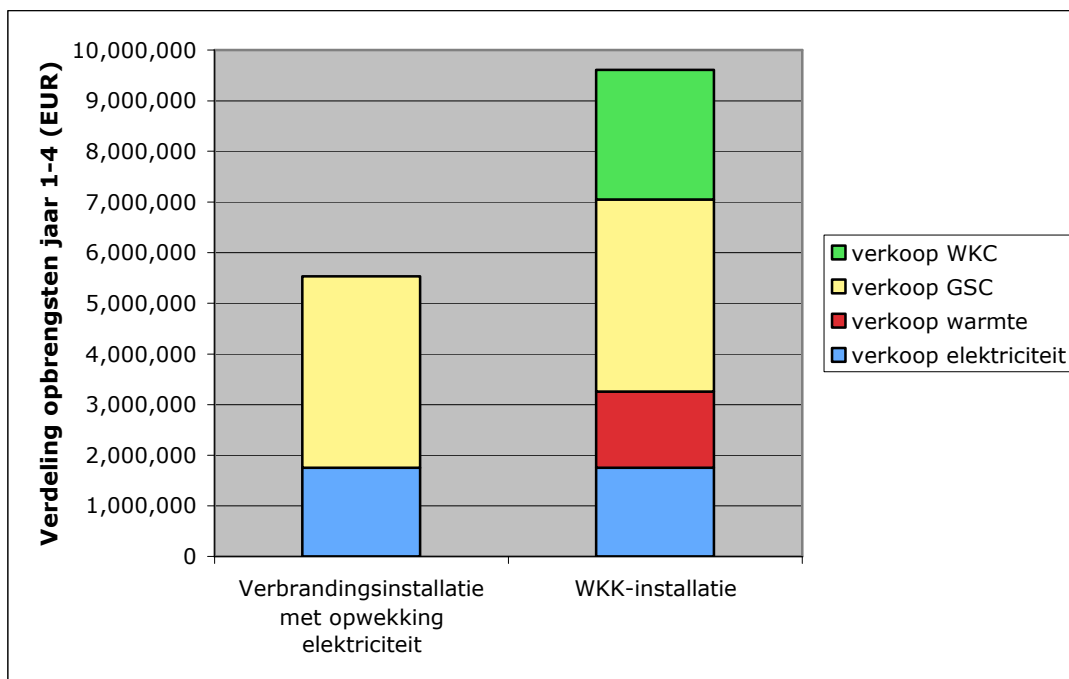
In de laatste rij van Tabel 64 staat de totale jaarlijkse netto kasstroom na belastingen van de eerste vier jaren. De netto kasstromen van de andere jaren verschillen van deze van de eerste vier jaren omwille van de al eerder aangehaalde redenen. Bij de berekening van de NCW kan geen gebruik gemaakt worden van annuïteiten. Elke jaarlijkse netto kasstroom moet afzonderlijk geactualiseerd worden. Dit geeft volgende netto contante waarden voor de verschillende capaciteiten.

Tabel 65: NCW WKK-installatie

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|-----------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| NCW (EUR) | 28 460 121 | 68 440 670 | 153 097 246 | 421 318 287 |

De netto contante waarde is voor alle capaciteiten positief en dus kunnen de investeringsprojecten aanvaard worden. Bovendien liggen de netto contante waarden een heel stuk boven deze van de verbrandingsinstallatie met productie van elektriciteit. De reden hiervoor ligt bij de extra opbrengsten door de verkoop van warmte en warmtekrachtcertificaten en dit tegenover een relatief beperkte extra investeringskost aangaande het warmtenet. Vooral de opbrengst van de verkoop van warmtekrachtcertificaten speelt een belangrijke rol. Dit wordt in het volgende hoofdstuk nog verder uitgewerkt. Om het gewicht van onder andere de warmtekrachtcertificaten in de jaarlijkse kasstroom duidelijk te maken, geeft de volgende figuur een vergelijking weer tussen de jaarlijkse

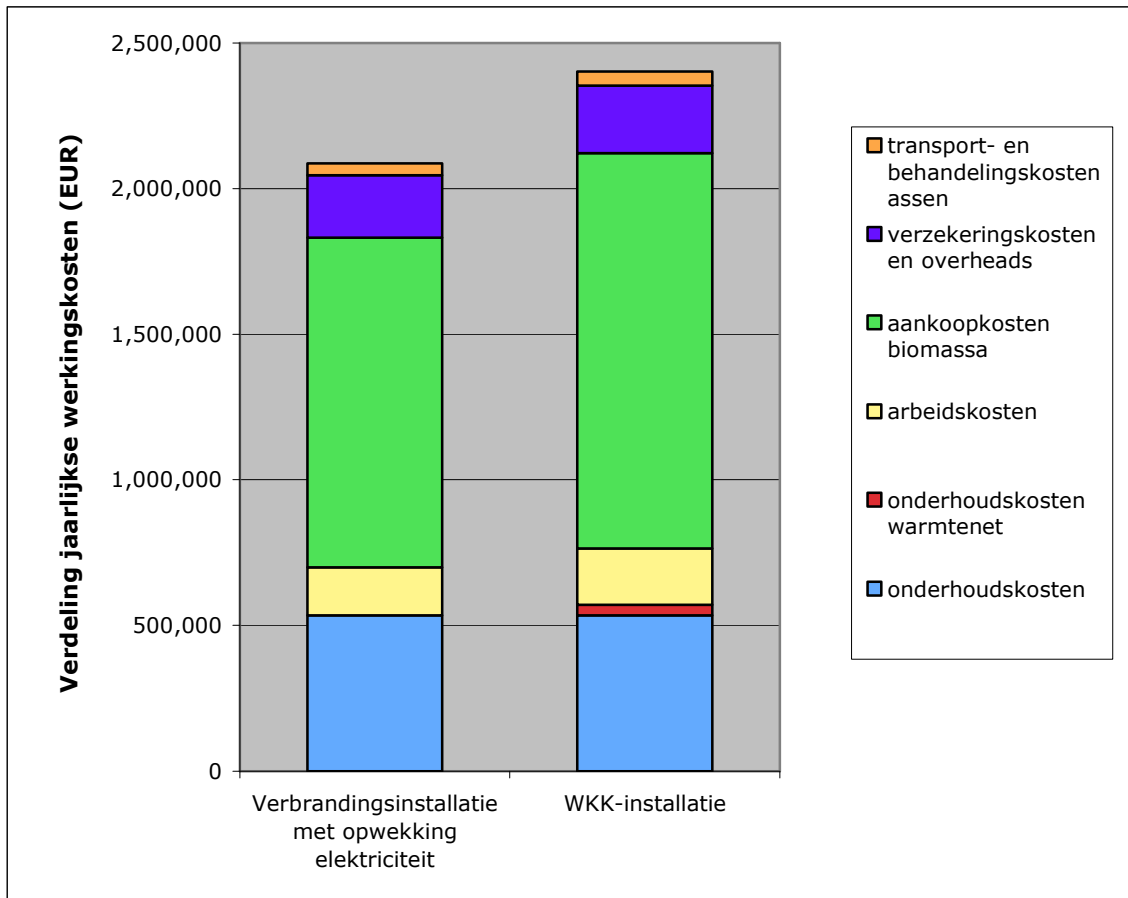
opbrengsten bij de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit enerzijds en anderzijds bij de WKK-installatie. De figuur geeft voor de twee installaties de verdeling weer van de jaarlijkse opbrengsten voor een capaciteit van 5 MW elektriciteitsoutput. Ook hier hoort weer de opmerking bij dat dit in het geval van de WKK-installatie enkel geldig is voor jaar één tot en met vier. Vanaf jaar vijf nemen de jaarlijkse opbrengsten geleidelijk af.



Figuur 14: Verdeling opbrengsten (capaciteit van 5 MW)

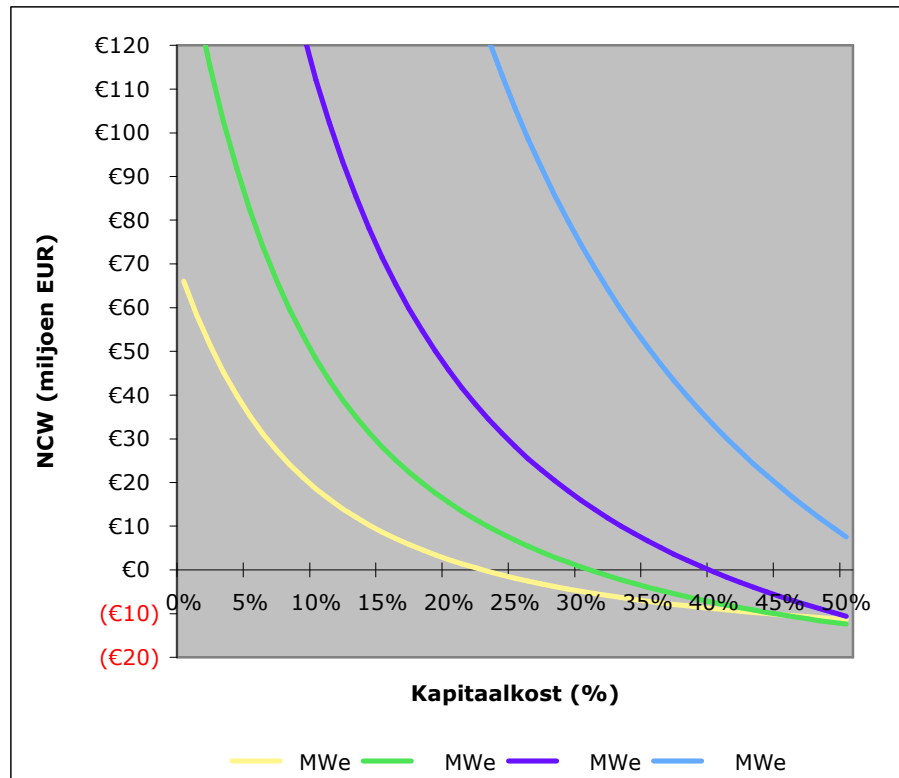
De figuur geeft duidelijk weer dat de verkoop van warmte en vooral warmtekrachtcertificaten de jaarlijkse opbrengsten sterk doen stijgen, wat uiteraard een positieve invloed heeft op de jaarlijkse kasstroom. Een gelijkaardige figuur voor de jaarlijkse werkingskosten geeft aan dat deze werkingskosten slechts in beperkte mate verschillen tussen de twee installaties. De WKK-installatie verbruikt meer tds biomassa en vraagt ook onderhoudskosten voor het warmtenet. Daarnaast zijn er verwaarloosbare verschillen met betrekking tot de arbeidskosten en de transport- en behandelingskosten van de assen. Gecombineerd met de bijkomende investeringskosten van het warmtenet verklaren figuren 14 en 15 hiermee het verschil in de netto contante waarden tussen de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit en de WKK-installatie.

Figuur 15 geeft daarnaast ook het gewicht van de aankoopkosten van de biomassa goed weer. Zowel voor de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit als voor de WKK-installatie is dit veruit de belangrijkste component in de jaarlijkse werkingskosten, met een gewicht van respectievelijk 54 procent en 56 procent in de jaarlijkse werkingskosten.



Figuur 15: Verdeling jaarlijkse werkingskosten (capaciteit van 5 MW)

Het netto-contante-waarde-profiel van de WKK-installatie geeft aan dat de kapitaalkost na belastingen minstens 23 procent moet bedragen om een negatieve netto contante waarde te verkrijgen. Dit is bij een capaciteit van 5 MW_e. Bij hogere capaciteiten wordt het investeringsproject pas onrendabel bij vrij hoge kapitaalkosten na belastingen. Voor een capaciteit van 50 MW_e is dit zelfs pas vanaf 54 procent. In vergelijking met Figuur 9 blijft een WKK-installatie rendabel bij stijgende kapitaalkosten. Daar waar een verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit met een capaciteit van 5 MW een negatieve netto contante waarde vertoont vanaf een kapitaalkost na belastingen van 13 procent, blijft de WKK-installatie van 5 MW_e wel nog rendabel tot een kapitaalkost na belastingen van 23 procent.



Figuur 16: NCW-profiel WKK-installatie

5.3.6 De productiekosten

De specifieke productiekost kan berekend worden voor de opwekking van elektriciteit. Logischerwijze liggen de productiekosten bij de WKK-installatie hoger dan bij de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit, indien alleen rekening gehouden wordt met de elektriciteitsproductie. De jaarlijkse werkingskosten liggen bij een capaciteit van 5 MW_e namelijk 15 procent hoger bij de WKK-installatie (zie Figuur 15). Ook heeft de WKK-installatie een hogere initiële investering, wat de jaarlijkse kapitaalkosten doet stijgen.

Bij de WKK-installatie speelt de warmteproductie een belangrijke rol en dus berekenen we ter vergelijking ook de productiekost per MWh energie. Ongeacht of deze energie elektriciteit of warmte is. Het valt dan te verwachten dat deze laatste productiekost per MWh een stuk lager gaat liggen dan de productiekost per MWh elektriciteit.

Voor een capaciteit van 5 MW_e en onder standaardvoorwaarden (dit wil dus ook zeggen dat de gebruiksfactor voor de geproduceerde warmte 100 procent bedraagt) bedragen de jaarlijkse werkingskosten 2 402 653 EUR. Samen met de kapitaalkosten van 2 536 206 EUR bedragen de

totale productiekosten over de levensduur van de installatie 4 938 859 EUR. Een capaciteit van 5 MW_e geeft jaarlijks 35 000 MWh elektriciteit. De productiekost per MWh_e is 141 EUR (0,141 EUR/kWh_e). De totale energieproductie bedraagt 119 000 MWh. De productiekost per MWh bedraagt bijgevolg 42 EUR (0,042 EUR/kWh).

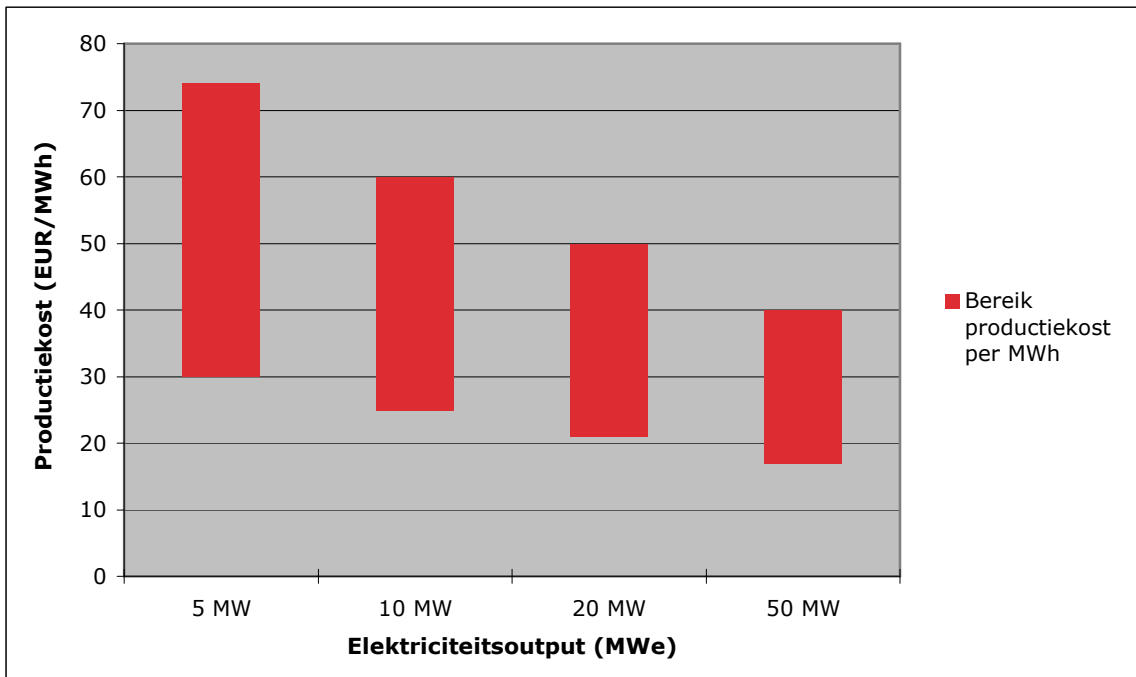
Ook voor andere capaciteiten kan deze productiekost per MWh_e berekend worden. Tabel 66 geeft een overzicht. In de laatste rij staat de productiekost per MWh energie (elektriciteit + warmte).

Tabel 66: Productiekosten energie onder standaardvoorwaarden WKK-installatie

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|--|-----------|-----------|------------|------------|
| Totale productiekosten (EUR) | 4 938 859 | 8 222 897 | 14 106 837 | 29 735 946 |
| Productiekost per MWh _e (EUR/MWh) | 141 | 117 | 101 | 85 |
| Productiekost per MWh (EUR/MWh) | 42 | 35 | 30 | 25 |

Onder- en bovengrenzen voor deze productiekost per MWh kunnen ook voor de WKK-installatie gevonden worden aan de hand van de parameters uit de sensitiviteitsanalyse van Hoofdstuk 6. Ook hier zoeken we de twee combinaties van parameters die de laagste en de hoogste productiekost per MWh opleveren. In tegenstelling tot de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit komt er hier één parameter extra in aanmerking door de nuttige aanwending van de warmte, namelijk de thermische efficiëntie. De verkoopprijs van de geproduceerde elektriciteit en thermische energie komen niet in aanmerking.

De combinatie die de laagste productiekost per MWh oplevert voor een capaciteit van 5 MW_e is deze waar de kapitaalkost voor belastingen 5 procent bedraagt en de aankoopprijs van het korte omloophout 28,5 EUR/tds. De productiekost is in dit geval 30 EUR/MWh. De hoogste productiekost per MWh is te vinden bij een andere combinatie van parameters. Een thermisch omzettingsrendement van 50 procent en een kapitaalkost voor belastingen van 25 procent zorgen voor een stijging in de productiekost per MWh tot 74 EUR. Ook voor andere capaciteiten kan op dezelfde wijze een onder- en bovengrens bepaald worden. Deze grenzen staan in de volgende figuur.



Figuur 17: Bereik productiekost per MWh WKK-installatie

Paragraaf 5.2.7 gaf al aan dat de verkoop van groenestroomcertificaten een opbrengst genereert die voor een capaciteit van 10 MW, 20 MW en 50 MW de productiekosten volledig kan dekken. Aangezien er naast groenestroomcertificaten ook warmtekrachtcertificaten verkocht worden, zal voor de WKK-installatie dezelfde conclusie getrokken kunnen worden. Voor een installatie met een vermogen van 5 MW_e bedragen de totale productiekosten 4 938 859 EUR per jaar. De verkoop van groenestroomcertificaten levert 3 788 050 EUR op en de verkoop van warmtekrachtcertificaten genereert een opbrengst van 2 559 529 EUR. Samen 6 347 579 EUR. Dit bedrag ligt een stuk hoger dan de totale productiekosten en ook hier kan de verkoop van certificaten de productiekosten volledig dekken. Capaciteiten van 10 MW_e, 20 MW_e en 50 MW_e leveren hetzelfde resultaat.

Een opmerking hierbij is dat wat de toekenning van warmtekrachtcertificaten betreft, het aantal daalt vanaf jaar 5. Hierdoor dalen ook de opbrengsten door de verkoop van certificaten. Neem als voorbeeld het laatste jaar van de levensduur van de WKK-installatie met een capaciteit van 5 MW_e. De totale productiekosten bedragen in dat jaar nog steeds 4 938 859 EUR. Er worden geen warmtekrachtcertificaten toegekend, maar wel groenestroomcertificaten, welke een opbrengst genereren van 3 788 050 EUR. Het verschil is 1 150 809 EUR. De specifieke productiekost is gelijk aan 10 EUR/MWh. Enkel de eerste 11 jaren van de levensduur van de WKK-installatie zijn de totale productiekosten volledig gedekt door de opbrengst van de verkoop van groenestroom- en eventueel warmtekrachtcertificaten.

Voor een capaciteit van 10 MW_e kunnen we concluderen dat enkel in de laatste 5 jaren van de levensduur van de installatie de opbrengst van de verkoop van de toegekende certificaten de totale productiekosten niet volledig kan dekken. Bij een vermogen van 20 MW_e en 50 MW_e zijn de productiekosten steeds gedekt door de verkoop van certificaten, zelfs in de laatste jaren van de levensduur van de installatie wanneer er geen warmtekrachtcertificaten toegekend worden.

Hoofdstuk 6: Analyse

6.1 Vergelijking met de realiteit

Vooraleer de resultaten uit Hoofdstuk 5 te onderwerpen aan scenarioanalyses en sensitiviteitsanalyses is het nuttig om een vergelijking te maken met de realiteit. De resultaten zijn immers gebaseerd op cijfers uit de literatuur. In welke mate komen deze theoretische cijfers overeen met de praktijk? Vooral de totale investeringskosten kunnen getoetst worden aan voorbeelden uit de realiteit.

Als eerste vergelijking komen twee houtverbrandingsinstallaties uit Nederland aan de beurt. Alle gegevens in verband met deze twee installaties komen uit Tijmensen en de Vos (2005). De eerste installatie staat in Cuijk. Het elektrisch vermogen van deze installatie bedraagt 25 MW. De restwarmte wordt niet verder benut. Dit is dus geen WKK-installatie, maar een gelijkaardige installatie als in paragraaf 5.2. Het hout dat verbrand wordt, bestaat uit dunningshout van bossen, snoeihout en schoon resthout van houtverwerkende industrieën. De verbrandingsinstallatie zelf is, net zoals verondersteld in deze gevalstudie, een wervelbedoven. En ook de elektriciteitsopwekking gebeurt op dezelfde manier als in deze case, namelijk door een generator die aangedreven wordt door een stoomturbine. Per jaar is de installatie 7 600 uren beschikbaar. De totale energieopbrengst bedraagt 190 000 000 kWh. Hiermee kunnen 63 000 huishoudens voorzien worden van elektriciteit. De totale investeringskosten bedragen 50 000 000 EUR, wat overeenkomt met 2 000 EUR/kW. Uit Figuur 10 blijkt dat dit in dezelfde lijn ligt als de investeringskost per kW in deze gevalstudie. Bij een elektriciteitsoutput van 25 MW komt in deze gevalstudie namelijk een investeringskost van 55 059 296 EUR overeen. Per kW is dit 2 202 EUR.

De tweede houtverbrandingsinstallatie staat in Lelystad. Naast elektriciteitsproductie wordt er ook warmte nuttig aangewend en dus is dit wel een WKK-installatie. De totale capaciteit ligt een stuk lager dan die van de installatie in Cuijk. Het elektrisch vermogen bedraagt 1,7 MW_e, terwijl het thermisch vermogen 6,5 MW_{th} bedraagt. Deze cijfers zijn de maximale vermogens van de installatie. De rendementen van de installatie worden op de warmtevraag afgesteld. De prioriteit ligt dus bij de productie van thermische energie. Het elektrisch rendement wordt vervolgens afgestemd op het thermisch rendement. Wanneer de vraag naar thermische energie in de warmste maanden van het jaar daalt, stijgt het elektrisch rendement. In de wintermaanden is het elektrisch rendement van de installatie het laagst. De installatie heeft net zoals in deze gevalstudie een stoomturbine. Per jaar wordt er 10 000 000 kWh elektriciteit geproduceerd waarmee 3 300 gezinnen in hun elektriciteitsbehoefte kunnen worden voorzien. De productie van warmte bedraagt

op jaarbasis 150 000 GJ. Met deze productie kunnen 3 000 gezinnen voorzien worden van warmte. De installatie is 8 350 uren per jaar operationeel.

De specifieke investeringskosten per kW liggen een stuk hoger dan bij de installatie in Cuijk. In totaal is er voor een bedrag van 6 900 EUR per kW aan elektrisch vermogen geïnvesteerd. In deze gevalstudie is 5 MW_e de kleinste capaciteit. De investeringskost per kW voor deze capaciteit bedraagt 4 646 EUR (zie Figuur 17). Indien we veronderstellen dat ook in deze gevalstudie het elektrisch vermogen 1,7 MW_e en het thermisch vermogen 6,5 MW_{th} bedragen, komen we uit op een totale investeringskost van circa 7 525 EUR/kW. In totaal bedragen de investeringskosten onder de veronderstellingen van deze gevalstudie 12 791 650 EUR. Voor de installatie in Lelystad geeft men een totale investeringskost van 12 000 000 EUR aan. Een mogelijke verklaring voor het verschil kunnen de investeringskosten in het warmtenet zijn. In deze gevalstudie zijn deze kosten meegerekend in de totale investeringskosten. Stel nu dat we deze kosten niet meerekenen. Dan bedragen de totale investeringskosten 11 804 711 EUR, of 6 944 EUR/kW. Deze waarde ligt een stuk dicht in de buurt van de 6 900 EUR/kW voor de installatie in Lelystad.

In Wenen in Oostenrijk is er een WKK-installatie met een netto-capaciteit van 12,9 MW_e in de winter en een netto-capaciteit van 21,3 MW_e in de zomer. De warmtevraag daalt immers in de zomer en daardoor is er meer vermogen beschikbaar voor elektriciteitsopwekking. In de winter wordt de warmte afgezet op een warmtenet. De capaciteit hiervan is 37 MW_{th}. De totale efficiëntie in de zomer ligt bijgevolg een stuk lager dan in de winter (36 procent in de zomer en 80 procent in de winter). Net zoals in deze gevalstudie bestaat de installatie uit een wervelbed en een stoomturbine. De brandstof van de installatie bestaat uit hout. De investeringskosten bedragen circa 52 000 000 EUR. Voor een capaciteit van 21,3 MW_e betekent dit een investeringskost per kW aan elektrisch vermogen van 2 441 EUR. (Madlener en Bachhiesl, 2005) Onder de veronderstellingen van deze case gaat met een capaciteit van 21,3 MW_e en een capaciteit van 37 MW_{th} voor het warmtenet een totale investeringskost gepaard van 55 591 658 EUR. Dit komt overeen met 2 610 EUR per kW aan elektrisch vermogen. Ook de investeringskosten van de WKK-installatie in Wenen liggen dus in dezelfde lijn als die van deze gevalstudie.

Het valt niet af te leiden of in de investeringskosten van 52 000 000 EUR al dan niet steunmaatregelen en/of premies van overheidswege meegerekend zijn. Stel dat dit wel zo is, dan moeten we de totale investeringskosten voor deze gevalstudie verminderen met de verhoogde investeringsaftrek en de ecologiepremie om te kunnen vergelijken. In dat geval dalen de totale investeringskosten tot 52 880 810 EUR. Per kW aan elektrisch vermogen is dit 2 483 EUR. Dit ligt heel dicht in de buurt van de investeringskost van 2 441 EUR per kW bij de WKK-installatie in Wenen.

Denemarken heeft sinds 1999 in Assens Fjernvarme een WKK-installatie met een elektrisch vermogen van 4,7 MW_e. De warmteproductie, die gebruikt wordt om een woonwijk te verwarmen, bedraagt 14 MW_{th}. In de installatie wordt hout verbrand om stoom te produceren die via een stoomturbine een generator aandrijft. De elektrische efficiëntie bedraagt 22 procent en de thermische efficiëntie 70 procent (deze gevalstudie: $\eta_e = 25\%$ en $\eta_{th} = 60\%$). De totale investeringskosten bedragen 17 024 000 EUR. In dit bedrag zijn geen steunmaatregelen meegerekend. Per kW aan elektrisch vermogen is dit 3 622 EUR. Onder de veronderstellingen van deze gevalstudie komt een elektrisch vermogen van 4,7 MW_e en een thermisch vermogen van 14 MW_{th} overeen met een totale investeringskost van 22 799 147 EUR of 4 851 EUR/kW_e. Het grootste verschil ligt in de investeringskosten voor het verbrandingsgedeelte van de installatie zelf. In deze case bedragen deze investeringskosten meer dan 8 000 000 EUR voor een capaciteit van 4,7 MW_e. Voor de installatie in Denemarken bedragen deze investeringskosten 4 600 000 EUR. (Obernberger en Thek, 2004)

Veringa (2004) vermeldt dat de kost van het opwekken van elektriciteit bij verbranding tussen 2,8cEUR en 10 cEUR per kWh bedraagt. Hierin zijn de investeringskosten niet meegerekend. Voor een capaciteit van 5 MW bedragen, onder de veronderstellingen van deze gevalstudie, de kosten voor het opwekken van elektriciteit (in deze gevalstudie werkingskosten genoemd) 2 086 131 EUR. Per kWh is dit 6 cEUR. Bij een capaciteit van 50 MW bedraagt deze kost 4,3 cEUR/kWh. Deze waarden liggen binnen de range van Veringa (2004). Daarnaast vermeldt dezelfde auteur dan de huidige range aan capaciteiten tussen 1 MW en 50 MW ligt voor het opwekken van elektriciteit. De gekozen range voor deze case (5 MW tot 50 MW) is dus realistisch.

6.2 Scenarioanalyse

Het NCW-model voor zowel de productie van elektriciteit als de gecombineerde productie van elektriciteit en warmte is opgebouwd rond veronderstellingen. Bijgevolg brengt een wijziging in één van deze veronderstellingen een verandering in de uiteindelijke netto contante waarde met zich mee. Er kunnen met andere woorden verschillende scenario's uitgewerkt worden met elk hun eigen veronderstellingen.

De scenarioanalyse die hier uitgevoerd wordt, heeft te maken met de verkoop van de geproduceerde warmte bij een WKK-installatie. In Hoofdstuk 5 werd nogal optimistisch aangenomen dat bij de WKK-installatie alle geproduceerde warmte ook verkocht kan worden. In de literatuur vindt men meestal een gebruiksfactor met betrekking tot de thermische energie. De vraag naar thermische energie is immers erg variabel. In de zomer ligt de vraag logischerwijze een stuk lager dan in de winter. Daarnaast kan thermische energie niet afgezet worden op een bestaand net, zoals wel kan met de geproduceerde elektriciteit. Deze elektriciteit kan daarnaast

getransporteerd worden over het net, terwijl thermische energie geconsumeerd moet worden op een plaats niet te ver van de installatie. Per kilometer waarover de thermische energie getransporteerd moet worden, is er immers verlies aan warmte. Daardoor kan een gedeelte van de geproduceerde thermische energie vaak niet verkocht worden. Vandaar de gebruiksfactor voor de verkoop van warmte. In de literatuur vindt men het volgende: Fiala *et al.* (1997) werken met een gebruiksfactor van gemiddeld 50 procent, Dornburg en Faaij (2001) hanteren een gebruiksfactor van afgerond 36 procent en bij Coenen en Schlatmann (2007) is een gebruiksfactor voor de thermische energie terug te vinden van 60 procent.

Tot nu toe hebben we twee scenario's aangaande de gebruiksfactor voor de geproduceerde warmte. Het eerste scenario neemt een gebruiksfactor voor de thermische energie aan van 0 procent. Dit wil zeggen dat de geproduceerde warmte niet aangewend wordt om nabijgelegen gebouwen te verwarmen. De geproduceerde energie bestaat enkel uit elektriciteit. Dit scenario komt overeen met de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit (zie 5.2). In het tweede scenario geldt een gebruiksfactor van 100 procent. Alle geproduceerde thermische energie kan worden verkocht. Dit scenario is hetzelfde zoals in het paragraaf 5.3. Als aanvulling worden nog drie scenario's toegevoegd, namelijk een gebruiksfactor voor de thermische energie van 0,25; 0,5 en 0,75. Indien men bijvoorbeeld uitgaat van een gebruiksfactor van 50 procent, wil dit zeggen dat slechts de helft van de geproduceerde warmte verkocht wordt terwijl de overige thermische energie in de lucht wordt vrijgelaten. Het aantal kWh warmte uit Tabel 49 moet dus gehalveerd worden om de hoeveelheid verkochte thermische energie te verkrijgen.

Het verschil tussen deze vijf scenario's zal vooral tot uiting komen in het aantal toegekende warmtekrachtcertificaten. Als de relatieve energiebesparing niet voldoende is (minder dan 10 procent), krijgt de installatie zelfs geen warmtekrachtcertificaten.

Naast de berekening van de netto contante waarde wordt bij elk van de scenario's ook de IRR berekend. De IRR (Internal Rate of Return) of IR (Interne Opbrengstvoet) is die discontovoet waarbij de netto contante waarde nul is. In de praktijk wordt deze IRR vergeleken met het vereiste rendement dat het management vaststelt. Het investeringsproject wordt verworpen indien de IRR kleiner is dan het vereiste rendement. (Mercken, 2004)

6.2.1 Scenario 1: een gebruiksfactor van 0%

Zoals al vermeld werd, is dit scenario identiek aan het geval waar alleen sprake is van elektriciteitsproductie. De warmte die vrijkomt bij het condenseren van de stoom, na de aandrijving van de turbine, verlaat de verbrandingsinstallatie zonder nuttig aanwending. De netto

contante waarden voor de verschillende capaciteiten uit Tabel 43 kunnen overgenomen worden voor dit eerste scenario.

De IRR bij een gebruiksfactor voor de geproduceerde warmte van 0 procent bedraagt voor een capaciteit van 5 MW 12,15 procent. Voor een capaciteit van 10 MW is de IRR 17,70 procent, voor een capaciteit van 20 MW bedraagt de IRR 24,17 procent. En de IRR bij een capaciteit van 50 MW ten slotte is gelijk aan 35,05 procent. Deze waarden moeten vergeleken worden met de rendementseis die het management bepaalt. Zoals Figuur 9 weergeeft, is de IRR ook het snijpunt met de x-as in het NCW-profiel. Een kapitaalkost na belastingen hoger dan de IRR zorgt voor een negatieve netto contante waarde. Bij een capaciteit van 5 MW en een kapitaalkost na belastingen van meer dan 12,15 procent is de netto contante waarde negatief en wordt het investeringsproject verworpen.

6.2.2 Scenario 2: een gebruiksfactor van 25%

Indien de gebruiksfactor 25 procent bedraagt, hebben we te maken met een WKK-installatie. De totale investeringskosten blijven hetzelfde. Ook de ecologiepremie bedraagt hetzelfde als in 5.3.3.2. Voor de verhoogde investeringsaftrek komt de WKK-installatie met een gebruiksfactor van 0,25 niet in aanmerking. Dit is het gevolg van de voorwaarden waaraan de omzettingsrendementen van de WKK-installatie moeten voldoen, namelijk:

$$\eta_e + (2/3 \times \eta_{th}) \geq 50\%$$

$$\text{en } \frac{\eta_e}{\eta_e + \eta_{th}} \geq 25\%$$

$$\text{en } \frac{\eta_{th}}{\eta_e + \eta_{th}} \geq 25\%$$

Een gebruiksfactor voor de thermische energie van slechts 25 procent wil zeggen dat maar ¼ van de geproduceerde warmte nuttig aangewend wordt. De thermische efficiëntie bedraagt hierdoor niet 60 procent, maar slechts ¼ van 60 procent, of 15 procent. Met dit thermisch rendement worden de bovenstaande voorwaarden:

$$0,25 + (2/3 \times 0,15) = 0,35 < 50\%$$

$$\frac{0,25}{0,25 + 0,15} = 0,625 \geq 25\%$$

$$\frac{0,15}{0,25 + 0,15} = 0,375 \geq 25\%$$

Aan de eerste voorwaarde is niet voldaan en de WKK-installatie heeft geen recht op een verhoogde investeringsaftrek.

Verder heeft de WKK-installatie in dit scenario ook geen recht op warmtekrachtcertificaten. De voorwaarde waaraan voldaan moet worden stelt dat de relatieve primaire energiebesparing minstens 10 procent moet zijn om te kunnen spreken van een kwalitatieve WKK en bijgevolg recht te hebben op warmtekrachtcertificaten. Een gebruiksfactor voor de geproduceerde warmte van slechts 25 procent geeft zelfs een negatieve relatieve primaire energiebesparing van "-9 procent". De WKK-installatie kan niet als kwalitatief beschouwd worden. Het aantal toe te kennen groenestroomcertificaten blijft wel behouden.

De netto contante waarden voor de verschillende capaciteiten in dit scenario staan in de volgende tabel.

Tabel 67: NCW bij een gebruiksfactor voor de warmte van 25%

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|-----------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| NCW (EUR) | 7 598 444 | 26 954 833 | 70 474 756 | 215 583 479 |

De IRR bedraagt 10,80 procent, 15,61 procent, 20,79 procent en 28,70 procent voor een capaciteit van 5 MW_e, 10 MW_e, 20 MW_e en 50 MW_e respectievelijk. Een kapitaalkost na belastingen boven deze IRR geeft voor de betreffende capaciteit een negatieve netto contante waarde.

6.2.3 Scenario 3: een gebruiksfactor van 50%

In dit scenario wordt de helft van de geproduceerde warmte nuttig aangewend. Dit komt overeen met een thermische efficiëntie van 30 procent. De WKK-installatie heeft nog steeds geen recht op de verhoogde investeringsaftrek. Aan de eerste van de drie opgelegde voorwaarden is immers niet voldaan:

$$0,25 + (2/3 \times 0,3) = 0,45 < 50\%$$

Verder kan de WKK-installatie ook geen warmtekrachtcertificaten aanvragen. De relatieve primaire energiebesparing bedraagt slechts 8 procent, wat minder is dan de opgelegde 10 procent. De WKK-installatie is met andere woorden geen kwalitatieve installatie en genereert dus ook geen extra opbrengsten door de verkoop van warmtekrachtcertificaten. Tabel 68 geeft een overzicht van de netto contante waarden voor de verschillende capaciteiten.

Tabel 68: NCW bij een gebruiksfactor voor de warmte van 50%

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|-----------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| NCW (EUR) | 10 345 199 | 32 448 343 | 81 461 775 | 243 051 027 |

Bij een gebruiksfactor van 50 procent ligt de IRR logischerwijze een stuk hoger dan bij een gebruiksfactor van 25 procent. Dezelfde investeringskosten gelden, alsook dezelfde jaarlijkse werkingskosten. Dit komt enerzijds doordat de elektriciteitsoutput constant wordt gehouden en dus de aankoopkosten van de biomassa hetzelfde blijven, omdat deze kosten net afhangen van de elektriciteitsoutput. Anderzijds zijn een deel van de jaarlijkse kosten afhankelijk van de investeringskosten, die niet wijzigen bij een verandering van de gebruiksfactor voor de geproduceerde warmte. Wat wel wijzigt, zijn de opbrengsten van de verkoop van warmte. De jaarlijkse kasstroom stijgt, net zoals de netto contante waarde en de IRR. De kapitaalkost na belastingen mag dus een stuk hoger zijn ten opzichte van paragraaf 6.2.2 vooraleer de netto contante waarde negatief wordt. Voor een capaciteit van 5 MW_e bedraagt de IRR 12,18 procent, voor een capaciteit van 10 MW_e 17,26 procent. Bij 20 MW_e is de IRR 22,77 procent en een capaciteit van 50 MW_e heeft een IRR van 31,26 procent.

6.2.4 Scenario 4: een gebruiksfactor van 75%

De thermische efficiëntie wordt met een gebruiksfactor van 0,75 voor de geproduceerde warmte 45 procent. Dit is voldoende om recht te hebben op de verhoogde investeringsaftrek. Ook warmtekrachtcertificaten kunnen worden aangevraagd. De relatieve primaire energiebesparing bedraagt namelijk 21 procent. De netto contante waarden voor de beschouwde capaciteiten staan in Tabel 69.

Tabel 69: NCW bij een gebruiksfactor voor de warmte van 75%

| | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|-----------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| NCW (EUR) | 19 483 635 | 50 487 699 | 117 191 303 | 331 553 430 |

De IRR bedraagt voor de verschillende capaciteiten respectievelijk 17,83 procent, 24,68 procent, 32,29 procent en 44,23 procent. Dit ligt een stuk hoger als bij een gebruiksfactor van 25 procent en 50 procent. De verklaring hiervoor is niet hetzelfde als in Paragraaf 6.2.3 Zoals in de vorige alinea al vermeld staat, heeft de WKK-installatie recht op een verhoogde investeringsaftrek, wat de initiële investeringskosten doet dalen. Daarnaast stijgen ook de opbrengsten door de verkoop van de geproduceerde warmte. Samen met de opbrengst van de verkoop van warmtekrachtcertificaten, zorgt dit voor een stijging van de jaarlijkse kasstroom. Hierdoor ligt de IRR hoger.

6.2.5 *Scenario 5: een gebruiksfactor van 100%*

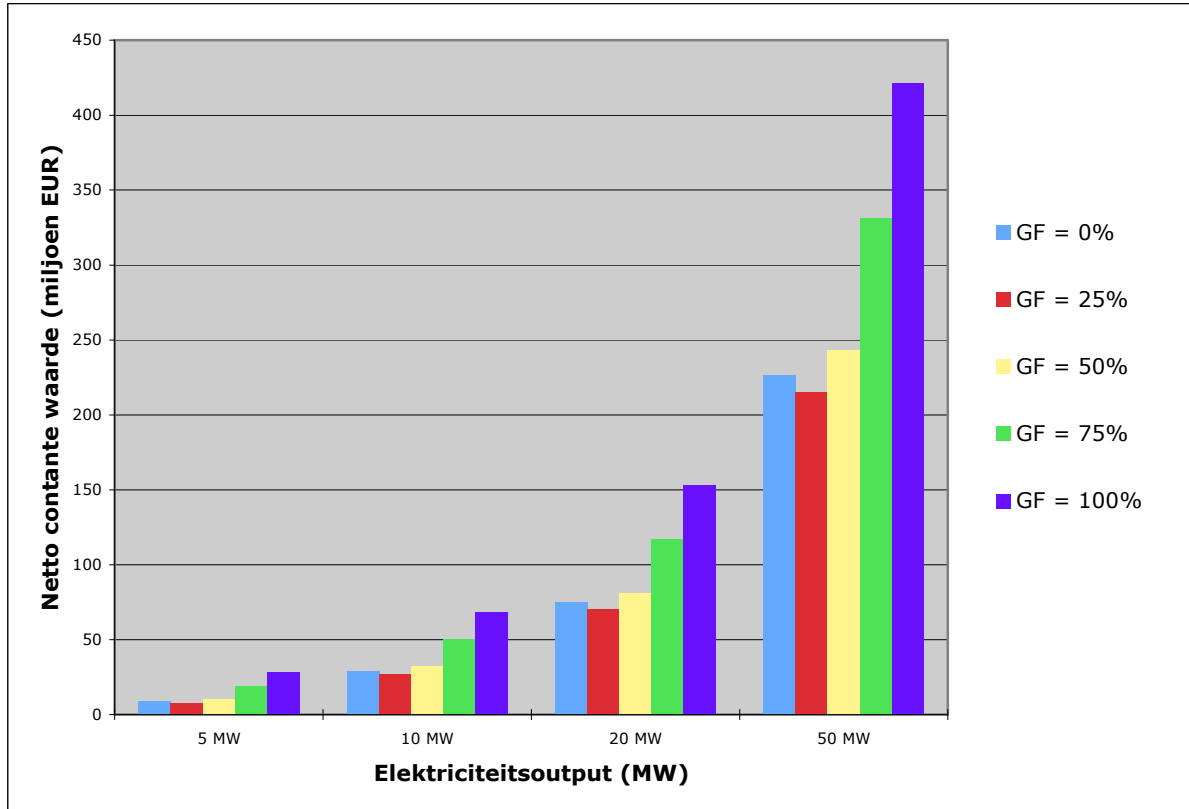
In de laatste scenario wordt alle geproduceerde warmte nuttig aangewend. Dit komt overeen met paragraaf 5.3. De WKK-installatie heeft recht op zowel de verhoogde investeringsaftrek als warmtekrachtcertificaten. De netto contante waarden die met dit scenario overeenkomen staan in Tabel 65.

De IRR bij een gebruiksfactor van 100 procent komt overeen met de snijpunten met de x-as uit het NCW-profiel (zie Figuur 16). Voor een capaciteit van 5 MW_e bedraagt de IRR 22,60 procent, voor een capaciteit van 10 MW_e bedraagt de IRR 30,64 procent, voor een capaciteit van 20 MW_e 39,67 procent en ten slotte voor een capaciteit van 50 MW_e is de IRR 53,92 procent.

6.2.6 *Grafische samenvatting*

De bevindingen uit de vijf besproken scenario's worden in onderstaande figuur weergegeven. GF staat voor gebruiksfactor. De figuur geeft mooi weer hoe de contante waarde stijgt met een stijgende gebruiksfactor voor de geproduceerde warmte. Alleen bij een gebruiksfactor van 25 procent is er voor alle capaciteiten een lichte daling ten opzichte van de netto contante waarde bij een gebruiksfactor van 0 procent. Dit komt doordat er bij een gebruiksfactor van 0 procent geen nuttige aanwending van de warmte plaatsvindt. Er is in zo een geval geen sprake van een WKK-installatie, maar van een verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit uit paragraaf 5.2. Bij een gebruiksfactor van 25 procent hebben we wel te maken met een WKK-installatie. Beide

installaties hebben in deze gevalstudie hun eigen veronderstellingen aangaande bijvoorbeeld omzettingsrendementen. Daarnaast zijn de investeringskosten bij een WKK-installatie hoger dan bij een verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit. De beperkte extra opbrengsten door de verkoop van een kwart van de warmte zijn niet voldoende om de extra investeringskosten en jaarlijkse werkingskosten te dekken. Hierdoor daalt de netto contante waarde.



Figuur 18: Samenvatting scenarioanalyse

6.3 Sensitiviteitsanalyse

Aan de hand van een sensitiviteitsanalyse gaan we de gevoeligheid van het NCW-model na voor verschillende parameters. We laten telkens twee parameters variëren binnen een bepaalde range en gaan na wat de invloed hiervan is op de NCW. De parameters die hiervoor in aanmerking komen zijn de elektrische en thermische efficiëntie, de aankoopprijs van de biomassa (EUR/tds), de verkoopprijs van de elektriciteit en de warmte (EUR/kWh) en ten slotte de kapitaalkost voor belastingen. Omdat de gebruiksfactor voor de thermische energie een niet onbelangrijke invloed heeft op de jaarlijkse kasstroom, wordt deze sensitiviteitsanalyse opgesplitst in drie delen: een gebruiksfactor van 100 procent, een gebruiksfactor van 50 procent en een gebruiksfactor van 0

procent voor de geproduceerde warmte. In de eerste twee gevallen hebben we met een WKK-installatie te maken, in het laatste geval wordt de thermische energie niet nuttig aangewend en bijgevolg gaat het over een verbrandingsinstallatie met opwekking van enkel elektriciteit.

De standaardwaarden die gelden voor de hierboven vermelde parameters staan in onderstaande tabel.

Tabel 70: Standaardwaarden parameters

| Parameter | Standaardwaarden |
|-------------------------------|---|
| Elektrische efficiëntie | <ul style="list-style-type: none">• verbrandingsinstallatie met elektriciteitsopwekking: 30%• WKK: 25% |
| Thermische efficiëntie | WKK: 60% |
| Aankoopprijs korte omloophout | 48,5 EUR/tds |
| Verkoopprijs elektriciteit | 0,05 EUR/kWh |
| Verkoopprijs warmte | 0,018 EUR/kWh |
| Kapitaalkost voor belastingen | 10% |

Voor de sensitiviteitsanalyse varieert de elektrische efficiëntie binnen een range van 15 procent tot 35 procent, terwijl de thermische efficiëntie varieert binnen een range van 50 procent tot 70 procent. Tabel 17 geeft aan dat bij de geraadpleegde bronnen de elektrische efficiëntie voor een verbrandingsinstallatie per opwekking van elektriciteit schommelt binnen een bereik van 18 procent tot 43 procent. Voor een WKK-installatie staan deze gegevens in Tabel 45. In deze tabel vinden we terug dat in de geraadpleegde literatuur een elektrische efficiëntie terug te vinden is van 20 procent tot 31 procent. Ook de thermische omzettingsrendementen zoals terug te vinden in de bronnen staan in Tabel 45. Het minimale rendement bedraagt hierbij 60 procent en het maximale rendement 78 procent. Dit zijn gegevens voor een WKK-installatie. De thermische efficiëntie bij een verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit heeft geen belang wegens het niet nuttig aanwenden van de warmte.

Voor de prijs van het korte omloophout wordt een bereik gebruikt van 28,5 EUR/tds tot 68,5 EUR/tds. Tabel 35 geeft weer dat er in de literatuur een brede range aan aankoopkosten van de biomassa te vinden is. Voor de sensitiviteitsanalyse gebruiken we daarom een bereik van 40 EUR.

In Paragraaf 5.2.5.1 is een overzicht terug te vinden van de gehanteerde elektriciteitsprijzen door de verschillende auteurs. Hieruit blijkt dat deze verkoopprijzen variëren binnen een bereik van 0,023 EUR/kWh tot 0,14 EUR/kWh. Voor de sensitiviteitsanalyse blijven we binnen deze gevonden range en bedraagt de prijs van één kWh elektriciteit tussen 0,03 EUR en 0,07 EUR. Wat betreft de verkoop van warmte staat een vergelijkbaar overzicht van verkoopprijzen in Paragraaf 5.3.4.1. De geraadpleegde bronnen vermelden een verkoopprijs voor de warmte van 0,013 EUR/kWh tot 0,02 EUR/kWh. Dit is een vrij klein bereik. Voor de sensitiviteitsanalyse gebruiken we een iets groter bereik, namelijk een verkoopprijs variërend van 0,006 EUR tot 0,03 EUR per kWh thermische energie.

Voor de laatste parameter ten slotte, de kapitaalkost voor belastingen, wordt er met een bereik gewerkt van 5 procent tot 25 procent. Een kapitaalkost voor belastingen van 25 procent is hoog. Een dergelijke kapitaalkost is bij financiering met vreemd vermogen niet waarschijnlijk. De rendementseis bij financiering met eigen vermogen ligt doorgaans hoger dan de rentevoet bij een lening. Daarnaast moet er ook roerende voorheffing betaald worden op de uit te keren dividenden. Indien de rendementseis uitgedrukt is als een nettodividend moet deze nog vermeerderd worden met de roerende voorheffing om het brutodividend te bekomen. (Mercken, 2004) Al deze factoren samen kunnen een hoge kapitaalkost voor belastingen opleveren en verklaren het bereik van 5 procent tot 25 procent.

De tabellen van de sensitiviteitsanalyses zijn te vinden in Bijlage 11, 12 en 13. Alle netto contante waarden staan uitgedrukt in aantal miljoen EUR. De negatieve netto contante waarden zijn aangeduid door een grijs vakje.

6.3.1 Sensitiviteitsanalyse met een gebruiksfactor van 100% voor de warmte

De WKK-installatie kan alle thermische energie afzetten op het warmtenet. De verschillende sensitiviteitsanalyses geven de volgende resultaten.

Door de volledige afzet van de geproduceerde warmte is de jaarlijkse kasstroom voldoende hoog om variaties in de verschillende parameters op te vangen. Daarnaast bedraagt de relatieve primaire energiebesparing, door de gebruiksfactor voor de warmte van 100 procent, in alle analyses meer dan 5 procent. Door de voldoende hoge relatieve primaire energiebesparing is de WKK-installatie kwalitatief en heeft het bijgevolg recht op warmtekrachtcertificaten, met een kleine uitzondering voor het geval waarbij de elektrische efficiëntie 15 procent en de thermische efficiëntie 50 procent bedraagt. Hetzelfde geldt voor de verhoogde investeringsaftrek. Met uitzondering van het geval waarbij de elektrische efficiëntie 15 procent en de thermische efficiëntie

50 procent bedraagt, heeft de WKK-installatie in alle overige gevallen recht op een verhoogde investeringsaftrek.

De netto contante waarde is over de hele analyse positief. Het investeringsproject is in alle beschouwde gevallen rendabel. De parameter waarvoor de netto contante waarde het meest gevoelig is, is de kapitaalkost voor belastingen. Vooral de combinatie van een hoge kapitaalkost voor belastingen (25 procent) met een laag elektrisch of thermisch omzettingsrendement of met een lage verkoopprijs voor de elektriciteit of de warmte zorgt voor een sterke daling in de netto contante waarde. De laagste netto contante is te vinden bij een kapitaalkost voor belastingen van 25 procent en een elektrische efficiëntie van 15 procent. Indien onder deze veronderstellingen de elektrische efficiëntie daalt tot 14 procent, is de netto contante waarde negatief, omwille van de hogere aankoopkosten voor de biomassa en de daling in de toegekende warmtekrachtcertificaten.

6.3.2 Sensitiviteitsanalyse met een gebruiksfactor van 50% voor de warmte

Een gebruiksfactor van 50 procent voor de warmte is meer realistisch dan een gebruiksfactor van 100 procent. De vraag naar warmte is immers niet constant doorheen het jaar en afhankelijk van de weersomstandigheden. Zoals uit de volgende tabellen duidelijk blijkt, is de netto contante waarde bij een gebruiksfactor van 50 procent veel gevoeliger voor variaties in de beschouwde parameters.

Net zoals bij een gebruiksfactor van 100 procent voor de geproduceerde thermische energie is ook hier de netto contante waarde het gevoeligst voor variaties in de kapitaalkosten voor belastingen. De combinatie van een hoge kapitaalkost voor belastingen met eender welke andere parameter resulteert in de meeste analyses tot een negatieve netto contante waarde. Bij een elektrische efficiëntie van 15 procent of een prijs van 0,03 EUR/kWh voor de geproduceerde elektriciteit is zelfs een kapitaalkost voor belastingen van 15 procent (dit is gelijk aan een kapitaalkost na belastingen van 10,05 procent) te hoog om een positieve netto contante waarde te verkrijgen. Een kapitaalkost voor belastingen van 25 procent resulteert overigens altijd in een negatieve netto contante waarde, ongeacht de waarde van de andere parameter. Er is één uitzondering hierop, namelijk bij een elektrische efficiëntie van 35 procent.

Naast de kapitaalkost voor belastingen is de netto contante waarde ook nog gevoelig voor lage elektrische omzettingsrendementen. In combinatie met een hoge prijs voor de biomassa (68,5 EUR/tds) of een lage prijs voor de geproduceerde thermische energie (0,006 EUR/kWh) geeft de netto contante waarde een negatieve waarde aan. Over de vijftien analyses blijkt dat de netto contante waarde een grotere sensitiviteit vertoont voor veranderingen in de elektrische efficiëntie dan in de thermische efficiëntie. Een verklaring hiervoor ligt bij het feit dat de capaciteit in deze

sensitiviteitsanalyse constant wordt gehouden, namelijk 5 MW_e elektriciteitsoutput. Dit is het gevolg van de kosten-batenanalyse van Hoofdstuk 5. Om vergelijkingen tussen de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit en de WKK-installatie te vereenvoudigen zijn de capaciteiten van beide installaties uitgedrukt in aantal MW elektriciteitsproductie. Een WKK-installatie wordt vaak gedimensioneerd op aantal MW warmteproductie of aantal MW thermische input. Stel dat in deze gevalstudie de capaciteit van de installatie uitgedrukt is in aantal MW warmteproductie. Hierdoor wordt in de sensitiviteitsanalyse deze capaciteit constant gehouden en zal de netto contante waarde een grotere sensitiviteit vertonen voor veranderingen in de thermische efficiëntie.

Maar voor deze sensitiviteitsanalyses is de capaciteit dus uitgedrukt in aantal MW elektriciteitsoutput. Als nu de elektrische efficiëntie daalt, stijgt de benodigde hoeveelheid biomassa om aan de elektriciteitsoutput van 5 MW_e te komen. En hiermee stijgen uiteraard ook de jaarlijkse werkingskosten. Een daling in de thermische efficiëntie heeft daarentegen geen invloed op de benodigde hoeveelheid biomassa. Een voorbeeldje: onder de standaardvoorwaarden in deze gevalstudie ($\eta_{th} = 60\%$ en $\eta_e = 25\%$) vraagt een elektriciteitsoutput van 5 MW_e een hoeveelheid aan biomassa van 28 000 tds. Een daling in de elektrische efficiëntie van 25 procent naar 20 procent zorgt voor een stijging in de benodigde hoeveelheid biomassa van 28 000 tds naar 35 000 tds om een elektriciteitsoutput van 5 MW_e te behouden. Indien de elektrische efficiëntie constant 25 procent blijft en de thermische efficiëntie daalt van 60 procent naar 55 procent heeft dit geen invloed op de benodigde hoeveelheid biomassa. Het elektrisch omzettingsrendement blijft 25 procent en dus is de benodigde hoeveelheid biomassa nog steeds 28 000 tds. De aankoopkosten voor de biomassa blijven bijgevolg ongewijzigd bij een constante elektrische efficiëntie en een variërende thermische efficiëntie. Dit verklaart ook grotendeels waarom de combinatie van een lage elektrische efficiëntie en een hoge prijs voor de biomassa resulteert in een negatieve netto contante waarde.

Op het eerste zicht lijkt er een andere verklaring voor de grotere gevoeligheid van de netto contante waarde met betrekking tot de elektrische efficiëntie in vergelijking met de thermische efficiëntie te liggen in de toekenning van warmtekrachtcertificaten. De formule voor de berekening van de primaire energiebesparing (PEB) geeft de indruk dat het aantal toe te kennen warmtekrachtcertificaten in grotere mate afhankelijk is van de elektrische efficiëntie. Kort samengevat kan men stellen dat de elektrische efficiëntie een invloed heeft op dit aantal toe te kennen warmtekrachtcertificaten via de relatieve primaire energiebesparing, de factor waarmee de PEB vermenigvuldigd wordt en het aantal kWh elektriciteit. De thermische efficiëntie heeft enkel een invloed via de relatieve primaire energiebesparing en de factor waarmee de PEB vermenigvuldigd wordt. Voor wat de elektriciteit betreft spelen zowel de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit als het omzettingsrendement een rol, terwijl bij de warmte alleen het omzettingsrendement een invloed heeft.

De bijhorende formule maakt dit duidelijk. Het aantal warmtekrachtcertificaten hangt af van de primaire energiebesparing. Er wordt één certificaat per gerealiseerde MWh PEB toegekend. De formule voor de PEB is als volgt (zie formule 25):

$$PEB = E \times \left(\frac{1}{\alpha_e} + \frac{\eta_{th}}{\eta_e \times \alpha_{th}} - \frac{1}{\eta_e} \right)$$

Hierbij is E de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit (MWh). De geproduceerde hoeveelheid warmte of de hoeveelheid nuttig aangewende warmte lijkt bij de berekening van de PEB geen invloed te hebben. Een omrekening van bovenstaande formule geeft aan dat de primaire energiebesparing ook berekend kan worden met behulp van de geproduceerde hoeveelheid warmte.

De geproduceerde hoeveelheid elektriciteit (E_i) is gelijk aan het product van de input aan energie (E_i) vermenigvuldigd met de elektrische efficiëntie (η_e). Analoog hiermee is de geproduceerde hoeveelheid warmte (E_Q) gelijk aan het product van de input aan energie (E_i) maal de thermische efficiëntie (η_{th}). Vervanging van E in de formule van de PEB door ($E_i \times \eta_e$) geeft:

$$\begin{aligned} PEB &= (E_i \times \eta_e) \times \left(\frac{1}{\alpha_e} + \frac{\eta_{th}}{\eta_e \times \alpha_{th}} - \frac{1}{\eta_e} \right) \\ &= E_i \times \left(\frac{\eta_e}{\alpha_e} + \frac{\eta_{th}}{\alpha_{th}} - 1 \right) \\ &= E_i \times \frac{(\eta_e \times \alpha_{th}) + (\eta_{th} \times \alpha_e) - (\alpha_e \times \alpha_{th})}{(\alpha_e \times \alpha_{th})} \end{aligned}$$

De formule voor de berekening van de PEB kan dus ook uitgedrukt worden in functie van de input aan energie. Hier door heeft de formule een iets ingewikkeldere vorm. Verdere omzetting kan een formule opleveren waarbij het aantal MWh warmte gebruikt wordt. De veronderstelling dat de elektriciteitsproductie meer zou doorwegen in de berekening van de PEB klopt met andere woorden niet. De grotere gevoeligheid van de netto contante waarde voor de elektrische efficiëntie heeft dus niets te maken met de berekening van de PEB, zoals de formule in eerste instantie doet vermoeden. Zoals eerder aangehaald ligt de verklaring van de grotere sensitiviteit voor veranderingen in η_e in het feit dat de capaciteit van de installatie uitgedrukt is in aantal MW_e.

6.3.3 *Sensitiviteitsanalyse met een gebruiksfactor van 0% voor de warmte*

Voor deze sensitiviteitsanalyse worden de gegevens en veronderstellingen van de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit gebruikt. Omdat er geen warmte afgezet

wordt op een warmtenet, spelen de thermische efficiëntie en de verkoopprijs voor de thermische energie geen rol. Deze parameters krijgen daarom eenvoudig de waarde nul in de analyse. Op deze manier krijgt men een sensitiviteitsanalyse waarbij slechts één parameter varieert binnen een bepaalde range in plaats van twee parameters. Eén analyse is achterwege gelaten, namelijk deze waarin de invloed van een veranderende verkoopprijs voor de warmte en een veranderende thermische efficiëntie wordt nagegaan. In een verbrandingsinstallatie waar de geproduceerde warmte niet verkocht wordt, is deze analyse uiteraard overbodig.

Dezelfde conclusie geldt voor deze sensitiviteitsanalyse aangaande de kapitaalkosten voor belastingen. Variaties in deze parameter zorgen voor de grootste veranderingen in de netto contante waarde. Bij een gebruiksfactor van 50 procent voor de geproduceerde warmte levert een kapitaalkost voor belastingen van 25 procent steeds een negatieve netto contante waarde op (behalve in combinatie met een elektrische efficiëntie van 35 procent). In het geval van een gebruiksfactor van 0 procent geeft een kapitaalkost van 25 procent ook in alle gevallen een negatieve netto contante waarde. Bovendien is een kapitaalkost voor belastingen van 20 procent meestal te hoog om de netto contante waarde positief te houden. De combinatie van een dergelijke kapitaalkost met eender welke andere beschouwde parameter geeft, op enkele uitzonderingen na, altijd een negatieve netto contante waarde. Hoe belangrijk de kapitaalkosten voor belastingen zijn, wordt wellicht het duidelijkst weergegeven in de combinatie met de thermische efficiëntie of de verkoopprijs voor de warmte. Omwille van de gebruiksfactor van 0 procent hebben variaties in deze twee parameters geen invloed op de netto contante waarde. Enkel de veranderingen in de kapitaalkosten voor belastingen veroorzaken veranderingen in de netto contante waarde. We kunnen concluderen dat onder de standaardvoorwaarden de kapitaalkost voor belastingen niet hoger mag zijn dan 18 procent (dit komt overeen met een kapitaalkost na belastingen van 12,06 procent). Vanaf 19 procent (of 12,73 procent na belastingen) is het investeringsproject niet meer rendabel.

Net zoals bij een WKK-installatie met een gebruiksfactor van 50 procent voor de geproduceerde warmte zorgt de combinatie van een lage elektrische efficiëntie en een hoge aankooprijs van de biomassa voor een negatieve netto contante waarde. Een lage elektrische efficiëntie geeft ook een negatieve netto contante waarde in combinatie met een lage verkoopprijs voor de elektriciteit.

Hoofdstuk 7: Externe baten en kosten

Bij het nagaan van de impact op het milieu moet er ook rekening gehouden worden met eventuele externe kosten en/of externe baten. Met externe kosten worden allerlei schadekosten als gevolg van het verbranden van biomassa bedoeld die een effect hebben op bijvoorbeeld het milieu. Deze kosten zijn extern omwille van het feit dat ze niet mee verrekend worden in de prijs van de uiteindelijke bekomen energie. Bijgevolg worden deze kosten niet rechtstreeks door de producent of door de consument gedragen. Ook externe baten kunnen optreden bij het verbranden van biomassa. Dit zijn bijkomende voordelen die men verkrijgt zonder dat hiermee bij de prijszetting rekening wordt gehouden. Externe baten en kosten worden samen externaliteiten genoemd en zitten dus niet verrekend in de private prijs. In een studie van Faaij *et al.* (1998) worden de kosten vergeleken tussen de productie van elektriciteit met biomassa en met traditionele steenkool. Dit wordt gedaan aan de hand van schattingen voor het jaar 2005. De gemiddelde private kost voor de productie van elektriciteit met behulp van biomassa bedraagt bijna twee maal zoveel als de gemiddelde private kost voor de productie van elektriciteit met behulp van steenkool. Indien er rekening wordt gehouden met externaliteiten bevinden de gemiddelde kosten zich op gelijke hoogte en bijgevolg is biomassa concurrerbaar met steenkool.

Externaliteiten moeten uitgedrukt worden in financiële termen indien men ze wil verrekenen in de prijs. Om externe kosten en baten te kunnen meten kan men gebruik maken van verschillende methodes. Een eerste methode is door te kijken naar de impact van veranderingen in het leefmilieu op gedrag dat direct meetbaar is. Zo kan men in financiële termen uitdrukken wat het verlies aan output is door ziekte. Een tweede methode bestaat uit het bevragen van de bevolking. Dit kan aan de hand van directe of indirecte vragen. Men kan hierbij peilen naar de "willingness to pay" of de "willingness to accept". Een voorbeeld van een directe vraag is: Wat is de bereidheid om een compensatie te aanvaarden voor vervuilde lucht? Een indirecte vraag kan zijn: Wat is de bereidheid tot betalen van een uitstap naar een natuurgebied? Als derde methode kan men gebruik maken van de zogenaamde abatement costs benadering. Hierbij berekent men de kost die het voorkomen van bijvoorbeeld een bepaalde emissie met zich meebrengt. Er bestaan nog andere methodes om externaliteiten te meten en in monetaire termen uit te drukken, maar geen enkele methode heeft de voorkeur op de andere methodes. De meest geschikte methode hangt af van de specifieke situatie, de nood aan betrouwbare resultaten en de beschikbaarheid aan data en budget. Elke methode heeft bovendien zijn pro's en contra's. Zo wordt het stellen van directe vragen aan de bevolking in sommige situaties in vraag gesteld. Hoe kunnen de ondervraagden immers juist inschatten wat bijvoorbeeld de gevolgen op lange termijn zijn van klimaatverandering of het verlies aan biodiversiteit? Daarnaast geeft de bereidheid tot betalen niet altijd weer wat men ook werkelijk zou betalen. (Faaij *et al.*, 1998)

De belangrijkste externe kosten en baten hebben te maken met enerzijds omgevingsfactoren en anderzijds sociaal-economische factoren. Deze laatste hebben te maken met werkgelegenheid en de invloed op het bruto nationaal product. Het is echter niet mogelijk om alle externe effecten te meten en in financiële termen uit te drukken. Het verlies aan natuurlijke gebieden of biodiversiteit of het verminderen van de voorraden energie zijn monetair moeilijk uit te drukken. Bovendien moet men bij het berekenen van externe kosten en baten telkens vanuit één situatie vertrekken en bijgevolg zijn de gevonden resultaten steeds gebonden aan heel wat assumpties. (Faaij *et al.*, 1998)

Hieronder volgt een opsomming van de belangrijkste externe kosten en baten die de productie van elektriciteit en eventueel warmte uit de verbranding van biomassa met zich mee kan brengen.

7.1 Externe kosten

Zoals in Paragraaf 3.3 al is aangegeven, kunnen er allerlei emissies vrijkomen bij de verbranding van biomassa. De belangrijkste emissies zijn deze naar de lucht. Het verbranden van biomassa is dan wel CO₂-neutraal, toch komen er voornamelijk stikstofoxiden, stof en zwaveldioxide vrij. Deze kunnen een invloed hebben op de gezondheid van de mens, op de fauna en flora en kunnen zelfs schade aanbrengen aan gebouwen door bepaalde materialen aan te tasten. Om dit te kunnen meten zijn er drie belangrijke methodes. Als eerste kan men gebruik maken van een schadefunctie. Men vertrekt van een bepaalde activiteit, in dit geval dus het verbranden van biomassa, en men berekent vervolgens de hoeveelheden aan emissies die worden uitgestoten. Dit waardeert men dan aan de hand van fysische effecten, zoals het verlies aan landbouwproductie, stijging van het aantal sterfgevallen of de aangebrachte schade aan gebouwen. Bij deze methode moet men veel data verzamelen en de resultaten hangen af van de situatie en de locatie. Er kan ook gebruik gemaakt worden van wat men noemt de top-down benadering. Hierbij begint men met een schatting te maken van de totale aangebrachte schade aan economie, mens, natuur of gebouwen. Daarna berekent men de bijdrage van verschillende emissiebronnen tot deze totale schade. Op basis hiervan wijst men externe kosten toe aan die verschillende emissiebronnen. Ten slotte kan men de hierboven besproken abatement costs benadering gebruiken. Hierbij zoekt men een evenwicht tussen de externe kosten van de emissies naar de lucht en de kosten die gepaard gaan met het vermijden van deze emissies. (Faaij *et al.*, 1998)

Indien de gebruikte biomassa afkomstig is van energieteelten moet men ook met andere emissies rekening houden. De belangrijkste emissie hierbij is stikstof. Vooral in Europa is dit reeds een probleem door intensief gebruik van bemesting in de landbouw. De stikstof komt terecht in het grondwater en dit kan voor conflicten zorgen in verband met de standaarden voor drinkwater. Men kan deze kosten voor de grondwatervervuiling waarderen door een vergelijking te maken tussen

hoeveel het kost om de stikstof uit het grondwater te verwijderen en de productie van zuiver drinkwater. Ook kan men nagaan wat de bereidheid tot betalen van de bevolking is met betrekking tot kwalitatief beter grondwater. (Faaij *et al.*, 1998)

Niet alleen bemesting kan het grondwater vervuilen. Ook het gebruik van pesticiden kan een invloed hebben op de natuur en de gezondheid van de mens. Verder kunnen energieteelten een invloed hebben op de kwaliteit van de bodem of de biodiversiteit. Ook kan er erosie ontstaan. Hierbij zijn niet alle effecten gekend of goed begrepen. De energieteelten zelf kunnen allerlei risico's met zich meebrengen voor de arbeiders. Het aanplanten, oogsten, voorbehandelen, transporteren en opslaan van de biomassa kunnen verwondingen of ongevallen veroorzaken. Een correcte waardering in financiële termen hiervan is moeilijk. (Faaij *et al.*, 1998)

De installatie van een verbrandingsinstallatie heeft in de meeste gevallen een positief effect op werkgelegenheid. Het kan voorkomen dat dit echter negatief uitdraait. Indien de economische activiteit hoog is en er dus al veel vraag is naar arbeid vanuit de bedrijven, kan een stijgende vraag naar arbeid inflatie veroorzaken. Met als gevolg dat de kost voor arbeid stijgt. (Faaij *et al.*, 1998)

7.2 Externe baten

Een investering in een verbrandingsinstallatie voor biomassa zorgt voor een stijging van de economische activiteit gedurende de levensduur van de installatie, ook in andere economische sectoren. Dit noemt men het multiplier effect. Zo kan er een positief effect waargenomen worden in de landbouwsector indien de biomassa afkomstig is van energieteelten. De verbrandingsinstallatie vraagt ook onderhoud en genoeg personeel voor een goede werking ervan. De biomassa moet aangevoerd worden en dit heeft gevolgen voor de transportsector. (Faaij *et al.*, 1998)

De effecten op werkgelegenheid kunnen opgedeeld worden in directe en indirecte werkgelegenheid. Directe werkgelegenheid is het gevolg van de opbouw en de werking van de installatie. Indirecte werkgelegenheid daarentegen komt voort uit andere sectoren van de economie doordat er uitgaven worden gedaan die het gevolg zijn van het vestigen van de betreffende verbrandingsinstallatie. Over het algemeen kan men stellen dat de productie van elektriciteit uit het verbranden van biomassa arbeidsintensiever is dan bijvoorbeeld de productie ervan uit steenkool. (Faaij *et al.*, 1998)

Bij de externe kosten in Paragraaf 7.1 werd al aangegeven dat energieteelten externe effecten met zich mee kunnen brengen. Toch hoeven deze externe effecten niet altijd negatief te zijn. Zo kan de

teelt van korte omloophout bijdragen tot de biodiversiteit doordat het een woonplaats voor vogels en insecten kan bieden. Ook kan wilg een positieve invloed hebben op het grondwaterniveau. Deze kan stijgen wanneer wilg wordt aangeplant en dit voorkomt uitdroging van de bodem. Wanneer een veld met energiegewassen aangelegd wordt op bijvoorbeeld landbouwgrond dat braak ligt of wanneer landbouwgrond wordt gebruikt om op deze manier de overproductie in de landbouwsector aan te pakken, levert dit ook een baat op. Indien men echter natuurgebied voor de energieteelt opoffert, is dit een externe kost. (Faaij *et al.*, 1998)

7.3 Externaliteiten in deze gevalstudie

In de kosten-batenanalyse van Hoofdstuk 5 werd geen rekening gehouden met externaliteiten. Deze externaliteiten zijn externe baten of kosten en zitten niet verrekend in de private prijs van de geproduceerde elektriciteit (en eventueel warmte). Vooral de externe baten van de verbranding van biomassa kunnen belangrijk zijn om biomassa als brandstof voor het genereren van energie concurrerbaar te maken met traditionele energiebronnen. In deze paragraaf komt de belangrijkste externe baat aan bod, namelijk de reductie van CO₂, wat één van de omstreden broeikasgassen is. De verbranding van biomassa is CO₂ - neutraal en dat terwijl er bij de verbranding van bijvoorbeeld steenkool grote hoeveelheden CO₂ in de atmosfeer terecht komen. Omdat de verbranding van biomassa CO₂ - neutraal is, kan de externe baat van de CO₂ - reductie berekend worden door na te gaan hoeveel CO₂ er uitgestoten wordt bij de verbranding van een traditionele energiebron. Dit is dan ook meteen de hoeveelheid CO₂ die bespaard wordt door biomassa te gebruiken in plaats van een traditionele energiebron. Externe baten worden steeds uitgedrukt in financiële termen en dus moet de uitstoot van CO₂ uitgedrukt worden in aantal EUR.

Voor de berekening van de externaliteiten heeft Carlson (2002) een monetaire waarde gebruikt van gemiddeld 46 EUR per ton CO₂. Deze waarde is afkomstig van een onderzoek van de Europese Commissie (ExternE). Faaij *et al.* (1998) gebruiken een lagere waarde, namelijk 1 tot 25 EUR/ton. Deze range is afkomstig van het IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Ze vermelden er wel bij dat de grote range het gevolg is van veronderstellingen in verband met de interestvoeten waartegen toekomstige kosten verdisconteerd worden. Ook bestaan er verschillende scenario's wat de impact betreft van CO₂ op de klimaatsverandering. Verder wijzen Faaij *et al.* (1998) er ook op dat hogere schadekosten nodig kunnen zijn voor de uitstoot van broeikasgassen. Een gemiddelde schadekost van 20 EUR/ton CO₂ is terug te vinden bij De Nocker *et al.* (2002). Voor deze gevalstudie wordt deze laatste waarde gebruikt.

Carlson (2002) vermeldt dat er bij de productie van elektriciteit in een steenkoolcentrale 728 gram CO₂ vrijkomt per kWh. Faaij *et al.* (1998) gebruiken een hoeveelheid van 815 gram CO₂ per geproduceerde kWh. Demirbas en Urkmez (2006) vermelden een hogere waarde van 920 gram per

kWh. Voor deze gevalstudie geldt het gemiddelde van deze drie bronnen, namelijk 821 gram/kWh. Als we nu weten dat de verbranding van 23 333 tds biomassa, onder de veronderstellingen uit Paragraaf 5.2.3 een elektriciteitsoutput oplevert van 35 000 000 kWh, dan bedraagt de externe baat:

$$35\,000\,000 \text{ kWh} \times 0,000821 \text{ ton/kWh} \times 20 \text{ EUR/ton} = 574\,700 \text{ EUR}$$

Steenkool heeft een grotere verbrandingswaarde dan biomassa, namelijk 26 GJ/ton. (Rabou *et al.*, 2006) Om dezelfde hoeveelheid elektriciteit op jaarbasis (35 000 000 kWh) te produceren met behulp van steenkool is er bijgevolg geen 23 333 ton steenkool nodig. Het elektrisch rendement van een traditionele steenkoolcentrale is hoger dan bij een verbrandingsinstallatie voor biomassa. Dit rendement wordt 37 procent verondersteld. (Emis, 2008) Om 35 000 000 kWh elektriciteit te produceren is er dus 13 098 ton steenkool op jaarbasis nodig.

De externe baat van het verbranden van 23 333 tds biomassa in plaats van 13 098 ton steenkool bedraagt dus 574 700 EUR. Voor de andere capaciteiten is de berekening analoog. De resultaten staan in Tabel 71.

Tabel 71: Externe baten op basis van het aantal ton

| | 5 MW | 10 MW | 20 MW | 50 MW |
|--------------------|------------|------------|-------------|-------------|
| Aantal kWh | 35 000 000 | 70 000 000 | 140 000 000 | 350 000 000 |
| Externe baat (EUR) | 574 700 | 1 149 400 | 2 298 800 | 5 747 000 |

De externe baten uit Tabel 71 geven aan in financiële termen hoeveel de externe baat bedraagt bij het vervangen van een bepaalde hoeveelheid steenkool door biomassa om aan de veronderstelde elektriciteitsproductie te voldoen.

Een andere externe baat is de extra werkgelegenheid die de productie van elektriciteit op basis van biomassa met zich meebrengen. Zo hebben Faaij *et al.* (1998) berekend dat een biomassa-installatie voor de opwekking van elektriciteit op jaarbasis tussen 0,44 en 0,53 arbeiders per GWh te werk stelt. Daarbij horen zowel directe als indirecte arbeid. Zo is bijvoorbeeld ook de arbeid voor de constructie van de installatie en het transport van de biomassa meegerekend. Het punt dat hier belangrijk is, is de vergelijking van het aantal arbeiders per GWh op jaarbasis in een steenkoolcentrale. Volgens Faaij *et al.* (1998) bedraagt dat aantal tussen 0,17 en 0,20 arbeiders. Dat is minder dan de helft van het aantal arbeiders bij de biomassa-installatie.

7.4 Biobrandstoffen en externaliteiten in een ruimer perspectief

In de Paragrafen 7.1 en 7.2 staan een aantal externaliteiten beschreven. De externe kosten in Paragraaf 7.1 hebben voornamelijk betrekking op de uitstoot van schadelijke stoffen, andere dan CO₂, bij de verbranding van biomassa of het vervuilen van het grondwater met stikstof bij energieteelten. Deze externe kosten zijn eerder plaatselijk en vragen om een oplossing op nationaal vlak. Indien we ruimer gaan en biomassa, of meer algemeen biobrandstoffen, op internationaal vlak kritisch bekijken rijzen er toch een aantal vragen.

Korte omloophout bevat cellulose. Dit is ook te vinden in bijvoorbeeld grassen. De tegenhangers van cellulose-gebaseerde biomassa zijn gewassen zoals maïs, sojabonen en suikerbieten. Vooral in de transportsector vormen deze laatste gewassen de basis voor de belangrijkste biobrandstoffen, zoals ethanol. De teelt van cellulose-gebaseerde biomassa brengt op dit moment hogere kosten met zich mee. Ook de omzetting van deze biomassa in energie vraagt grotere investeringen in vergelijking met bijvoorbeeld maïs. Voor de productie van ethanol wordt daarom nog voornamelijk maïs gebruikt. De vraag naar deze maïs, maar ook naar andere gewassen die voor ethanolproductie gebruikt worden, stijgt elk jaar waardoor de prijs ervan meestijgt. Ook maïs die niet bestemd is voor biobrandstoffen wordt hierdoor duurder. Dit kan verstrekkende gevolgen met zich meebrengen. Een hogere verkoopprijs zet meer landbouwers aan om over te schakelen van andere gewassen naar maïs. Hierdoor wordt het landbouwareaal voor andere gewassen kleiner en dus daalt het aanbod van deze gewassen en stijgt de prijs. Bovendien bestaat er een relatie tussen de prijs van olie en maïs. Zoals Runge en Senauer (2007) vermelden zorgt een hoge olieprijs ervoor dat maïs als brandstof competitief is. Hoe hoger de prijs van olie, hoe gunstiger voor maïstelers. Bovendien heeft men erg veel maïs nodig om voldoende ethanol te produceren. Bijvoorbeeld: het vullen van een 4x4 met pure ethanol vraagt zoveel brandstof dat men met dezelfde hoeveelheid calorieën een persoon een jaar lang eten kan geven (Runge en Senauer, 2007)

Zelfs in de ontwikkelingslanden schakelen veel landbouwers over op energieteelten, omdat ze hiervoor hogere prijzen kunnen vragen. In de armste delen van de wereld is een groot deel van de bevolking afhankelijk van maniok. De prijs van dit gewas is sterk gestegen doordat landen zoals China, Nigeria en Thailand dit gewas inzetten om ethanol te produceren. Het zelfde verhaal als voor maïs gaat hier op: een grotere vraag naar maniok, de prijs stijgt, meer landbouwers schakelen over op maniok, minder landbouwgrond blijft over voor andere gewassen. Bovendien is er minder maniok beschikbaar als voedsel. En het gedeelte van de maniokproductie dat nog rest als voedsel wordt voor veel mensen onbetaalbaar. Een prijsstijging van maniok wordt verwacht van 33 procent tegen 2010 en zelfs 135 procent tegen 2020. (Runge en Senauer, 2007)

Deze gevalstudie gaat niet over de productie van ethanol, maar over de productie van elektriciteit. Ook wordt er niet met maïs of maniok gewerkt. Uit de vorige twee alinea's blijkt duidelijk dat de vraag gesteld moet worden of de voordelen van biobrandstoffen op basis van gewassen zoals maïs en maniok wel opwegen tegen de nadelen. Is het wel verantwoord om voedingsgewassen te gebruiken als brandstof? Energieteelten zoals korte omloophout hebben gunstigere vooruitzichten voor wat betreft prijsstijgingen van voedsel en energie. Korte omloophout kan namelijk op armere grond geteeld worden. Grond dus, die niet geschikt is voor landbouwgewassen. Bovendien vormt een stijging van de productie van korte omloophout geen rechtstreeks gevaar voor de voedselprijzen. Toch mag men niet te optimistisch zijn over korte omloophout. Zoals al aangehaald, is de teelt een stuk duurder, ook al omdat het zwaartepunt van energieteelten op dit moment nog op maïs ligt. Verder onderzoek naar omzettingsprocessen en efficiënte manieren om korte omloophout te telen zijn zeker noodzakelijk. Deze boodschap vermelden ook Msangi *et al.* (2007) en Runge en Senauer (2007) in hun conclusie.

Maar zelfs als dat gebeurt, duiken er weer nieuwe vragen op. Naarmate de vraag naar korte omloophout stijgt, zal ook de prijs stijgen en meer landbouwer aanzetten tot een overschakeling. En als deze overschakeling niet op bestaande landbouwgronden gebeurt, dan misschien wel in bosrijke gebieden. In het Amazonewoud bijvoorbeeld wordt al jaren gekapt om plaats te maken voor nieuwe sojaplantages of suikerrietplantages. Jaarlijkse wordt er volgens het WWF (2008) tussen 17 000 km² en 27 000 km² gekapt. Als dit zo doorgaat is tegen 2020 een kwart van het Amazonewoud verdwenen. In het zuidoosten van Azië is er een gelijkaardig probleem voor wat betreft de palmolieplantages. En nog zijn er talrijke andere voorbeelden. Ook voor korte omloophout bestaat de mogelijkheid dat regenwoud moet wijken voor plantages.

Hoofdstuk 8: Conclusies en suggesties voor verder onderzoek

De kosten-batenanalyse uit Hoofdstuk 5 is geheel opgebouwd rond veronderstellingen. De conclusies gelden bijgevolg alleen voor deze gevalstudie. Om toch wat ruimte te laten voor variaties in de veronderstelde parameters, is het model uitgewerkt in Excel. Alle parameters zijn hierbij als variabele ingevoerd en kunnen dus een andere waarde aannemen. De structuur van het model ligt wel vast, d.w.z. de capaciteit van de installatie is uitgedrukt in aantal MW elektriciteitsoutput. Verder is er in jaar 0 een initiële investering, bestaande uit de totale investeringskosten verminderd met de ecologiepremie en de verhoogde investeringsaftrek. De jaarlijkse netto kasstroom is het verschil tussen de inkomende en de uitgaande kasstroom. Onder de inkomende kasstroom vallen de opbrengsten uit de verkoop van de geproduceerde energie en certificaten (groenestroom- en eventueel warmtekrachtcertificaten). De uitgaande kasstroom bestaat uit de jaarlijkse werkingskosten (o.a. onderhoudskosten, personeelskosten en aankoopkosten van de biomassa). Daarnaast is er rekening gehouden met het belastingschild van de afschrijvingen. Deze opbouw van de kasstromen ligt dus vast, maar bij de invulling ervan aan de hand van concrete waarden voor de parameters, kan eender welke waarde voor die parameters gekozen worden. Het werkblad uit Excel is ook gebruikt bij de scenario- en sensitiviteitsanalyse.

Twee typen van installaties zijn in deze gevalstudie aan bod gekomen: de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit en de WKK-installatie met gezamenlijke opwekking van elektriciteit en warmte. Het verbrandingsgedeelte en de stoomcyclus zijn hetzelfde verondersteld bij beide installaties. Een WKK-installatie vraagt extra investeringskosten in verband met de aanleg van een warmtenet voor de distributie van de geproduceerde warmte. De warmtewisselaar die hierbij de verbinding vormt tussen de WKK-installatie en het warmtenet, heeft bij een verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit de functie de restwarmte vrij te laten in de lucht. Hoe groter de WKK-installatie, hoe groter het warmtenet dat nodig is om de warmte te kunnen afzetten.

We kunnen vaststellen dat onder de standaardwaarden voor de verschillende parameters een investering in zowel een verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit als een WKK-installatie economisch haalbaar is. Schaalvoordelen zorgen voor een hogere netto contante waarde bij een toenemende capaciteit. Deze schaalvoordelen zijn terug te vinden bij beide installaties in zowel de totale investeringskosten als de jaarlijkse werkingskosten. Aangaande de totale investeringskosten is er een daling van 4 282 kEUR/MW voor een capaciteit van 5 MW naar 1 687 kEUR/MW voor een capaciteit van 50 MW, en dit voor een verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit. Bij een WKK-installatie is er een daling van 4 646 kEUR/MW_e voor een capaciteit van 5 MW_e naar 2 051 kEUR/MW_e voor een capaciteit van 50 MW_e. De schaalvoordelen in verband met de jaarlijkse werkingskosten hebben te maken met de personeelskosten. Het aantal

werknemers per MW daalt immers bij een stijgende capaciteit. Onderhoudskosten, verzekeringskosten en algemene overheadkosten dragen ook bij tot de schaalvoordelen omdat ze uitgedrukt zijn als percentage van de totale investeringskosten.

Door de hogere netto contante waarde bij een toenemende capaciteit, stijgt ook de IRR bij een toenemende capaciteit. Als alle andere parameters constant blijven, mag de kapitaalkost na belastingen niet boven de IRR stijgen. Indien wel, dan wordt de netto contante waarde negatief. Bij de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit stijgt de IRR van 12,15 procent bij een capaciteit van 5 MW naar 35,05 procent bij een capaciteit van 50 MW. Bij de WKK-installatie en bij dezelfde capaciteit aan elektriciteitsoutput ligt de IRR boven of onder de IRR van de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit, afhankelijk van de gebruiksfactor voor de geproduceerde warmte. Bij een gebruiksfactor van 25 procent of 50 procent ligt de IRR van de WKK-installatie onder de IRR van de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit. Het omgekeerde geldt bij een gebruiksfactor van 75 procent of 100 procent.

De WKK-installatie met een gebruiksfactor van 100 procent blijkt in de sensitiviteitsanalyse (uitgevoerd voor een capaciteit van 5 MW) voor wat betreft de investeringsbeslissing het minst gevoelig te zijn voor variaties in de beschouwde parameters. Er is wel een sensitiviteit vast te stellen voor de variaties, maar voor alle mogelijke combinaties blijft de netto contante waarde positief. Het investeringsproject wordt in geen van de gevallen verworpen. In een meer realistisch scenario waarbij de gebruiksfactor voor de geproduceerde warmte 50 procent bedraagt, zijn wel negatieve netto contante waarden terug te vinden. De combinatie van een hoge kapitaalkost voor belastingen (d.w.z. 20 procent of 25 procent) met eender welke parameter resulteert meestal in een negatieve of soms nog net positieve netto contante waarde. Wanneer de gebruiksfactor voor de geproduceerde warmte 0 procent bedraagt, hebben we geen WKK-installatie, maar een verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit. Deze blijkt, net zoals de WKK-installatie met een gebruiksfactor van 50 procent, aangaande de investeringsbeslissing gevoelig te zijn voor variaties in bepaalde parameters. Een kapitaalkost voor belastingen van 18 procent (d.w.z. een discontovoet van 12,06 procent) en de standaardwaarde voor alle andere parameters vasthoudend, geeft een netto contante waarde die nog net positief is. Een hogere kapitaalkost voor belastingen maakt het investeringsproject onrendabel.

Uit de sensitiviteitsanalyse kunnen we besluiten dat het investeringsproject financieren met geleend kapitaal of in ieder geval een combinatie van geleend kapitaal en eigen vermogen een betere optie is dan financieren met alleen eigen vermogen. De rendementseis van de aandeelhouders ligt immers hoger dan de discontovoet bij vreemd vermogen. En in alle drie de scenario's blijkt de netto contante waarde het gevoeligst te zijn voor variaties in de kapitaalkost voor belastingen, al dan niet in combinatie met variaties in andere parameters. Vooral voor de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit en de WKK-installatie met een

gebruiksfactor van 50 procent mag de kapitaalkost voor belastingen niet te hoog liggen. Deze moet in ieder geval minder dan 25 procent bedragen en afhankelijk van veranderingen in de waarde van andere parameters, zelfs minder dan 20 procent, of uitzonderlijk minder dan 15 procent. De WKK-installatie met een gebruiksfactor voor de geproduceerde warmte van 100 procent heeft over de hele sensitiviteitsanalyse heen een positieve netto contante waarde. Indien de kapitaalkost voor belastingen niet meer dan 25 procent bedraagt, is een financiering met eigen vermogen en met een hoge rendementseis in principe mogelijk. Toch is ook hier voorzichtigheid gebaat. De combinatie van een hoge kapitaalkost voor belastingen met bijvoorbeeld een lage elektrische of thermische efficiëntie of met een lage verkoopprijs voor de geproduceerde elektriciteit of warmte resulteert telkens in een nog net positieve netto contante waarde.

Wat de opbouw van de jaarlijkse inkomende kasstroom betreft, valt op hoe zwaar de verkoop van groenestroomcertificaten en eventueel warmtekrachtcertificaten doorweegt. Nemen we bijvoorbeeld de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit met een capaciteit van 5 MW. De opbrengst door de verkoop van de geproduceerde elektriciteit bedraagt 1 750 000 EUR. De verkoop van de toegekende groenestroomcertificaten levert een opbrengst op van 3 788 050 EUR. De jaarlijkse opbrengsten kunnen met andere woorden procentueel verdeeld worden in 32 procent voor de verkoop van elektriciteit en 68 procent voor de verkoop van groenestroomcertificaten. De analyse van de jaarlijkse inkomende kasstroom van de WKK-installatie met een capaciteit van 5 MW_e levert een gelijkaardige conclusie op. Hierbij bestaat deze jaarlijkse inkomende kasstroom uit vier componenten: de opbrengsten uit de verkoop van de geproduceerde elektriciteit en warmte en de opbrengsten uit de verkoop van de toegekende groenestroom- en warmtekrachtcertificaten. De eerste twee componenten zijn goed voor 34 procent van de totale jaarlijkse opbrengsten en de opbrengsten uit de verkoop van beide typen certificaten zijn goed voor 66 procent. Een kleine opmerking hierbij: de inkomende kasstroom voor de WKK-installatie is alleen geldig in de eerste vier jaren wegens het afnemend aantal toegekende warmtekrachtcertificaten.

Om aan te tonen hoe zwaar deze certificaten doorwegen in de jaarlijkse netto kasstroom, veronderstellen we dat de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit geen groenestroomcertificaten krijgt. De jaarlijkse inkomende kasstroom bestaat dus enkel uit de verkoop van de geproduceerde elektriciteit. Alle andere kasstromen blijven net als alle parameters hetzelfde. Dit betekent dus ook dat de ecologiepremie en verhoogde investeringsaftrek behouden blijven. Voor een capaciteit van 5 MW geeft dit een negatieve jaarlijkse netto kasstroom na belastingen van -225 208 EUR. Dankzij het belastingschild van de afschrijvingen wordt de totale jaarlijkse netto kasstroom na belastingen toch nog positief, namelijk 128 048 EUR. De netto contante waarde bedraagt -18 MEUR. Bij een capaciteit van 50 MW is de jaarlijkse netto kasstroom na belastingen maar voor het belastingschild van de afschrijvingen met 1 546 003 EUR toch nog positief. Door de hoge initiële investering is de netto contante waarde echter negatief: -49 MEUR.

Bij de WKK-installatie met een gebruiksfactor van 100 procent gebeurt hetzelfde indien de certificaten wegvallen. Maar alleen voor de lage capaciteiten. Bij hogere capaciteiten zijn de opbrengsten door de verkoop van warmte hoog genoeg om de jaarlijkse netto kasstromen voldoende positief te maken en zo de netto contante waarde ook positief te houden. Stel dat er geen groenestroomcertificaten en geen warmtekrachtcertificaten toegekend worden terwijl al de overige kasstromen en de initiële investering hetzelfde blijven. Een capaciteit van 5 MW_e heeft in een dergelijk geval een netto contante waarde van -11 MEUR en een capaciteit van 50 MW_e heeft dan een positieve netto contante waarde van 25 MEUR. De WKK-installatie met een gebruiksfactor van 50 procent heeft steeds een negatieve netto contante waarde indien de opbrengsten uit de verkoop van de certificaten wegvallen. Bij een capaciteit van 5 MW_e bedraagt de netto contante waarde -17 MEUR en bij een capaciteit van 50 MW_e bedraagt de netto contante waarde -32 MEUR.

We kunnen hieruit besluiten dat voor de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit de groenestroomcertificaten cruciaal zijn om het investeringsproject rendabel te houden. Bij de WKK-installatie met een gebruiksfactor van 100 procent voor de warmte zijn de certificaten ook belangrijk, maar voor installaties met een capaciteit vanaf 27 MW_e zijn ze niet noodzakelijk om de netto contante waarde positief te houden. Indien de geproduceerde warmte maar voor de helft nuttig aangewend wordt, zijn, net zoals bij de verbrandingsinstallatie met opwekking van elektriciteit, de opbrengsten uit de verkoop van de toegekende certificaten (zowel groenestroom- als warmtekrachtcertificaten) bepalend voor de netto contante waarde.

Uit de Paragrafen 5.2.7 en 5.3.6 blijkt dat zeker voor installaties met een hoge capaciteit de verkoop van certificaten een zodanige hoge opbrengst genereren dat ze de productiekosten volledig dekken. Dit is toch wel opmerkelijk omdat de productiekosten op deze manier al gedekt zijn, nog voordat de opbrengsten van de verkoop van elektriciteit en eventueel warmte verrekend zijn. Dat zou betekenen dat er geen verkoopsopbrengsten meer nodig zijn om de productiekosten terug te verdienen. Is het dan misschien zinvol om de maximumprijs van de groenestroomcertificaten te verlagen?

Hoewel dit theoretisch model getoetst is aan voorbeelden uit de praktijk en er bij de invulling van de waarden van de parameters, indien mogelijk, verschillende bronnen geraadpleegd zijn, is het theoretische ervan voor discussie vatbaar. Op papier lijkt het model misschien wel goed onderbouwd te zijn, niets garandeert dat de resultaten ook gelden in de praktijk. De onzekerheid in verband met de waarden van bepaalde parameters vertaalt zich eveneens in de literatuur. Voor de totale investeringskosten bijvoorbeeld zijn uiteenlopende waarden terug te vinden. Maar uit Paragraaf 6.1 blijkt dat ook in de praktijk de totale investeringskosten kunnen verschillen naargelang de installatie. Zo lagen de specifieke investeringskosten per kW voor de meeste praktijkvoorbeelden en deze gevalstudie in dezelfde lijn, maar toch was er bijvoorbeeld een opmerkelijk verschil met de installatie in Denemarken. Daarbij lag de specifieke investeringskost

per kW_e 1 229 EUR lager dan in deze gevalstudie, hoewel de installatie vergelijkbare omzettingsrendementen heeft en net als in deze gevalstudie werkt met een stoomcyclus.

Er spelen bij de investering in een dergelijke installatie factoren mee die sterk kunnen verschillen van installatie tot installatie. Neem bijvoorbeeld terreinvoorbereiding. Bij het ene terrein is misschien maar weinig voorbereiding nodig, terwijl een ander terrein een grondige voorbereiding vraagt vooraleer er met de eigenlijke bouw gestart kan worden. Locatie-specifieke factoren kunnen één van de verklaringen zijn voor verschillen in totale investeringskosten en maken het moeilijk om een gemiddelde specifieke investeringskost geldig voor alle installaties te berekenen. Andere belangrijke verschillen in de literatuur betreffen het aantal arbeiders en vooral de aankoopkosten van de biomassa. Ook aangaande de opbrengsten, in de vorm van de verkoopprijs voor de geproduceerde elektriciteit en warmte is een brede range aan waarden te vinden in de literatuur.

In deze gevalstudie bestaat de input van beide typen installaties uit korte omloophout, meer bepaald hout afkomstig van populier. Vooral voor de installaties met een grote capaciteit, zijn vele tonnen korte omloophout nodig om de installatie het jaar rond werkende te houden. In Hoofdstuk 4 veronderstellen we dat een landbouwer een deel van zijn beschikbare areaal gaat gebruiken voor de teelt van korte omloophout. Maar is dit wel realistisch? Gaan er genoeg landbouwers overschakelen op korte omloophout om voldoende hout te leveren aan de installatie? Dit is meteen een eerste suggestie voor verder onderzoek. Men kan nagaan of de teelt van korte omloophout wel winstgevend is voor de landbouwer. En welke energieteelt hiervoor het beste gebruikt kan worden. Daarnaast kan ook onderzocht worden waar de investeerder de voeding voor zijn installatie vandaan kan halen indien er onvoldoende beschikbaar is in eigen land. Is import een optie? En welke gevolgen heeft deze import dan bijvoorbeeld op de aankoopprijs ervan?

De kosten-batenanalyse uit Hoofdstuk 5 betreft de verbranding van biomassa. Om te vergelijken met andere conversietechnieken voor de omzetting van biomassa in energie kan eenzelfde analyse uitgevoerd worden voor conversietechnieken zoals vergassing en pyrolyse. Op deze manier kunnen de sterkste en zwakste punten van de verschillende technieken onderscheiden worden. En er kan een afweging gemaakt worden betreffende de rendabiliteit van de verschillende omzettingstechnieken.

Zoals al aangehaald in Hoofdstuk 7 kan de teelt van energiegewassen externaliteiten met zich meebrengen. Deze externe baten en kosten vragen zeker nog verder onderzoek. Naast de teelt van energiegewassen moet ook de teelt van voldoende voedingsgewassen gegarandeerd blijven en dit tegen een aanvaardbare prijs. Het één hangt natuurlijk af van het ander. Hoe minder landbouwers nog voedingsgewassen telen, hoe schaarser deze voedingsgewassen worden en hoe hoger de marktprijs. Een terugschakeling van energiegewassen naar voedingsgewassen kan door de hogere marktprijs van de voedingsgewassen wel interessant worden. Een mogelijke vraag is

dan bij welke teelt de winstgevendheid het grootst is: bij de teelt van voedingsgewassen door de stijgende marktprijs of bij de teelt van energiegewassen door de stijgende vraag?

Los van deze "concurrentie" tussen energieteelten en voedingsgewassen kan natuurlijk de vraag gesteld worden in hoeverre het verantwoord is om het mechanisme van vraag en aanbod te laten beslissen over prijzen en aangeboden/gevraagde hoeveelheden. De bevolkingsgroep die het eerst getroffen gaat worden door stijgende voedingsprijzen en eventueel energieprijzen zijn de minst kapitaalkrachtigen. Met het oog hierop kan men zich dan afvragen of een overheidstussenkomst gewenst is en in welke mate. Een voorbeeld uit de actualiteit dat hierbij aansluit is het volgende: donderdag 22 mei 2008 heeft Vlaams minister van Mobiliteit Van Brempt beslist om het proefproject rond bussen die op biodiesel rijden (tijdelijk) stop te zetten om zo de landbouwers aan te zetten meer voedingsgewassen te telen in plaats van koolzaad. En dit met de bedoeling de stijgende voedselprijzen niet nog meer in de hand te werken door bussen op koolzaad te laten rijden.

Vanuit het standpunt van de investeerder in een installatie om elektriciteit en eventueel warmte op te wekken, kan onderzocht worden wat de invloed is van een daling van de verkoopprijzen van elektriciteit en warmte op de rendabiliteit van de installatie. In Vlaanderen is de energiemarkt sinds 1 juli 2003 volledig geliberaliseerd. Dit wil zeggen dat iedereen vrij is om de leverancier van elektriciteit en aardgas te kiezen. De bedoeling is de concurrentie tussen de leveranciers te verhogen om zo de consumenten tegen een concurrentiële prijs te voorzien van energie. Nogal contradictorisch deelde de VREG op 14 mei 2008 mee dat de elektriciteits- en aardgasprijzen nog nooit zo hoog geweest sinds de vrijmaking van de energiemarkt. Indien de vrijmaking van de energiemarkt toch nog zijn doel zou bereiken, kan een daling in de verkoopprijzen van elektriciteit en eventueel warmte verwacht worden. Dit betekent minder opbrengsten voor de producent. In welke mate heeft deze daling in opbrengsten een invloed op de rendabiliteit van de installatie?

Daarnaast kan men ook onderzoeken of het distributienet wel voorzien is op het afzetten van elektriciteit door verbrandingsinstallaties of WKK-installaties. Op 12 april 2008 gaf de beheerder van laagspanningsnetten in Vlaanderen Eandis toe dat het elektriciteitsnet verzadigd is. Vooral door de steeds toenemende productie van groene stroom, ook door particuliere gezinnen die bijvoorbeeld in zonnepanelen investeren en het teveel aan elektriciteit op het net afzetten. Door de verzadiging geraakt niet alle groene stroom het distributienet op. Eandis vermeldde erbij dat er mogelijk investeringen gedaan moeten worden die de prijzen van elektriciteit en aardgas kunnen doen stijgen. Welke gevolgen heeft dit voor de rendabiliteit van groene stroom vanuit het standpunt van de investeerder in een installatie? Stel dat niet alle geproduceerde elektriciteit afgezet kan worden, hoe zit het dan met de rendabiliteit? In deze gevalstudie is er vanuit gegaan dat alle geproduceerde elektriciteit zonder meer afgezet kan worden. Door de mededeling van Eandis blijkt dat deze veronderstelling niet zomaar aangenomen kan worden.

Literatuurlijst

Boeken, artikels en studies

- 'A guide to cogeneration' (2001) Educogen – The European Association for the Promotion of Cogeneration, Brussel, 49p (online). Beschikbaar op:
http://www.cogen.org/Downloadables/Projects/EDUCOGEN_Cogen_Guide.pdf
- Allen, J. *et al.* (1998) 'Logistics management and costs of biomass fuel supply', *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 28:6, pp. 463-477.
- Amos, W. A. (1998) *Report on biomass drying technology*, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 35p (online). Beschikbaar op:
<http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25885.pdf>
- Baxter, L. (2005) 'Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy', *Fuel*, 84:10, pp. 1295-1302.
- Bergkvist, P. en Ledin, S. (1998) 'Stem biomass yields at different planting designs and spacings in willow coppice systems', *Biomass and Bioenergy*, 14:2, pp. 149-156.
- Bergman, P. C. A. en Kiel, J. H. A. (2005) *Torrefaction for biomass upgrading; Published at 14th European Biomass Conference & Exhibition, Paris, France*, ECN, 8p (online). Beschikbaar op: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/rx05180.pdf>
- Berndes, G. *et al.* (2003) 'The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies', *Biomass and Bioenergy*, 25:1, 28p.
- Biewinga, E. E. en Bijl, van der, G. (1996) *Sustainability of energy crops in Europe. A methodology developed and applied*, Centre for Agriculture & Environment, CLM, Utrecht, 234-1996.
- Biezma, M. V. en San Cristóbal, J. R. (2006) 'Investment criteria for the selection of cogeneration plants - a state of the art review', *Applied Thermal Engineering*, 26:5-6, pp. 583-588.

- 'Biomassa installaties' (2007) Biogas International, 34p (online). Beschikbaar op: http://www.biogas.nl/option.com_docman/task.doc_download/gid,130/
- Bolhàr-Nordenkampf, M. (2006) 'Economic assessment of biomass gasification compared to other renewable technologies', *Thermalnet*, Issue 1, 48p.
- Bridgwater, A. V. *et al.* (2002) 'A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6:3, pp. 181-246.
- Bridgwater, A. V. (1995) 'The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation', *Fuel*, 74:5, pp. 631-653.
- Brouwers, J. *et al.* (2005) *Energie. Zoektocht naar milieuvriendelijke energievormen*, MIRA-T, pp. 61-78 (online). Beschikbaar op: http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/01_SECTOREN/01_04/SYNTHESSEKST_MIRAT2005_03.PDF
- Caputo, A. C. *et al.* (2005) 'Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects on logistic variables', *Biomass and Bioenergy*, 28:1, pp. 35-51.
- Carlin, N. *et al.* (2007) 'Thermo-chemical conversion analysis on dairy manure-based biomass through direct combustion', *International Journal of Green Energy*, 4:2, pp. 133-159.
- Carlson, A. (2002) 'Energy system analysis of the inclusion of monetary values of environmental damage', *Biomass and Bioenergy*, 22:3, pp. 169-177.
- Ceulemans, R. *et al.* (2001) *Biomassa*, ODE-Vlaanderen, Leuven, 36p (online). Beschikbaar op: http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/brochure_biomassa.pdf
- Ceulemans, R. en Deraedt, W. (1999) 'Production physiology and growth potential of poplars under short-rotation forestry culture', *Forest Ecology and Management*, 121:1-2, pp. 9-23.
- Coenen, J. en Schlatmann, S. (2007) *Rentabiliteit biomassa wkk. Mogelijkheden tot verbetering*, SenterNovem, COGEN Projects, 42p.

- 'Co-gasification (CFB-vergasser - bijstook in kolencentrale)' (2001), Vito, Mol, 8p (online). Beschikbaar op: http://www.emis.vito.be/afss/fiches/Uitvoeringen/Cogasification_HA.pdf
- Cramer, J. et al. (2007) *Toetsingskader voor duurzame biomassa. Eindrapport van de projectgroep "Duurzame productie van biomassa"*, SenterNovem, EnergieTransitie, 72p (online). Beschikbaar op: http://www.senternovem.nl/energietransitie/nieuws/2007/duurzaamheidscriteria_voor_biomassa_opgesteld.asp
- Dach, J. (2006) *Biological drying of biowaste to generate biomass*, ORBIT Association, 6p.
- Deckmyn, G. et al. (2004) 'Poplar growth and yield in short rotation coppice: model simulations using the process model SECRETS', *Biomass and Bioenergy*, 26:3, pp. 221-227.
- Demirbas, A. (2007) 'Combustion systems for biomass fuel', *Energy Sources, Part A: recovery, utilization and environmental effects*, 29:4, pp. 303-312.
- Demirbas, A. (2007) 'Combustion of biomass', *Energy Sources, Part A: recovery, utilization and environmental effects*, 29:6, pp. 549-561.
- Demirbas, A. (2003) 'Sustainable cofiring of biomass with coal', *Energy Conversion and Management*, 44:9, pp. 1465-1479.
- Demirbas, A. (2000) 'Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass', *Energy Conversion and Management*, 41:6, pp. 633-646.
- Demirbas, A. en Urkmez, A. (2006) 'Biomass-based combined heat and power systems', *Energy Sources, Part B: economics, planning and policy*, 1:3, pp. 245-253.
- De Nocker, L. et al. (2002) *The benefits of clean air for lungs and wallets. Environmental damage costs of air pollution in Belgium 2000 - 2010*, Vito, Mol, 6p (online). Beschikbaar op: <http://www.vito.be/bugs/externe/docs/denocker%20psam6.pdf>
- De Paepe, M. en Mertens, D. (2007) 'Combined heat and power in a liberalised energy market', *Energy Conversion and Management*, 48:9, pp. 2542-2555.

- Deraedt, W. en Ceulemans, R. (1998) 'Clonal variability in biomass production and conversion efficiency of poplar during the establishment year of a short rotation coppice plantation', *Biomass and Bioenergy*, 15:4-5, pp. 391-398.
- De Ruyck, J. *et al.* (2007) 'Co-utilization of biomass and natural gas in combined cycles through primary steam reforming of the natural gas', *Energy*, 32:4, pp. 371-377.
- Devriendt, N. *et al.* (2004) *Hernieuwbare warmte uit biomassa in Vlaanderen*, Vito, Mol, 149p (online). Beschikbaar op:
http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/biomassa_hernieuwbarewarmte.pdf
- Dijk, J. A. (2005) *Bacterial oxidation of low-chlorinated compounds under anoxic conditions*, Wageningen University, Wageningen (online). Beschikbaar op:
<http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/lang/336641>
- Dornburg, V. en Faaij, A. (2001) 'Efficiency and economy of wood-fired biomass energy systems in relation to scale regarding heat and power generation using combustion and gasification technologies', *Biomass and Bioenergy*, 21:2, pp. 91-108.
- 'Duurzame energie. Wegwijzer 2007' (2006), ODE-Vlaanderen, Leuven, 67p (online). Beschikbaar op:
http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/brochure_wegwijs.pdf
- Energie uit afval en biomassa - Concepttekst, 108p (online). Beschikbaar op:
www.bvor.nl/Intranet/documentatie/concepttekstEnergie%20uit%20afval%20en%20biomassa.doc
- Faaij, A. *et al.* (1998) 'Externalities of biomass based electricity production compared with power generation from coal in the Netherlands', *Biomass and Bioenergy*, 14:2, pp. 125-147.
- Fiala, M. *et al.* (1997) 'A model for the optimal dimensioning of biomass-fuelled electric power plants', *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67:1, pp. 17-25.
- García, C. V. *et al.* (2003) *Energiegewassen in de Vlaamse landbouwsector*, Steunpunt Duurzame Landbouw, Publicatie 1, 94p (online). Beschikbaar op:
<http://weblog.kuleuven.be/dlcount.php?id=stedula&url=/nl/publicaties/publicatie1.pdf>

- Geurds, M. *et al.* (2006) *Bio-energie. Omzetten van vaste biomassa in hernieuwbare warmte en elektriciteit*, ODE-Vlaanderen, Leuven, 76p (online). Beschikbaar op: http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/brochure_bioenergie.pdf
- Geurds, M. *et al.* (2005) *Vaste biobrandstof. Onvermoeibare energiebron voor duurzame warmte en elektriciteit*, ODE-Vlaanderen, Leuven, 6p (online). Beschikbaar op: http://ode.be/images/stories/Brochures/bmb_fo_vaste%20bio-brandstof_061201.pdf
- Groten, J. (2003) *Biomaïssa. Inventarisatieonderzoek: Maisstro voor productie bio-energie*, SenterNovem, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V., Wageningen, 49p (online). Beschikbaar op: http://www.senternovem.nl/duurzameenergie/projecten/den-projecten_bio-col/biomaïssa_inventarisatieonderzoek_maisstro_voor_productie_bio-energie.asp
- Gujarati, D. N. (2003) *Basic Econometrics*, Fourth edition, McGraw-Hill/Irwin, New York, 1002p.
- Hoogsteen, R. *et al.* (2003) *Haalbaarheid warmtenet regio Twente*, KEMA Power Generation & Sustainables, Arnhem, 68p (online). Beschikbaar op: http://www.senternovem.nl/dbt/projecten/warmtenet_in_twente.asp
- INBO presentatie (2007) *Van snoeihout tot warmte: een gesloten cyclus*.
- Jacobs, A. *et al.* (2003) *Gids Afvalverwerkingstechnieken*, Uitgave 2, Academia Press, Gent, 565p.
- Keppo, I. en Savola, T. (2007) 'Economic appraisal of small biofuel fired CHP plants', *Energy Conversion and Management*, 48:4, pp. 1212-1221.
- Keukeleere, De, D. (1997) 'Biomassa als energiedrager in Vlaanderen', *Energie en milieu: tijdschrift over energie en leefmilieu*, 13:4, pp. 159-164.
- Lamont, J. L. *et al.* (2005) *Koolzaad, van zaad tot olie*, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, beleidsdomein landbouw en visserij, Brussel, 52p (online). Beschikbaar op: http://www2.vlaanderen.be/landbouw/downloads/plant/koolzaad_van_zaad_totolie.pdf
- Laureysens, I. *et al.* (2004) 'Biomass production of 17 poplar clones in a short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics', *Forest Ecology and Management*, 187:2-3, pp. 295-309.

- Lewandowski, I. *et al.* (2000) 'Miscanthus: European experience with a novel energy crop', *Biomass and Bioenergy*, 19:4, pp. 209-227.
- Madlener, R. en Bachhiesl, M. (2005) *Socio-economics of large urban wood-fuelled cogeneration: sustainable energy supply for Austria's capital city of Vienna*, Centre for Energy Policy and Economics, Zurich, 26p (online). Beschikbaar op: http://www.task29.net/assets/files/tsukuba_papers/Madlener_Bachhiesl_2004.pdf
- McKendry, P. (2002) 'Energy production from biomass (part 1): overview of biomass', *Bioresource Technology*, 83:1, pp. 37-46.
- McKendry, P. (2002) 'Energy production from biomass (part 2): conversion technologies', *Bioresource Technology*, 83:1, pp. 47-54.
- Mercken, R. (2004) *De investeringsbeslissing, een beleidsgerichte analyse*, Garant, Antwerpen - Apeldoorn, 350p.
- Mertens, D. (2007) *Warmtekrachtcertificaten in Vlaanderen*, COGEN Vlaanderen, Leuven, 11p (online). Beschikbaar op: [http://www.cogenvlaanderen.be/website/cogen.nsf/Files/CertificatenVlaanderen.pdf/\\$FILE/CertificatenVlaanderen.pdf](http://www.cogenvlaanderen.be/website/cogen.nsf/Files/CertificatenVlaanderen.pdf/$FILE/CertificatenVlaanderen.pdf)
- Minnesma, M. en Hisschemöller, M. (2003) *Biomassa, een wenkend perspectief*, Instituut voor Milieuvraagstukken, 45p (online). Beschikbaar op: <http://dare.ubvu.vu.nl/bitstream/1871/1709/2/ivmvu0761.pdf>
- Mitchell, C. P. *et al.* (1995) 'Technoeconomic assessment of biomass to energy', *Biomass and Bioenergy*, 9:1-5, pp. 205-226.
- Mitchell, C. P. *et al.* (1999) 'Short-rotation forestry - operations, productivity and costs based on experience gained in the UK', *Forest Ecology and Management*, 121:1-2, pp. 123-136.
- Msangi, S. *et al.* (2007) 'Global scenarios for biofuels: impacts and implications', *Farm Policy Journal*, 4:2, 9p.
- Nesheim, S. J. en Ertesvåg, I. S. (2007) 'Efficiencies and indicators defined to promote combined heat and power', *Energy Conversion and Management*, 48:3, pp. 1004-1015.

- Nonhebel, S. (2002) 'Energy yields in intensive and extensive biomass production systems', *Biomass and Bioenergy*, 22:3, pp. 159-167.
- Nordh, N. E. en Verwijst, T. (2004) 'Above-ground biomass assessments and first cutting cycle production in willow (*Salix* sp.) coppice - a comparison between destructive and non-destructive methods', *Biomass and Bioenergy*, 27:1, 8p.
- Obernberger, I. en Thek, G. (2004) *Techno-economic evaluation of selected decentralised CHP applications based on biomass combustion in IEA partner countries - final report*, BIOS Bioenergiesysteme GmbH, Graz, 87p.
- Oh, S. D. *et al.* (2007) 'Optimal planning and economic evaluation of cogeneration system', *Energy*, 32:5, pp. 760-771.
- Osowski, S. en Fahlenkamp, H. (2006) 'Regenerative energy production using energy crops', *Industrial Crops and Products*, 24:3, pp. 196-203.
- Outryve, van, J. *et al.* (2002) 'Biomassa: de groene grondstof', *Mens: milieu-educatie, natuur en samenleving*, vol. 46, 15p.
- Papadopoulos, D. P. en Katsigiannis, P. A. (2002) 'Biomass energy surveying and techno-economic assessment of suitable CHP system installations', *Biomass and Bioenergy*, 22:2, pp. 105-124.
- Prins, W. en Ham, van, J. (2000) *Biomassa: verbranden, vergassen, vergisten, pyrolyse: proceedings van een symposium gehouden op 24 mei 2000 in de Jaarbeurs te Utrecht, 's Hertogenbosch: Vereniging van Milieukundigen*, 98p.
- Putseys, L. *et al.* (2006) *Inventarisatie huishoudelijke afvalstoffen 2005*, OVAM, 61p (online). Beschikbaar op:
<http://www.ovam.be/jahia/Jahia/cache/offonce/pid/176?actionReq=actionPubDetail&fileItem=1148>
- Quaak, P. *et al.* (1990) *Energy from Biomass: a review of combustion and gasification technologies* (online). Beschikbaar op:
http://books.google.be/books?id=M2WMrePIIxcC&pg=PA54&ots=mSRw1jq3N&dq=biomassa+%2B+verbranding&sig=HhV1F_YdAM1oXcB3lwnsZGcDTxw

- Rabou, L. P. L. M. *et al.* (2006) *Biomassa in de Nederlandse energiehuishouding in 2030*, ECN, Wageningen, 54p (online). Beschikbaar op: <http://www.biomassandbioenergy.nl/filesdwnld/BiomassFinalReportPGG.pdf>
- Reith, J. H. *et al.* (2006) *Duurzame productie en ontwikkeling van biomassa, zowel in Nederland als in het buitenland*, SenterNovem, EnergieTransitie, 97p (online). Beschikbaar op: http://www.senternovem.nl/energietransitiegg/documentatie/groenboek_energietransitie.asp
- Rhén, C. *et al.* (2007) 'Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics', *Biomass and Bioenergy*, 31:1, pp. 66-72.
- Runge, C. F. en Senauer, B. (2007) 'How biofuels could starve the poor', *Foreign Affairs* (online). Beschikbaar op: <http://www.foreignaffairs.org/20070501faessay86305/c-ford-runge-benjamin-senauer/how-biofuels-could-starve-the-poor.html>
- Schuck, S. (2006) 'Biomass as an energy source', *International Journal of Environmental Studies*, 63:6, pp. 823-835.
- Sintzoff, I. *et al.* (2001) *Woodsustain. Contributions of wood energy to sustainable development in Belgium*, Final summary, 10p (online). Beschikbaar op: http://www.belspo.be/belspo/ssd/science/FinalReports/rappCG2131_nl.stm
- Sundberg, G. en Henning, D. (2002) 'Investments in combined heat and power plants: influence of fuel price on cost minimised operation', *Energy Conversion and Management*, 43:5, pp. 639-650.
- Taiz, L. en Zeiger, E. (2002) *Plant Physiology*, 3^{de} editie, Sinauer Associates, Sunderland, 690p.
- Tijmensen, M. en Vos, de, R. (2005) *Bio-energie van eigen bodem. Voorbeelden van en ervaringen met kleinschalige installaties voor opwekking van elektriciteit uit biomassa*, Ecofys bv, Utrecht, in opdracht van SenterNovem, 105p (online). Beschikbaar op: http://www.ecofys.nl/nl/publicaties/documents/Ecofys_Bioboek.pdf
- Vanclooster, V. (2005) *Biomassa: recente ontwikkelingen in Vlaanderen met specifieke aandacht voor het onderzoek naar energieteelten*, Antwerpen, 2005:2, 182p.

- Vande Walle, I. *et al.* (2007) 'Short-rotation forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) – Biomass production after 4 years of tree growth', *Biomass and Bioenergy*, 31:5, pp. 267-275.
- Veringa, H. J. (2004) *Advanced techniques for generation of energy from biomass and waste*, ECN Biomass, 24p (online). Beschikbaar op:
http://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/bio/Overig/pdf/Biomassa_voordelen.pdf

Internetsites

- Agentschap Economie - Ecologiepremie (online). Beschikbaar op: http://ewbl-publicatie.vlaanderen.be/servlet/ContentServer?pagename=Ondernemen/Page/MVG_CMS4_VT_Special_Subnav&cid=1196737282623&c=Page
- Agentschap Economie - Ecologiepremie - Limitatieve lijst van technologieën (online). Beschikbaar op: http://ewbl-publicatie.vlaanderen.be/servlet/ContentServer?c=Page&pagename=Ondernemen%2FPage%2FMVG_CMS4_VT_Special_Subnav&cid=1190944945144
- Algemene Directe Statistiek en Economische Informatie - FOD Economie - Land- en tuinbouwtelling (online). Beschikbaar op: http://statbel.fgov.be/figures/d50_nl.asp#2
- Algemene Directe Statistiek en Economische Informatie - FOD Economie - Oppervlakte van het grondgebied - België en gewesten (online). Beschikbaar op: http://statbel.fgov.be/figures/d110_nl.asp#1
- Algemene Directe Statistiek en Economische Informatie - FOD Economie - Sociale geografie - gebouwen en woningen (online). Beschikbaar op: http://www.statbel.fgov.be/figures/d132_nl.asp
- Belgisch Staatsblad: Besluit van de Vlaamse Regering inzake de bevordering van elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen: 5 maart 2004 (online). Beschikbaar op: <http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi/api2.pl?lg=nl&pd=2004-03-23&numac=2004035460>

- Belgisch Staatsblad: Besluit van de Vlaamse Regering inzake de bevordering van elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen: 28 september 2001 (online). Beschikbaar op: <http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi/api2.pl?lg=nl&pd=2001-10-23&numac=2001036198>
- Bio-energy (online). Beschikbaar op: www.bio-energy.nu/index.htm
- Biogas International - Maïsteelt (online). Beschikbaar op: <http://www.biogas.nl/ma%efsteelt/>
- Biomassa (online). Beschikbaar op: www.biomassa.nu
- Biomass Energy Centre - Drying biomass material (online). Beschikbaar op: http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?_pageid=75,17305&_dad=portal&_schema=PORTAL
- Biomass Energy Technology - Pre-Processing (online). Beschikbaar op: http://www.rwedp.org/d_technopre.html
- Bureau voor officiële publicaties der Europese Gemeenschappen: Richtlijn 2001/80/EG (online). Beschikbaar op: http://europa.eu.int/eur-lex/nl/consleg/pdf/2001/nl_2001L0080_do_001.pdf
- Bureau voor officiële publicaties der Europese Gemeenschappen: Richtlijn 2001/77/EG (online). Beschikbaar op: http://europa.eu.int/eur-lex/pri/nl/oj/dat/2001/l_283/l_28320011027nl00330040.pdf
- COGEN Vlaanderen - Vlaamse Referentierendementen (online). Beschikbaar op: [http://www.cogenvlaanderen.be/website/cogen.nsf/Files/20070307%20Vlaamse%20referenties.pdf/\\$FILE/20070307%20Vlaamse%20referenties.pdf](http://www.cogenvlaanderen.be/website/cogen.nsf/Files/20070307%20Vlaamse%20referenties.pdf/$FILE/20070307%20Vlaamse%20referenties.pdf)
- De Tijd - Wisselkoersen (online). Beschikbaar op: <http://www.tijd.be/wisselkoersen>
- ECN - Energieonderzoek Centrum Nederland - Technologie-ontwikkeling ECN Biomassa (online). Beschikbaar op: <http://www.ecn.nl/bkm/producten-en-diensten/technologie-ontwikkeling/>
- EIA - Energy Information Administration - International Energy Outlook 2007 (online). Beschikbaar op: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/oil.pdf>

- Emis - Decreet van 2 juli 1981 betreffende de voorkoming en het beheer van afvalstoffen (Afvalstoffendecreet) (online). Beschikbaar op:
http://www.emis.vito.be/navigator/Scripts/item.asp?id_boek=1100&volgnr=1&id_inhoud=1&AddInfo=false
- Energiesparen - Investeringsaftrek (online). Beschikbaar op:
http://www.energiesparen.be/duurzame_energie/nieuwsbrief/nieuwsbrief/artikel.php?artikel=20
- Energiesparen - Groenestroomcertificaten (online). Beschikbaar op:
http://www.energiesparen.be/duurzame_energie/groenestroomcertificaten.php
- Euramis - Bulletin van de Europese Unie (online). Beschikbaar op:
<http://euramis.org/bulletin/nl/9706/somma00.htm>
- Europa - Glossarium - Kyotoprotocol (online). Beschikbaar op:
http://europa.eu/scadplus/glossary/kyoto_protocol_nl.htm
- Europa - Samenvattingen van de wetgeving - Strategie ter bestrijding van de klimaatverandering: maatregelen tot 2020 en later (online). Beschikbaar op:
<http://europa.eu/scadplus/leg/nl/lvb/l28188.htm>
- Europees Parlement - Einde aan de braaklegging (online). Beschikbaar op:
http://www.europarl.europa.eu/news/expert/infopress_page/032-10637-267-09-39-904-20070823IPR09780-24-09-2007-2007-false/default_nl.htm
- Fisconet - Artikel 44 , § 3, 10°, van het BTW-Wetboek - Verhandeling van groenestroomcertificaten (online). Beschikbaar op:
http://www.fisconet.fgov.be/nl/?bron.dll&root=V:/sites/FisconetNldAdo.2/&versie=04&file=bronnen/BES&zoek=000000000&name=ET110775&Style=-1&hdr_referer=&type=2&
- FOD Economie, KMO, Middenstand en Energie - Mineco - Energie (online). Beschikbaar op:
<http://www.mineco.fgov.be/energy>
- FOD Economie, KMO, Middenstand en Energie - Mineco - Evolutie van de energiemarkt in 2005 (online). Beschikbaar op:
http://mineco.fgov.be/energy/balance_sheets/home_nl.htm
- Houtpellets (online). Beschikbaar op: <http://www.houtpellets.be/html/waarom.html>

- INDAVER (online). Beschikbaar op: <http://www.indaver.be/Home.18.0.html>
- Innovatiesteunpunt voor land- en tuinbouw (online). Beschikbaar op: www.innovatiesteunpunt.be
- Kennislink - Biomassa - Snelgroeiende energie (online). Beschikbaar op: <http://www.kennislink.nl/web/show?id=16148>
- Milieu- en natuurraad van Vlaanderen - Advies van 28 april 2005 over de duurzaamheidsaspecten van bio-energie (online). Beschikbaar op: http://www.minaraad.be/adviezen/adv_2005/de-duurzaamheidsaspecten-van-bio-energie
- ODE-Vlaanderen - Biomassa (online). Beschikbaar op: <http://ode.be/index.php?page=biomassa>
- OVAM (online). Beschikbaar op: <http://www.ovam.be/jahia/Jahia/pid/5>
- Phyllis - database for biomass and waste. Energy research centre of the Netherlands (online). Beschikbaar op: <http://www.ecn.nl/phyllis/>
- Titel I van het VLAREM - Besluit van de Vlaamse Regering van 6 februari 1991 houdende vaststelling van het Vlaams Reglement betreffende de milieuvergunning (online). Beschikbaar op: <http://navigator.emis.vito.be/milnav-consult/faces/consultatieOverzicht.jsp>
- Titel II van het VLAREM - Besluit van de Vlaamse Regering van 1 juni 1995 houdende algemene en sectorale bepalingen inzake milieuhygiëne (online). Beschikbaar op: <http://navigator.emis.vito.be/milnav-consult/faces/consultatieOverzicht.jsp>
- Vlaamse Codex - Besluit van de Vlaamse Regering ter bevordering van de elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekrachtinstallaties (online). Beschikbaar op: <http://212.123.19.141/ALLESNL/wet/detailframe.vwp?SID=0&WetID=1015224>
- Vlaamse Codex - Decreet houdende diverse bepalingen inzake leefmilieu en energie (online). Beschikbaar op: <http://212.123.19.141/ALLESNL/wet/detailframe.vwp?SID=0&WetID=1014591>
- Vlaams Energieagentschap - Energiesparen - Energie uit biomassa (online). Beschikbaar op: http://www.energiesparen.be/duurzame_energie/biomassa.php

- Vlaams Energieagentschap - Energiesparen - Groenestroomcertificaten (online). Beschikbaar op: http://www.energiesparen.be/duurzame_energie/groenestroomcertificaten.php
- Vlaamse Overheid - Landbouw en Visserij - Vlaamse Landbouw in cijfers (online). Beschikbaar op: <http://lv.vlaanderen.be/nlapps/docs/default.asp?id=94>
- Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt (VREG) - Quotumverplichting groenestroomcertificaten (online). Beschikbaar op: http://www.vreg.be/nl/06_sector/02_leveranciers/02_openbaredienstverplichtingen/03_groenestroomcertificaten.asp
- Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt (VREG) - Statistieken groenestroomcertificaten (online). Beschikbaar op: <http://www.vreg.be/vreg/documenten/Statistieken/54946.pdf>
- Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt (VREG) - Statistieken warmtekrachtcertificaten (online). Beschikbaar op: <http://www.vreg.be/vreg/documenten/statistieken/54945.pdf>
- Vlaamse Reguleringsinstantie voor de elektriciteits- en gasmarkt (VREG) - Statistieken verbruik (online). Beschikbaar op: http://www.vreg.be/nl/04_privé/05_meteropneming/04_verbruik.asp
- Vlaams Informatiecentrum over Land- en Tuinbouw - Landbouwrapport 2005 (online). Beschikbaar op: <http://www.vilt.be/feitenencijfers/beschrijving.html>
- Vlaams Informatiecentrum over Land- en Tuinbouw - Van wilg tot Watt (online). Beschikbaar op: <http://www.vilt.be/vilt-info/detail.phtml?id=381>
- Vlaams Ministerie van Leefmilieu, Natuur en Energie. Departement Leefmilieu, Natuur en Energie (online). Beschikbaar op: <http://www.lne.be>
- World Wildlife Fund (WWF) - Ontbossing (online). Beschikbaar op: <http://www.wwf.be/nl/?inc=page&pageid=217>

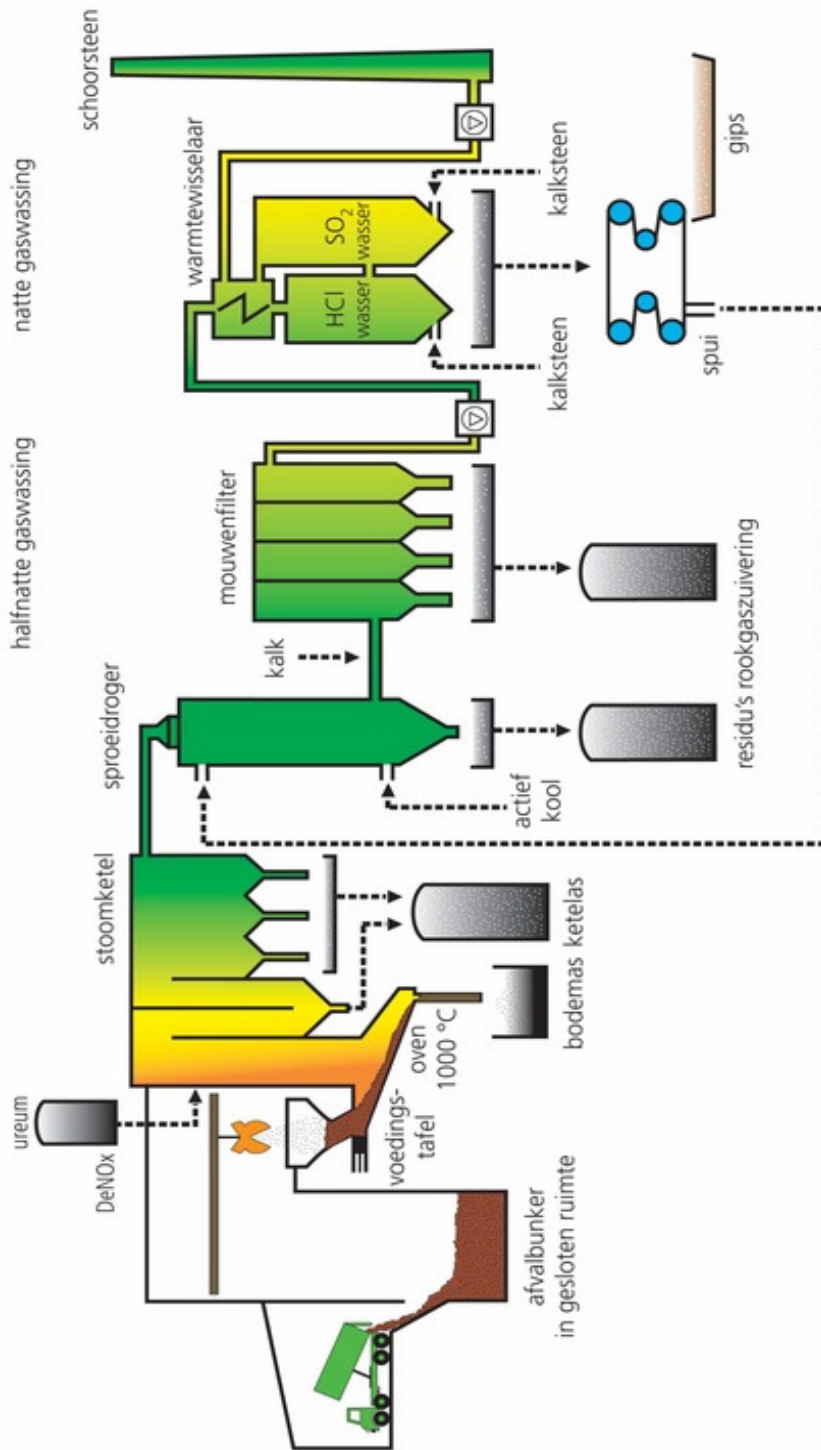
BIJLAGEN

Inhoudsopgave bijlagen

| | |
|---|-------|
| Bijlage 1: Roosteroven ----- | ii |
| Bijlage 2: Wervelbedoven ----- | iii |
| Bijlage 3: Draaitrommeloven----- | iv |
| Bijlage 4: Toröidaal bed ----- | v |
| Bijlage 5: Indeling totale investeringskosten uit Caputo <i>et al.</i> (2005) ----- | vi |
| Bijlage 6: Correlaties uit Caputo <i>et al.</i> (2005) ----- | viii |
| Bijlage 7: De totale investeringskosten (5 MW - 25 MW) ----- | x |
| Bijlage 8: De totale investeringskosten (30 MW - 50 MW) ----- | xii |
| Bijlage 9: De totale investeringskosten - berekenen vanuit het aantal ha ----- | xiv |
| Bijlage 10: Fracties en het aantal toegekende warmtekrachtcertificaten per jaar ----- | xvi |
| Bijlage 11: Sensitiviteitsanalyse – gebruiksfactor van 100% ----- | xvii |
| Bijlage 12: Sensitiviteitsanalyse – gebruiksfactor van 50%----- | xx |
| Bijlage 13: Sensitiviteitsanalyse – gebruiksfactor van 0% ----- | xxiii |

Bijlage 1: Roosteroven

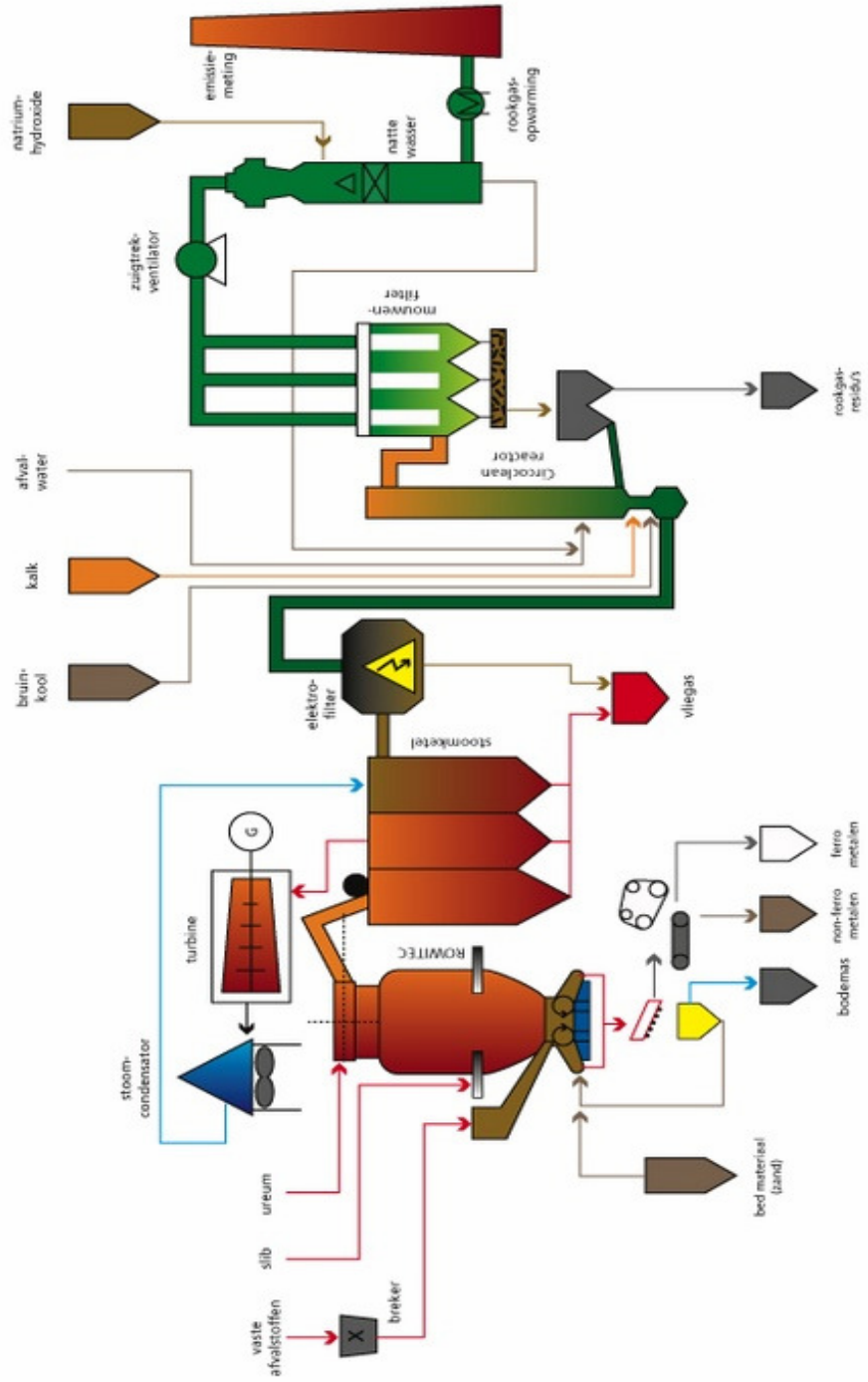
Roosteroven



Bron: INDAVER

Bijlage 2: Wervelbedoven

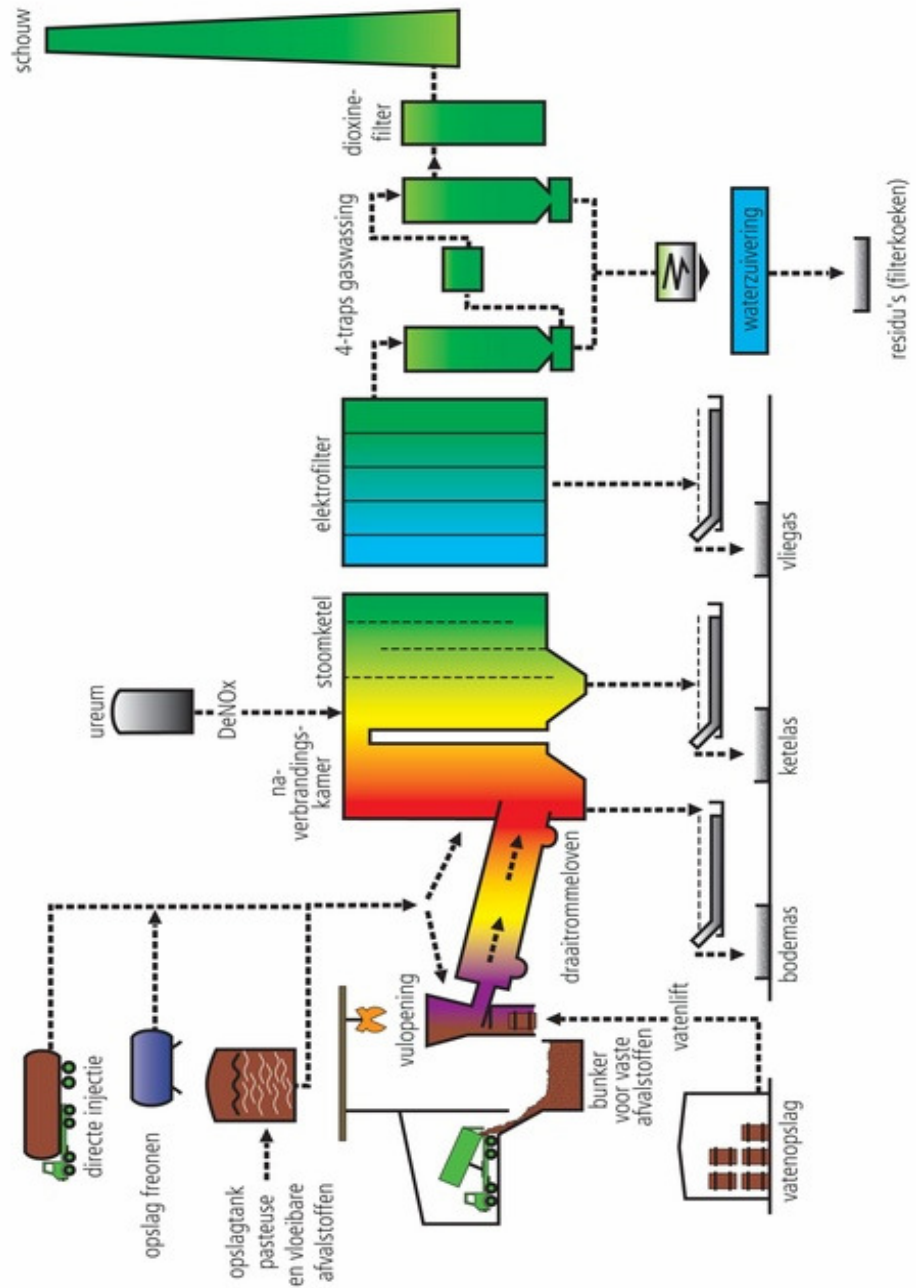
Wervelbedinstallatie



Bron: INDAVER

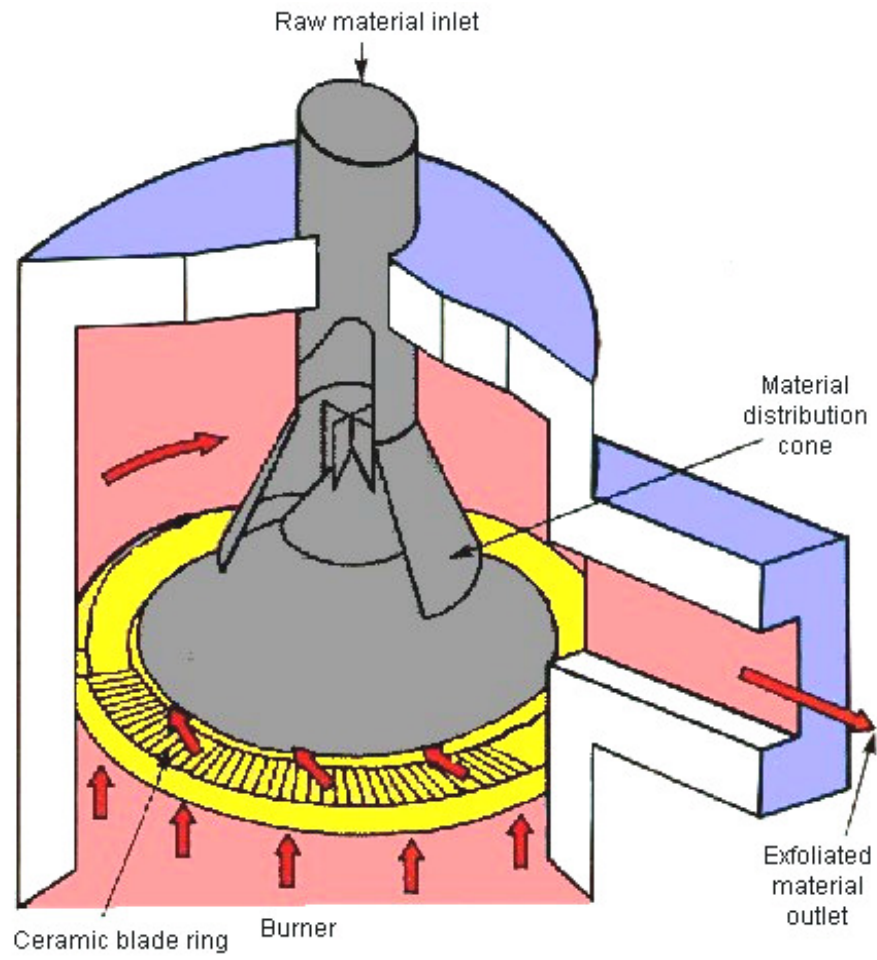
Bijlage 3: Draaitrommeloven

Draaitrommeloven



Bron: INDAVER

Bijlage 4: Toroïdaal bed



Bron: Energie uit afval en biomassa: concepttekst

Bijlage 5: Indeling totale investeringskosten uit Caputo *et al.* (2005)

- **directe kosten**
 - uitrustingskosten
 - opwekken elektriciteit
 - boiler
 - stoomturbine
 - condensator
 - warmtewisselaar
 - alternator
 - ventilatoren
 - extractiepompen
 - voedingspompen
 - andere pompen
 - biomassa
 - biomassa opslag
 - biomassa behandeling
 - compressor en drogers
 - nooddiesel
 - rookbehandeling
 - verwijderen NO_x en SO_x
 - rookfilters
 - opslag assen
 - extractie assen
 - ventilatoren
 - rookleidingswerken
 - afhandeling reststoffen schoorsteen
 - pijpleidingen
 - brandblustank
 - brandbluscomponenten
 - brandblussysteem
 - industriële watertank
 - tanks
 - warmtewisselaar
 - ontgasser
 - by-pass buizen
 - hogedruk buizen
 - controlebuizen

- andere buizen
- pijpleidingen
- pijpleidingrek
- elektriciteitswerken
 - switchen
 - elektrische bescherming
 - transformator
 - hulptransformator
 - elektrische hulpmiddelen
 - assembleren
- civiele werken
 - terreinbewaking
 - ventilatiesysteem afstellen
 - civiele werken
 - personeel op het terrein
 - terreinfaciliteiten
 - behandeling afvalwater
- directe installatiekosten
- hulpdiensten
- instrumenten/controles
- terreinvoorbereiding
- **indirecte kosten**
 - constructiekosten
 - opstartkosten

Bijlage 6: Correlaties uit Caputo *et al.* (2005)

| | |
|--|-------------------------------------|
| Directe kosten | |
| <i>Uitrustingskosten</i> | A |
| * Opwekken elektriciteit | |
| boiler | $1\,340\,000 \times W_{NE}^{0,694}$ |
| stoomturbine | $633\,000 \times W_{NE}^{0,398}$ |
| condensator | $398\,000 \times W_{NE}^{0,333}$ |
| warmtewisselaar | $51\,500 \times W_{NE}^{0,5129}$ |
| alternator | $138\,300 \times W_{NE}^{0,6107}$ |
| ventilatoren | $35\,300 \times W_{NE}^{0,3139}$ |
| extractiepompen | $9\,000 \times W_{NE}^{0,4425}$ |
| voedingpompen | $35\,000 \times W_{NE}^{0,6107}$ |
| andere pompen | $28\,000 \times W_{NE}^{0,5575}$ |
| | |
| * Biomassa | |
| biomassa opslag | $114\,100 \times W_{NE}^{0,5575}$ |
| biomassa behandeling | $46\,600 \times W_{NE}^{0,9554}$ |
| compressor en drogers | $11\,400 \times W_{NE}^{0,5575}$ |
| nooddiesel | $36\,200 \times W_{NE}^{0,1989}$ |
| | |
| * Rookbehandeling | |
| verwijderen NO _x en SO _x | $126\,000 \times W_{NE}^{0,5882}$ |
| rookfilters | $66\,600 \times W_{NE}^{0,7565}$ |
| opslag assen | $88\,300 \times W_{NE}^{0,3139}$ |
| extractie assen | $93\,500 \times W_{NE}^{0,4425}$ |
| ventilatoren | $28\,500 \times W_{NE}^{0,5575}$ |
| rookleidingswerken | $51\,500 \times W_{NE}^{0,5129}$ |
| afhandeling reststoffen schoorsteen | $28\,500 \times W_{NE}^{0,5575}$ |
| | |
| <i>Pijpleidingen</i> | B |
| brandblustank | $85\,700 \times W_{NE}^{0,1040}$ |
| brandbluscomponenten | $5\,300 \times W_{NE}^{0,7565}$ |
| brandblussysteem | $6\,600 \times W_{NE}^{0,7565}$ |
| industriële watertank | $9\,300 \times W_{NE}^{0,7565}$ |
| tanks | $10\,300 \times W_{NE}^{0,5129}$ |
| warmtewisselaar | $34\,200 \times W_{NE}^{0,5575}$ |
| ontgasser | $17\,100 \times W_{NE}^{0,5575}$ |
| by-pass buizen | $20\,600 \times W_{NE}^{0,5129}$ |
| hogedruk buizen | $28\,500 \times W_{NE}^{0,5575}$ |
| controlebuizen | $10\,100 \times W_{NE}^{0,6756}$ |
| andere buizen | $28\,500 \times W_{NE}^{0,5575}$ |
| pijpleidingen | $42\,300 \times W_{NE}^{0,885}$ |
| pijpleidingrek | $12\,100 \times W_{NE}^{0,686}$ |
| | |
| <i>Elektriciteitswerken</i> | C |
| switchen | $13\,400 \times W_{NE}^{0,3672}$ |
| elektrische bescherming | $44\,700 \times W_{NE}^{0,2266}$ |
| transformator | $64\,600 \times W_{NE}^{0,4289}$ |
| hulptransformator | $14\,000 \times W_{NE}^{0,4425}$ |
| elektrische hulpmiddelen | $409\,100 \times W_{NE}^{0,6415}$ |
| assembleren | $186\,900 \times W_{NE}^{0,7137}$ |

| | |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| <i>Civiele werken</i> | <i>D</i> |
| terreinbewaking | $70\ 100 \times W_{NE}^{0,4425}$ |
| ventilatiesysteem afstellen | $23\ 400 \times W_{NE}^{0,6328}$ |
| civiele werken | $1\ 337\ 00 \times W_{NE}^{0,3672}$ |
| personeel op het terrein | $133\ 700 \times W_{NE}^{0,3672}$ |
| terreinfaciliteiten | $13\ 300 \times W_{NE}^{0,7565}$ |
| behandeling afvalwater | $6\ 900 \times W_{NE}^{0,6107}$ |
| <i>Directe installatiekosten</i> | $E = 0,30 \times A$ |
| <i>Hulpdiensten</i> | $F = 0,15 \times A$ |
| <i>Instrumenten/controles</i> | $G = 0,10 \times A$ |
| <i>Terreinvoorbereiding</i> | $H = 0,10 \times A$ |
| Indirecte kosten | |
| <i>Constructiekosten</i> | $K = 0,12 \times A$ |
| <i>Opstartkosten</i> | $W = 0,10 \times A$ |

Samengevat geeft dit volgende tabel.

| | |
|----------------------------------|--|
| Totaal directe kosten | $A + B + C + D + E + F + G + H$ $= A + B + C + D + (0,30 \times A) + (0,15 \times A) + (0,10 \times A)$ $+ (0,10 \times A)$ $= (1,65 \times A) + B + C + D$ |
| Totaal indirecte kosten | $K + W$ $= (0,12 \times A) + (0,10 \times A)$ $= 0,22 \times A$ |
| Totale investeringskosten | $(1,65 \times A) + B + C + D + (0,22 \times A)$ $= (1,87 \times A) + B + C + D$ |

Bijlage 7: De totale investeringskosten (5 MW - 25 MW)

| Aantal MW -> | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|-------------------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Directe kosten | | | | | |
| <u><i>Uitrustingskosten</i></u> | | | | | |
| * Opwekken elektriciteit | 8420555,63 | 12750501,70 | 16335145,40 | 19517024,64 | 22433448,21 |
| boiler | 6701930,01 | 10136918,05 | 12968374,25 | 15472667,97 | 17760900,24 |
| stoomturbine | 4094397,29 | 6623763,21 | 8776313,58 | 10715677,03 | 12510514,32 |
| condensator | 1201140,39 | 1582718,61 | 1859893,31 | 2085516,59 | 2279207,33 |
| warmtewisselaar | 680205,41 | 856807,13 | 980666,77 | 1079259,95 | 1162511,06 |
| alternator | 117573,36 | 167767,27 | 206549,64 | 239389,73 | 268417,40 |
| ventilatoren | 369558,47 | 564315,76 | 722871,52 | 861710,13 | 987516,01 |
| extractiepompen | 58503,44 | 72723,49 | 82594,24 | 90399,91 | 96958,99 |
| voedingspompen | 18345,80 | 24931,16 | 29830,66 | 33880,38 | 37396,50 |
| andere pompen | 93525,28 | 142813,10 | 182939,28 | 218075,59 | 249913,67 |
| * Biomassa | 68680,56 | 101078,32 | 126715,26 | 148758,66 | 168464,96 |
| biomassa opslag | 574555,14 | 930794,77 | 1249464,96 | 1547881,34 | 1832954,02 |
| biomassa behandeling | 279873,27 | 411894,17 | 516364,67 | 606191,53 | 686494,72 |
| compressor en drogers | 216861,20 | 420519,28 | 619474,60 | 815436,18 | 1009201,30 |
| nooddiesel | 27962,80 | 41153,32 | 51591,21 | 60566,03 | 68589,31 |
| * Rookbehandeling | 49857,87 | 57228,00 | 62034,48 | 65687,61 | 68668,70 |
| verwijderen NOx en Sox | 1144070,48 | 1682788,88 | 2117306,19 | 2496475,33 | 2839593,95 |
| rookfilters | 324716,76 | 488169,39 | 619651,38 | 733899,16 | 836833,12 |
| opslag assen | 225032,39 | 380166,84 | 516639,09 | 642248,98 | 760354,02 |
| extractie assen | 146341,46 | 181911,73 | 206602,58 | 226127,83 | 242534,81 |
| ventilatoren | 190592,51 | 259007,07 | 309907,43 | 351979,51 | 388508,09 |
| rookleidingswerken | 69907,00 | 102883,29 | 128978,03 | 151415,06 | 171473,26 |
| afhandeling reststoffen schoorsteen | 117573,36 | 167767,27 | 206549,64 | 239389,73 | 268417,40 |
| <u><i>Pijpleidingen</i></u> | 69907,00 | 102883,29 | 128978,03 | 151415,06 | 171473,26 |
| brandblustank | 751360,15 | 1152687,31 | 1497273,92 | 1810832,19 | 2103754,56 |
| brandbluscomponenten | 101314,99 | 108888,20 | 113578,03 | 117027,50 | 119775,11 |
| brandblussysteem | 17907,98 | 30253,52 | 41113,92 | 51109,90 | 60508,65 |
| industriële watertank | 22300,51 | 37674,19 | 51198,47 | 63646,29 | 75350,40 |
| tanks | 31423,44 | 53086,36 | 72143,30 | 89683,42 | 106175,56 |
| warmtewisselaar | 23514,67 | 33553,45 | 41309,93 | 47877,95 | 53683,48 |
| ontgasser | 83888,39 | 123459,95 | 154773,64 | 181698,08 | 205767,92 |
| by-pass buizen | 41944,20 | 61729,98 | 77386,82 | 90849,04 | 102883,96 |
| hogedruk buizen | 47029,35 | 67106,91 | 82619,85 | 95755,89 | 107366,96 |
| controlebuizen | 69907,00 | 102883,29 | 128978,03 | 151415,06 | 171473,26 |
| andere buizen | 29960,26 | 47854,34 | 62934,48 | 76435,87 | 88872,96 |
| pijpleidingen | 69907,00 | 102883,29 | 128978,03 | 151415,06 | 171473,26 |
| pijpleidingrek | 175763,55 | 324593,91 | 464709,05 | 599448,55 | 730326,86 |
| | 36498,82 | 58719,91 | 77550,39 | 94469,57 | 110096,17 |

| | | | | | |
|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <u>Elektriciteitswerken</u> | 1984143,31 | 3077449,39 | 3987043,47 | 4795399,20 | 5536245,00 |
| switchen | 24197,28 | 31210,79 | 36221,42 | 40257,15 | 43694,66 |
| elektrische bescherming | 64371,57 | 75319,52 | 82567,63 | 88129,42 | 92700,21 |
| transformator | 128831,11 | 173433,31 | 206375,46 | 233477,10 | 256926,55 |
| hulptransformator | 28537,92 | 38781,81 | 46403,25 | 52702,81 | 58172,33 |
| elektrische hulpmiddelen | 1148732,05 | 1791964,82 | 2324299,14 | 2795375,93 | 3225581,32 |
| assembleren | 589473,37 | 966739,14 | 1291176,56 | 1585456,79 | 1859169,93 |
| | | | | | |
| <u>Civiele werken</u> | 2927526,85 | 3825157,69 | 4477954,46 | 5010492,04 | 5468748,77 |
| terreinbewaking | 142893,42 | 194186,05 | 232347,71 | 263890,52 | 291277,19 |
| ventilatiesysteem afstellen | 64792,40 | 100465,25 | 129851,33 | 155778,54 | 179404,07 |
| civiele werken | 2415033,19 | 3115023,44 | 3615114,27 | 4017903,79 | 4360987,98 |
| personeel op het terrein | 241431,09 | 311409,18 | 361403,30 | 401670,21 | 435968,37 |
| terreinfaciliteiten | 44938,90 | 75919,20 | 103172,67 | 128256,93 | 151842,47 |
| behandeling afvalwater | 18437,84 | 28154,58 | 36065,17 | 42992,05 | 49268,69 |
| | | | | | |
| <u>Directe installatiekosten</u> | 2526166,69 | 3825150,51 | 4900543,62 | 5855107,39 | 6730034,46 |
| | | | | | |
| <u>Hulpdiensten</u> | 1263083,34 | 1912575,26 | 2450271,81 | 2927553,70 | 3365017,23 |
| | | | | | |
| <u>Instrumenten/controles</u> | 842055,56 | 1275050,17 | 1633514,54 | 1951702,46 | 2243344,82 |
| | | | | | |
| <u>Terreinvoorbereiding</u> | 842055,56 | 1275050,17 | 1633514,54 | 1951702,46 | 2243344,82 |
| | | | | | |
| Totaal directe kosten | 19556947,10 | 29093622,20 | 36915261,77 | 43819814,09 | 50123937,89 |
| | | | | | |
| Indirecte kosten | | | | | |
| <u>Constructiekosten</u> | 1010466,68 | 1530060,20 | 1960217,45 | 2342042,96 | 2692013,79 |
| | | | | | |
| <u>Opstartkosten</u> | 842055,56 | 1275050,17 | 1633514,54 | 1951702,46 | 2243344,82 |
| | | | | | |
| Totaal indirecte kosten | 1852522,24 | 2805110,37 | 3593731,99 | 4293745,42 | 4935358,61 |
| | | | | | |
| Totaal (in €) | 21409469,33 | 31898732,57 | 40508993,75 | 48113559,51 | 55059296,49 |

Bijlage 8: De totale investeringskosten (30 MW - 50 MW)

| Aantal MW -> | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Directe kosten | | | | | |
| <u><i>Uitrustingskosten</i></u> | | | | | |
| * Opwekken elektriciteit | 25156628,98 | 27730345,58 | 30183618,03 | 32536909,07 | 34805318,13 |
| boiler | 19891613,48 | 21900350,86 | 23810701,24 | 25639314,24 | 27398486,10 |
| stoomturbine | 14197992,72 | 15801125,45 | 17335422,56 | 18811970,24 | 20239043,39 |
| condensator | 2450744,12 | 2605810,27 | 2748043,40 | 2879932,38 | 3003265,81 |
| warmtewisselaar | 1235277,27 | 1300342,42 | 1359468,19 | 1413848,38 | 1464333,79 |
| alternator | 294728,90 | 318977,26 | 341588,94 | 362860,69 | 383008,97 |
| ventilatoren | 1103824,76 | 1212787,00 | 1315831,31 | 1413966,31 | 1507936,88 |
| extractiepompen | 102669,88 | 107760,02 | 112372,83 | 116605,25 | 120526,18 |
| voedingspompen | 40538,59 | 43400,29 | 46041,99 | 48505,28 | 50820,24 |
| andere pompen | 279348,28 | 306923,68 | 333001,42 | 357836,74 | 381618,15 |
| * Biomassa | 186488,96 | 203224,45 | 218930,60 | 233788,96 | 247932,70 |
| biomassa opslag | 2108308,61 | 2376140,09 | 2637902,29 | 2894619,90 | 3147048,88 |
| biomassa behandeling | 759942,52 | 828139,65 | 892142,21 | 952690,03 | 1010325,75 |
| compressor en drogers | 1201233,85 | 1391837,48 | 1581226,31 | 1769559,43 | 1956959,59 |
| nooddiesel | 75927,65 | 82741,38 | 89136,03 | 95185,51 | 100944,03 |
| * Rookbehandeling | 71204,59 | 73421,58 | 75397,74 | 77184,93 | 78819,51 |
| verwijderen NOx en Sox | 3156706,89 | 3453854,63 | 3735014,50 | 4002974,93 | 4259783,15 |
| rookfilters | 931565,22 | 1019979,33 | 1103321,88 | 1182470,04 | 1258069,70 |
| opslag assen | 872803,46 | 980757,65 | 1085007,18 | 1186122,37 | 1284532,32 |
| extractie assen | 256820,13 | 269552,69 | 281091,26 | 291678,29 | 301486,17 |
| ventilatoren | 421150,93 | 450880,78 | 478325,08 | 503916,00 | 527965,86 |
| rookleidingswerken | 189819,12 | 206853,46 | 222840,08 | 237963,77 | 252360,07 |
| afhandeling reststoffen schoorsteen | 294728,90 | 318977,26 | 341588,94 | 362860,69 | 383008,97 |
| <u><i>Pijpleidingen</i></u> | 189819,12 | 206853,46 | 222840,08 | 237963,77 | 252360,07 |
| brandblustank | 2381542,60 | 2647550,15 | 2904011,18 | 3152507,71 | 3394211,70 |
| brandbluscomponenten | 122067,89 | 124040,61 | 125775,21 | 127325,36 | 128728,20 |
| brandblussysteem | 69457,33 | 78048,28 | 86344,42 | 94391,12 | 102222,54 |
| industriële watertank | 86494,04 | 97192,20 | 107523,23 | 117543,66 | 127296,00 |
| tanks | 121877,96 | 136952,64 | 151510,01 | 165629,70 | 179371,63 |
| warmtewisselaar | 58945,78 | 63795,45 | 68317,79 | 72572,14 | 76601,79 |
| ontgasser | 227782,95 | 248224,15 | 267408,10 | 285556,52 | 302832,08 |
| by-pass buizen | 113891,47 | 124112,08 | 133704,05 | 142778,26 | 151416,04 |
| hogedruk buizen | 117891,56 | 127590,91 | 136635,58 | 145144,28 | 153203,59 |
| controlebuizen | 189819,12 | 206853,46 | 222840,08 | 237963,77 | 252360,07 |
| andere buizen | 100522,78 | 111556,21 | 122088,04 | 132200,09 | 141953,31 |
| pijpleidingen | 189819,12 | 206853,46 | 222840,08 | 237963,77 | 252360,07 |
| pijpleidingrek | 858208,24 | 983649,98 | 1107040,37 | 1228664,87 | 1348741,81 |
| | 124764,36 | 138680,71 | 151984,23 | 164774,18 | 177124,56 |

| | | | | | |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <u>Elektriciteitswerken</u> | 6227541,10 | 6880273,88 | 7501776,84 | 8097250,21 | 8670549,36 |
| switchen | 46720,10 | 49440,92 | 51925,56 | 54220,61 | 56359,43 |
| elektrische bescherming | 96610,25 | 100044,53 | 103117,96 | 105907,20 | 108466,13 |
| transformator | 277824,04 | 296813,26 | 314308,44 | 330594,30 | 345876,26 |
| hulptransformator | 63060,03 | 67511,56 | 71620,87 | 75452,66 | 79053,71 |
| elektrische hulpmiddelen | 3625790,98 | 4002663,95 | 4360647,33 | 4702895,27 | 5031746,32 |
| assembleren | 2117535,70 | 2363799,65 | 2600156,67 | 2828180,17 | 3049047,52 |
| <u>Civiele werken</u> | 5875563,92 | 6244180,66 | 6583060,62 | 6897985,57 | 7193106,06 |
| terreinbewaking | 315750,59 | 338040,03 | 358615,92 | 377802,26 | 395833,23 |
| ventilatiesysteem afstellen | 201343,77 | 221974,00 | 241545,76 | 260236,82 | 278178,83 |
| civiele werken | 4662944,47 | 4934499,45 | 5182481,35 | 5411541,01 | 5625007,48 |
| personeel op het terrein | 466154,98 | 493302,36 | 518093,13 | 540992,25 | 562332,51 |
| terreinfaciliteiten | 174298,59 | 195857,01 | 216675,61 | 236868,28 | 256520,72 |
| behandeling afvalwater | 55071,52 | 60507,81 | 65648,85 | 70544,96 | 75233,29 |
| <u>Directe installatiekosten</u> | 7546988,69 | 8319103,67 | 9055085,41 | 9761072,72 | 10441595,44 |
| <u>Hulpdiensten</u> | 3773494,35 | 4159551,84 | 4527542,71 | 4880536,36 | 5220797,72 |
| <u>Instrumenten/controles</u> | 2515662,90 | 2773034,56 | 3018361,80 | 3253690,91 | 3480531,81 |
| <u>Terreinvoorbereiding</u> | 2515662,90 | 2773034,56 | 3018361,80 | 3253690,91 | 3480531,81 |
| Totaal directe kosten | 55993085,42 | 61527074,89 | 66791818,39 | 71833643,47 | 76686642,03 |
| Indirecte kosten | | | | | |
| <u>Constructiekosten</u> | 3018795,48 | 3327641,47 | 3622034,16 | 3904429,09 | 4176638,18 |
| <u>Opstartkosten</u> | 2515662,90 | 2773034,56 | 3018361,80 | 3253690,91 | 3480531,81 |
| Totaal indirecte kosten | 5534458,37 | 6100676,03 | 6640395,97 | 7158120,00 | 7657169,99 |
| Totaal (in €) | 61527543,80 | 67627750,92 | 73432214,36 | 78991763,47 | 84343812,02 |

Bijlage 9: De totale investeringskosten - berekenen vanuit het aantal ha

| Opbrengst (ton d.s./hectare/jaar) | |
|--|---------------------|
| Droging op het veld | Mechanische droging |
| 8,7 | 10 |

Aantal ha ->

| | |
|------|------|
| 1000 | 1000 |
|------|------|

Aantal MW ->

1,86429

2,14286

Directe kosten

Uitrustingskosten

| | | |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------|
| | 4.757.856,84355 | 5.149.721,94241 |
| * Opwekken elektriciteit | 3.784.248,81957 | 4.096.844,78968 |
| boiler | 2.064.621,53865 | 2.274.123,74252 |
| stoomturbine | 811.087,43533 | 857.312,21419 |
| condensator | 489.737,91183 | 512.983,99334 |
| warmtewisselaar | 70.884,79305 | 76.133,12406 |
| alternator | 202.313,16606 | 220.272,22515 |
| ventilatoren | 42.922,85194 | 44.840,81287 |
| extractiepompen | 11.856,16619 | 12.609,76546 |
| voedingspompen | 51.200,00587 | 55.744,95936 |
| andere pompen | 39.624,95065 | 42.823,95273 |
| | | |
| * Biomassa | 303.074,66490 | 330.588,27940 |
| biomassa opslag | 161.471,67388 | 174.507,60736 |
| biomassa behandeling | 84.495,49064 | 96.519,89442 |
| compressor en drogers | 16.133,01562 | 17.435,46647 |
| nooddiesel | 40.974,48476 | 42.125,31116 |
| | | |
| * Rookbehandeling | 670.533,35908 | 722.288,87333 |
| verwijderen NOx en Sox | 181.754,83846 | 197.269,86917 |
| rookfilters | 106.688,32922 | 118.541,54939 |
| opslag assen | 107.367,92709 | 112.165,54607 |
| extractie assen | 123.172,39316 | 131.001,45229 |
| ventilatoren | 40.332,53905 | 43.588,66617 |
| rookleidingswerken | 70.884,79305 | 76.133,12406 |
| afhandeling reststoffen schoorsteen | 40.332,53905 | 43.588,66617 |
| | | |
| <u>Pijpleidingen</u> | 428.533,72944 | 462.168,84487 |
| brandblustank | 91.435,34733 | 92.769,26520 |
| brandbluscomponenten | 8.490,21239 | 9.433,48666 |
| brandblussysteem | 10.572,71731 | 11.747,36075 |
| industriële watertank | 14.897,91985 | 16.553,09924 |
| tanks | 14.176,95861 | 15.226,62481 |
| warmtewisselaar | 48.399,04686 | 52.306,39940 |

| | | |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| ontgasser | 24.199,52343 | 26.153,19970 |
| by-pass buizen | 28.353,91722 | 30.453,24962 |
| hogedruk buizen | 40.332,53905 | 43.588,66617 |
| controlebuizen | 15.384,36587 | 16.902,08933 |
| andere buizen | 40.332,53905 | 43.588,66617 |
| pijpleidingen | 73.408,08670 | 83.036,56327 |
| pijpleidingrek | 18.550,55579 | 20.410,17454 |
| | | |
| <u>Elektriciteitswerken</u> | 1.072.716,50764 | 1.169.088,41592 |
| switchen | 16.843,67984 | 17.727,41895 |
| elektrische bescherming | 51.476,10158 | 53.126,42431 |
| transformator | 84.383,06910 | 89.576,79294 |
| hulptransformator | 18.442,92518 | 19.615,19072 |
| elektrische hulpmiddelen | 610.046,90773 | 667.054,97801 |
| assembleren | 291.523,82421 | 321.987,61099 |
| | | |
| <u>Civiele werken</u> | 2.007.610,54027 | 2.116.960,59227 |
| terreinbewaking | 92.346,36108 | 98.216,06209 |
| ventilatiesysteem afstellen | 34.705,32770 | 37.902,54451 |
| civiele werken | 1.681.099,80763 | 1.769.302,24633 |
| personeel op het terrein | 168.059,70112 | 176.877,30696 |
| terreinfaciliteiten | 21.305,62731 | 23.672,71182 |
| behandeling afvalwater | 10.093,71544 | 10.989,72056 |
| | | |
| <u>Directe installatiekosten</u> | 1.427.357,05306 | 1.544.916,58272 |
| | | |
| <u>Hulpdiensten</u> | 713.678,52653 | 772.458,29136 |
| | | |
| <u>Instrumenten/controles</u> | 475.785,68435 | 514.972,19424 |
| | | |
| <u>Terreinvoorbereiding</u> | 475.785,68435 | 514.972,19424 |
| | | |
| Totaal directe kosten | 11.359.324,56922 | 12.245.259,05804 |
| | | |
| Indirecte kosten | | |
| <u>Constructiekosten</u> | 570.942,82123 | 617.966,63309 |
| | | |
| <u>Opstartkosten</u> | 475.785,68435 | 514.972,19424 |
| | | |
| Totaal indirecte kosten | 1.046.728,50558 | 1.132.938,82733 |
| | | |
| Totaal | 12.406.053,07480 | 13.378.197,88537 |

Bijlage 10: Fracties en het aantal toegekende warmtekrachtcertificaten per jaar

| Jaar | Fractie (X) (%) |
|------|-----------------|
| 5 | 95,75% |
| 6 | 87,91% |
| 7 | 80,07% |
| 8 | 72,23% |
| 9 | 64,39% |
| 10 | 56,55% |
| 11 | 48,71% |
| 12 | 40,87% |
| 13 | 33,03% |
| 14 | 25,19% |
| 15 | 17,35% |
| 16 | 9,51% |
| 17 | 2,65% |

| Jaar | 5 MW _e | 10 MW _e | 20 MW _e | 50 MW _e |
|------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 61 765 | 123 529 | 247 059 | 617 647 |
| 2 | 61 765 | 123 529 | 247 059 | 617 647 |
| 3 | 61 765 | 123 529 | 247 059 | 617 647 |
| 4 | 61 765 | 123 529 | 247 059 | 617 647 |
| 5 | 59 142 | 118 284 | 236 567 | 591 418 |
| 6 | 54 299 | 108 599 | 217 198 | 542 994 |
| 7 | 49 457 | 98 914 | 197 828 | 494 571 |
| 8 | 44 615 | 89 229 | 178 459 | 446 147 |
| 9 | 39 772 | 79 545 | 159 089 | 397 724 |
| 10 | 34 930 | 69 860 | 139 720 | 349 300 |
| 11 | 30 088 | 60 175 | 120 351 | 300 876 |
| 12 | 25 245 | 50 491 | 100 981 | 252 453 |
| 13 | 20 403 | 40 806 | 81 612 | 204 029 |
| 14 | 15 561 | 31 121 | 62 242 | 155 606 |
| 15 | 10 718 | 21 436 | 42 873 | 107 182 |
| 16 | 5 876 | 11 752 | 23 504 | 58 759 |
| 17 | 1 639 | 3 278 | 6 555 | 16 388 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Bijlage 11: Sensitiviteitsanalyse – gebruiksfactor van 100%

| | η_{th} | | | | |
|----------|-------------|------|-----|------|-----|
| η_e | 0.5 | 0.55 | 0.6 | 0.65 | 0.7 |
| 0.15 | 12 | 14 | 18 | 23 | 28 |
| 0.2 | 18 | 21 | 25 | 28 | 32 |
| 0.25 | 23 | 26 | 28 | 31 | 34 |
| 0.3 | 26 | 29 | 31 | 34 | 36 |
| 0.35 | 29 | 31 | 33 | 35 | - |

| | P_{kon} | | | | |
|----------|-----------|------|------|------|------|
| η_e | 28.5 | 38.5 | 48.5 | 58.5 | 68.5 |
| 0.15 | 25 | 22 | 18 | 15 | 12 |
| 0.2 | 30 | 27 | 25 | 22 | 20 |
| 0.25 | 33 | 30 | 28 | 26 | 24 |
| 0.3 | 35 | 33 | 31 | 29 | 28 |
| 0.35 | 36 | 34 | 33 | 31 | 30 |

| | P_e | | | | |
|----------|-------|------|------|------|------|
| η_e | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| 0.15 | 13 | 16 | 18 | 21 | 23 |
| 0.2 | 20 | 22 | 25 | 27 | 30 |
| 0.25 | 23 | 26 | 28 | 31 | 34 |
| 0.3 | 26 | 29 | 31 | 34 | 36 |
| 0.35 | 28 | 30 | 33 | 35 | 38 |

| | P_e | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|------|
| η_e | 0.006 | 0.012 | 0.018 | 0.024 | 0.03 |
| 0.15 | 6 | 12 | 18 | 24 | 30 |
| 0.2 | 16 | 20 | 25 | 29 | 34 |
| 0.25 | 21 | 25 | 28 | 32 | 36 |
| 0.3 | 25 | 28 | 31 | 34 | 37 |
| 0.35 | 28 | 30 | 33 | 36 | 38 |

| | r^* | | | | |
|----------|-------|-----|------|-----|------|
| η_e | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 0.15 | 30 | 18 | 10 | 4 | 0,3 |
| 0.2 | 39 | 25 | 15 | 9 | 4 |
| 0.25 | 43 | 28 | 18 | 11 | 6 |
| 0.3 | 47 | 31 | 21 | 13 | 8 |
| 0.35 | 49 | 33 | 22 | 14 | 9 |

| | P_{кон} | | | | |
|-----------------------|------------------------|------|------|------|------|
| η_{th} | 28.5 | 38.5 | 48.5 | 58.5 | 68.5 |
| 0.5 | 27 | 25 | 23 | 21 | 19 |
| 0.55 | 30 | 28 | 26 | 24 | 22 |
| 0.6 | 33 | 30 | 28 | 26 | 24 |
| 0.65 | 35 | 33 | 31 | 29 | 27 |
| 0.7 | 38 | 36 | 34 | 32 | 30 |

| | P_e | | | | |
|-----------------------|----------------------|------|------|------|------|
| η_{th} | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| 0.5 | 18 | 20 | 23 | 25 | 28 |
| 0.55 | 21 | 23 | 26 | 28 | 31 |
| 0.6 | 23 | 26 | 28 | 31 | 34 |
| 0.65 | 26 | 29 | 31 | 34 | 36 |
| 0.7 | 29 | 32 | 34 | 37 | 39 |

| | P_{th} | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|------|
| η_{th} | 0.006 | 0.012 | 0.018 | 0.024 | 0.03 |
| 0.5 | 17 | 20 | 23 | 26 | 29 |
| 0.55 | 19 | 22 | 26 | 29 | 32 |
| 0.6 | 21 | 25 | 28 | 32 | 36 |
| 0.65 | 23 | 27 | 31 | 35 | 39 |
| 0.7 | 26 | 30 | 34 | 38 | 43 |

| | r* | | | | |
|-----------------------|-----------|-----|------|-----|------|
| η_{th} | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 0.5 | 36 | 23 | 14 | 8 | 3 |
| 0.55 | 40 | 26 | 16 | 9 | 5 |
| 0.6 | 43 | 28 | 18 | 11 | 6 |
| 0.65 | 47 | 31 | 21 | 13 | 8 |
| 0.7 | 51 | 34 | 23 | 15 | 9 |

| | P_e | | | | |
|------------------------|----------------------|------|------|------|------|
| P_{кон} | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| 28.5 | 27 | 30 | 33 | 35 | 38 |
| 38.5 | 25 | 28 | 30 | 33 | 36 |
| 48.5 | 23 | 26 | 28 | 31 | 34 |
| 58.5 | 21 | 24 | 26 | 29 | 32 |
| 68.5 | 19 | 22 | 24 | 27 | 29 |

| | P_{th} | | | | |
|------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|------|
| P_{кон} | 0.006 | 0.012 | 0.018 | 0.024 | 0.03 |
| 28.5 | 25 | 29 | 33 | 36 | 40 |
| 38.5 | 23 | 27 | 30 | 34 | 38 |
| 48.5 | 21 | 25 | 28 | 32 | 36 |
| 58.5 | 19 | 23 | 26 | 30 | 34 |
| 68.5 | 17 | 21 | 24 | 28 | 32 |

| | r* | | | | |
|------------------------|-----------|-----|------|-----|------|
| P_{кон} | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 28.5 | 49 | 33 | 22 | 14 | 8 |
| 38.5 | 46 | 30 | 20 | 13 | 7 |
| 48.5 | 43 | 28 | 18 | 11 | 6 |
| 58.5 | 41 | 26 | 17 | 10 | 5 |
| 68.5 | 38 | 24 | 15 | 9 | 4 |

| | P_{th} | | | | |
|----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|------|
| P_e | 0.006 | 0.012 | 0.018 | 0.024 | 0.03 |
| 0.03 | 16 | 20 | 23 | 27 | 31 |
| 0.04 | 19 | 22 | 26 | 30 | 33 |
| 0.05 | 21 | 25 | 28 | 32 | 36 |
| 0.06 | 24 | 27 | 31 | 35 | 38 |
| 0.07 | 26 | 30 | 34 | 37 | 41 |

| | r* | | | | |
|----------------------|-----------|-----|------|-----|------|
| P_e | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 0.03 | 37 | 23 | 14 | 8 | 3 |
| 0.04 | 40 | 26 | 16 | 10 | 5 |
| 0.05 | 43 | 28 | 18 | 11 | 6 |
| 0.06 | 47 | 31 | 20 | 13 | 7 |
| 0.07 | 50 | 34 | 22 | 15 | 9 |

| | r* | | | | |
|-----------------------|-----------|-----|------|-----|------|
| P_{th} | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 0.006 | 34 | 21 | 13 | 7 | 2 |
| 0.012 | 38 | 25 | 16 | 9 | 4 |
| 0.018 | 43 | 28 | 18 | 11 | 6 |
| 0.024 | 48 | 32 | 21 | 14 | 8 |
| 0.03 | 53 | 36 | 24 | 16 | 10 |

Bijlage 12: Sensitiviteitsanalyse – gebruiksfactor van 50%

| | η_{th} | | | | |
|----------|-------------|------|-----|------|-----|
| η_e | 0.5 | 0.55 | 0.6 | 0.65 | 0.7 |
| 0.15 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 |
| 0.2 | 8 | 8 | 9 | 9 | 9 |
| 0.25 | 10 | 10 | 10 | 11 | 13 |
| 0.3 | 13 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 0.35 | 18 | 19 | 20 | 21 | - |

| | P_{kon} | | | | |
|----------|-----------|------|------|------|------|
| η_e | 28.5 | 38.5 | 48.5 | 58.5 | 68.5 |
| 0.15 | 13 | 9 | 6 | 2 | -1 |
| 0.2 | 14 | 11 | 9 | 6 | 4 |
| 0.25 | 14 | 12 | 10 | 8 | 6 |
| 0.3 | 19 | 17 | 16 | 14 | 12 |
| 0.35 | 23 | 22 | 20 | 19 | 17 |

| | P_e | | | | |
|----------|-------|------|------|------|------|
| η_e | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| 0.15 | 0,6 | 3 | 6 | 8 | 11 |
| 0.2 | 4 | 6 | 9 | 11 | 14 |
| 0.25 | 5 | 8 | 10 | 13 | 15 |
| 0.3 | 11 | 13 | 16 | 18 | 21 |
| 0.35 | 15 | 18 | 20 | 23 | 25 |

| | P_{th} | | | | |
|----------|----------|-------|-------|-------|------|
| η_e | 0.006 | 0.012 | 0.018 | 0.024 | 0.03 |
| 0.15 | -0,4 | 3 | 6 | 9 | 12 |
| 0.2 | 4 | 6 | 9 | 11 | 13 |
| 0.25 | 7 | 9 | 10 | 12 | 14 |
| 0.3 | 13 | 14 | 16 | 17 | 19 |
| 0.35 | 17 | 19 | 20 | 21 | 23 |

| | r^* | | | | |
|----------|-------|-----|------|-----|------|
| η_e | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 0.15 | 15 | 6 | -0,6 | -5 | -8 |
| 0.2 | 19 | 9 | 2 | -3 | -6 |
| 0.25 | 21 | 10 | 3 | -2 | -5 |
| 0.3 | 27 | 16 | 8 | 3 | -1 |
| 0.35 | 33 | 20 | 12 | 6 | 2 |

| | P_{кон} | | | | |
|-----------------------|------------------------|------|------|------|------|
| η_{th} | 28.5 | 38.5 | 48.5 | 58.5 | 68.5 |
| 0.5 | 14 | 12 | 8 | 8 | 6 |
| 0.55 | 14 | 12 | 10 | 8 | 6 |
| 0.6 | 14 | 12 | 10 | 8 | 6 |
| 0.65 | 15 | 13 | 11 | 9 | 7 |
| 0.7 | 17 | 15 | 13 | 11 | 9 |

| | P_e | | | | |
|-----------------------|----------------------|------|------|------|------|
| η_{th} | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| 0.5 | 5 | 7 | 10 | 12 | 15 |
| 0.55 | 5 | 8 | 10 | 13 | 15 |
| 0.6 | 5 | 8 | 10 | 13 | 15 |
| 0.65 | 6 | 9 | 11 | 14 | 16 |
| 0.7 | 8 | 10 | 13 | 15 | 18 |

| | P_{th} | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|------|
| η_{th} | 0.006 | 0.012 | 0.018 | 0.024 | 0.03 |
| 0.5 | 7 | 8 | 10 | 11 | 13 |
| 0.55 | 7 | 8 | 10 | 12 | 13 |
| 0.6 | 7 | 9 | 10 | 12 | 14 |
| 0.65 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 |
| 0.7 | 8 | 11 | 13 | 15 | 17 |

| | r* | | | | |
|-----------------------|-----------|-----|------|------|------|
| η_{th} | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 0.5 | 20 | 10 | 3 | -2 | -5 |
| 0.55 | 21 | 10 | 3 | -2 | -5 |
| 0.6 | 21 | 10 | 3 | -2 | -5 |
| 0.65 | 22 | 11 | 5 | -0,3 | -4 |
| 0.7 | 23 | 13 | 6 | 0,6 | -3 |

| | P_e | | | | |
|------------------------|----------------------|------|------|------|------|
| P_{кон} | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| 28.5 | 9 | 12 | 14 | 17 | 19 |
| 38.5 | 7 | 10 | 12 | 15 | 17 |
| 48.5 | 5 | 7 | 10 | 13 | 15 |
| 58.5 | 3 | 5 | 8 | 11 | 13 |
| 68.5 | 0,9 | 3 | 6 | 8 | 11 |

| | P_{th} | | | | |
|------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|------|
| P_{кон} | 0.006 | 0.012 | 0.018 | 0.024 | 0.03 |
| 28.5 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 |
| 38.5 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 |
| 48.5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 |
| 58.5 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
| 68.5 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |

| | r* | | | | |
|------------------------|-----------|-----|------|-----|------|
| P_{кон} | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 28.5 | 25 | 14 | 7 | 1 | -2 |
| 38.5 | 22 | 12 | 5 | 0,2 | -3 |
| 48.5 | 20 | 10 | 3 | -1 | -4 |
| 58.5 | 17 | 8 | 2 | -2 | -5 |
| 68.5 | 14 | 6 | 0,3 | -4 | -7 |

| | P_{th} | | | | |
|----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|------|
| P_e | 0.006 | 0.012 | 0.018 | 0.024 | 0.03 |
| 0.03 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
| 0.04 | 4 | 6 | 7 | 9 | 11 |
| 0.05 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 |
| 0.06 | 9 | 11 | 13 | 14 | 16 |
| 0.07 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 |

| | r* | | | | |
|----------------------|-----------|-----|------|-----|------|
| P_e | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 0.03 | 13 | 5 | -0,5 | -4 | -7 |
| 0.04 | 16 | 7 | 1 | -3 | -6 |
| 0.05 | 20 | 10 | 3 | -1 | -4 |
| 0.06 | 23 | 13 | 5 | 0,5 | -3 |
| 0.07 | 27 | 15 | 7 | 2 | -2 |

| | r* | | | | |
|-----------------------|-----------|-----|------|-----|------|
| P_{th} | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 0.006 | 15 | 6 | 0,6 | -3 | -6 |
| 0.012 | 17 | 8 | 2 | -2 | -5 |
| 0.018 | 20 | 10 | 3 | -1 | -4 |
| 0.024 | 22 | 12 | 5 | 0,1 | -3 |
| 0.03 | 25 | 14 | 6 | 1 | -2 |

Bijlage 13: Sensitiviteitsanalyse – gebruiksfactor van 0%

| | η_{th} |
|----------|-------------|
| η_e | 0 |
| 0.2 | 5 |
| 0.25 | 7 |
| 0.3 | 9 |
| 0.35 | 10 |
| 0.4 | 11 |

| | P_{kon} | | | | |
|----------|-----------|------|------|------|------|
| η_e | 28.5 | 38.5 | 48.5 | 58.5 | 68.5 |
| 0.2 | 10 | 7 | 5 | 2 | -0,4 |
| 0.25 | 11 | 9 | 7 | 5 | 3 |
| 0.3 | 13 | 11 | 9 | 7 | 6 |
| 0.35 | 13 | 12 | 10 | 9 | 7 |
| 0.4 | 14 | 13 | 11 | 10 | 9 |

| | P_e | | | | |
|----------|-------|------|------|------|------|
| η_e | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| 0.2 | -0,4 | 2 | 5 | 7 | 10 |
| 0.25 | 2 | 5 | 7 | 10 | 12 |
| 0.3 | 4 | 7 | 9 | 12 | 14 |
| 0.35 | 5 | 8 | 10 | 13 | 15 |
| 0.4 | 6 | 9 | 11 | 14 | 16 |

| | P_{th} |
|----------|----------|
| η_e | 0 |
| 0.2 | 5 |
| 0.25 | 7 |
| 0.3 | 9 |
| 0.35 | 10 |
| 0.4 | 11 |

| | r^* | | | | |
|----------|-------|-----|------|------|------|
| η_e | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 0.2 | 13 | 5 | -0,6 | -4 | -7 |
| 0.25 | 16 | 7 | 1 | -3 | -6 |
| 0.3 | 19 | 9 | 3 | -1 | -5 |
| 0.35 | 20 | 10 | 4 | -0,7 | -4 |
| 0.4 | 22 | 11 | 5 | -0,1 | -3 |

| | Ркон | | | | |
|------------|-------------|------|------|------|------|
| Пth | 28.5 | 38.5 | 48.5 | 58.5 | 68.5 |
| 0 | 13 | 11 | 9 | 7 | 6 |

| | Рe | | | | |
|------------|-----------|------|------|------|------|
| Пth | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| 0 | 4 | 7 | 9 | 12 | 14 |

| | г* | | | | |
|------------|-----------|-----|------|-----|------|
| Пth | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 0 | 19 | 9 | 3 | -1 | -5 |

| | Рe | | | | |
|-------------|-----------|------|------|------|------|
| Ркон | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| 28.5 | 7 | 10 | 13 | 15 | 18 |
| 38.5 | 6 | 8 | 11 | 13 | 16 |
| 48.5 | 4 | 7 | 9 | 12 | 14 |
| 58.5 | 2 | 5 | 7 | 10 | 13 |
| 68.5 | 0,7 | 3 | 6 | 8 | 11 |

| | Рth |
|-------------|------------|
| Ркон | 0 |
| 28.5 | 13 |
| 38.5 | 11 |
| 48.5 | 9 |
| 58.5 | 7 |
| 68.5 | 6 |

| | г* | | | | |
|-------------|-----------|-----|------|------|------|
| Ркон | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 28.5 | 23 | 13 | 6 | 0,7 | -3 |
| 38.5 | 21 | 11 | 4 | -0,4 | -4 |
| 48.5 | 19 | 9 | 3 | -1 | -5 |
| 58.5 | 16 | 7 | 2 | -3 | -5 |
| 68.5 | 14 | 6 | 0,2 | -4 | -6 |

| | P_{th} |
|----------------------|-----------------------|
| P_e | 0 |
| 0.03 | 4 |
| 0.04 | 7 |
| 0.05 | 9 |
| 0.06 | 12 |
| 0.07 | 14 |

| | r* | | | | |
|----------------------|-----------|-----|------|-----|------|
| P_e | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 0.03 | 12 | 4 | -1 | -5 | -7 |
| 0.04 | 15 | 7 | 0,9 | -3 | -6 |
| 0.05 | 19 | 9 | 3 | -1 | -5 |
| 0.06 | 22 | 12 | 5 | 0,2 | -3 |
| 0.07 | 25 | 14 | 7 | 2 | -2 |

| | r* | | | | |
|-----------------------|-----------|-----|------|-----|------|
| P_{th} | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 0 | 19 | 9 | 3 | -1 | -5 |