

Haalbaarheidsstudie voor de aanwending van pyrolysechar als bodemverbeteraar of grondstof voor actieve koolproductie

Een eerste analyse

Anne Houbrechts

promotor :
Prof. dr. Bernard VANHEUSDEN

Voorwoord

Deze masterproef vormt de afsluiting van mijn opleiding Master in de Bedrijfseconomische Wetenschappen: Handelsingenieur aan de Universiteit van Hasselt, een vijfjarige periode van hard werken, maar ook van het sluiten van enkele mooie vriendschappen.

De keuze voor het onderwerp van deze masterproef komt voort uit mijn persoonlijke interesse in het milieu en mijn bezorgdheid over de klimaatsverandering.

Zonder de steun en hulp van heel wat mensen zou deze masterproef niet tot stand gekomen zijn, vandaar volgend dankwoord.

In eerste plaats zou ik mijn promotor, Prof. dr. Vanheusden, willen bedanken om mij de mogelijkheid te bieden dit onderwerp te behandelen. Verder wil ik hem bedanken voor de hulp en de informatie die hij bood. Een speciaal woord van dank aan mijn co-promotor, de heer Tom Kuppens, voor het beantwoorden van mijn vragen en het aanreiken van informatie.

Verder wil ik alle mensen bedanken die op een of andere manier een bijdrage geleverd hebben aan het tot stand komen van deze masterproef. In het bijzonder een woord van dank aan ir. Tom Cornelissen, voor het delen van zijn kennis over het pyrolyseproces, de actieve koolproducent en Kenny Vanreppelen, voor het bijbrengen van kennis over de actieve koolproductie, enkele medewerkers van VITO, voor de informatie in verband met het onderzoek naar de bodemverbeterende kwaliteiten van biochar in Vlaanderen, en diegenen die per mail mijn vragen beantwoordden.

Tot slot een woord van dank aan mijn ouders die mij de mogelijkheid gaven deze opleiding te volgen en mij hierin steunden. Ook een woord van dank aan mijn vrienden die de voorbije vijf jaar onvergetelijk maakten.

Anne-Sophie Houbrechts

Samenvatting

In deze masterproef wordt de economische en maatschappelijke waarde van pyrolysechar bepaald. Na een korte omschrijving van de probleemstelling komt in hoofdstuk 2 een omschrijving van biochar aan bod. Biochar wordt geproduceerd uit vele soorten biomassa. Pyrolysechar krijgt de naam biochar als deze als bodemverbeteraar gebruikt wordt.

In hoofdstuk 3 worden de productieprocessen die resulteren in pyrolysechar besproken. Afval uit de houtskoolindustrie is bruikbaar, maar het productieproces waar in deze masterproef op verder gebouwd wordt, is het pyrolyseproces. Bij snelle pyrolyse wordt droge biomassa in minder dan een seconde en in de afwezigheid van zuurstof verhit tot temperaturen rond 500 °C. Dit resulteert in niet-condenseerbaar gas, dat gebruikt zal worden om het pyrolyseproces op temperatuur te houden, en in bio-olie en pyrolysechar, die beiden verkocht zullen worden. Dit hoofdstuk bepreekt eveneens het potentieel van de productie van pyrolysechar in Vlaanderen. Voor de analyse in deze masterproef zal gebruik gemaakt worden van korteomloophout.

In hoofdstuk 4 wordt beschreven op welke manieren pyrolysechar te gelde gemaakt kan worden. In het kader van deze masterproef wordt uitgegaan van gebruik van pyrolysechar als bodemverbeteraar en gebruik van pyrolysechar als grondstof voor actieve kool. In de masterproef wordt met de benaming biochar verwezen naar pyrolysechar die als bodemverbeteraar gebruikt wordt. Met de benaming actieve kool wordt verwezen naar pyrolysechar die na activatie verkocht wordt als actieve kool.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 5 de netto contante waardemethode (NCW-methode) uitgelegd. Deze methode zal gebruikt worden bij het bepalen van de economische haalbaarheid van de gezamenlijke productie van pyrolysechar en bio-olie. De bestudeerde investeringsprojecten bestaan uit een eenmalige investering aan het begin van het project en jaarlijks terugkerende operationele opbrengsten en kosten. De analyse zal beperkt worden tot drie situaties die zich onderscheiden in de hoeveelheid per uur aangevoerde droge biomassa. De NCW wordt berekend bij een input van 0,5, 1 en 1,5 ton droge stof biomassa per uur (tds/uur).

In hoofdstuk 6 wordt de NCW berekend uitgaande van de verkoop van pyrolysechar en bio-olie. Er is momenteel geen enkele vorm van subsidie mogelijk voor een pyrolyse-installatie bij de verkoop van pyrolysechar en bio-olie. De operationele kosten worden onderverdeeld in de kost voor aanleg, oogst en voorbehandeling van het korteomloophout, de aanvoerkosten van het korteomloophout, onderhoudskosten, personeelskosten, verzekeringskosten, energiekosten, kosten voor koeling en algemene overheadkosten.

Bij het bepalen van de operationele opbrengsten zal een onderscheid gemaakt worden tussen de verkoop van biochar en de verkoop van actieve kool. De NCW is voor de drie inputniveaus negatief en dit zowel bij de verkoop van biochar als bij de verkoop van actieve kool. De NCW daalt in beide gevallen naarmate de per uur aangevoerde hoeveelheid biomassa stijgt. Bij de verkoop van biochar en bio-olie wordt de NCW nooit positief. Bij de verkoop van actieve kool en bio-olie is de NCW positief bij een input van 12 tds/uur of meer.

In hoofdstuk 7 wordt een beschrijving van de warmtekrachtkoppeling (WKK) gegeven. Het principe van de WKK wordt besproken, gevolgd door een beschrijving van de mogelijke technologieën. In deze masterproef wordt uitgegaan van een WKK-installatie met dieselmotor. De subsidiëring met warmtekracht- en groenestroomcertificaten komt eveneens aan bod.

In hoofdstuk 8 wordt de NCW berekend bij de verkoop van pyrolysechar, warmte en elektriciteit, uitgaande van een warmteafzet van 100%. Er wordt extra geïnvesteerd in een WKK-installatie voor de omzetting van bio-olie naar elektriciteit en warmte. De pyrolyse- en WKK-installatie komen beiden in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek en ecologiepremie. Er wordt opnieuw een onderscheid gemaakt tussen de verkoop van biochar en de verkoop van actieve kool. Bij de verkoop van warmte en elektriciteit ontvangt men groenestroom- en warmtekrachtcertificaten. De NCW neemt toe naarmate de aangevoerde hoeveelheid biomassa stijgt. De NCW is enkel positief bij een input van 1,5 tds/uur bij de verkoop van actieve kool, warmte en elektriciteit.

In hoofdstuk 9 wordt de maatschappelijke waarde van pyrolysechar berekend. Biochar is een zeer stabiele vorm van koolstof, waardoor het vele jaren in de bodem bewaard kan blijven. Hierdoor kan de koolstof niet oxideren en zorgt toevoeging van biochar aan de bodem voor een CO₂-reductie in de atmosfeer. Hierbij moet rekening gehouden worden met de uitstoot als gevolg van de productie van biochar. Bij de bepaling van de maatschappelijke waarde wordt een onderscheid gemaakt tussen het stockeren van biochar in de bodem en gebruik van pyrolysechar als grondstof voor actieve kool. De CO₂-reductie per ton pyrolysechar is positief, zowel bij het stockeren van biochar als bij het gebruik van pyrolysechar als grondstof voor actieve kool.

In hoofdstuk 10 wordt het break-evenpunt bepaald. Bij de verkoop van biochar en bio-olie is er geen break-evenpunt. Bij de verkoop van actieve kool en bio-olie ligt het break-evenpunt bij een input van 12 tds/uur. Bij de verkoop van warmte en elektriciteit in plaats van bio-olie liggen de break-evenpunten lager. Bij de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte ligt dit op 3 tds/uur, waar dit bij de verkoop van actieve kool, elektriciteit en warmte op 1,5 tds/uur ligt.

In de scenarioanalyse in hoofdstuk 11 wordt het effect van een verminderde warmteafzet op de NCW, berekend in hoofdstuk 8, bepaald. De NCW wordt berekend bij een warmteafzet van 25%, 50% en 75% en nadien vergeleken met de NCW bij de verkoop van bio-olie. Op deze manier kan bepaald worden wanneer investeren in een WKK-installatie interessant is. Enkel bij een warmteafzet van 25% en een input van 0,5 tds/uur is de NCW bij de verkoop van bio-olie hoger dan bij de verkoop van elektriciteit en warmte, zowel bij de verkoop van biochar als bij de verkoop van actieve kool. In dit geval is investeren in een WKK-installatie niet interessant.

In hoofdstuk 12 volgt een sensitiviteitsanalyse. Hierbij worden vier situaties onderscheiden: de verkoop van biochar en bio-olie, de verkoop van actieve kool en bio-olie, de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte en de verkoop van actieve kool, elektriciteit en warmte. Voor elk van deze situaties worden vijf variabelen geïdentificeerd die opgenomen worden in de sensitiviteitsanalyse. Het doel is de gevoeligheid van de NCW voor verandering in de waarde van deze variabelen nagaan.

In hoofdstuk 13 komt het juridisch aspect aan bod. Pyrolysechar werd nog niet opgenomen in de Vlaamse wetgeving. In dit hoofdstuk wordt nagegaan of pyrolysechar zou vallen onder de huidige wetgeving inzake bodemverbeteraars en actieve kool. Er wordt eveneens nagegaan of pyrolysechar als afvalstof, dan wel als secundaire grondstof of product beschouwd kan worden. Dit zou bepalend zijn voor de verdere wetgeving waar pyrolysechar onder valt. Er kan momenteel niet eenduidig bepaald worden of pyrolysechar als afvalstof, secundaire grondstof of product beschouwd moet worden.

Kortecomloophout kan gebruikt worden als fyto-remediatietechniek, waarbij historische zware metalenvervuiling uit een bodem verwijderd wordt door opname van de zware metalen in het kortecomloophout. Als dit hout nadien gepyrolyseerd wordt, wordt de vervuiling geconcentreerd in de geproduceerde pyrolysechar. Deze pyrolysechar kan niet gebruikt worden als bodemverbeteraar of grondstof voor actieve kool als de zware metalen niet eerst uit de pyrolysechar verwijderd worden. Verder onderzoek is echter noodzakelijk om de juiste techniek hiervoor te achterhalen. In hoofdstuk 14 wordt dit probleem kort behandeld.

In hoofdstuk 15 volgt tenslotte een algemeen besluit.

Inhoudsopgave

Voorwoord

Samenvatting

Inhoudsopgave

Lijst van tabellen

Lijst van figuren

1	Probleemstelling	- 1 -
1.1	Situering praktijkprobleem.....	- 1 -
1.2	Afleiding onderzoeksvragen	- 3 -
2	Wat is biochar?	- 5 -
2.1	Terra preta	- 5 -
2.2	Terra nova	- 6 -
2.3	Definitie biomassa	- 8 -
3	Hoe wordt biochar geproduceerd?	- 9 -
3.1	De productietechniek	- 9 -
3.2	Potentieel in Vlaanderen	- 14 -
3.3	Kortecomloophout.....	- 16 -
4.	Aanwending van de char	- 20 -
4.1	Gebruik als bodemverbeteraar	- 20 -
4.2	Gebruik als grondstof voor actieve kool	- 23 -
5	De netto contante waardemethode	- 26 -
6.	NCW bij de verkoop van pyrolysechar en bio-olie	- 28 -
6.1	Totale investeringskosten	- 28 -
6.1.1	Bedrag van de initiële investering	- 28 -
6.1.2	Ecologiepremie	- 29 -
6.1.3	Investeringsaftrek.....	- 31 -
6.2	Operationele kosten	- 33 -
6.2.1	Kosten voor aanleg, oogst en voorbehandeling kortecomloophout	- 33 -
6.2.2	Aanvoerkosten	- 36 -
6.2.3	Onderhoudskosten	- 37 -

6.2.4	Personeelskosten	- 38 -
6.2.5	Verzekeringskosten	- 40 -
6.2.6	Energiekosten	- 41 -
6.2.7	Koelwater	- 44 -
6.2.8	Algemene overheadkosten	- 44 -
6.3	Operationele opbrengsten	- 47 -
6.3.1	Opbrengst uit de verkoop van biochar	- 47 -
6.3.2	Opbrengst uit de verkoop van actieve kool	- 48 -
6.3.3	Opbrengst uit de verkoop van bio-olie	- 49 -
6.4	NCW-berekening	- 51 -
7	Warmtekrachtkoppeling.....	- 55 -
7.1	Het principe	- 55 -
7.2	Technologieën	- 57 -
7.3	District heating.....	- 57 -
7.4	Groenestroomcertificaten.....	- 58 -
7.5	Warmtekrachtcertificaten.....	- 58 -
8	NCW bij de verkoop van pyrolysechar, elektriciteit en warmte	- 59 -
8.1	Totale investeringskosten	- 59 -
8.1.1	Bedrag van de initiële investering	- 59 -
8.1.2	De ecologiepremie	- 61 -
8.1.3	Investeringsaftrek.....	- 64 -
8.2	Operationele kosten	- 69 -
8.2.1	Kost korteomloophout en aanvoerkosten	- 69 -
8.2.2	Onderhoudskosten	- 69 -
8.2.3	Personeelskosten	- 70 -
8.2.4	Verzekeringskosten	- 72 -
8.2.5	Energiekosten	- 72 -
8.2.6	Algemene overheadkosten	- 73 -
8.3	Operationele opbrengsten.....	- 74 -
8.3.1	Opbrengsten uit de verkoop van char	- 74 -

8.3.2	Opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit.....	- 74 -
8.3.3	Opbrengsten uit de verkoop van warmte.....	- 76 -
8.3.4	Opbrengsten uit de verkoop van groenestroomcertificaten	- 76 -
8.3.5	Opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten	- 77 -
8.4	NCW-berekening	- 81 -
9	Maatschappelijke waarde	- 86 -
9.1	Opslag van biochar in de bodem.....	- 87 -
9.1.1	CO ₂ -sequestratie.....	- 87 -
9.1.2	Effect op de uitstoot van N ₂ O.....	- 90 -
9.1.3	Vorming van CO ₂ bij het vervoer van biomassa.....	- 91 -
9.1.4	Vorming van CO ₂ bij de productie van biochar	- 91 -
9.1.5	Bepaling van de maatschappelijke waarde	- 92 -
9.2	Gebruik van de char als grondstof voor actieve kool.....	- 93 -
9.2.1	CO ₂ -sequestratie.....	- 94 -
9.2.2	Vorming van CO ₂ bij de productie van actieve kool.....	- 94 -
9.2.3	Bepaling van de maatschappelijke waarde	- 95 -
9.3	Conclusie maatschappelijke waarde	- 96 -
10	Break-evenanalyse	- 97 -
11	Scenarioanalyse.....	- 98 -
11.1	Warmteafzet van 25%.....	- 98 -
11.2	Warmteafzet van 50%.....	- 99 -
11.3	Warmteafzet van 75%.....	- 100 -
11.4	Besluit.....	- 100 -
12	Sensitiviteitsanalyse	- 102 -
12.1	Verkoop van biochar en bio-olie.....	- 102 -
12.2	Verkoop van actieve kool en bio-olie	- 103 -
12.3	Verkoop van biochar, warmte en elektriciteit.....	- 104 -
12.4	Verkoop van actieve kool, warmte en elektriciteit	- 106 -
13	Juridisch aspect	- 108 -
13.1	Voldoet de char aan de wettelijke normen?.....	- 108 -

13.1.1	Gebruik als biochar	- 108 -
13.1.2	Gebruik als grondstof voor actieve kool	- 110 -
13.2	Pyrolysechar als afvalstof.....	- 110 -
13.3	Aanbevelingen voor het juridisch kader	- 115 -
14	Fytoremediatie.....	- 116 -
14.1	Oplossing voor historische vervuiling.....	- 116 -
14.2	Gevolgen voor de geproduceerde biochar	- 116 -
14.3	Wetgevend aspect	- 117 -
15	Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek.....	- 120 -
15.1	Is de productie van biochar haalbaar in Vlaanderen?.....	- 120 -
15.2	De NCW bij de verkoop van pyrolysechar en bio-olie	- 121 -
15.2.1	De NCW bij de verkoop van biochar en bio-olie.....	- 121 -
15.2.2	De NCW bij de verkoop van actieve kool en bio-olie	- 122 -
15.2.3	Vergelijking van de NCW bij de verkoop van biochar en bio-olie en de NCW bij de verkoop van actieve kool en bio-olie.....	- 123 -
15.3	De NCW bij de verkoop van pyrolysechar, elektriciteit en warmte	- 123 -
15.3.1	De NCW bij de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte	- 123 -
15.3.2	De NCW bij de verkoop van actieve kool, elektriciteit en warmte.....	- 124 -
15.3.3	Vergelijking van de NCW bij de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte en de NCW bij de verkoop van actieve kool, elektriciteit en warmte	- 125 -
15.4	Biochar als bodemverbeteraar	- 125 -
15.5	Is biochar het nieuwe goud in de strijd tegen de klimaatsverandering?.....	- 126 -
16	Lijst van geraadpleegde werken	- 128 -
Bijlagen		

Lijst van tabellen

Tabel 1: chemische samenstelling van biochar voor verschillende soorten biomassa	7
Tabel 2: opbrengst van de drie geproduceerde fracties bij de verschillende types pyrolyse	10
Tabel 3: verdeling populierenareaal in Vlaanderen per provincie	18
Tabel 4: oppervlakte met korteomloophout beplante landbouwgrond in Vlaanderen op basis van aangevraagde subsidies (in ha)	18
Tabel 5: samenstelling terra preta en omliggende grond	20
Tabel 6: chemische samenstelling char	22
Tabel 7: weergave van het aantal personeelsleden en jaaromzet bij gebruik van char als grondstof voor actieve kool	30
Tabel 8: berekening van de investeringskosten bij een input van 0,5 tds/uur	33
Tabel 9: kost aanleg en verwerking korteomloophout	33
Tabel 10: kost terreinvoorbereiding en oogst korteomloophout	34
Tabel 11: kost voor teler korteomloophout in EUR/tds	35
Tabel 12: berekening oppervlakte aanvoergebied en vervoersafstand	37
Tabel 13: berekening van de jaarlijkse loonkost	39
Tabel 14: berekening van het aantal arbeiders per shift voor de pyrolyse-installatie en de activatie-oven	40
Tabel 15: berekening van het energieverbruik (kWh) voor activatie	43
Tabel 16: berekening van de algemene overheadkosten naar Bridgwater et al (2002)	44
Tabel 17: berekening van de jaarlijkse operationele kosten bij een input van 0,5 tds/uur	46
Tabel 18: berekening van de jaarlijkse operationele opbrengsten bij een input van 0,5 tds/uur	51
Tabel 19: berekening van de NCW bij de verkoop van biochar en bio-olie	52
Tabel 20: berekening van de NCW bij de verkoop van actieve kool en bio-olie	52
Tabel 21: berekening van de grootte van het warmteafzetgebied	61
Tabel 22: berekening van de totale distributiekosten van de geproduceerde warmte	61
Tabel 23: componenten van de investering die in aanmerking komen voor de ecologiepremie	62
Tabel 24: berekening van het aantal personeelsleden en de jaaromzet bij het gebruik van char als grondstof voor actieve kool	63
Tabel 25: componenten van de investering in de pyrolyse-installatie die in aanmerking komen voor de verhoogde investeringsaftrek	65
Tabel 26: componenten van de investering in de WKK-installatie die in aanmerking komen voor de verhoogde investeringsaftrek	67
Tabel 27: berekening van de investeringskosten bij een input van 0,5 tds/uur	69

Tabel 28: berekening van het vermogen van de WKK-installatie	70
Tabel 29: berekening jaarlijkse onderhoudskosten WKK-installatie	70
Tabel 30: berekening van de elektriciteitsoutput en de intern benodigde elektriciteit van de WKK-installatie	71
Tabel 31: berekening aantal arbeiders WKK-installatie	71
Tabel 32: berekening van de jaarlijkse operationele kosten van de WKK-installatie bij een input van 0,5 tds/uur	73
Tabel 33: jaarlijks te verkopen hoeveelheid elektriciteit	75
Tabel 34: berekening van de besparing van elektriciteitskosten	75
Tabel 35: aantal groenestroomcertificaten voor de elektriciteitsproducent bij de verkoop van biochar	77
Tabel 36: aantal groenestroomcertificaten voor de elektriciteitsproducent bij de verkoop van actieve kool	77
Tabel 37: berekening van de opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten voor jaar 1 tot en met 4	80
Tabel 38: opbrengsten uit de verkoop van verkregen warmtekrachtcertificaten	80
Tabel 39: berekening van de opbrengsten uit de verkoop van warmte en elektriciteit bij een input van 0,5 tds/uur	81
Tabel 40: berekening van de NCW bij de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte	82
Tabel 41: berekening van de NCW bij de verkoop van actieve kool, elektriciteit en warmte	84
Tabel 42: veroudering van black carbon na 6 en 12 maanden	90
Tabel 43: marktprijs voor EUA contracten in 2010	93
Tabel 44: berekening van de maatschappelijke waarde van biochar bij een vervoersafstand van 8,61 km (input van 1,5 tds/uur)	93
Tabel 45: berekening van de maatschappelijke waarde van char als grondstof voor actieve kool bij een vervoersafstand van 8,61 km (input van 1,5 tds/uur)	96
Tabel 46: NCW bij een warmteafzet van 25%	99
Tabel 47: NCW bij een warmteafzet van 50%	99
Tabel 48: NCW bij een warmteafzet van 75%	100
Tabel 49: resultaten sensitiviteitsanalyse bij de verkoop van biochar en bio-olie	103
Tabel 50: resultaten sensitiviteitsanalyse bij de verkoop van actieve kool en bio-olie	104
Tabel 51: resultaten sensitiviteitsanalyse bij de verkoop van biochar, warmte en elektriciteit	105
Tabel 52: resultaten sensitiviteitsanalyse bij de verkoop van actieve kool, warmte en elektriciteit	107
Tabel 53: chemische samenstelling char	108
Tabel 54: zware metalen in biomassa	117
Tabel 55: concentratie zware metalen in char en bio-olie	117

Tabel 56: terugnamevoorwaarden voor gebruikte actieve kool	118
Tabel 57: maximale gehalte zware metalen in bodemverbeteraar	118

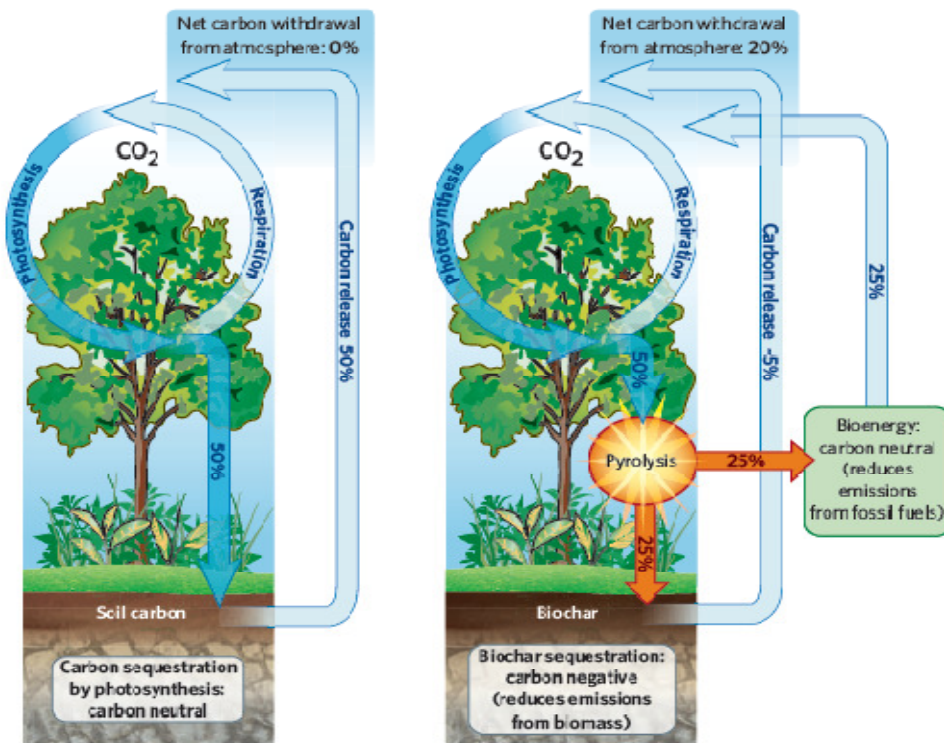
Lijst van figuren

Figuur 1a en 1b: CO ₂ -neutrale brandstof en CO ₂ -negatieve brandstof	1
Figuur 2: het kleurverschil tussen terra preta en de omliggende gronden	5
Figuur 3: schematische voorstelling van een snel pyrolyseproces	10
Figuur 4: stationair wervelbed	12
Figuur 5: circulerend wervelbed	13
Figuur 6: ablatieve pyrolyse reactor	13
Figuur 7: verdeling van de operationele kosten van pyrolyse van biomassa	46
Figuur 8: verdeling van de operationele kosten van activatie van char	47
Figuur 9: vergelijking van de evolutie van de NCW bij de verkoop van actieve kool (NCWa) met de evolutie van de NCW bij de verkoop van biochar (NCWb)	53
Figuur 10: vereenvoudigde voorstelling van de energetische balans tussen een WKK-installatie en gescheiden productie van warmte en elektriciteit	56
Figuur 11: verdeling van de operationele kosten bij de productie van elektriciteit en warmte uit bio-olie	74
Figuur 12: vergelijking van de evolutie van de NCW bij de verkoop van bio-olie (NCWb-olie) met de evolutie van de NCW bij de verkoop van warmte en elektriciteit (NCWb-wkk) bij de verkoop van biochar	82
Figuur 13: vergelijking van de evolutie van de NCW bij de verkoop van bio-olie (NCWa-olie) met de evolutie van de NCW bij de verkoop van warmte en elektriciteit (NCWa-wkk) bij de verkoop van actieve kool	85
Figuur 14: vergelijking van de evolutie van de NCW bij de verkoop van actieve kool (NCWa) met de evolutie van de NCW bij de verkoop van biochar (NCWb) bij de verkoop van warmte en elektriciteit	85

1 Probleemstelling

1.1 Situering praktijkprobleem

Koolstofdioxide (CO₂) maakt het grootste deel uit van de gassen die zorgen voor het zogenaamde broeikaseffect. In 2006 was dit, in België, 86,6% van de totale uitstoot van broeikasgassen (MIRA, 2007a). Een methode om de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer terug te dringen, is de uitstoot van dergelijke gassen te verminderen. Het opvangen van CO₂ uit de atmosfeer, om dit, al dan niet tijdelijk, op te slaan, kan een extra hulp zijn. Er wordt hierbij volgens Matthews (2008) onderscheid gemaakt tussen geosequestration en biosequestration. Bij geosequestration gebruikt men lege holten in het aardoppervlak, zoals oude mijnschachten of lege olievelden, om CO₂ op te slaan. Biosequestration maakt gebruik van bepaalde biologische componenten die als eigenschap hebben dat ze CO₂ opnemen en voor langere tijd uit de atmosfeer houden.



Figuur 1a: CO₂-neutrale brandstof en figuur 1b: CO₂-negatieve brandstof. Bron: Lehmann 2007a

Planten zetten CO₂ om in zuurstof die wordt vrijgegeven aan de lucht en koolstof die in de vorm van glucose wordt opgeslagen in de biomassa. Dit omzettingsproces wordt fotosynthese genoemd (De Schutter, Neels, Palmans & Van der Mueren, 2004). Hout bestaat hierdoor voor ongeveer 50% uit koolstof (Defays, 2010). Bij verrotting of verbranding van de biomassa, wordt de in de planten aanwezige koolstof opnieuw gebonden aan in de atmosfeer aanwezige zuurstof. De koolstof komt op deze manier terug als CO₂ vrij in de atmosfeer (zie figuur 1a). Dit wordt ook wel eens de koolstofcyclus genoemd (Defays, 2010).

Biobrandstof, afkomstig van biomassa, kan als een CO₂-neutrale brandstof beschouwd worden. De CO₂ die vrijkomt bij de verbranding van de biobrandstof vervangt de CO₂ die werd opgenomen tijdens het groeiproces van de biomassa. Gebruik maken van biobrandstof kan CO₂-negatief worden, als een deel van de biomassa op een min of meer permanente manier in de bodem opgeslagen kan worden (Matthews, 2008). Een technologie die CO₂-negatief is, wordt gekenmerkt door het feit dat er voor elke eenheid energie die er geproduceerd wordt, broeikasgassen uit de atmosfeer verwijderd worden (Lehmann, 2007b). Pyrolyse van biomassa met biochar sequestration, is een optie voor zowel productie van bio-energie, als verwijdering van CO₂ uit de atmosfeer (Lehmann, 2009). Voor de productie van biochar wordt biomassa gebruikt die, na oogst of snoeiwerk, plaats maakt voor groei van nieuwe biomassa. Op het moment dat CO₂ door deze nieuwe biomassa wordt omgezet en de koolstof wordt opgeslagen in de vorm van glucose, wordt de biochar een koolstof sink (Lehmann, 2007b). Koolstof sinks worden door Defays (2010) omschreven als vergaarplaatsen van CO₂, meer bepaald elementen uit de koolstofcyclus die CO₂ kunnen opnemen en stockeren, zodat de koolstofconcentratie in de atmosfeer teruggedrongen wordt. Ongeveer de helft van de in het hout opgeslagen koolstof komt terecht in biochar. Hiervan zal volgens Lehmann (2007a) ongeveer 80% in stabiele vorm bewaard blijven na toevoeging van biochar aan een bodem. De overige 20% zal zich vrij snel binden met zuurstof tot CO₂ (zie figuur 1b).

Biochar kan geproduceerd worden door pyrolyse van biomassa. Snelle pyrolyse is een proces dat gebruikt wordt om bio-olie te produceren. In enkele seconden wordt biomassa verhit tot hoge temperaturen. Dit in de afwezigheid van zuurstof. Naast deze bio-olie, die als biobrandstof kan gebruikt worden, levert dit proces ook een vaste en een gasfractie op (Bridgwater, T., 2006). Deze vaste fractie kent een hoge koolstofconcentratie en kan gebruikt worden als biochar. Als deze in de bodem wordt opgeslagen, kan de koolstof min of meer permanent in de bodem opgeslagen worden. Dit valt onder de noemer biosequestration (Matthews, 2008).

De bodemverbeterende kwaliteiten van biochar in tropische gebieden werden door vele auteurs beschreven. Indien biochar ook in Vlaanderen als bodemverbeteraar gebruikt kan worden, kan het gebruik van dierlijke mest en kunstmest beperkt worden.

Bemesting met dierlijke mest en kunstmest kan leiden tot een te hoog gehalte aan stikstof en fosfaat in de bodem, oppervlaktewater en grondwater. Dit heeft een negatieve impact op de biodiversiteit en de drinkwatervoorziening kan in gevaar komen (ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit Nederland).

1.2 Afleiding onderzoeksvragen

In België wordt er vooralsnog weinig aandacht besteed aan de toepassing van biochar. Er zijn reeds enkele instanties bezig met onderzoek, maar toepassing in de praktijk lijkt nog ver weg. Aangezien biochar heel wat voordelen kent, kan het nuttig zijn om deze ook in Vlaanderen te produceren en te gebruiken. De centrale onderzoeksvraag luidt dan ook als volgt:

"Wat is de haalbaarheid van de productie en het gebruik van pyrolysechar in Vlaanderen?"

Vooraleer onderzocht kan worden of biochar toepasbaar is in Vlaanderen, is het van belang te weten wat biochar is. Men moet ook weten op welke manier het geproduceerd wordt en welke grondstoffen hiervoor geschikt zijn.

De eerste deelvragen zijn:

"Wat is biochar?"

"Hoe wordt biochar geproduceerd?"

Pyrolysechar krijgt pas de benaming biochar indien het als bodemverbeteraar aangewend wordt. Deze benaming zou ook gebruikt kunnen worden voor pyrolysechar die in de bodem opgeslagen wordt. Het is echter interessant te onderzoeken of er alternatieve toepassingsmogelijkheden zijn voor de pyrolysechar. Een derde deelvraag luidt als volgt:

"Zijn er alternatieve toepassingsmogelijkheden voor de pyrolysechar?"

De beschrijving van het economische aspect zal het grootste deel van deze masterproef innemen. De bedoeling is na te gaan wat de productie van pyrolysechar zou opleveren voor de producent. Een economische analyse van de pyrolyse van biomassa, waarbij de geproduceerde char werd gebruikt om het pyrolyseproces van de nodige warmte te voorzien, werd door Bloemen en Voets (2009) reeds uitgevoerd. McCarl, Peacocke, Chrisman, Kung en Sands (2009) geven een inzicht in de economische aspecten van de productie van biochar. De bepaling van de economische waarde van pyrolysechar in Vlaanderen, met hieraan gekoppeld een economische analyse van de pyrolyse van biomassa met de verkoop van zowel de bio-olie als de char, gebeurde echter nog niet.

Een vierde deelvraag luidt als volgt:

"Wat is de economische waarde van pyrolysechar?"

Uit de omschrijving van het praktijkprobleem kan afgeleid worden dat gebruik van biochar een aantal maatschappelijke voordelen zou kunnen opleveren. Zo zal er een netto CO₂-reductie ontstaan en kan het gebruik van dierlijke mest en kunstmest mogelijk beperkt worden. Er zal nagegaan worden wat de waarde van biochar is voor de maatschappij. Deze waarde zal ook bepaald worden voor alternatieve toepassingen van de pyrolysechar. De vijfde deelvraag is:

"Wat is de maatschappelijke waarde van pyrolysechar?"

De analyse in deze masterproef zal uitgaan van aanvoer van Vlaamse biomassa om deze in Vlaanderen te pyrolyseren. De eindproducten worden verondersteld verkocht te worden in Vlaanderen. Vandaar dat een zesde deelvraag wordt afgeleid:

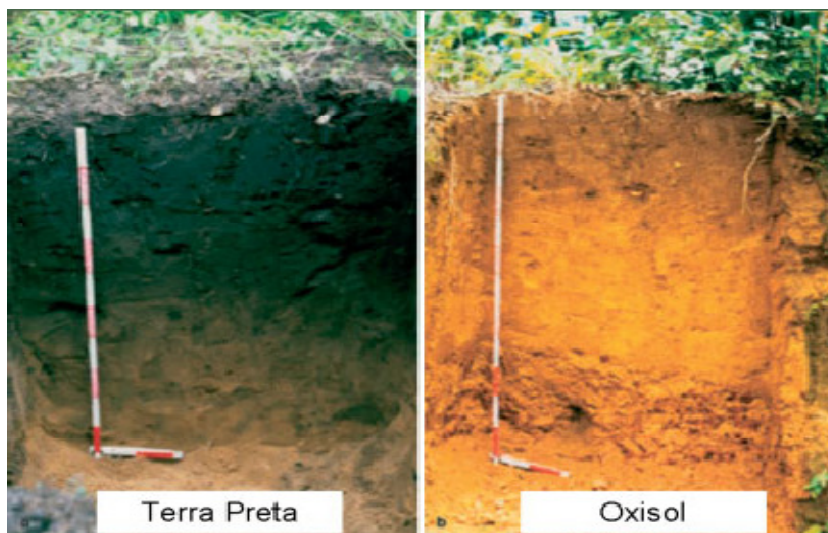
"Wat is de haalbaarheid op juridisch vlak?"

2 Wat is biochar?

2.1 Terra preta

In het Braziliaanse Amazonewoud vindt men de zogenaamde terra preta terug. Volgens Krull, Sohi, Lopez-Capel en Bol (2008), is deze grond veel vruchtbaarder dan de gronden in omliggende gebieden. Terra preta bevat een grotere hoeveelheid organische materie, kan beter vocht en nutriënten vasthouden, heeft hogere pH waarden en een grotere hoeveelheid voor biomassa beschikbare stikstof, fosfor, calcium en kalium, dan de omliggende gronden (Laird, Brown, Amonette & Lehmann, 2009). Planten groeien op deze grond tot drie keer sneller dan op de omliggende gronden die doorgaans zelfs een zeer lage vruchtbaarheid hebben. Dit type grond komt ook voor in Ecuador, Peru, West-Afrika en de savanne van Zuid-Afrika (Krull et al., 2008).

Volgens Winsley (2007) bevat een hectare van één meter diepe terra preta tot 250 ton koolstof, wat veel meer is dan de 100 ton die een gelijkaardige onverbeterde grond bevat. Om deze reden heeft terra preta een veel donkerder kleur dan omliggende gronden. Dit hoge gehalte aan koolstof wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van onvolledig verbrande resten van kookvuren of wegbranden van bossen om plaats te maken voor landbouw. De oude pre-Columbiaanse beschavingen die op deze manier leefden, bevolkten het Braziliaanse regenwoud van 2 500 tot 500 jaar voor Christus (Lehmann et al., 2003). Terra preta bevat, vele duizenden jaren nadat ze door deze bevolking werd verlaten, nog altijd grote hoeveelheden koolstof (Lehmann & Rondon, 2006).



Figuur 2: het kleurverschil tussen terra preta en de omliggende gronden. Bron: Laird et al., 2009

Volgens Winsley (2007) wordt in een terra preta de koolstof tot op grotere diepte opgeslagen dan in andere gronden het geval is. In terra preta kan dit tot op twee meter diepte, waar dit voor de meeste andere gronden slechts 40 tot 50 centimeter is. Een bijkomend voordeel is dat gronden die koolstof opslaan, tegelijkertijd ook stikstof opslaan. Deze stikstof kan dan niet door binding met zuurstofmoleculen als distikstofoxide (N_2O) vrijkomen in de atmosfeer. N_2O is een broeikasgas dat veel sterker bijdraagt tot de opwarming van de aarde dan CO_2 (European Environment Agency). Terra preta reduceert dus niet enkel de concentratie van CO_2 in de atmosfeer, maar ook die van N_2O .

2.2 Terra nova

Wetenschappers ontdekten dat na toevoeging van bepaalde bijproducten uit de productie van bio-energie aan een bodem, deze bodem dezelfde eigenschappen kreeg als terra preta. Op deze manier ontstond het idee van terra nova, een bodem die verbeterd wordt door toepassing van een moderne variant van de technieken waardoor terra preta ontstond (Krull et al., 2008).

Biochar is een voorbeeld van wat black carbon (BC) genoemd wordt. BC is de restfractie die ontstaat na het onvolledig verbranden van biomassa of fossiele brandstoffen (Cheng & Lehmann, 2009). Liang et al. (2010) hebben het over een groot aantal thermisch gewijzigde producten, gaande van gedeeltelijk verkoold koolstofrijk materiaal tot roetdeeltjes. Deze materie komt voor in bodems, waterwegen en oceanen, waar het lange tijd in stabiele vorm aanwezig kan zijn. Nguyen et al. (2008) vermelden een half life van 2 400 tot 13 900 jaar in de afzetting uit de oceaan en 5 000 jaar in sommige bodems. Dit wil zeggen dat de hoeveelheid koolstof die BC bevat pas na 2 400 tot 13 900 jaar in oceanen en na 5 000 jaar in bodems, gehalveerd is.

Biochar kan geproduceerd worden uit vele soorten biomassa. Uit een literatuurstudie blijkt dat men zich bij de huidige onderzoeken naar biochar, voornamelijk bezighoudt met verschillende soorten hout. Zo vermelden Krull et al. (2008) beukenstammen en -schors. Woolf (2008) vermeldt beuk en spar. Uit de literatuur kan ook afgeleid worden dat noten bruikbaar zijn. Woolf (2008) vermeldt basten van hazelnoot en het omhulsel van pindanoten. Ook Krull et al. (2008) vermelden hazelnoot. Woolf (2008) vermeldt tenslotte ook olijfpitten en maïskolven. Dit is allemaal houtachtige biomassa. Deze biomassa bevat een stof, lignine, die omzetting naar char mogelijk maakt (Carleer, 2009). Biochar is een koolstofrijke materie, maar bestaat ook uit andere chemische elementen. De precieze chemische samenstelling van de biochar is onder andere afhankelijk van de gebruikte biomassa. Naast koolstof bevat biochar hoofdzakelijk zuurstof. De hoeveelheid in de biochar aanwezige stikstof is, voor alle hierna opgesomde soorten biomassa, eerder klein. Tabel 1 geeft een overzicht.

Tabel 1: chemische samenstelling van biochar voor verschillende soorten biomassa

bron	biomassa	koolstof	waterstof	zuurstof	stikstof
Cheng en Lehmann (2009)	eik	90,80%	2,20%	6,80%	0,20%
Major, Lehmann, Rondon en Goodale (2009)	snoeisel van mangobomen	71,70%	g.d.	g.d.	0,26%
Glaser, Lehmann en Zech (2002)	zaagsel (afval uit houtbewerking)	59,20%	g.d.	g.d.	g.d.
Krull et al. (2008)	omhulsel hazelnoot	95,60%	1,30%	3,10%	0,00%
Krull et al. (2008)	hout	85,00%	2,80%	12,20%	0,00%
Krull et al. (2008)	steel van katoenplant	72,20%	1,20%	26,60%	0,00%

g.d.: geen gegevens beschikbaar

Biochar kent een aromatische, chemische structuur (Liang et al., 2006). Yperman en Vanderzande (2006) omschrijven een aromatische molecule als een molecule met een cyclisch gedeelte van de mesomere ruimte die $4n + 2$, met $n = 0, 1, 2, \dots$ delocaliseerbare elektronen bevat. Enkele begrippen uit deze definitie zijn eerder technisch en worden hierna verklaard.

Normaal gesproken behoort een elektronenpaar tot één atoom of twee atomen. Bij één atoom heet dit een vrij elektronenpaar, bij twee atomen wordt er gesproken over een bindingselektronenpaar. Bij delocalisatie behoort een vrij elektronenpaar tot meer dan één molecule, of een bindingselektronenpaar tot meer dan twee moleculen. Als gevolg van deze delocalisatie verandert de elektronendichtheid rond een aantal atomen in het molecule. De verandering in elektronendichtheid als gevolg van delocalisatie van elektronen, wordt het mesomeer effect genoemd. Indien mesomere ruimten voorkomen in een ringstructuur spreekt men van cyclische, mesomere ruimten. Om een cyclische, mesomere ruimte te kunnen vormen, moeten alle atomen in de ringstructuur in één vlak liggen. Deze atomen moeten allen sp^2 -gehybridiseerd zijn en een p-orbitaal hebben dat parallel staat met alle andere p-orbitalen in de ring. Aromatische moleculen zijn vrij sterk gestabiliseerd ten opzichte van hun acyclische analogo (Yperman & Vanderzande, 2006).

2.3 Definitie biomassa

Voor de productie van biochar is biomassa nodig. Biomassa wordt in artikel 1 van het besluit van de Vlaamse regering inzake de bevordering van elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen van 5 maart 2004, omschreven als "de 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".

In VLAREM II wordt biomassa gedefinieerd als "producten, bestaande uit plantaardige materialen of delen daarvan van landbouw of bosbouw, die kunnen worden gebruikt om de energie-inhoud terug te winnen, alsmede biomassa-afval".

Biomassa-afval wordt in VLAREM II gedefinieerd als "de volgende als brandstof gebruikte afvalstoffen:

- plantaardig afval van land- en bosbouw;
- plantaardig afval van de levensmiddelenindustrie, indien de opgewekte warmte wordt teruggewonnen;
- vezelachtig afval afkomstig van de productie van ruwe pulp en van de productie van papier uit pulp, dat op de plaats van productie wordt meeverbrand en waarvan de vrijgekomen energie wordt teruggewonnen;
- kurkafval;
- houtafval, met uitzondering van houtmateriaal dat als gevolg van een behandeling met houtbeschermingsmiddelen of van het aanbrengen van een beschermingslaag, gehalogeneerde organische verbindingen dan wel zware metalen kan bevatten, met inbegrip van met name dergelijk houtafval dat afkomstig is van constructie- en sloopafval."

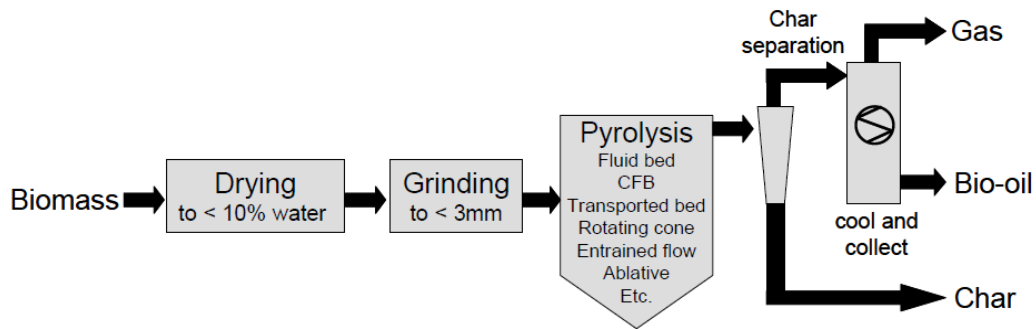
3 Hoe wordt biochar geproduceerd?

3.1 De productietechniek

Een eerste bron van biochar is afval van de steenkoolindustrie. In 2002 werd er wereldwijd 41 miljoen ton steenkool geproduceerd, waarvan 40 miljoen ton in ontwikkelingslanden. Tijdens de productie van steenkool ontstaat altijd een bepaalde hoeveelheid afval, die niet als brandstof verkocht kan worden (Lehmann & Rondon, 2006). Cheng, Lehmann en Engelhard (2008a) vergelijken de vruchtbaarheid van bodems waar in het verleden steenkoolafval aan werd toegevoegd, met de vruchtbaarheid van bodems waarbij dit niet het geval is. Uit hun conclusies blijkt dat de bodemverbeterende kwaliteiten van biochar, ook toegeschreven kunnen worden aan afval van de steenkoolindustrie. Toevoeging van steenkoolafval aan de bodem zorgt echter niet voor een netto reductie van CO₂, aangezien het afval sowieso zou accumuleren, of het nu aan de bodem wordt toegevoegd of niet (Lehmann, Gaunt & Rondon, 2006).

Een andere bron van biochar is de pyrolyse van biomassa om bio-energie te produceren, waarbij biochar als bijproduct gevormd wordt (Lehmann & Rondon, 2006). Pyrolyse is thermische ontleding in de afwezigheid van zuurstof (Boukris, Grammelis, Bezergianni & Bridgwater, 2007a). Bij de pyrolyse van biomassa ontstaat een condenseerbare fractie, bestaande uit water en olie, een niet-condenseerbare fractie (gas) en pyrolysecokes. Deze pyrolysecokes (char) kunnen gebruikt worden als biochar (Lehmann, 2007a). Vooraleer men biomassa kan pyrolyseren, moet deze eerst gedroogd worden, vandaar dat in het verdere verloop van deze masterproef over droge stof gesproken zal worden. Bridgwater (2006) en Bridgwater (2003) spreken van een maximaal vochtgehalte van 10%. Een lager vochtgehalte van maximaal 7% is echter te verkiezen (Bridgwater, Toft & Brammer, 2002). De biomassa wordt ook verkleind om een goede pyrolysereactie te bekomen (Bridgwater, 2006).

Er bestaan verschillende soorten pyrolyse, waarbij de opbrengst van de 3 fracties verschilt. Bij snelle pyrolyse wordt de biomassa in één of twee seconden verhit tot temperaturen tussen 350 °C en 500 °C. Hierdoor wordt er meer bio-olie geproduceerd en minder char en gas (Krull et al., 2008). De biomassadeeltjes moeten snel op de juiste temperatuur gebracht worden om de olieopbrengst te maximaliseren. Eén manier om dit te bekomen is de biomassadeeltjes te verkleinen tot een grootte van slechts enkele millimeters. Een andere manier is om de warmte enkel snel naar de oppervlakte van het biomassadeeltje over te brengen door contact met de warmtebron, zoals dit bij ablatieve pyrolyse gebeurt.



Figuur 3: schematische voorstelling van een snel pyrolyseproces. Bron: Krull et al., 2008

Bij trage pyrolyse wordt de biomassa traag verhit tot temperaturen tussen 450 °C en 650 °C. De biomassa blijft langere tijd in de reactor, meer dan vijf seconden, maar dit kan oplopen tot minuten of uren. Op deze manier wordt er meer char geproduceerd, maar minder gas en bio-olie (Krull et al., 2008). Onderstaande tabel geeft weer wat de opbrengst van de drie fracties is bij verschillende soorten pyrolyse. Hieruit blijkt dat trage pyrolyse doorgaans bij lagere temperaturen plaatsvindt dan snelle pyrolyse.

Tabel 2: opbrengst van de drie geproduceerde fracties bij de verschillende types pyrolyse

type	eigenschappen	Liquid (%)	Char (%)	Gas (%)
snelle pyrolyse	gemiddelde temperatuur (± 500 °C), korte verblijftijd (± 1 s)	75	12	13
gewone pyrolyse	gemiddelde temperatuur (± 500 °C), gemiddelde verblijftijd (± 10 à 20 s)	50	20	30
trage pyrolyse	lage temperatuur (± 400 °C), lange verblijftijd	30	35	35
gasificatie	hoge temperatuur (± 800 °C), lange verblijftijd	5	10	85

Bron: Bridgwater (2006), Krull et al. (2008), Bridgwater (2003)

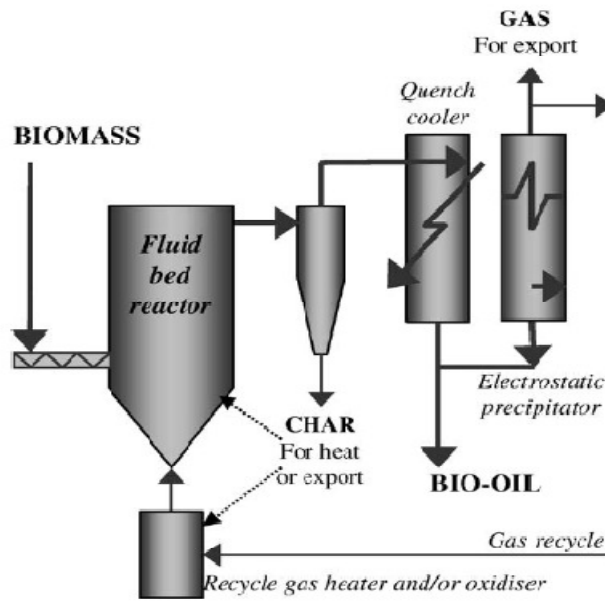
De resultaten in bovenstaande tabel worden niet door alle onderzoekers gehaald. Zo voerden Boukis, Grammelis, Bezergianni en Bridgwater (2007b) een onderzoek uit naar de optimale pyrolysecondities voor maximale olieopbrengst. Er werd gebruik gemaakt van snelle pyrolyse. Dit leverde in hun experiment slechts 61,5% olie op. In deze paper werd een vergelijking gemaakt tussen verschillende technieken voor snelle pyrolyse. De olieopbrengsten van deze technieken varieerden tussen 40 en 78%. Een mindere olieopbrengst leidde in deze gevallen tot een verhoogde charopbrengst.

Laird et al. (2009) vermelden een charopbrengst van 10-30%, een olieopbrengst van 50-70% en een gasopbrengst van 15-20% bij snelle pyrolyse. Trage pyrolyse van biomassa levert volgens hen 35% biochar, 30% bio-olie en 35% gas op. Voor het uitvoeren van de economische analyse zal uitgegaan worden van een bio-olieopbrengst van 70% en een charopbrengst van 12% bij snelle pyrolyse en een opbrengst van 30% bio-olie en 35% char bij trage pyrolyse.

Op basis van deze informatie kan geconcludeerd worden dat als men de opbrengst aan vaste fractie wil maximaliseren, men best gebruik maakt van trage pyrolyse. Dit zou tot gevolg hebben dat de opbrengst van de andere fracties, dus ook de condenseerbare, zou verlagen. Deze condenseerbare fractie bestaat onder andere uit olie die als biobrandstof verkocht kan worden. Toch is het vanuit economisch standpunt aan te raden om te kiezen voor snelle pyrolyse (Kuppens, 2009). Het vermoeden bestaat dat de pyrolyse-olie een hogere marktwaarde heeft dan de biochar. Het is echter wel mogelijk dat de waarde van pyrolysechar als grondstof voor actieve kool voldoende hoog ligt om trage pyrolyse aantrekkelijker te maken dan snelle pyrolyse. Voor de analyse in deze masterproef zal uitgegaan worden van de snelle pyrolyse van biomassa.

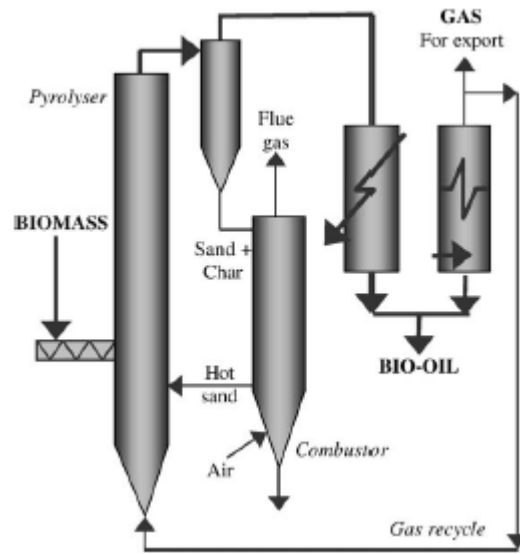
Er bestaan verschillende types pyrolysereactors, waarvan sommige meer geschikt zijn voor snelle en andere meer geschikt zijn voor trage pyrolyse. Enkelen worden hier opgesomd.

Het stationair wervelbed (bubbling fluid bed reactor) levert hoge olieopbrengsten op. Ongeveer 70 tot 75% van de gedroogde biomassa wordt omgezet tot bio-olie (Bridgwater A, 2003). Om een maximale olieopbrengst te bekomen, is het belangrijk de biomassadeeltjes snel op de gewenste temperatuur te brengen. Gebeurt deze verhitting langzamer, dan wordt er meer char en minder olie gevormd (Bridgwater, 2003). De temperatuur in het stationair wervelbed kan goed gecontroleerd worden en er is een zeer efficiënte warmtetransfer naar de biomassa deeltjes. Deze eigenschappen van het stationair wervelbed maken het tot een goede reactor voor snelle pyrolyse (Bridgwater, 2006). In het wervelbed wordt de biomassa aan één kant van de reactor ingebracht. Het gas dat gebruikt wordt om de biomassadeeltjes om te zetten tot bio-olie, gas en char, wordt aan de andere kant van de reactor ingebracht (Fahmi, Bridgwater, Donnison, Yates & Jones, 2008). De verblijftijd van de char in de reactor is groter dan de verblijftijd van de condenseerbare en niet-condenseerbare gassen (IEA). De biomassadeeltjes die in de reactor ingebracht worden, mogen niet groter zijn dan twee tot drie millimeter. Zouden de biomassadeeltjes groter zijn, dan kan de geproduceerde char uit te grote deeltjes bestaan. De char kan dan niet goed uit de bio-olie verwijderd worden. De geproduceerde char kan gebruikt worden om het proces van de nodige energie te voorzien of kan opgevangen worden om te gebruiken als, bijvoorbeeld, biochar (Bridgwater, 2006).



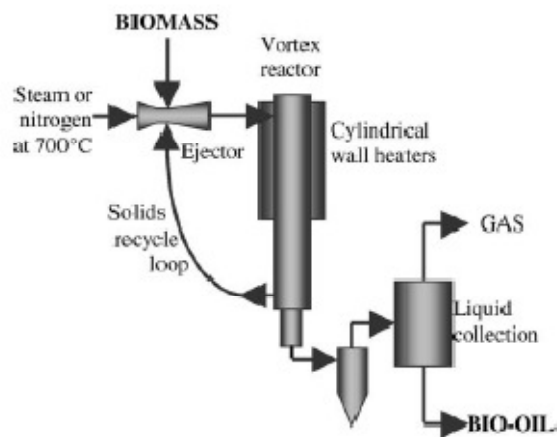
Figuur 4: stationair wervelbed. Bron: Bridgwater, 2003

Het circulerend wervelbed (circulating fluid bed) heeft eigenschappen vergelijkbaar met deze van het stationair wervelbed (Bridgwater, 2003). Een eerste verschilpunt is te vinden in de verblijftijd van de char, die bij het circulerend wervelbed ongeveer even lang is als de verblijftijd van de condenseerbare en niet-condenseerbare gassen (IEA). In het circulerend wervelbed wordt de geproduceerde char, ten minste gedeeltelijk, ingebracht in de bodem van het bed. De temperatuur in het wervelbed kan op een constant niveau gehouden worden door de snelle circulatie van char, die op hoge temperatuur gehouden wordt (Hastaoglu & Hassam, 1995).



Figuur 5: circulerend wervelbed. Bron: Bridgwater, 2003

De reactor gebruikt in het ablatieve pyrolyseproces, verschilt van de andere reactortypen in de manier van warmteoverdracht. Bij ablatieve pyrolyse wordt de warmte via de wand van de reactor overgebracht op de biomassadeeltjes. De biomassadeeltjes worden hard tegen de wand van de reactor geduwd door centrifugale krachten, waardoor de warmteoverdracht kan plaatsvinden. Hierdoor kunnen veel grotere biomassadeeltjes verwerkt worden. De temperatuur van de reactorwand is altijd lager dan 600 °C (Bridgwater, 2006).



Figuur 6: ablatieve pyrolyse reactor. Bron: Bridgwater, 2003

Vacuümpyrolyse is geen echt snel pyrolyseproces. De biomassadeeltjes blijven veel langer in de reactor dan bij de bovenvermelde reactors het geval is. Toch levert pyrolyse in deze reactor meer bio-olie op dan bij trage pyrolysereactors het geval is. Doorgaans is dit 35 tot 50% van de droge biomassa. Het proces is mechanisch vrij complex (Bridgwater, 2003).

3.2 Potentieel in Vlaanderen

Indien men voor de productie van biomassa voor pyrolyse land zou gebruiken dat tot op dat moment gebruikt werd voor voedselproductie, dan moedigt men het vrijmaken van nieuw landbouwgebied elders in de wereld aan. Searchinger et al. verwoorden dit in Laird et al. (2009) als volgt: voor elke hectare landbouwgrond in Iowa die wordt omgezet van voedselproductie naar bio-energieproductie, zal ergens in Brazilië een hectare regenwoud worden weggekapt om er landbouwgrond voor voedselproductie van te maken. De hoeveelheid CO₂ die vrijkomt door dit weggakken van regenwoud is veel groter dan de hoeveelheid CO₂ die uit de atmosfeer verwijderd zou worden na productie en sequestratie van biochar uit de biomassa van de hectare uit Iowa. Om deze reden wordt door deze auteurs aangeraden biochar te produceren uit afvalstromen. In de literatuur werden reeds beukenschors (Krull et al., 2008), notenafval (Krull et al., 2008 en Woolf, 2008) en olijfpitten en maïskolven (Woolf, 2008) aangehaald.

Een bijkomend argument voor het gebruik van afvalstromen, is het economische voordeel dat dit oplevert. Bronnen van biomassa die nood hebben aan management van afvalstromen, zoals landbouwafval, hebben het grootste economische winstpotentieel (Roberts, Gloy, Joseph, Scott & Lehmann, 2010). Volgens Glaser et al. (2002) zou de productie van biochar enkel economisch voordeel opleveren indien hiervoor afval gebruikt wordt. Als voorbeeld geven zij kaphout, dat altijd meer zal opleveren indien het als constructiemateriaal of brandhout gebruikt wordt, dan als er biochar van gemaakt wordt. Om deze redenen zal onderzocht worden welke de potentieel bruikbare afvalstromen in Vlaanderen zijn.

De zoektocht naar notenafval werd zo ruim mogelijk aangepakt. Zo werden niet enkel bedrijven gecontacteerd die noten invoeren, eventueel verwerken en verkopen aan de kleinhandel, maar ook producenten van koekjes en chocolade waarin noten verwerkt worden. Uit deze contacten bleek dat er niet veel notenafval voorhanden is in België en Nederland. Zo voert Horizon Natuurvoeding gepelde noten in (de Bruijn, 2009). Deze noten worden meestal in de landen van herkomst gepeld, m.a.w. van hun bast ontdaan, waarna ze worden geëxporteerd. In De pindabrandery wordt jaarlijks 500 à 600 kg notenafval geproduceerd. Dit is een kleine hoeveelheid ten opzichte van hun totale notenverbruik (Boontjes, 2009).

Bij de productie van chocolade wordt gebruik gemaakt van notenpasta's in plaats van zuivere noten (Bilaey, 2009). Bij Horizon Natuurvoeding maakt men onder andere dit soort notenpasta's. Zoals reeds eerder vermeld werd, houden zij geen notenafval over na de productie. In België wordt tegenwoordig het grootste deel van het notenafval ingezameld voor oliepersing (Geens, 2009). Het relatief weinige notenafval dat in België en buurlanden voorhanden is, wordt al op een nuttige manier verwerkt, waardoor notenafval gebruiken in het pyrolyseproces geen optie lijkt in Vlaanderen.

Er kan beter geen gebruik gemaakt worden van maïs, omdat dit makkelijk te fermenteren is. Deze techniek zou altijd economisch interessanter zijn dan pyrolyse, vandaar dat deze piste niet verder onderzocht werd (Carleer, Vangronsveld & Yperman, 2009).

Electrabel maakt in zijn centrale in Langerlo gebruik van olijfpitten en -pulp voor meeverbranding in de elektriciteitscentrale. Op 7 oktober 2009 werd er door Electrabel een infonamiddag georganiseerd. Tijdens deze infonamiddag werd verteld dat de laatste maanden er meer en meer olijfpulp wordt ingevoerd in plaats van olijfpitten. Dit omdat deze pitten andere nuttige toepassingen kennen, onder meer in carbonfilters. Bovendien worden deze olijven ingevoerd uit Portugal, Spanje, Tunesië en Egypte. Dit zou door de afstand tot de pyrolyse-installatie een weinig zinvol transport zijn, aangezien de bedoeling van productie van biochar is om de hoeveelheid CO₂ in de lucht te verminderen. Dit werd ook aangehaald door Carleer et al. (2009).

Vanuit wetenschappelijk oogpunt kan een pyrolyse-installatie enkel nuttig geplaatst worden op een plaats waar grondstof voor het proces aanwezig is, zeker wanneer het de bedoeling is milieuontlastende producten te bekomen (Carleer et al., 2009).

In Vlaanderen is gebruik maken van de organische fractie van huishoudelijk afval een optie. Bij Bio-oil Tessenderlo produceert men bio-olie door de pyrolyse van solid recovered fuel (SRF). Huishoudelijk afval wordt in België opgehaald in de grijze huisvuilzak. De inhoud van deze zakken wordt in een huisvuilscheidingsbedrijf gescheiden in functie van het type afval. Zo wordt ijzer, plastic en dergelijke verwijderd, waarna een residu overblijft. Dit residu, het SRF, bestaat uit het niet aan een specifieke stroom toekenbare of onscheidbare afval uit de huisvuilzak. De precieze samenstelling van dit SRF is echter moeilijk vast te stellen (Cornelissen, 2009). Aangezien het net de samenstelling van de grondstof voor pyrolyse is die de hoeveelheid en kwaliteit van de char bepalen, wordt voor deze analyse geen gebruik gemaakt van de organische fractie van huisvuil.

Een andere afvalbron is deze van het GFT-afval. GFT-afval wordt momenteel gecomposteerd of vergist. Door vergisting van GFT-afval wordt biogas en een digestaat geproduceerd. Dit digestaat kan nadien verwerkt worden tot compost van hoge kwaliteit. Voor het composteren van GFT-afval is elektriciteit nodig, terwijl bij het vergisten van GFT-afval een netto elektriciteitsbesparing optreedt. Het geproduceerde biogas kan gebruikt worden om te voorzien in de energiebehoefte van het composteringsproces, waarna nog biogas overblijft dat als milieuvriendelijke energievorm aangewend kan worden (Brinkmann). Ingezameld GFT-afval bevat 60% vocht (Senternovem, 2007). Dit vochtgehalte verlagen tot de 10% die de biomassa maximaal mag bevatten om voor pyrolyse bruikbaar te zijn, zou de kosten voor droging van biomassa enorm de hoogte in duwen. Bovendien kan, net zoals bij de organische fractie van huishoudelijk afval het geval was, niet vastgesteld worden wat de precieze samenstelling zou zijn van char geproduceerd uit GFT-afval.

Om deze redenen wordt bij deze analyse vertrokken van korteomloophout dat aangeplant wordt om er door middel van pyrolyse bio-olie en biochar van te maken.

3.3 Korteomloophout

De term korteomloophout wordt gebruikt voor houtsoorten die elke drie tot vijf jaar geoogst worden waarbij de plantage een levensduur heeft van 20 tot 25 jaar. Korteomloopbossen worden aangeplant met wilg of populier. In de conventionele bosbouw wordt er slechts om de 15 jaar geoogst en sommige van deze plantages gaan tot 120 jaar mee (Garcia, Mathijs, Nevens & Reheul, 2003).

Korteomloophout wordt in artikel 4 van het bosdecreet van 13 juni 1990 omschreven als "de 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". Artikel 3 van het bosdecreet vermeldt uitdrukkelijk dat de korteomloophoutteelt waarvan de aanplant plaatsgevonden heeft op gronden die op dat ogenblik gelegen zijn buiten de ruimtelijk kwetsbare gebieden, niet onder de voorschriften van dit decreet vallen.

De term ruimtelijk kwetsbare gebieden wordt gedefinieerd in de Vlaamse Codex Ruimtelijke Ordening. Ruimtelijk kwetsbare gebieden worden hierin omschreven als:

- "agrarische gebieden met ecologisch belang of ecologische waarde, bosgebieden, brongebieden, groengebieden, natuurgebieden met of zonder wetenschappelijke waarde, natuurontwikkelingsgebieden, natuurreservaten, overstromingsgebieden, parkgebieden en valleigebieden aangewezen op plannen van aanleg;
- gebieden, aangewezen op ruimtelijke uitvoeringsplannen, en behorend tot één van volgende categorieën of subcategorieën: bos, parkgebied of reservaat en natuur;
- het Vlaams ecologisch netwerk, bestaande uit de gebiedscategorieën Grote Eenheden Natuur en Grote Eenheden Natuur in Ontwikkeling, vermeld in het decreet van 21 oktober 1997 betreffende het natuurbehoud en het natuurlijk milieu;
- de beschermde duingebieden en de voor het duingebied belangrijke landbouwgebieden, aangeduid krachtens artikel 52, § 1, van de wet van 12 juli 1973 op het natuurbehoud."

De aanleg van een korteomloophoutplantage in gewone agrarische gebieden, wordt sinds de wijziging in het bosdecreet niet langer als bos beschouwd, op voorwaarde dat er maximaal 8 jaar na aanplanting of vorige oogst wordt geoogst (De Somviele, Meiresonne & Verdonckt, 2009).

Dit heeft belangrijke implicaties voor de landbouwer die overweegt korteomloophout aan te planten. Voor de wijziging in het bosdecreet was ontbossen van een gebied aangeplant met korteomloophout verboden, tenzij dit toegestaan werd door de bepalingen in het bosdecreet. Bossen mogen niet bemest worden en er mogen geen bestrijdingsmiddelen gebruikt worden. Sinds de wijziging in het bosdecreet, wordt korteomloophout als een gewoon landbouwgewas beschouwd. Reconversie naar een klassiek landbouwgewas is mogelijk, zonder dat de landbouwer gebonden is aan de compensatieplicht. Deze compensatieplicht geldt, volgens artikel 81 van het bosdecreet, voor de kapping van privébossen en stelt dat elke kapping in een privébos gevolgd moet worden door herstelmaatregelen, zoals herbebossing van het gekapte gebied of bebossing van percelen met een gelijkwaardige oppervlakte. Bemesting en gebruik van bestrijdingsmiddelen zijn toegestaan bij de teelt van een landbouwgewas (INBO, 2007).

Garcia et al. (2003) vergeleken de opbrengst in ton droge stof per hectare en de energieopbrengst van wilg en populier. De netto bruikbare energie wordt berekend door de energie die gebruikt wordt voor de teelt, het vervoer naar de verwerkingseenheid en het transformeren van de in de biomassa opgeslagen energie tot een energievorm die voor de mens bruikbaar is, af te trekken van de energie die het korte omloophout oplevert.

Voor wilg is de netto bruikbare energie gemiddeld 122-128 GJ/ha. Voor populier is dit gemiddeld 115-121 GJ/ha. Alvorens biomassa gepyrolyseerd kan worden, moet dit gedroogd worden. Droging en opslag op het veld is de goedkoopste manier. Bij velddroging van wilg gaat wel 4% van de droge stof verloren, terwijl dit bij populier echter 13% is. Op basis van deze gegevens wordt geconcludeerd dat gebruik van wilg de meeste voordelen oplevert. Bij de uitvoering van de economische analyse zal uitgegaan worden van een aanplant met wilg.

Tabel 3: verdeling populierenareaal in Vlaanderen per provincie

provincie	% van totale bosoppervlakte	aantal ha
Antwerpen	7,8	4 000
Vlaams-Brabant	22,2	6 000
West-Vlaanderen	10,6	750
Oost-Vlaanderen	29,4	5 500
Limburg	10,4	5 500

Bron: Meiresonne, 2006

Meiresonne (2006) geeft een overzicht van het populierenareaal in Vlaanderen. België heeft ongeveer 35 000 ha populierenbossen, waarvan 21 750 ha in Vlaanderen. Dit is 14% van de totale bosoppervlakte in Vlaanderen. De Belgische populierenbossen leveren jaarlijks 537 000 m³ hout. Dit onderzoek geeft geen informatie over wilgenbossen. Vermits het in dit onderzoek gaat over populieren in bosgebieden en niet over kortoomloophout, geeft dit geen indicatie van de haalbaarheid van productie van biochar uit kortoomloophout.

De teelt van energiegewassen kon tot en met 2009 rekenen op een Europese subsidie met een maximum van 45 EUR/ha. In 2007 bedroeg deze premie slechts 31,65 EUR/ha, omdat het aantal ingediende aanvragen het quotum van 2 000 000 ha overschreed. In 2010 zal de premie voor energiegewassen verdwijnen (Enerpedia). De invoering van deze premie leidde niet tot aanplanting van vele hectaren kortoomloophout, zoals blijkt uit cijfers van Neels (2010). Sinds 2009 komen energieteelten, waartoe ook de teelt van kortoomloophout behoort, in aanmerking om toeslagrechten te activeren (Campens, 2009).

Tabel 4: oppervlakte met kortoomloophout beplante landbouwgrond in Vlaanderen op basis van aangevraagde subsidies (in ha)

	2006	2007	2008	2009
cultuurpopulier	6,11	0,00	5,46	3,94
ratelpopulier	0,00	0,00	0,06	0,00
wilg	0,65	0,00	0,00	0,00

Bron: Neels, 2010

Tegen 2010 zou 100 ha korteomloophout aangeplant moeten zijn in Vlaanderen, als bijdrage aan de realisatie van de Vlaamse hernieuwbare energiedoelstelling (Vlaams klimaatbeleidsplan, 2006).

Tegen 2010 zou 6% van het bruto binnenlands elektriciteitsgebruik opgewekt moeten worden door middel van hernieuwbare energiebronnen. In 2007 maakte groene stroom 2,7% uit van het bruto elektriciteitsgebruik in Vlaanderen. Dit was een stijging met 15% ten opzichte van 2006. Deze stijging was vooral te danken aan de stijgende groenestroomproductie door middel van biomassa, biogas en windturbines. Verwacht wordt dat dit aandeel nog zal stijgen door ingebruikname van grote biomassaprojecten en windparken (MIRA, 2007b).

Vlaanderen kent momenteel geen grote aanplantingen met korteomloophout. De meeste aanplantingen zijn bedoeld voor kleinschalige projecten. Zo verwarmt de stad Doornik zijn stedelijk zwembad met een warmtekrachtkoppeling-vergassingsinstallatie die onder meer korteomloophout verbruikt. Hiervoor werd reeds in 2006 25 ha korteomloophout aangeplant in de directe nabijheid van de stad (project Gazenbois, 2009). Oogstdemonstraties vonden in 2009 plaats in Rijckevelde bij Brugge en in Lommel.

4. Aanwending van de char

4.1 Gebruik als bodemverbeteraar

Terra preta gronden werden al door vele auteurs beschreven. De vruchtbaarheid van deze gronden werd onder meer door Liang et al. (2008) onderzocht. De resultaten van hun onderzoek wijzen op een hogere pH-waarde en een hoger nutriëntengehalte in terra preta dan in omliggende gronden.

Tabel 5: samenstelling terra preta en omliggende grond

site	pH	organische koolstof (mg/g)	stikstof (mg/g)
Hatahara terra preta	6,4	22,0	1,0
Hatahara omliggende grond	4,6	21,8	1,6
Lago Grande terra preta	5,9	31,5	1,8
Lago Grande omliggende grond	4,2	17,5	1,3
Açutuba terra preta	5,6	15,7	1,0
Açutuba omliggende grond	4,7	15,4	0,8
Dona Stella terra preta	5,0	16,5	1,1
Dona Stella omliggende grond	3,9	10,2	0,4

Bron: Liang et al., 2008

In de studie van Liang et al. (2008) werden de omliggende gronden geselecteerd op maximaal kleurverschil met de terra preta. Dit zijn typische bleke gronden zonder zichtbare tekenen van menselijke bewerking. Enkel in de streek Hatahara werd minder organische koolstof en stikstof in de terra preta teruggevonden. Dit laatste zal eerder een gevolg zijn van de specifieke steekproefselectie dan van een werkelijk verschil tussen terra preta en de omliggende grond.

Gronden in de tropen kennen mogelijk een te verschillende samenstelling ten opzichte van Vlaamse gronden om een goede vergelijking tussen beide mogelijk te maken. Er werden echter ook gronden uit Canada en de Verenigde Staten onderzocht. Cheng, Lehmann, Thies en Burton (2008b) vergeleken gronden waarop in het verleden houtskoolovens stonden met omliggende gronden.

De houtskool, gebruikt in deze ovens, werd geproduceerd uit verschillende soorten hout, waardoor de restanten van deze houtskool die in de grond terechtkwamen, vergeleken kunnen worden met toevoeging van biochar, geproduceerd na pyrolyse van hout, aan de bodem.

De resultaten van de studie van Cheng et al. (2008b) wijzen er op dat de gronden waarop in het verleden houtskoolovens stonden een grotere concentratie organische koolstof kenden dan de omliggende gronden. Het effect van de grotere concentratie organische koolstof op de bodemvruchtbaarheid of de plantengroei werd door Cheng et al. (2008b) niet onderzocht.

Sinds eind jaren '90 is er een daling in het aandeel organische koolstof in de Vlaamse bodems. Deze achteruitgang is nadelig, omdat deze gepaard gaat met opbrengstverliezen. Als een bodem minder organische koolstof bevat, zal deze minder stikstof vasthouden, wat leidt tot lagere opbrengsten (Dossier koolstof, 2008), doordat het stikstof in de bodem afvloeit als er minder koolstof in een bodem aanwezig is (Ruysschaert, 2010). Een lager organisch koolstofgehalte leidt ook tot een kleinere bodembiodiversiteit, omdat er minder voedsel voorradig is voor in de bodem levende organismen. Bovendien vermindert de infiltratiecapaciteit van de bodem, wat kan leiden tot bodemerosie. Bodemerosie heeft dan weer tot gevolg dat de bovenste, vruchtbare grondlaag wegspoelt (Sustainable agriculture and soil conservation, 2009). De geproduceerde biochar kent een vrij hoog koolstofgehalte en is afkomstig van organisch materiaal. Toevoeging van deze biochar aan de bodem, kan het koolstofgehalte ervan terug op niveau brengen. Het is echter noodzakelijk een onderscheid te maken tussen organische koolstof afkomstig van verrotte of verbrande plantenresten en biochar. Biochar zal veel langer op een stabiele manier bewaard blijven. Bijgevolg is het mogelijk dat de stikstof, door biochar vastgelegd, langer wordt vastgehouden dan stikstof vastgelegd door andere vormen van organische koolstof. Het vasthouden van stikstof zorgt ervoor dat deze niet meer ter beschikking is voor planten. Door het oxideren van organische koolstof, dus het binden van koolstof met zuurstof tot CO₂, komt de vastgelegde stikstof terug vrij in de bodem, waarna deze door de plantenwortels opgenomen kan worden. De aanwezigheid van organische koolstof, afkomstig van verrotte of verbrande plantenresten in een Vlaamse bodem is noodzakelijk om de bodem vruchtbaar te houden. Het is echter niet zeker of de aanwezigheid van de stabiele koolstof uit biochar hetzelfde effect zal hebben. (Ruysschaert, 2010).

Toevoeging van zuurstof aan de bodem, voornamelijk door grondbewerking, is een oorzaak van het verlaagde koolstofgehalte. De verrotting van organische stof zal sneller verlopen en bijgevolg is er minder organische koolstof in de bodem aanwezig (Sustainable agriculture and soil conservation, 2009). De geproduceerde biochar bevat 122 gram zuurstof per kilo (Krull et al., 2008). Dit is een veel kleinere hoeveelheid dan de hoeveelheid toegevoegde koolstof en zal niet bijdragen tot een vermindering van het gehalte aan organische koolstof in de bodem.

Tabel 6: chemische samenstelling char

samenstelling char	%
koolstof	85,0
waterstof	2,8
stikstof	<1,0
zuurstof	12,2

Bron: Krull et al., 2008

Laird et al. (2009) geven aan dat toevoeging van biochar zorgt voor een beter vasthouden van nutriënten in de bodem. Zo blijft er meer stikstof en fosfor in de bodem. Er is ook meer organische koolstof aanwezig in gronden met toegevoegde biochar dan in andere gronden. Er is een grotere cation exchange capacity (CEC) en een hogere pH in bodems als gevolg van de toevoeging van biochar. Dit onderzoek vond echter plaats in tropisch gebied, waarvan de gronden mogelijk niet vergelijkbaar zijn met Vlaamse gronden.

De CEC is een waarde die de capaciteit van een grond om nutriënten uit te wisselen met de plantenwortels, weergeeft. De CEC is afhankelijk van de hoeveelheid klei of humus die in een bodem aanwezig is. Zandige gronden die een kleine hoeveelheid organisch materiaal bevatten, hebben een lage CEC. Zware kleigronden die grote hoeveelheden organisch materiaal bevatten, hebben een hogere CEC. Een grond met een lage CEC wordt gekenmerkt door een lagere beschikbaarheid van nutriënten voor de planten die op deze grond groeien. Het is erg moeilijk om de CEC van een bodem te verhogen (microsoil). Toevoeging van biochar aan de bodem verhoogt de CEC echter wel.

Een te lage pH leidt tot een gebrek aan bepaalde nutriënten, bijvoorbeeld ijzer, zink, koper, boor en mangaan, in de bodem. Een gevolg hiervan is dat de humuswaarden zeer snel zakken, vooral in uitspoelbare bodems zoals zandbodems. Een te hoge pH kent echter ook zijn nadelen. Zo kunnen er tekorten zijn van magnesium en fosfor en uitspoeling van kalium. Veel hangt af van de natuurlijke pH van een bodemtype. Zandbodems hebben een hogere pH (zijn dus meer base) dan lemige bodems, die meer zuur zijn. Echte uitschieters zijn kalkgronden die uitgesproken base zijn en zeer humusrijke of venige bodems, die uitgesproken zuur zijn (tuinadvies.be).

Glaser et al. (2002) melden verder dat gronden verrijkt met biochar, water beter vasthouden. Dit water is beter beschikbaar voor planten die op deze gronden aangeplant worden. Het is niet de biochar zelf die de bodem vruchtbaarder maakt. Toevoeging van biochar aan de bodem verbetert de bodem door een beter ter beschikking stellen van water en door verhoging van de CEC. Extra toevoeging van meststoffen is noodzakelijk wanneer meer nutriënten in een bodem wenselijk zijn (Lehmann et al., 2003).

Lehmann en Rondon (2006) geven aan dat arme, zandige bodems of zure bodems de grootste verbetering kennen na toevoeging van biochar. De sterkte van de bodemverbetering door toevoeging van biochar, hangt verder af van het al dan niet toevoegen van andere organische materialen zoals mest, de plantensoorten die aangeplant worden en de biomassa waaruit de biochar geproduceerd werd.

Woolf (2008) en Lehmann et al. (2006) geven een antwoord op de vraag hoeveel biochar aan een bodem kan toegevoegd worden. Uit onderzoeken blijkt dat gewassen beter groeien bij toevoeging van biochar tot een hoeveelheid die 50 ton koolstof per hectare vertegenwoordigd. Wanneer men meer koolstof aan de bodem toevoegt, zal de groei van vele gewassen vertragen. Dit is uiteraard niet wenselijk, omdat het de bedoeling is de bodem te verbeteren door toevoeging van biochar. Rekening houdend met de chemische samenstelling van de biochar volgens Krull et al. (2008), kan er bijna 59 ton biochar per hectare aan de bodem toegevoegd worden.

4.2 Gebruik als grondstof voor actieve kool

Actieve kool is een vorm van koolstof met een grote, interne oppervlakte. Het wordt meestal gebruikt als filtermateriaal om organische componenten uit water of lucht te verwijderen, door middel van adsorptie (Ioannidou & Zabaniotou, 2007). Bij adsorptie hechten de moleculen van een gas of vloeistof zich aan de oppervlakte van een vloeistof of vaste stof. Adsorptie vindt altijd plaats op het grensvlak van twee fasen, dus vloeistof-gas, vast-vloeistof of gas-vast. Bij actieve kool worden gas- of vloeistofmoleculen gehecht aan het oppervlak van de actieve kool, waar zij een laagje vormen.

De basisstructuur van actieve kool lijkt op deze van grafiet. Een grafietkristal bestaat uit zeshoeken die samengehouden worden door zwakke Vanderwaalskrachten. Deze zeshoeken vormen lagen die samengehouden worden door koolstof-koolstofverbindingen (informatie van actieve koolproducent).

De vraag naar actieve kool is hoog, omdat het zoveel verschillende toepassingsmogelijkheden kent. Verwacht wordt dat deze vraag in de toekomst alleen maar zal stijgen door strenger wordende milieuwetgeving in vele landen. Momenteel wordt voor de productie van actieve kool voornamelijk hout, steenkool of kokosnootschaal gebruikt. Deze grondstoffen zijn echter niet altijd in voldoende mate beschikbaar voor de producenten van actieve kool. In de meeste landen is er wel een grote hoeveelheid biomassa-afval beschikbaar. Dit afval kan goedkoop aangeschaft worden. Indien dit actieve kool van goede kwaliteit zou opleveren, is biomassa-afval een goede, alternatieve grondstof voor de productie van actieve kool (Schröder, Thomauske, Weber, Hornung & Tumiatti, 2007).

De geschiktheid als grondstof voor actieve kool hangt af van een aantal eigenschappen. Zo is een voldoende hoog gehalte aan elementaire koolstof noodzakelijk (Paraskeva, Kalderis & Diamadopoulos, 2008). De grondstof mag ook geen ziektekiemen, asbest, radioactieve producten, zware metalen en explosieve stoffen bevatten (informatie van actieve koolproducent).

De productie van actieve kool kent drie grote stappen: dehydratatie, carbonisatie en ten slotte activatie. Dehydratatie houdt in dat al het water verwijderd wordt uit de grondstof voor actieve kool. Bij carbonisatie wordt de grondstof omgezet naar elementaire koolstof. De niet-koolstof elementen in de grondstof worden verwijderd (informatie van actieve koolproducent). Dit gebeurt bij temperaturen tot 800 °C en in de afwezigheid van zuurstof, bijvoorbeeld door de grondstof te pyrolyseren (Ioannidou & Zabaniotou, 2007). Tenslotte wordt deze koolstof geactiveerd, door het aantal aanwezige poriën waarlangs chemische stoffen kunnen geadsorbeerd worden, te vergroten (informatie van actieve koolproducent).

Er kunnen twee vormen van activatie onderscheiden worden, fysische en chemische activatie. Fysische activatie vindt plaats bij hogere temperaturen dan chemische activatie. Bij fysische activatie gebruikt men meestal CO₂ als activatiegas omdat dit een zuiver en makkelijk te gebruiken gas is. Het activatieproces kan goed gecontroleerd worden, omdat CO₂ een trage reactie kent bij een temperatuur van ongeveer 800 °C. Er kan ook gebruik gemaakt worden van stoom of lucht of een combinatie hiervan (Ioannidou & Zabaniotou, 2007).

Het chemische activatieproces maakt gebruik van chemicaliën. De koolstofrijke grondstof wordt met deze chemicaliën doordrenkt voordat overgegaan wordt tot carbonisatie en activatie. Hiervoor wordt de koolstofrijke grondstof in een tank met chemicaliën geplaatst en verblijft hier soms tot 24 uur (Paraskeva et al., 2008). De carbonisatie en activatie van de grondstof kan in één stap gebeuren (Ioannidou & Zabaniotou, 2007 en Mui, Ko & McKay, 2004). Een tweestapsproces, waarbij de grondstof eerst gecarboniseerd en vervolgens geactiveerd wordt, is echter ook mogelijk (Ng, Marshall, Rao, Bansode & Losso, 2003).

Volgens Ioannidou en Zabaniotou (2007) kent actieve kool na chemische activatie een betere poriestructuur. De poriestructuur van actieve kool na chemische activatie is echter afhankelijk van vele factoren. Zo verbetert de poriestructuur bij gebruik van kaliumhydroxide (KOH) als reagens bij chemische activatie als de carbonisatietemperatuur stijgt, terwijl verbetering van de poriestructuur bij gebruik van zinkchloride (ZnCl₂) optreedt bij een daling van de carbonisatietemperatuur (Ahmadpour & Do, 1996).

Schröder et al. (2007) en Ng et al (2003) maakten gebruik van een pyrolyseproces voor de carbonisatie van de koolstofrijke grondstof. De pyrolysechar kan gebruikt worden als grondstof voor actieve kool. Aangezien de benaming biochar enkel van toepassing is op pyrolysechar die aan een bodem toegevoegd wordt, zal in het verder verloop van deze masterproef met de term biochar verwezen worden naar gebruik van pyrolysechar als bodemverbeteraar. Wordt de pyrolysechar gebruikt als grondstof voor actieve kool dan wordt de benaming actieve kool gebruikt. De char en bio-olie waarnaar in het verdere verloop van deze masterproef verwezen wordt, zijn deze afkomstig van de pyrolyse van biomassa.

5 De netto contante waardemethode

De netto contante waardemethode (NCW-methode) kan gebruikt worden om te bepalen of een investering rendabel is. Belangrijk om weten is dat geld een tijdswaarde heeft. Een euro die men nu in het bezit heeft, is meer waard dan een euro die men pas later zal ontvangen. De belangrijkste reden hiervoor is, dat de euro die men nu in het bezit heeft, belegd kan worden. Dit levert interestinkomsten op. Een euro die n jaar belegd wordt, is na n jaar aangegroeid tot $(1+r)^n$ euro, waarbij r gelijk is aan de intrestvoet. Als een investering per geïnvesteerde euro minder dan r opbrengt, kan men beter beslissen elke euro te beleggen tegen de intrestvoet r, dan deze te investeren in het project. Omgekeerd geldt ook dat elke euro die pas op het einde van jaar n ontvangen wordt, verdisconteerd wordt door deze te delen door de factor $(1+r)^n$. Een bedrag X_n dat men verwacht te ontvangen op het einde van jaar n, heeft een huidige waarde X_0 van:

$$X_0 = X_n / [(1+r)^n] \quad (1)$$

Bij de berekening van de NCW worden alle toekomstige inkomende kasstromen geactualiseerd en vergeleken met de initiële investeringsuitgave. De som van de geactualiseerde toekomstige inkomsten moet groter zijn dan het bedrag van de initiële investering om te kunnen spreken van een rendabele investering (Baker, 2000). Een investering met een negatieve NCW is, vanuit economisch standpunt, te verwerpen. Een investeringsproject is aanvaardbaar als het project een positieve NCW oplevert. Voor de berekening van de NCW van de pyrolyse-installatie moet rekening worden gehouden met een aantal eigenschappen van deze specifieke investering. Deze worden hierna besproken, waarbij het effect op de formule voor de berekening van de NCW wordt weergegeven.

Bij de berekening van de NCW wordt enkel rekening gehouden met de kasstromen. De niet-kaskosten, zoals afschrijvingen, waardeverminderingen en voorzieningen komen hierin niet voor. Deze niet-kaskosten hebben echter wel een effect op de uitgaande kasstromen. Bij de investering in een pyrolyse-installatie wordt enkel rekening gehouden met de afschrijvingen als relevante niet-kaskost. Een afschrijving is een boekhoudkundige kost die leidt tot minder winst, waardoor er minder belastingen betaald moeten worden en er bijgevolg minder uitgaande kasstromen zijn. Dit effect op de NCW noemt men het belastingschild van de afschrijvingen (Mercken, 2004).

De inkomende en uitgaande kasstromen die ontstaan na investering in een pyrolyse-installatie worden verondersteld constant te zijn over de jaren. Er zal elk jaar dezelfde hoeveelheid biomassa verwerkt worden. Hierdoor worden de operationele kosten en opbrengsten verondersteld elk jaar dezelfde te zijn.

Een annuïteit is een rij van gelijke bedragen die met gelijke tussenpauzen worden ontvangen of uitgegeven (Mercken, 2004). Dit maakt de berekening van de NCW een stuk eenvoudiger. Als men op het einde van elk van de volgende n jaren een bedrag van 1 euro verwacht te ontvangen, kan de huidige waarde van deze n euro eenvoudig berekend worden als:

$$a_{n-r} = [1-(1+r)^{-n}]/r \quad (2)$$

Het bedrag van de investering zal lineair worden afgeschreven. Hierdoor kan de jaarlijkse afschrijvingskost eenvoudig bepaald worden door het initiële investeringsbedrag te delen door de looptijd van het project. Deze looptijd zal gelijk zijn aan de technische levensduur van de pyrolyse-installatie. De te gebruiken formule voor de berekening van de NCW is de volgende:

$$NCW = [(1-b)*(O_t-Q_t) + b*(I_0/n)]a_{n-r} - I_0 \quad (3)$$

met:

- b = belastingvoet
- O_t = inkomende kasstromen
- Q_t = uitgaande kasstromen
- I_0 = initieel investeringsbedrag
- n = looptijd van het project
- r = kapitaalkost na belastingen
- r^* = kapitaalkost voor belastingen
- $r = (1-b) \times r^*$ (Mercken, 2004)

De belastingvoet wordt gelijkgesteld aan 33% (Brussels Agentschap voor de Onderneming). Dit is de basisbelastingvoet voor de vennootschapsbelasting in België. Ochelen en Putzeijs (2008) vermelden een return op investeringen van 10%. De kapitaalkost voor belastingen wordt, in het kader van deze masterproef, vastgelegd op 10%. Thewys en Kuppens (2009) vermelden een technische levensduur van een pyrolyse-installatie van 20 jaar.

De NCW wordt berekend voor 3 gevallen, waarbij het verschil zit in hoeveelheid aangevoerde droge stof in ton per uur. De NCW wordt berekend bij een input van 0,5, 1 en 1,5 ton droge stof per uur (tds/uur). De beschikbare hoeveelheid korteomloophout is in Vlaanderen namelijk beperkt. De voor deze masterproef gekozen inputniveaus komen overeen met de kleinste input die in economische studies gehanteerd worden. Zo bestudeerden Peacocke, Bridgwater en Brammer een inputrange van 0,25 tot 10 tds/uur. Bij Bio-oil Tessenderlo gaat deze range van 100 kg tot 5 ton per uur.

6. NCW bij de verkoop van pyrolysechar en bio-olie

In dit hoofdstuk wordt de NCW berekend voor een investering in een pyrolyse-installatie die gebruikt zal worden voor de productie van bio-olie en char met als doel de bio-olie en de char te verkopen. Bij de verkoop van char zal een onderscheid gemaakt worden tussen de verkoop van biochar en de verkoop van actieve kool.

6.1 Totale investeringskosten

6.1.1 Bedrag van de initiële investering

Bridgwater et al. (2002) bepalen de totale investeringskosten door middel van volgende formule:

$$\text{Totale investeringskosten pyrolyse-installatie} = 40,8 \cdot 10^3 \cdot (Q_{\text{dry}} \cdot 1000)^{0,6194} \quad (4)$$

met Q_{dry} = aangevoerde biomassa in tds/uur

Schröder et al. (2007) vermelden dat, voor de productie van actieve kool, de char die ontstaat na pyrolyse van biomassa in een aparte oven geactiveerd moet worden. De investeringskosten van deze oven moeten bij het uitvoeren van een economische analyse in rekening gebracht worden. Voor de activatie van de koolstof kan gebruik gemaakt worden van een pyrolyse-reactor. Ng et al. (2003) voerden een economische analyse uit voor het gebruik van pecannoetschalen als grondstof voor actieve kool. Zij gebruikten voor de pyrolyse en activatie hetzelfde type reactor. Een gecontacteerde actieve koolproducent, waarnaar in het verder verloop van deze masterproef zal verwezen worden met de actieve koolproducent, geeft aan gebruik te maken van een pyrolyse-oven voor de (re)activatie van gebruikte actieve kool.

De formule van Bridgwater et al. (2002) kan, echter in aangepaste versie, ook gebruikt worden om de investeringskost voor de activatie-oven te bepalen.

$$\text{Totale investeringskosten activatie-oven} = 40,8 \cdot 10^3 \cdot (QC \cdot 5,583 \cdot 1000)^{0,6194} \quad (5)$$

met QC = geproduceerde char in ton/uur

Deze formulering voor QC wordt gebruikt, omdat de pyrolyse van een bepaalde hoeveelheid biomassa per uur (Q_{dry}) een bepaalde hoeveelheid char (QC) per uur oplevert, met $QC = 0,12 \cdot Q_{\text{dry}}$ bij snelle pyrolyse. In deze formulering wordt rekening gehouden met de activatietijd van de char.

Paraskeva et al. (2008) geven de activatietijden, de tijd dat de koolstofbron doorbrengt in de activatie-oven, voor harde landbouwafvalstoffen zoals olijfpitten en abrikoospitten. Deze werden eerst gepyrolyseerd op hoge temperaturen, variërend van 500 °C tot 850 °C en dit gedurende 1 à 2 uur. Snelle pyrolyse kent een verblijftijd van ongeveer 1 seconde, wat de vergelijking tussen een activatietijd van char na snelle pyrolyse met de activatietijden gegeven door Paraskeva et al. (2008) moeilijk maakt.

Als een gemiddelde van de activatietijden, gegeven door Paraskeva et al. (2008) berekend wordt, komt dit uit op 5,38 uur. Hoewel de char in deze studie geproduceerd wordt door middel van snelle pyrolyse, wordt in het kader van deze masterproef uitgegaan van een activatietijd van 5,5 uur bij een temperatuur van 800 °C. Volgens de actieve koolproducent zouden deze activatiecondities juist kunnen zijn voor de productie van actieve kool uit kortetoomloophout.

De char moet voor activatie 5,5 uur in de activatie-oven blijven. De tijd nodig om tot deze temperatuur te komen wordt geschat op 5 minuten (van der Wal, 2010). De activatiecyclus duurt in totaal 5 uur en 35 minuten. Verondersteld wordt dat elke 5,583 uur de in deze tijdspanne geproduceerde char in de activatie-oven wordt gebracht. De formule uit Bridgwater et al. (2002) gaat uit van een bepaalde input per uur. De activatie-oven moet voldoende groot zijn om de char geproduceerd in een tijdspanne van 5 uur en 35 minuten te kunnen verwerken. Om deze reden wordt de hoeveelheid per uur geproduceerde char vermenigvuldigd met de duur van de activatiecyclus, wat leidt tot bovenstaande formule.

6.1.2 Ecologiepremie

De ecologiepremie is een steunmaatregel waarmee de Vlaamse overheid bedrijven wil aanzetten om over te gaan tot ecologie-investeringen. Dit zijn investeringen gericht op bescherming van het milieu of investeringen die ertoe leiden dat een onderneming minder energie verbruikt in haar productieproces. Elk bedrijf dat een ecologie-investering plant, kan een aanvraag indienen. In 2010 voorziet de Vlaamse overheid een budget van 120 miljoen euro. Er zullen drie oproepen gelanceerd worden, waarbij telkens 40 miljoen euro verdeeld wordt. Voor grote ondernemingen bedraagt de ecologiepremie 20%, voor kleine is dit 40%, met een maximum van 1,75 miljoen euro per aanvraag (Agentschap Ondernemen). Volgens het Agentschap Ondernemen (2010) is een grote onderneming elke onderneming die niet klein of middelgroot is. Een kleine onderneming stelt minder dan 50 werkzame personen te werk en heeft een jaarlijks balanstotaal of jaaromzet van maximaal 10 miljoen euro. Een middelgrote onderneming stelt maximaal 250 werkzame personen te werk en heeft een jaarlijks balanstotaal van maximaal 43 miljoen euro of een jaaromzet van maximaal 50 miljoen euro.

Een bedrijf dat biomassa verwerkt, gebruik makend van pyrolyse, wordt verondersteld een KMO te zijn, waardoor een ecologiepremie van 40% geldt. De gegevens in tabel 6 verklaren dit. De berekening van het aantal personeelsleden en de jaaromzet komt verderop aan bod. De jaaromzet wordt berekend door de opbrengst uit de verkoop van bio-olie op te tellen bij de opbrengst uit de verkoop van actieve kool. De jaaromzet uit de verkoop van biochar en bio-olie zal altijd lager zijn dan de jaaromzet uit de verkoop van actieve kool en bio-olie.

Tabel 7: weergave van het aantal personeelsleden en jaaromzet bij gebruik van char als grondstof voor actieve kool

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
aantal werknemers pyrolyse-installatie	1	2	2
aantal werknemers oven	1	1	2
jaaromzet (EUR)	784 867,97	1 569 735,93	2 354 603,9

Enkel investeringen die voorkomen op de limitatieve technologieënlijst, komen in aanmerking voor een ecologiepremie (Agentschap Ondernemen). Pyrolyse van biomassa valt onder categorie 1166 'productie van energie (WKK/elektriciteit) op basis van de pyrolyse van biomassa' (Agentschap Economie, 2008). De pyrolyse-olie kan namelijk tot warmte of elektriciteit verwerkt worden. Enkel de extra investeringen, die zorgen voor het milieuvriendelijk of energiezuinig karakter van de investering, komen in aanmerking voor de ecologiepremie. Deze zogenaamde essentiële investeringscomponenten, worden berekend door de milieuvriendelijke investering te vergelijken met een klassieke investering die een grotere milieubelasting kent. (Agentschap Ondernemen, 2010)

De essentiële investeringscomponenten die in aanmerking komen voor de ecologiepremie zijn de volgende:

- installatie voor afhandeling van reststoffen;
- schoorstenen en apparatuur om rookgas/stookgas te reinigen, met inbegrip van apparatuur voor injectie van additieven en apparatuur voor afvoer en opslag van vliegassen;
- pyrolyseapparatuur en aangepaste branders of vuurhaarden, voorzien van luchtvoorverwarmers en rookgascirculatie;
- meet- en regelapparatuur;
- elektrotechnische uitrusting voor aansluiting op interne en/ of externe elektriciteitsnetten;
- installatie voor krachtwerktuigen (turbines, diesel-, Stirling-, stoom- of gasmotoren of ORC (Agentschap Economie, 2008).

Enkel indien er directe energie wordt opgewekt door de pyrolyse van biomassa, komt een investering in een pyrolyse-installatie in aanmerking voor de ecologiepremie, zo blijkt uit navraag bij het Vlaams Energieagentschap. Als de geproduceerde bio-olie niet ter plaatse gebruikt wordt om elektriciteit of warmte te produceren, wordt de bio-olie als biobrandstof bekeken. Hierbij werd verwezen naar een Europese beschikking. Het betreft steunmaatregel nr. N 334/2005 België: Verlaging van het accijnstarief voor biobrandstoffen, die expliciet vermeldt dat installaties voor de productie van biobrandstoffen geen investeringssteun kunnen krijgen.

In de analyse in dit hoofdstuk kan geen ecologiepremie opgenomen worden.

6.1.3 Investeringsaftrek

De investeringsaftrek is een door de overheid gehanteerde investeringsstimulans. Een investeringsaftrek is geen uitbetaling, maar laat de onderneming toe de belastbare winst van het jaar waarin de investering plaats vindt, te verlagen met een bepaald percentage. Het voordeel van de investeringsaftrek kan berekend worden met volgende formule:

$$\text{Voordeel investeringsaftrek} = b \cdot c \cdot I_0 \quad (6)$$

met:

- b = belastingspercentage
- c = percentage van de investeringsaftrek
- I_0 = initieel investeringsbedrag (Mercken, 2004)

De investeringsaftrek bestaat uit een basispercentage en eventueel een verhogingspercentage voor, onder andere, energiebesparende investeringen. Op deze manier worden ondernemingen extra gestimuleerd over te gaan tot energiebesparende investeringen (Federale Overheidsdienst Financiën).

Het percentage van de verhoogde investeringsaftrek bedraagt 13,5% voor vennootschappen voor het aanslagjaar 2011 (Federale Overheidsdienst Financiën). Het aanslagjaar is het jaar dat volgt op het jaar waarin de inkomsten werden behaald (Mercken & Siau, 2004). Om deze reden wordt in deze analyse gebruik gemaakt van het percentage dat betrekking heeft op het aanslagjaar 2011.

In principe is de investeringsaftrek een eenmalige aftrek. Natuurlijke personen die minder dan 20 werknemers tewerkstellen kunnen kiezen voor een gespreide aftrek. Dit kan ook voor milieuvriendelijke investeringen in onderzoek en ontwikkeling (Vlaamse overheid, 2009).

Aangezien de pyrolyse van biomassa valt onder de energiebesparende investeringen en ervan uitgegaan wordt dat de investering zal gebeuren door een vennootschap, kan er niet gekozen worden voor een gespreide aftrek.

De pyrolyse van biomassa valt onder categorie 10 van de lijst van activa die in aanmerking komen voor de verhoogde investeringsaftrek voor energiebesparende investeringen: productie en gebruik van energie door chemische, thermochemische of biochemische omzetting van biomassa en afvalstoffen. De in aanmerking komende investeringen binnen de inrichting zijn:

- uitrusting uitsluitend voor het bewerken, opslaan en transporteren van de in- en uitgaande stoffen;
- reactoren gebruikt voor de chemische, thermochemische 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 (ecosubsibru[a]).

De methode voor de bepaling van de componenten van de pyrolyse-installatie die in aanmerking komen voor een investeringsaftrek, verschilt van de methode die gebruikt wordt bij de ecologiepremie. De ecologiepremie wordt berekend op basis van de extra investeringen die zorgen voor het milieuvriendelijk of energiezuinig karakter van de investering, terwijl alle kosten die rechtstreeks aan de pyrolyse-installatie toewijsbaar zijn, in aanmerking komen voor de verhoogde investeringsaftrek (van Droogenbroeck, 2010). Voor de berekening van de verhoogde investeringsaftrek zullen meer kosten als berekeningsbasis gebruikt kunnen worden. De verhoogde investeringsaftrek is echter enkel van toepassing op investeringen die een directe energiebesparing met zich meebrengen. Hiermee wordt bedoeld dat de directe opwekking van warmte of elektriciteit een voorwaarde is om in aanmerking te komen voor de verhoogde investeringsaftrek. Wanneer de geproduceerde bio-olie als zodanig verkocht wordt, komt een investering in een pyrolyse-installatie niet in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek (van Droogenbroeck, 2010).

Voor het aanslagjaar 2011 geldt de gewone investeringsaftrek enkel nog voor natuurlijke personen. Er bestaan wel nog bepaalde typen investeringsaftrek voor specifieke investeringen door vennootschappen, maar de investering in een pyrolyse-installatie valt hier in geen geval onder (van Droogenbroeck, 2010).

Als de geproduceerde char gebruikt wordt als grondstof voor actieve kool, moet deze geactiveerd worden. Hiervoor zal een pyrolyse-installatie gebruikt worden. Deze installatie komt echter niet in aanmerking voor de verhoogde of gewone investeringsaftrek, om redenen die hierboven vermeld werden. De investering zoals die in dit hoofdstuk beschreven werd, komt niet in aanmerking voor een investeringsaftrek, van welke vorm dan ook.

In onderstaande tabel worden alle gegevens die de totale investeringskost van een pyrolyse-installatie en een activatie-oven bepalen, weergegeven voor een input van 0,5 tds/uur. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen de productie van biochar en de productie van actieve kool.

Tabel 8: berekening van de investeringskosten bij een input van 0,5 tds/uur

	actieve kool	biochar
INVESTERING (EUR)	3 411 083,39	1 916 029,47
pyrolyse-installatie (EUR)	1 916 029,47	1 916 029,47
oven (EUR)	1 495 053,92	

6.2 Operationele kosten

6.2.1 Kosten voor aanleg, oogst en voorbehandeling korteomloophout

De kosten voor aanleg en oogst van korteomloophout worden door Garcia et al. (2003) gegeven per hectare per jaar. Het korteomloophout moet gedroogd worden, alvorens het gepyrolyseerd kan worden. Bij velddroging gebeurt dit op de plaats waar het hout geogst werd.

Tabel 9: kost aanleg en verwerking korteomloophout

	EUR/ha/jaar
zaai- en pootgoed	39
meststoffen	21
plantenbeschermingsmiddelen	24
velddroging	0
verkleinen	50

Bron: Garcia et al., 2003

In een publicatie van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO, 2007) worden deze kosten aangevuld met kosten voor terreinvoorbereiding en oogst. Het INBO (2007) adviseert te ploegen in de herfst en te eggen in het voorjaar.

Na het ploegen en eggen wordt er gesproeid. De kosten voor sproeien volgens het INBO (2007) komen niet overeen met de kosten voor plantenbeschermingsmiddelen die Garcia et al. (2003) geven.

Bijkomend zijn er kosten voor de kapitaalkost van de plantmachine, het loonwerk, voor het oogsten van het korteomloophout en het ontstronken van het terrein. De kapitaalkost voor de machines die gebruikt worden voor het oogsten en verhakkelen van het korteomloophout worden niet opgenomen in de analyse. De landbouwer zal hiervoor namelijk materieel kunnen gebruiken dat hij reeds in zijn bezit heeft. Het ontstronken kan best om de 6 tot 7 cycli gebeuren (INBO, 2007). Het korteomloophout kent volgens het INBO (2007) een cyclus van twee tot vier jaar. Garcia et al. (2003) hebben het over een cyclus van drie tot vijf jaar.

In het kader van deze masterproef wordt uitgegaan van een oogst, elke drie jaar, van gewassen die 7 keer geoogst kunnen worden alvorens ze opnieuw aangeplant moeten worden. De plantage met korteomloophout gaat met andere woorden 21 jaar mee.

De kosten die het INBO (2007) weergeeft zijn de totale kosten per hectare. Deze kosten worden gedeeld door 21 om de kosten per hectare per jaar te bekomen.

Tabel 10: kost terreinvoorbereiding en oogst korteomloophout

terreinvoorbereiding	EUR/ha	EUR/ha/jaar
sproeien (4l/ha à EUR 7/l)	28	1,33
ploegen	55	2,62
eggen	50	2,38
plantgoed	1.200	57,14
plantmachine	400	19,05
oogsten (7 keer à EUR 800)	5 600	266,67
ontstronken	1 500	71,43

Bron: INBO, 2007

Het INBO (2007) spreekt van een opbrengst van 8 tot 12 ton droge stof per jaar. Thewys en Kuppens (2009) gaan uit van een opbrengst van 10 ton droge stof per hectare per jaar. Voor deze masterproef wordt uitgegaan van een opbrengst van 10 ton droge stof per hectare per jaar.

De kosten per ton droge stof worden in volgende tabel weergegeven. Deze worden berekend door de kost per hectare per jaar te delen door de opbrengst in ton droge stof per hectare per jaar.

Garcia et al. (2003) hielden rekening met een opbrengst van 10,8 tds/ha. Om de kost per ton droge stof wilg te berekenen voor de kosten gegeven door het INBO (2007) wordt gebruik gemaakt van een opbrengst van 10 tds/ha.

Tabel 11: kost voor teler korteomloophout in EUR/tds

	EUR/ha/jaar	EUR/tds
zaai- en pootgoed	39,00	3,61
meststoffen	21,00	1,94
plantenbeschermingsmiddelen	24,00	2,22
velddroging	0,00	0,00
verkleinen	50,00	4,63
sproeien (4l/ha à EUR 7/l)	1,33	0,13
ploegen	2,62	0,26
eggen	2,38	0,24
plantmachine	19,05	1,90
oogsten (7 keer à EUR 800)	266,67	26,67
ontstronken	71,43	7,14
TOTAAL		48,76

Na velddroging is het vochtigheidspercentage van de biomassa 20-30% (Garcia et al., 2003). In het kader van deze masterproef wordt 25% verondersteld. Dit percentage zou echter niet groter mogen zijn dan 10% (Bridgwater, 2006). Een maximaal vochtpercentage van 7% is ideaal (Bridgwater et al., 2002). De kost voor het drogen van wilg is 10 EUR per ton natte stof (Thewys & Kuppens, 2009). Per ton droge stof wilg, met een vochtpercentage van 0%, komt dit neer op een kost voor drogen van 13,33 EUR/tds. Bij snelle pyrolyse mogen de biomassadeeltjes niet groter zijn dan 2 mm (Laird et al., 2009). De kost voor het verkleinen van wilg is 10 EUR per ton natte stof (Thewys & Kuppens, 2009), wat overeenkomt met een kost van 13,33 EUR/tds.

De totale kost voor de aanleg, oogst en voorbehandeling van het korteomloophout, kortweg kost korteomloophout, is 75,42 EUR/tds. Er wordt uitgegaan van 7000 werkuren per jaar (Siemons, 2005). De jaarlijks te verwerken hoeveelheid biomassa wordt bepaald door: $Q_{dry} * 7000$, waarbij Q_{dry} = aangevoerde biomassa in tds/uur. De jaarlijkse kosten voor de aanleg, oogst en voorbehandeling van het korte omloophout kunnen met volgende formule berekend worden:

$$\text{Jaarlijkse kost korteomloophout} = Q_{dry} * 7000 \text{ uur} * 75,42 \text{ EUR/tds} \quad (7)$$

met Q_{dry} = aangevoerde biomassa in tds/uur

6.2.2 Aanvoerkosten

De transportkost van biomassa werd door verschillende auteurs berekend. Sintzoff et al. (2002) spreken over 8 EUR/tds, Spinelli, Ward en Owende (2009) vermelden 8,80 EUR/tds, Mitchell, Stevens en Watters (1999) vonden 13,20 EUR/tds, FNR (2005) vermeldt 13,80 EUR/tds en Valentine, Heaton, Randerson en Duller (2008) 13,84 EUR/tds. Voor deze masterproef zal uitgegaan worden van een transportkost voor biomassa van 11,50 EUR/tds. De transportkost wordt verondersteld onafhankelijk te zijn van de vervoersafstand tussen plaats van oogst en pyrolyse-installatie.

De jaarlijkse aanvoerkosten worden als volgt bepaald:

$$\text{Jaarlijkse aanvoerkosten} = Q_{dry} * 7000 \text{ uur} * 11,50 \text{ EUR/tds} \quad (8)$$

met Q_{dry} = aangevoerde biomassa in tds/uur

Om een idee te krijgen van de grootte van het aanvoergebied voor korteomloophout wordt dit berekend op basis van de veronderstelling dat het aanvoergebied bij benadering cirkelvormig is. Een andere veronderstelling is, dat de bebouwde gebieden waar geen aanplant van korteomloophout mogelijk is, verspreid liggen binnen dit cirkelvormige gebied. Om deze reden kan verondersteld worden dat de locatie waar het korteomloophout wordt opgehaald, gelegen is op de helft van de straal van deze cirkel. Aangezien er sprake is van zowel een heenrit als een terugrit, wordt de vervoersafstand per lading gelijkgesteld aan de straal, r , van de cirkel.

$$r \text{ (in km)} = (\text{oppervlakte aanvoergebied (in km}^2\text{)}/\pi)^{0,5} \quad (9)$$

De oppervlakte van het aanvoergebied wordt bepaald door de benodigde oppervlakte, beplant met korteomloophout. Een hectare zal, na velddroging, 10 ton droge stof per jaar opleveren. Om de grootte van het aanvoergebied te bepalen moet de benodigde oppervlakte, beplant met korteomloophout, gedeeld worden door het percentage van het aanvoergebied dat voor beplanting met korte omloophout in aanmerking komt. Volgens Garcia et al. (2003) wordt 47% van de totale oppervlakte in België gebruikt voor landbouwteelt. Zij veronderstellen dat als er ergens een pyrolyse-installatie gebouwd wordt, men 10% van de landbouwoppervlakte rond deze installatie zal beplanten met korteomloophout. Er zal 4,7% van het aanvoergebied aangeplant worden met korteomloophout. De formule voor de vervoersafstand per lading wordt aangepast tot:

$$r \text{ (in km)} = [(\text{benodigde oppervlakte, beplant met korteomloophout (in km}^2\text{)}/0,047)/\pi]^{0,5} \quad (10)$$

De benodigde oppervlakte, beplant met korteomloophout, kan berekend worden door de jaarlijks te verwerken hoeveelheid droge stof ($Q_{dry} * 7000$) te delen door de opbrengst, in ton droge stof, per km². De benodigde oppervlakte, beplant met korteomloophout, wordt berekend in km² om de vervoersafstand in km te bepalen. Een hectare levert 10 ton droge stof wilg op. Een km² levert 1 000 ton droge stof op.

Tabel 12: berekening oppervlakte aanvoergebied en vervoersafstand

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
benodigde oppervlakte aanvoergebied (km ²)	3,50	7,00	10,50
vervoersafstand (km)	4,87	6,89	8,43

6.2.3 Onderhoudskosten

De onderhoudskosten voor de pyrolyse-installatie worden bepaald als een percentage van de totale investeringskosten. Ringer, Putsche en Scahill (2006) spreken van een onderhoudskost die 2% uitmaakt van de totale investeringskost. Jones en Zhu (2009) vermelden hetzelfde percentage.

De onderhoudskosten zouden volgens Cornelissen (2010) vrij laag liggen. Hij gebruikt een onderhoudskost van 4% van de investeringskost, wat volgens hem een pessimistische schatting is. Dit komt doordat een deel van de onderdelen van de pyrolyse-installatie aangekocht worden met een fabrieksgarantie, waardoor eventuele machinebreuk kosteloos verholpen wordt. Andere onderdelen blijken dan weer weinig te degraderen. Om deze redenen bestaan de onderhoudskosten voor de pyrolyse-installatie doorgaans enkel uit de kosten voor maandelijks of jaarlijks onderhoud van de installatie, bijvoorbeeld de smering of het zuiveren van bepaalde onderdelen. Een optimistische schatting zou volgens Cornelissen (2010) een onderhoudskost van 1% van de investeringskosten zijn. Voor de analyse in deze masterproef wordt uitgegaan van een jaarlijkse onderhoudskost van 2% van de investeringskost van de pyrolyse-installatie.

De formule voor de berekening van de onderhoudskosten wordt:

$$\text{Jaarlijkse onderhoudskosten} = 0,02 * 40,8 * 10^3 * (Q_{dry} * 1000)^{0,6194} \quad (11)$$

met Q_{dry} = aangevoerde biomassa in tds/uur

Als de geproduceerde char gebruikt wordt als grondstof voor actieve kool, moeten er extra onderhoudskosten aangerekend worden voor de activatie-oven.

De actieve koolproducent schat een onderhoudskost voor een reactivatie-oven van 5% van de totale investeringskosten. Reactivatie gebeurt bij hogere temperaturen dan activatie, waarbij de geadsorbeerde stoffen vrijkomen en vervuiling van de oven veroorzaken. Er wordt aangenomen dat de onderhoudskosten van een activatie-oven lager zullen uitvallen dan deze van een oven die ook voor reactivatie gebruikt wordt. Het percentage van de investeringskosten dat voor de berekeningen van de onderhoudskosten van de activatie-oven gehanteerd wordt, is 3,5%.

$$\text{Jaarlijkse onderhoudskosten oven} = 0,035 \cdot 40,8 \cdot 10^3 \cdot (QC \cdot 5,583 \cdot 1000)^{0,6194} \quad (12)$$

met $QC = \text{geproduceerde char in ton/uur} = 0,12 \cdot Q_{\text{dry}}$

6.2.4 Personeelskosten

Bij de personeelskosten worden enkel de loonkosten opgenomen van de arbeiders die direct bij het pyrolyse- of activatieproces betrokken zijn. De loonkosten van de andere werknemers worden opgenomen bij de algemene overheadkosten.

De totale personeelskosten worden berekend door het aantal arbeiders dat in dienst is te vermenigvuldigen met de gemiddelde loonkost per arbeider. Bridgwater et al. (2002) stelden een formule samen voor het berekenen van het aantal in dienst te nemen arbeiders. Resulteert dit in een niet-afgerond getal, dan wordt dit altijd afgerond naar boven.

$$\text{Aantal arbeiders per shift} = 1,04 \cdot (Q_{\text{dry}})^{0,475} \quad (13)$$

met $Q_{\text{dry}} = \text{aangevoerde biomassa in tds/uur}$

Er wordt verondersteld dat er in 3 shiften wordt gewerkt.

De jaarlijkse loonkost per arbeider is gelijk aan het brutoloon van de werknemer, wat de optelsom is van het nettoloon, de RSZ-bijdrage en de bedrijfsvoorheffing (Cantillon, Marx, Rottiers & Van Rie, 2007). Bloemen en Voets (2009) gebruikten in hun studie een loonkost van 52 000 EUR uit Waterbley (2005). Deze loonkost kan, door middel van de loonindexen berekend door het NIS, omgerekend worden naar een loonkost voor het jaar 2009. De loonindexen worden gegeven voor verschillende sectoren die aangeduid worden met een NACEBEL-code. Code D, productie en distributie van elektriciteit, gas, stoom en gekoelde lucht (NIS, 2008a), sluit het dichtst aan bij de pyrolyse van biomassa tot bio-olie en char.

Door middel van loonindexering wordt de koopkracht van de consument verzekerd door een aanpassing van de lonen aan gestegen consumptieprijzen. Een negatieve indexering is echter ook mogelijk.

Om deze reden kan verondersteld worden dat aanpassing van de loonkost gegeven door Waterbley (2005) in Bloemen en Voets (2009), gebruik makend van de loonindex, een bruikbare loonkost oplevert. De voor deze analyse relevante gegevens worden in volgende tabel weergegeven. De jaarlijkse loonkost voor een arbeider wordt op 46 000 EUR geschat.

Tabel 13: berekening van de jaarlijkse loonkost

jaar	loonindex	jaarlijkse loonkost (EUR)
2005	110,361	52 000 ,00
2008	100,000	47 118,09
2009	97,581	45 978,31

Bron: NIS (2008b)

De totale jaarlijkse personeelskost wordt berekend als volgt:

$$\text{Jaarlijkse personeelskost} = 3 \text{ shiften} * 46\ 000 \text{ EUR/arbeider/jaar} * \text{aantal arbeiders (naar boven afgerond)} \quad (14)$$

Als de char geactiveerd wordt tot actieve kool, zijn extra arbeiders noodzakelijk. Er wordt minimaal één extra arbeider aangenomen per shift. De activatie-oven is een pyrolyse-oven, waardoor gelijkaardige formules kunnen gebruikt worden voor de berekening van het aantal arbeiders en de jaarlijkse personeelskost, als voor de pyrolyse-installatie. Net zoals bij de berekening van de investeringskost het geval is, wordt de formulering aangepast aan het feit dat de activatie-oven de in 5 uur en 35 minuten geproduceerde hoeveelheid char moet verwerken. Deze aanpassing lijkt op het eerste zicht overbodig. De aanpassing in de formule voor de berekening van de investeringskost uit Bridgwater et al. (2002), zoals dit gebeurde bij formule (5) is noodzakelijk om de investering in een oven geschikt voor de verwerking van de in 5 uur 35 minuten geproduceerde hoeveelheid char te verwerken. De totale hoeveelheid geproduceerde char per jaar blijft echter gelijk aan $QC * 7000$, met $QC = 0,12 * Q_{dry}$. Er zou kunnen verondersteld worden dat het aantal personeelsleden voor de activatie-oven berekend kan worden met onderstaande formule.

$$\text{Aantal arbeiders per shift oven} = 1,04 * (QC)^{0,475} \quad (15)$$

met $QC = \text{geproduceerde char in ton/uur} = 0,12 * Q_{dry}$

Toch wordt ervoor gekozen deze formule aan te passen. De per keer te verwerken hoeveelheid char wijzigt namelijk wel. Om vertragingen van het productieproces te voorkomen, gebeurt de berekening van het aantal personeelsleden voor de activatie-oven met behulp van volgende formule.

$$\text{Aantal arbeiders per shift oven} = 1,04 \cdot (\text{QC} \cdot 5,583)^{0,475} \quad (16)$$

met $\text{QC} = \text{geproduceerde char in ton/uur} = 0,12 \cdot Q_{\text{dry}}$

$$\text{Jaarlijkse personeelskost oven} = 3 \text{ shiften} \cdot 46\,000 \text{ EUR/arbeider/jaar} \cdot \text{aantal arbeiders (naar boven afgerond)} \quad (17)$$

Tabel 14: berekening van het aantal arbeiders per shift voor de pyrolyse-installatie en de activatie-oven

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
aantal arbeiders pyrolyse-installatie per shift	0,75	1,04	1,26
aantal arbeiders per shift afgerond	1	2	2
aantal arbeiders oven per shift	0,62	0,86	1,04
aantal arbeiders per shift afgerond	1	1	2

6.2.5 Verzekeringskosten

De jaarlijkse verzekeringskosten zijn volgens Cornelissen (2010) verwaarloosbaar klein voor een snelle pyrolyse-installatie. De totale verzekeringskost van een pyrolyse-installatie wordt bepaald door de omvang van de installatie. Cornelissen (2010) geeft de kosten voor een installatie met een input van 5 tds/uur en voor een installatie met een input van 1,5 tds/uur. Een omniumverzekering voor een vijftons- en een anderhalftonsinstallatie tesamen kost een bedrijf 6 000 EUR per jaar. Dit zou overeen komen met een kost van 923,07 EUR voor de verwerking van één ton biomassa per uur. Voor twee vijftons- en een anderhalftonsinstallatie tesamen betaalt een bedrijf 10 400 EUR per jaar, wat overeen zou komen met een kost van 904,35 EUR voor de verwerking van een ton biomassa per uur. Voor de berekening van de jaarlijkse verzekeringskosten zal gebruik gemaakt worden van onderstaande formule.

$$\text{Jaarlijkse verzekeringskost} = 940 \cdot Q_{\text{dry}} \quad (18)$$

met $Q_{\text{dry}} = \text{aangevoerde biomassa in tds/uur}$

Een gelijkaardige formule kan gebruikt worden voor de berekening van de jaarlijkse verzekeringskosten voor de activatie-oven.

Aangezien de verzekeringskost bepaald wordt door de omvang van de oven, wordt de verzekeringskost berekend met onderstaande formule.

$$\text{Jaarlijkse verzekeringskost oven} = 940 * QC * 5,583 \quad (19)$$

met QC = geproduceerde char in ton/uur = $0,12 * Q_{\text{dry}}$

6.2.6 Energiekosten

Bij de pyrolyse van biomassa kan de benodigde energie in twee aparte delen verdeeld worden. Enerzijds is er een zekere energiebehoefte om de pyrolyse reactor op temperatuur te houden. Anderzijds is er elektriciteit nodig voor motoren en computers (Cornelissen, 2009), die het pyrolyseproces ondersteunen.

Bij de pyrolyse van biomassa kan de geproduceerde char gebruikt worden om energie op te wekken om de pyrolyse-installatie op temperatuur te houden (Bridgwater, 2003). In deze analyse is het de bedoeling de char te verkopen. Er zal bijgevolg een andere energiebron gebruikt moeten worden om de biomassa te pyrolyseren. Bridgwater et al. (2002) vermelden het gebruik van char en geproduceerd niet-condenseerbaar gas om de pyrolyse-installatie van de nodige energie te voorzien om de reactor op temperatuur te houden, waarbij de overtollige energie gebruikt wordt om elektriciteit op te wekken. Het is met andere woorden niet noodzakelijk alle char en al het niet-condenseerbare gas te verbranden om de pyrolyse reactor van de nodige energie te voorzien. Volgens Vanreppelen en Kuppens (2010) kan verondersteld worden dat bij snelle pyrolyse van korteomloophout de aanwending van de energie uit het geproduceerde niet-condenseerbare gas, voldoende is om het pyrolyseproces te voorzien van de nodige energie om de reactor op temperatuur te houden. Er dient bijgevolg geen energiekost aangerekend te worden voor het op temperatuur houden van de pyrolyse reactor.

Bridgwater et al. (2002) melden dat er voor elke ton droge stof biomassa die door snelle pyrolyse verwerkt moet worden, naast de benodigde energie om de pyrolyse reactor op temperatuur te houden, een elektriciteitsbehoefte bestaat van 40 kWh. Cornelissen (2009) vermeldt een jaarlijks elektriciteitsverbruik van 4 410 MW_e bij een input van 6,87 ton natte stof per uur met een werkjaar van 7 000 uren. Op deze manier wordt er een input van 5 tds/uur verzekerd. Per uur komt dit neer op een verbruik van 0,63 MW_e, wat overeenkomt met 630 kWh, voor een input van 6,87 ton natte stof per uur. Per ton natte stof betekent dit een elektriciteitsverbruik van 91,7 kWh. Cornelissen (2009) maakte in zijn berekeningen gebruik van een vochtigheidsgehalte van 27,22%. Per ton droge stof komt dit overeen met een elektriciteitsverbruik van 126 kWh, wat opmerkelijk hoger ligt dan het elektriciteitsverbruik dat Bridgwater et al. (2002) voorstelden.

Cornelissen (2009) berekende het elektriciteitsverbruik gedurende het hele pyrolyseproces, gaande van drogen en verkleinen van biomassa tot de eigenlijke pyrolyse. Voor de analyse in deze masterproef zal uitgegaan worden van een elektriciteitsbehoefte van 100 kWh/tds.

Uit navraag bij een elektriciteitsleverancier in de provincie Limburg, blijkt dat de huidige aankoopprijs voor elektriciteit 7,964 cent/kWh bedraagt in piekuren en 4,707 cent/kWh in daluren. Volgens de Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt (VREG) worden in Vlaanderen per 24 uur 9 daluren aangerekend (VREG[a]). Aangezien er in drie shiften gewerkt wordt, wordt er verondersteld dat voor 9 van de 24 uur het daluurtarief wordt aangerekend en voor de overige 15 uren het piekuurtarief. De gewogen gemiddelde aankoopprijs voor elektriciteit bedraagt 6,743 cent per kWh. Er wordt een aankoopprijs voor elektriciteit van 0,067 EUR/kWh aangenomen.

$$\text{Jaarlijkse elektriciteitskost} = Q_{\text{dry}} * 7000 \text{ uur} * 100 \text{ kWh/tds} * 0,067 \text{ EUR/kWh} \quad (20)$$

met Q_{dry} = aangevoerde biomassa in tds/uur

Voor de activatie van char is extra energie nodig. Er wordt uitgegaan van fysische activatie, omdat dit volgens de actieve koolproducent het meest wordt toegepast. Dit gebeurt bij een temperatuur van 800 °C. Uit een opsomming van Paraskeva et al. (2008), blijkt dat dit meestal de temperatuur is waarbij fysische activatie plaats vindt. In paragraaf 6.1.1 werd reeds vermeld dat uitgegaan wordt van een activatietijd van 5,5 uur.

Om een goede inschatting te kunnen maken van het energieverbruik bij activatie van char, zijn een aantal extra gegevens noodzakelijk. Deze zijn de opwarmingsnelheid, de warmteverliezen en de soortelijke warmte van char en kunnen niet met zekerheid vastgelegd worden. Er wordt verondersteld dat de temperatuur verhoogd wordt van kamertemperatuur (20 °C) tot 800 °C in 5 minuten. Van der Wal (2010) berekende het totale energieverbruik bij activatie van bepaalde hoeveelheden char, gebruik makend van een computerprogramma. De warmteverliezen worden door het computerprogramma ingeschat. Als schatting voor de soortelijke warmte van char, wordt de soortelijke warmte van koolstof gebruikt, namelijk 811 J/kg.K bij 20 °C. Op basis van deze gegevens kan het energieverbruik in kWh voor een bepaalde hoeveelheid char berekend worden. De activatiecyclus duurt 5 uur en 35 minuten, waarvan de eerste 5 minuten gebruikt worden om tot op een temperatuur van 800 °C te komen, waarna deze temperatuur 5,5 uur behouden blijft. Na deze 5 uur en 35 minuten wordt de geactiveerde char in een koelschroef gekoeld en komt de oven weer vrij voor de start van een volgende cyclus (informatie van actieve koolproducent).

Tabel 15: berekening van het energieverbruik (kWh) voor activatie

massa (ton)	verbruik (kWh)	verbruik (kWh)/ton
2,750	19 900	7 236,36
5,500	39 400	7 163,64
8,250	59 000	7 151,52

Bron: van der Wal, 2010

Uit bovenstaande tabel valt af te leiden dat het verbruik per ton char voor een cyclus van 5 uur en 35 min afneemt naarmate de te activeren hoeveelheid char toeneemt. Er zijn geen gegevens beschikbaar over het energieverbruik voor kleinere hoeveelheden. Om deze reden wordt verondersteld dat het energieverbruik gelijk is aan 7 236,36 kWh per ton char voor een volledige cyclus van 5 uur en 35 minuten.

Het aantal activatiecycli per jaar wordt berekend door het aantal werkuren per jaar (7 000) te delen door het aantal uur nodig voor het voltooiën van één activatiecyclus (5,583). Jaarlijks worden 1 253 activatiecycli doorlopen.

Er zal aardgas gebruikt worden om de nodige energie te leveren voor het activatieproces. Uit navraag bij een Limburgse aardgasleverancier blijkt dat de huidige aardgasprijs voor grootverbruikers gelijk is aan 0,030 EUR/kWh. Dit is de prijs die in de berekening in deze masterproef gebruikt zal worden.

De energiekosten voor de activatie-oven kunnen in formulevorm als volgt weergegeven worden:

$$\text{Jaarlijkse energiekosten activatie} = (QC * 5,583 \text{ uur}) * (7\ 236,36 \text{ kWh/ton/cyclus}) * (1\ 253 \text{ cycli}) * (0,03 \text{ EUR/kWh}) \quad (21)$$

met $QC = \text{geproduceerde char in ton/uur} = 0,12 * Q_{\text{dry}}$

Aangezien de gebruikte activatie-oven een pyrolyse-oven is, nemen de elektriciteitskosten eveneens toe. Eerder werd berekend dat er 100 kWh elektriciteit nodig is per ton droge stof korteomloophout. De input van de activatie-oven is echter de in 5 uur en 35 minuten geproduceerde hoeveelheid char. Hiermee werd rekening gehouden bij de berekening van de investeringskosten. Aangezien de elektriciteitskosten verbonden zijn aan de grootte van de investeringskost, moet ook bij de berekening van de elektriciteitskosten rekening gehouden worden met dit gegeven.

De elektriciteitskosten van activatie kunnen berekend worden met onderstaande formule.

$$\text{Jaarlijkse elektriciteitskost activatie} = QC * 5,583 * 7000 \text{ uur} * 100 \text{ kWh/tds} * 0,067 \text{ EUR/kWh} \quad (22)$$

met $QC = \text{geproduceerde char in ton/uur} = 0,12 * Q_{\text{dry}}$

6.2.7 Koelwater

Voor de pyrolyse van biomassa is koelwater nodig. Per ton droge stof is 18,5 m³ koelwater nodig (Bridgwater et al., 2002). De prijs van koelwater wordt vastgelegd op 1,50 EUR per m³ (Bloemen & Voets, 2009). De jaarlijkse kost voor koelwater kan als volgt berekend worden:

$$\text{Jaarlijkse kosten voor koelwater} = Q_{\text{dry}} * 7000 \text{ uur} * 1,50 \text{ EUR/m}^3 * 18,5 \text{ m}^3 \quad (23)$$

met $Q_{\text{dry}} = \text{aangevoerde biomassa in tds/uur}$

Voor de koeling van de geproduceerde actieve kool wordt door de actieve koolproducent gebruik gemaakt van teruggewonnen warmte-energie uit de activatie van de grondstof.

6.2.8 Algemene overheadkosten

Alle kosten van de niet-kernactiviteiten van een onderneming worden tot de algemene overheadkosten gerekend. Hiertoe behoren onder meer de kosten voor management, administratie, ICT, marketing en verkoop, energie en huur van gebouwen. De lonen van alle personeelsleden die niet direct bij de productie betrokken zijn, vallen hier ook onder (Horngren, Datar & Foster, 2006).

Bridgwater et al. (2002) stellen dat de algemene overheadkosten gelijk zijn aan 2,5% van de investeringskosten. De formule voor de jaarlijkse algemene overheadkosten zou dan de volgende zijn:

$$\text{Jaarlijkse algemene overheadkosten} = 0,025 * 40,8 * 10^3 * (Q_{\text{dry}} * 1000)^{0,6194} \quad (24)$$

met $Q_{\text{dry}} = \text{aangevoerde biomassa in tds/uur}$

Als deze berekend worden voor de verschillende inputniveaus zou dit resulteren in de kosten uit onderstaande tabel.

Tabel 16: berekening van de algemene overheadkosten naar Bridgwater et al. (2002)

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
algemene overheadkosten (EUR)	47 900,74	73 586,84	94 595,64

De algemene overheadkosten zoals deze in tabel 16 werden berekend, lijken te laag. De jaarlijkse loonkost van een arbeider bedraagt reeds 46 000 EUR. Bovenop de loonkosten van de manager, en eventuele andere bedienden, die mogelijk hoger zijn dan deze voor een arbeider, komen ook nog vaste kosten van het gebouw waarin de pyrolyse-installatie zich bevindt. Voor de bepaling van de algemene overheadkosten wordt een andere methode gebruikt.

Het managementadviesbureau Berenschot geeft ondernemingen advies in verband met het reduceren van overheadkosten. Een productiebedrijf heeft gemiddeld overheadkosten die 20 tot 25% uitmaken van de totale operationele kosten. Met de hulp van het managementadviesbureau Berenschot kan dit met 20% gereduceerd worden.

De algemene overheadkosten van elektriciteitsproducenten maken volgens Bennink en Benner (2009) 4 tot 20% uit van de totale operationele kosten. De hoogste percentages worden gehaald door elektriciteitsleveranciers die in deze kostenpost ook kosten opnemen die onder andere kostencategorieën opgenomen kunnen worden.

Het percentage van de investeringskost dat als overheadkost dient opgenomen te worden, wordt tussen de 2,5 en 20% geschat. In het kader van deze masterproef wordt voor de berekening van de algemene overheadkosten gebruik gemaakt van een percentage van 10% van de totale operationele kosten.

In formulevorm geeft dit: (25)

$$\text{Jaarlijkse algemene overheadkosten} = 0,10 * [(SOM(\text{kost korteomloophout, aanvoerkost, onderhoudskost, personeelskost, verzekeringskost, energiekost, kost voor koelwater})/90) * 100]$$

De algemene overheadkosten nemen toe bij gebruik van char als grondstof voor actieve kool, door de toename in operationele kosten die het gevolg is van het gebruik van een activatie-oven.

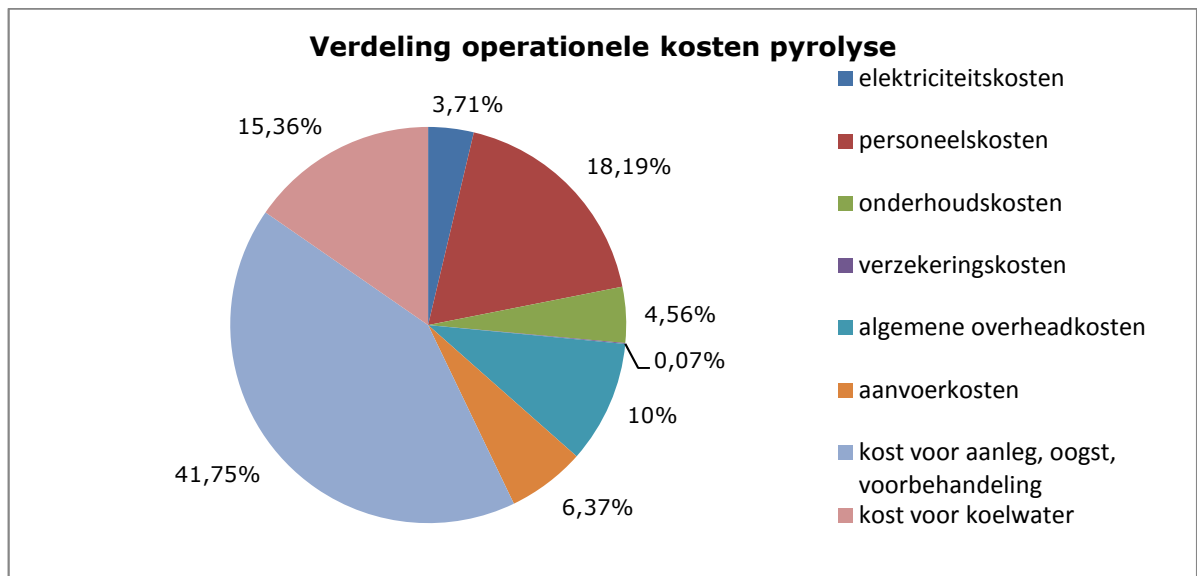
$$\text{Jaarlijkse algemene overheadkosten oven} = 0,10 * [(SOM(\text{onderhoudskost oven, personeelskost oven, verzekeringskost oven, energiekost oven})/90) * 100] \quad (26)$$

Volgende tabel geeft een samenvatting van de jaarlijkse operationele kosten voor pyrolyse van droge biomassa en, in geval van gebruik van char als grondstof voor actieve kool, activatie van deze char bij een input van 0,5 tds/uur.

Tabel 17: berekening van de jaarlijkse operationele kosten bij een input van 0,5 tds/uur

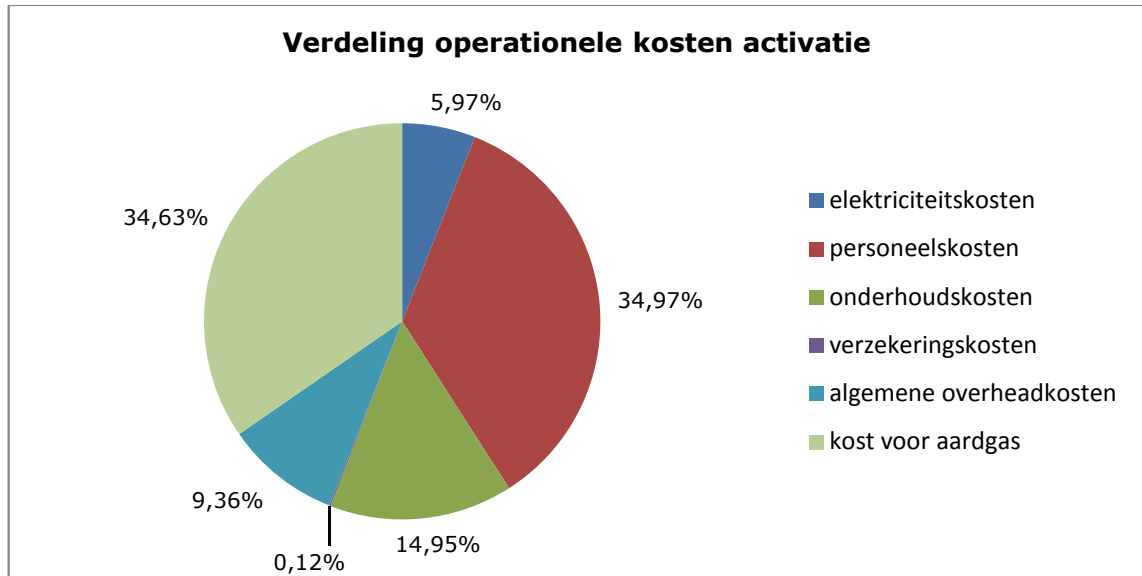
	actieve kool	biochar
KOSTEN (EUR)	998.952,75	668.428,43
kost korteomloophout (EUR)	263.970,00	263.970,00
aanvoerkosten (EUR)	40.250,00	40.250,00
onderhoudskosten (EUR)	38.320,59	38.320,59
personeelskosten (EUR)	138.000,00	138.000,00
verzekeringskosten (EUR)	470,00	470,00
algemene overheadkosten (EUR)	66.842,84	66.842,84
elektriciteitskosten (EUR)	23.450,00	23.450,00
kost voor koelwater (EUR)	97.125,00	97.125,00
onderhoudskosten oven (EUR)	52.326,89	
personeelskosten oven (EUR)	138.000,00	
verzekeringskosten oven (EUR)	314,88	
algemene overheadkosten oven (EUR)	33.052,43	
energiekosten oven (EUR)	91.119,55	
elektriciteitskosten oven (EUR)	15.710,56	

Volgende figuur geeft de bijdragen van de verschillende kostencategorieën tot de totale operationele kosten weer bij de pyrolyse van biomassa.



Figuur 7: verdeling van de operationele kosten van pyrolyse van biomassa

In onderstaande figuur zijn de bijdragen van de verschillende kostencategorieën tot de totale operationele kosten bij de activatie van char weergegeven. Om deze grafieken op te stellen, werd gebruik gemaakt van de gemiddelden van elke kostencategorie voor de drie inputniveaus. De belangrijkste kostenpost van de pyrolyse van biomassa is de kost voor aanleg, oogst en voorbehandeling van korteomloophout, gevolgd door de personeelskosten, de kost voor koelwater en de algemene overheadkosten. Bij de activatie van char zijn de belangrijkste kostenposten de kost voor aardgas en de personeelskosten.



Figuur 8: verdeling van de operationele kosten van activatie van char

6.3 Operationele opbrengsten

6.3.1 Opbrengst uit de verkoop van biochar

Uit de chemische samenstelling van biochar, valt af te leiden dat biochar zelf bijna geen nutriënten bevat. De meeste studies over de bodemverbeterende kwaliteiten van biochar werden uitgevoerd in het Amazonewoud. De, in dit woud voorkomende, terra preta, die eerder in deze masterproef besproken werd, kent een zeer hoog koolstofgehalte, waardoor een vergelijking met Vlaamse gronden moeilijk is.

Biochar houdt stikstof vast, waardoor dit minder goed ter beschikking is voor planten. Toevoeging van biochar aan de bodem verhoogt wel de cation exchange capacity (CEC). Hierdoor is er een betere uitwisseling van nutriënten, reeds aanwezig in de bodem, tussen bodem en plantenwortel. Het is zeer belangrijk het onderscheid tussen beide effecten in te zien.

Tropische gronden worden gekenmerkt door een zeer lage CEC. De nutriënten in een tropische bodem worden bijgevolg niet goed uitgewisseld tussen bodem en planten. Toevoeging van biochar verhoogt de CEC. In een tropische bodem zorgt dit voor een groot verschil in uitwisseling van nutriënten, waaronder stikstof, tussen bodem en plantenwortel. Dit compenseert de hoeveelheid stikstof die door de biochar vastgehouden wordt. Hierdoor kunnen planten die op een tropische grond, verrijkt met biochar, groeien toch meer nutriënten opnemen na toevoeging van biochar (Ruyschaert, 2010).

Vlaamse gronden kennen over het algemeen al een vrij hoge CEC, waardoor de nutriënten al goed uitgewisseld worden tussen bodem en plantenwortels. Toevoeging van biochar aan de bodem, zorgt ervoor dat stikstof in de bodem vastgehouden wordt. Het zou kunnen dat aan Vlaamse bodems op korte termijn meer meststof moet toegevoegd worden wanneer biochar aan de bodem werd toegevoegd, omdat de verbetering in CEC in Vlaamse bodems eerder klein zal zijn. De hoeveelheid stikstof die door biochar zou vastgelegd worden, is mogelijk groter dan de hoeveelheid reeds in de bodem aanwezige stikstof die, door een verbeterde CEC, extra uitgewisseld wordt tussen bodem en plantenwortels. Het zou wel kunnen dat deze stikstof op langere termijn terug wordt vrijgegeven, en de biochar kan dienen als een meststof op langere termijn. Dit moet echter nog onderzocht worden. In Vlaanderen zal enkel een verhoging van de CEC en van de pH mogelijk zijn. Verder onderzoek is noodzakelijk om te bepalen of deze verbetering effectief zorgt voor een betere plantengroei. Het is mogelijk dat toevoeging van biochar aan de bodem, zonder dat er extra meststoffen worden toegevoegd, zorgt voor een lagere opbrengst (Ruyschaert, 2010).

In paragraaf 4.1 werd reeds aangehaald dat bepaalde grondsoorten van nature een lagere pH hebben dan andere. De verhoging van de pH die ook in Vlaanderen het gevolg zou zijn van toevoeging van biochar aan een bodem, zal eerder voor een verbetering zorgen van arme zandgronden, zoals in de Kempen, dan van leemgronden, zoals in Haspengouw.

Voorlopig is het aan te raden de verkoopwaarde van biochar gelijk te stellen aan 0 EUR (Nelissen, 2010). De totale opbrengsten uit de verkoop van biochar zijn gelijk aan 0 EUR, ongeacht de geproduceerde hoeveelheid biochar.

6.3.2 Opbrengst uit de verkoop van actieve kool

Actieve kool kan gebruikt worden om organische moleculen te verwijderen uit een vloeistof of een gas. Actieve kool op basis van hout is zachter dan actieve kool op basis van steenkool of kokosnoot. Vandaar dat deze meestal in poedervorm met een deeltjesgrootte van maximaal 0,1 mm gebruikt wordt, bijvoorbeeld bij het ontkleuren van vloeistoffen.

De actieve kool wordt aan de vloeistof toegevoegd. Na adsorptie van de moleculen, wordt de verzadigde actieve kool afgefilterd. De meeste actieve kool wordt geactiveerd door verhitting. Slechts een beperkte hoeveelheid van de geproduceerde actieve kool wordt chemisch geactiveerd. De marktprijs voor actieve kool in poedervorm is onder andere afhankelijk van de relatie tussen producent en klant, de toepassing, het geschatte verbruik, en de gevraagde kwaliteit. Deze marktprijs schommelt tussen de 1,5 en 2,5 EUR per kg (informatie van actieve koolproducent).

De verkoop van actieve kool uit korteomloophout brengt 2 EUR per kg op. Tijdens de activatie van de koolstofrijke zuivere grondstof of de reactivatie van gebruikte actieve kool, moet rekening gehouden worden met een verlies aan koolstof. Mui et al. (2004) geven een overzicht van de activatiecondities en actieve koolopbrengsten uit autobanden. Afhankelijk van de pyrolyse- en activatiecondities, treedt er een koolstofverlies van 25 tot 78% op. Volgens Vanreppelen en Kuppens (2010) kan een koolstofverlies van 50% verondersteld worden. Hierdoor levert de 120 kg char die uit een ton biomassa geproduceerd wordt, slechts 60 kg actieve kool op.

De jaarlijkse opbrengsten uit de verkoop van actieve kool kunnen berekend worden met volgende formule:

$$\text{Jaarlijkse opbrengsten uit de verkoop van actieve kool} = (Y_{char} * Q_{dry} * 7000 \text{ uur}) * 2 \text{ 000 EUR/ton} * 0,5 \quad (27)$$

met:

- Q_{dry} = aangevoerde biomassa in tds/uur
- Y_{char} = percentage van aangevoerde biomassa dat wordt omgezet in char = 12%

6.3.3 Opbrengst uit de verkoop van bio-olie

Bio-olie is een, meestal donkerbruine, vloeistof. De kleur van bio-olie kan variëren van zwart tot donkerrood of donkergroen. Dit is afhankelijk van de gebruikte biomassa en de gebruikte pyrolysemethode. Bio-olie heeft een waterpercentage van 15 tot 30%, met een maximum van 50%, afhankelijk van het type biomassa en de wijze waarop dit werd geogst en al dan niet gedroogd. Bio-olie kan niet vermengd worden met uit petroleum geproduceerde olie. Bio-olie kan bijgevolg niet vermengd worden met klassieke diesel (Bridgwater, 2006).

Bio-olie kan gebruikt worden in verbrandingsovens om er warmte of elektriciteit uit te produceren. Als de bio-olie ge-upgraded wordt, kan deze gebruikt worden als brandstof voor voertuigen. Dit laatste is echter economisch nog niet interessant (Bridgwater, 2003).

Om de jaarlijkse opbrengsten uit de verkoop van de bio-olie te kunnen berekenen, moet rekening gehouden worden met het percentage van de aangevoerde biomassa dat omgezet wordt in bio-olie. Snelle pyrolyse van biomassa levert een olieopbrengst van 70% op.

De energiedichtheid van bio-olie wordt weergegeven in GJ/1000 l of GJ/m³, wat op hetzelfde neerkomt. Laird et al. (2009) vermelden een energiedichtheid van 22 GJ/m³. Rogers en Brammer (2009) vermelden een lower heating value (LHV) van 16,5 MJ/kg. De higher heating value (HHV) van bio-olie is volgens McCarl et al. (2009) 16,1 MJ/kg. De HHV wordt gedefinieerd als de hoeveelheid energie die vrijkomt bij de verbranding van een bepaalde hoeveelheid brandstof, als de restproducten na verbranding terug op initiële temperatuur (doorgaans wordt hiervoor 25 °C gebruikt) zijn. De LHV is dan gelijk aan de HHV vermindert met de latente warmte van de verdamping van water, waarbij de latente warmte de hoeveelheid energie in de vorm van warmte is, die nodig is om een stof een faseovergang te doen ondergaan bij constante druk en temperatuur (Engineer toolbox).

De dichtheid van bio-olie is volgens Ringer et al. (2006) en Bridgwater (2006) 1 200 kg/m³ of 1,2 kg/l. Voor deze analyse zal uitgegaan worden van een dichtheid voor bio-olie van 1 200 kg/m³. Gebruik makend van deze dichtheid kunnen de LHV, uit Rogers en Brammer (2009), en de HHV, uit McCarl et al. (2009), omgezet worden om deze te vergelijken met de energiedichtheden van andere auteurs.

De LHV van bio-olie bedraagt volgens Rogers en Bammer (2009) 16,5 GJ per 1 000 kg, wat overeenkomt met 19,81 GJ/m³. De HHV is volgens McCarl et al. (2009) 16,1 GJ per 1 000 kg, wat hetzelfde is als 19,33 GJ/m³. In het kader van deze masterproef zal uitgegaan worden van een energiedichtheid van 19,4 GJ/m³. Met een dichtheid van 1,2 kg/l komt dit overeen met 16,17 GJ/ton. In Europa wordt de LHV gebruikt om de energiedichtheid van verschillende brandstoffen te vergelijken. De energiedichtheid zoals deze berekend werd voor bio-olie wordt verondersteld de LHV te zijn.

Van der Kooy (2010) geeft een verkoopprijs van bio-olie van 300 EUR tot 400 EUR per ton, voor bio-olie met een energiedichtheid van 38 MJ/kg. Deze bio-olie is geen bio-olie uit pyrolyse van hout, maar is vetzuur geproduceerd uit afvalvetten uit de plantaardige olieverwerkende industrie. Deze kent echter dezelfde toepassingen, waardoor deze prijs ook geldt voor bio-olie uit pyrolyse van hout. Omgerekend komt dit neer op een verkoopprijs van 7,89 EUR tot 10,53 EUR per GJ. Deze prijzen fluctueren sterk. Zo is er door de voorbije strenge winter een prijsstijging van bio-olie ontstaan door een grotere vraag naar bio-olie in de Scandinavische landen. In deze masterproef zal uitgegaan worden van een verkoopprijs van 9,21 EUR/GJ, wat het middelpunt is van het interval gegeven door van der Kooy (2010).

In formulevorm kunnen de jaarlijkse opbrengsten uit de verkoop van bio-olie weergegeven worden als volgt:

(28)

$$\text{Jaarlijkse opbrengsten uit de verkoop van bio-olie} = Q_{\text{dry}} * 7000 \text{ uur} * Y_{\text{bio-olie}} * LHV_{\text{bio-olie}} * p_{\text{bio-olie}}$$

met:

- Q_{dry} = aangevoerde biomassa in tds/uur
- $Y_{\text{bio-olie}}$ = percentage van aangevoerde biomassa dat wordt omgezet in bio-olie (70%)
- $LHV_{\text{bio-olie}}$ = lower heating value bio-olie = 16,17 GJ/ton
- $p_{\text{bio-olie}}$ = verkoopprijs bio-olie in EUR/GJ = 9,21 EUR/GJ

Onderstaande tabel vat de jaarlijkse opbrengsten uit de verkoop van bio-olie en char, als bodemverbeteraar of grondstof voor actieve kool, samen voor een input van 0,5 tds/uur.

Tabel 18: berekening van de jaarlijkse operationele opbrengsten bij een input van 0,5 tds/uur

	actieve kool	biochar
OPBRENGSTEN (EUR)	784 867,97	364 867,97
actieve kool (EUR)	420 000,00	
biochar (EUR)		0,00
bio-olie (EUR)	364 867,97	364 867,97

6.4 NCW-berekening

Bij gebruik van biochar zijn de opbrengsten uit de verkoop van bio-olie de enige operationele opbrengsten. Wordt de char gebruikt als grondstof voor actieve kool, dan worden er extra opbrengsten gegenereerd. De investering in en werking van een oven voor de activatie van char, brengt kosten met zich mee die er niet zijn als de char verkocht zou worden als bodemverbeteraar. De NCW kan verschillen naargelang de aanwending van de char.

Eerst wordt de NCW berekend voor de verkoop van biochar. Verwacht wordt dat deze voor de drie gevallen negatief zal zijn. Bloemen en Voets (2009) gaven namelijk aan dat de pyrolyse van biomassa niet winstgevend is als enkel de bio-olie verkocht wordt. Aangezien de verkoopwaarde van biochar verondersteld wordt gelijk te zijn aan 0, komt dit eigenlijk overeen met een situatie waarbij men enkel de bio-olie zou verkopen.

Tabel 19: berekening van de NCW bij de verkoop van biochar en bio-olie

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
investering (EUR)	1 916 029,47	2 943 473,72	3 783 825,41
jaarlijkse operationele opbrengsten (EUR)	364 867,97	729 735,93	1 094 603,90
jaarlijkse operationele kosten (EUR)	668 428,43	1 317 110,53	1 808 301,68
jaarlijkse kasstroom (EUR)	-303 560,47	-587 374,60	-713 697,78
geactualiseerde kasstroom (EUR)	-1 862 958,57	-3 741 443,79	-4 508 994,29
NCW (EUR)	-3 778 988,03	-6 684 917,51	-8 292 819,70

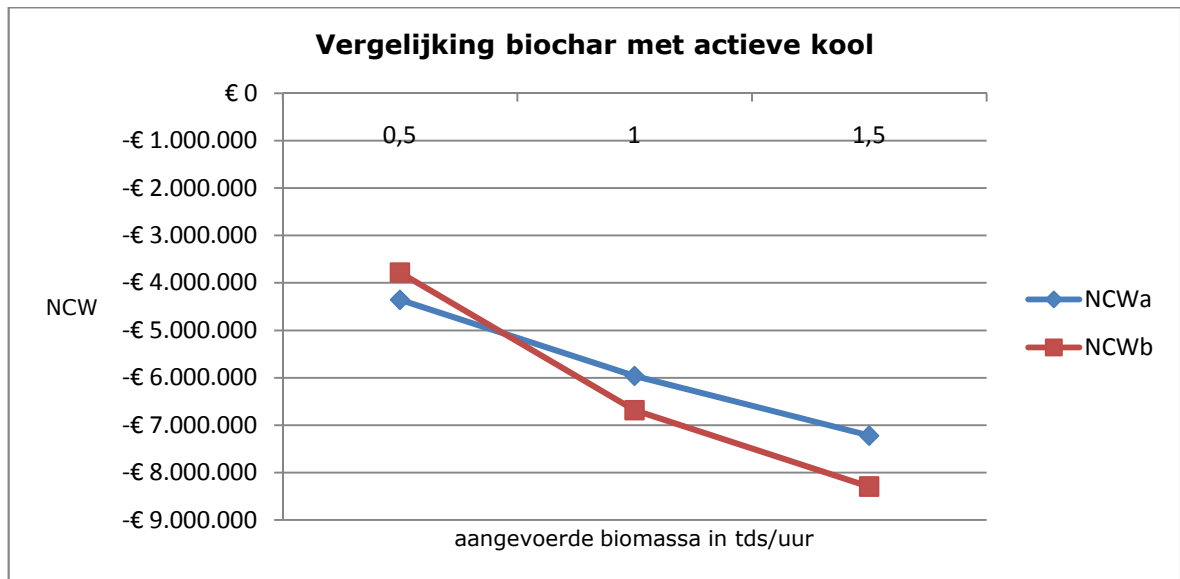
De NCW is voor de drie inputniveaus negatief en neemt zelfs af naarmate de hoeveelheid aangevoerde biomassa per uur stijgt. Dit zou kunnen betekenen dat de NCW nooit positief zal worden, ongeacht de hoeveelheid aangevoerde biomassa per uur. In onderstaande tabel is de NCW berekening bij de verkoop van actieve kool terug te vinden.

Tabel 20: berekening van de NCW bij de verkoop van actieve kool en bio-olie

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
investering (EUR)	3 411 083,39	5 240 229,60	6 736 297,23
jaarlijkse operationele opbrengsten (EUR)	784 867,97	1 569 735,93	2 354 603,90
jaarlijkse operationele kosten (EUR)	998 952,75	1 797 862,14	2 586 936,68
jaarlijkse kasstroom (EUR)	-214 084,78	-228 126,21	-232 332,79
geactualiseerde kasstroom (EUR)	-945 236,00	-719 938,80	-482 781,39
NCW (EUR)	-4 356 319,39	-5 960 168,40	-7 219 078,62

Ook bij de verkoop van actieve kool is de NCW voor de drie inputniveaus negatief en daalt deze naarmate de hoeveelheid per uur aangevoerde biomassa stijgt. Dit kan er wederom op duiden dat de NCW nooit positief zal worden.

In onderstaande figuur wordt de evolutie van de NCW bij de verkoop van actieve kool vergeleken met de evolutie van de NCW bij de verkoop van biochar.



Figuur 9: vergelijking van de evolutie van de NCW bij de verkoop van actieve kool (NCWa) met de evolutie van de NCW bij de verkoop van biochar (NCWb)

Bij een input van 0,5 tds/ur is de NCW bij de verkoop van actieve kool lager dan bij de verkoop van biochar. De reden hiervoor is dat de extra opbrengsten uit de verkoop van actieve kool de investeringskost en operationele kosten van de activatie niet compenseren, waar dit wel het geval is bij een input van 1 of 1,5 tds/ur. Bij een kleine hoeveelheid aangevoerde biomassa kan er beter voor gekozen worden niet te investeren in een activatie-oven, om de verliezen van het project te beperken.

De afname in NCW bij een stijging in aangevoerde biomassa in tds/ur, kan erop wijzen dat er geen schaalvoordelen zijn of dat de hoeveelheden aangevoerde biomassa die hier beschouwd werden te klein zijn om voordeel te ondervinden van de schaalvoordelen.

Uit de grafiek in figuur 9 kan afgeleid worden dat de NCW bij de verkoop van biochar veel sterker daalt bij een stijging in de hoeveelheid aangevoerde biomassa dan de NCW bij de verkoop van actieve kool. Er wordt naar een verklaring gezocht voor beide fenomenen.

De totale investeringskosten stijgen minder dan evenredig met de toename van de aangevoerde biomassa in tds/ur, dit zowel bij de verkoop van biochar als bij de verkoop van actieve kool. Hierbij wordt verwezen naar figuur B1.1 in bijlage 1. Bij de totale investeringskosten is er met andere woorden sprake van schaalvoordelen. Dit zou op termijn in een positieve NCW kunnen resulteren als de jaarlijkse kasstroom positief zou zijn.

Om een positieve NCW te bekomen, is het noodzakelijk voldoende positieve kasstromen te genereren, zoals blijkt uit formule (3) in hoofdstuk 5. De operationele kosten bij de verkoop van bio-olie en actieve kool zijn hoger dan de operationele opbrengsten bij een input van 0,5, 1 en 1,5 tds/uur. Bij een input van 3 tds/uur of meer zijn de operationele opbrengsten hoger dan de operationele kosten. In tabel B1.1 en figuur B1.2 in bijlage 1 komt dit tot uiting. Er is vanaf een input van 3 tds/uur sprake van een positieve jaarlijkse kasstroom. Dit resulteert, samen met de schaalvoordelen van de totale investeringskost, in een positieve NCW vanaf een input van 12 tds/uur.

De operationele opbrengsten uit de verkoop van bio-olie en actieve kool stijgen evenredig met de aangevoerde hoeveelheid biomassa. De enige verklaring voor het positief worden van de jaarlijkse kasstroom is de aanwezigheid van schaalvoordelen bij de operationele kosten.

De situatie ligt anders bij de verkoop van biochar en bio-olie. Zelfs bij extreem hoge inputniveaus wordt er in dit geval geen positieve kasstroom en dus ook geen positieve NCW bekomen. Tabel B1.2 in bijlage 1 geeft een overzicht.

7 Warmtekrachtkoppeling

7.1 Het principe

Bij warmtekrachtkoppeling (WKK) worden twee of meer nuttige energievormen geproduceerd uit één enkele primaire energiebron (Cogen, 2006). In het kader van deze masterproef wordt uitgegaan van de gezamenlijke productie van elektrische en thermische energie.

Het gebruik van WKK leidt tot een vermindering in brandstofgebruik ten opzichte van gescheiden productie van warmte en elektriciteit, doordat er bij WKK een veel betere benutting is van de in de brandstof aanwezige energie dan bij gescheiden productie. Bovendien bestaat de mogelijkheid om de WKK-installatie te voorzien van biobrandstoffen, waardoor niet enkel gebruik gemaakt wordt van een milieuvriendelijke energiebron, maar deze ook optimaal benut wordt (Cogen, 2006).

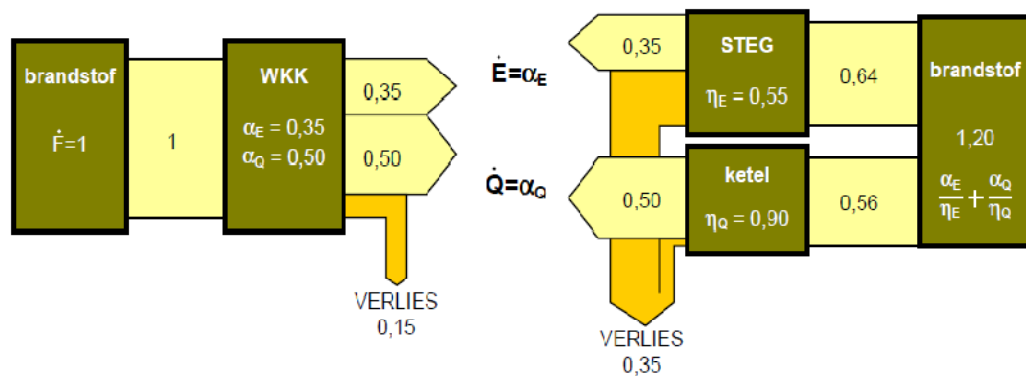
De kwaliteit van een energievorm wordt onder meer bepaald door de mate waarin de energievorm kan omgezet worden in andere energievormen (Cogen, 2006). Arbeid, waartoe elektriciteit behoort, is de meest waardevolle energievorm, want arbeid kan volledig in warmte omgezet worden, waar warmte slechts in beperkte mate kan omgezet worden in arbeid (Commissie Ampere, 2000).

Exergie wordt gedefinieerd als het gedeelte van energie dat in eender welke andere vorm van energie omgezet kan worden. Alle elektrische energie is exergie, terwijl bij warmte slechts een fractie $1 - T_0/T$ exergie bevat (Cogen, 2006). Deze factor wordt het carnotrendement genoemd, waarbij T de temperatuur is van de hoge-temperatuursbron, terwijl de temperatuur T_0 van de lage-temperatuursbron verondersteld wordt gelijk te zijn aan de omgevingstemperatuur. Het carnotrendement is het maximale rendement dat voor een thermische arbeidsmachine theoretisch haalbaar is (Commissie Ampere, 2000). De omzetbaarheid van warmte in andere energievormen neemt af met de temperatuur (Cogen, 2006). Een cijfervoorbeeld opgesteld door de Commissie Ampere (2000) kan dit verduidelijken. Beide temperaturen in de formule voor de berekening van het carnotrendement worden uitgedrukt in Kelvin, waarbij $0\text{ °C} = 273\text{ K}$. Bij $T = 500\text{ °C}$ is het carnotrendement gelijk aan 63%, waar dit bij $T = 1\ 000\text{ °C}$ gelijk is aan 77%. In beide gevallen werd $T_0 = 15\text{ °C}$ verondersteld.

Bij de productie van elektriciteit in conventionele elektriciteitscentrales treden grote warmteverliezen op via de koelcircuits (stoomcondensoren, koeltorens, waterkoelers, enzovoort) en via de uitlaatgassen. Het grootste deel van deze warmte zou gerecupereerd kunnen worden om aan de warmtevraag in de nabijheid van de elektriciteitscentrale te voldoen.

Zo zou de brandstofbenutting van 30 tot 55% bij een conventionele elektriciteitscentrale stijgen tot 80 à 90% bij een WKK-systeem (Cogen, 2006). Bij de conventionele productie van warmte wordt een brandstof verstoekt in, bijvoorbeeld, een verwarmingsketel of stoomketel. Een hoogrendementsketel kent een rendement van 80% (Commissie Ampere, 2000).

In onderstaande figuur wordt de energetische balans tussen een WKK-installatie en gescheiden productie vereenvoudigd voorgesteld. In deze figuur wordt verondersteld dat beide installaties eenzelfde elektrisch vermogen \dot{E} en thermisch vermogen \dot{Q} produceren. Het thermisch rendement van de ketel η_Q is 90%, het elektrisch rendement van de STEG η_E is 55%. De WKK-installatie kent een thermisch rendement α_Q van 50% en een elektrisch rendement α_E van 35%, waarbij $\alpha_E = \dot{E}/\dot{F}$ en $\alpha_Q = \dot{Q}/\dot{F}$, met \dot{E} is het nuttig geleverd elektrisch vermogen, \dot{Q} is het nuttig geleverd thermisch vermogen en \dot{F} is het toegevoegd brandstofvermogen (Commissie Ampere, 2000).



Figuur 10: vereenvoudigde voorstelling van de energetische balans tussen een WKK-installatie (links) en gescheiden productie van warmte en elektriciteit (rechts). Bron: Commissie Ampere (2000)

In figuur 10 wordt de brandstofinput \dot{F} voor de WKK-installatie gelijk gesteld aan één eenheid, waardoor de elektriciteitsopbrengst van de WKK gelijk is aan het elektrisch rendement en de warmteopbrengst gelijk aan het thermisch rendement (Commissie Ampere, 2000).

$$\dot{E} = \alpha_E$$

$$\dot{Q} = \alpha_Q$$

Om dezelfde hoeveelheid \dot{E} te produceren, heeft de gescheiden elektrische centrale een brandstofinput gelijk aan \dot{E}/η_E en de hoogrendementsketel een brandstofinput van \dot{Q}/η_Q nodig (Commissie Ampere, 2000).

Het totaal rendement van de WKK-installatie kan berekend worden door het thermisch rendement α_Q en het elektrisch rendement α_E bij elkaar op te tellen. Men kan echter beter de term "brandstofbenuttingsgraad" gebruiken om op deze manier duidelijk te maken dat het enkel gaat over de energetische benutting van de brandstof. Warmte en elektriciteit zijn namelijk niet equivalent (Commissie Ampere, 2000). De formule voor de brandstofbenuttingsgraad kan dan als volgt opgesteld worden.

$$\alpha_{\text{tot}} = (\dot{E} + \dot{Q}) / \dot{F} = \alpha_E + \alpha_Q \quad (29)$$

met:

- \dot{E} = de elektrische energie geproduceerd door de WKK gedurende een jaar
- \dot{Q} = de thermische energie of warmte geproduceerd door de WKK gedurende een jaar
- \dot{F} = de brandstofenergie verbruikt door de WKK gedurende een jaar

Toegepast op figuur 10 geeft dit een brandstofbenuttingsgraad van 85% voor de WKK-installatie. De gescheiden productie van warmte en elektriciteit kent een brandstofbenuttingsgraad van 70,8%.

7.2 Technologieën

De meest bekende technologieën voor WKK zijn de stoomturbine, de gasturbine en zuigmotoren met inwendige verbrandingsmotor (Cogen, 2006). Voor de analyse in deze masterproef zal uitgegaan worden van een WKK-installatie met dieselmotor, wat onder de zuigmotoren valt.

7.3 District heating

De geproduceerde warmte kan gebruikt worden om het pyrolyseproces van de nodige warmte te voorzien, of om te voldoen aan de warmtebehoefte van derden. Het pyrolyse- en, desgevallend, activatieproces worden verondersteld van de nodige energie voorzien te worden door respectievelijk de niet-condenseerbare gassen gevormd bij pyrolyse van biomassa en aardgas. De door de WKK-installatie geproduceerde warmte zal volledig geleverd worden aan de omgeving, wat valt onder de noemer district heating. District heatingssystemen kunnen gebruikt worden om de warmte, afkomstig van de gezamenlijke productie van elektriciteit en warmte, af te geven aan huishoudens om te voldoen aan de warmtebehoefte van deze laatste (Snoek & Spurr). De warmte kan eveneens aan commerciële of openbare gebouwen afgeleverd worden.

Er wordt verondersteld dat de warmte afgezet zal worden in de directe omgeving van de pyrolyse-installatie. Hiervoor wordt een residentiële, niet-stedelijke omgeving aangenomen met hoofdzakelijk open bebouwing en slechts enkele gesloten bebouwingen en appartementsblokken. Er wordt verondersteld dat enkel huishoudens aangesloten worden op het warmtenet en dat 100% van de geproduceerde warmte verkocht zal worden.

7.4 Groenestroomcertificaten

Het systeem van groenestroomcertificaten geldt in het Vlaams gewest sinds 1 januari 2002. Elektriciteitsproducenten die elektriciteit uit hernieuwbare energie produceren, kunnen hiervoor groenestroomcertificaten ontvangen (VREG[c]). Voor elke MWh elektriciteit die geproduceerd wordt uit hernieuwbare energiebronnen, wordt één groenestroomcertificaat afgeleverd door de VREG. Een groenestroomcertificaat kan gebruikt worden als bewijs van oorsprong, wanneer dit werd uitgereikt voor elektriciteit die in het transmissie- en distributienetwerk werd geïnjecteerd. Voor de productie van elektriciteit die op de site gebruikt wordt, wordt een groenestroomcertificaat afgeleverd dat wordt gemarkeerd als "ter plaatse verbruikt" (VREG[b]).

Elektriciteitsleveranciers dienen te voldoen aan de quotumverplichting, door inlevering van groenestroomcertificaten bij de VREG. In 2010 is elke leverancier verplicht 6% van de elektriciteit die geleverd wordt aan de klanten te produceren uit hernieuwbare energiebronnen (VREG[c]). De gemiddelde prijs van een groenestroomcertificaat bedroeg in februari 2010 108,40 EUR voor een groenestroomcertificaat zonder garantie van oorsprong en 107,14 EUR voor een groenestroomcertificaat met garantie van oorsprong (VREG, 2010a).

7.5 Warmtekrachtcertificaten

Het systeem van de warmtekrachtcertificaten, ter bevordering van primaire energiebesparing geldt in het Vlaams gewest sinds 1 januari 2005. Per 1 000 kWh primaire energie die bespaard wordt in een kwalitatieve warmtekrachtinstallatie in vergelijking met gescheiden productie van dezelfde hoeveelheid elektriciteit en/of mechanische energie en warmte, wordt een warmtekrachtcertificaat uitgereikt. Elektriciteitsleveranciers zijn verplicht ervoor te zorgen dat een minimumaandeel van de door hen aangeboden elektriciteit opgewekt wordt in kwalitatieve warmtekrachtcentrales (VREG[d]).

Wanneer een warmtekrachtcertificaat uitgereikt werd voor elektriciteit, geproduceerd uit kwalitatieve WKK, en deze elektriciteit werd geïnjecteerd in het distributie- en transmissienet, kan het gebruikt worden als bewijs van oorsprong (VREG[e]). In april 2010 bedroeg de gemiddelde marktprijs voor een warmtekrachtcertificaat 38,56 EUR (VREG, 2010b).

8 NCW bij de verkoop van pyrolysechar, elektriciteit en warmte

Tot hertoe werd verondersteld dat de geproduceerde bio-olie als olie verkocht werd. Deze bio-olie kan echter ook ter plaatse in elektriciteit en warmte worden omgezet. Wat de gevolgen hiervan zijn voor de analyse wordt in dit hoofdstuk besproken. Er zal uitgegaan worden van de snelle pyrolyse van kortetoomloophout. Voor de productie van elektriciteit en warmte uit de geproduceerde bio-olie wordt gebruik gemaakt van een WKK-installatie. Er wordt verondersteld dat alle geproduceerde warmte verkocht wordt, met andere woorden een warmteafzet van 100%, hoewel dit in de realiteit niet altijd haalbaar zal zijn. Het effect op de NCW bij een warmteafzet van minder dan 100% komt in hoofdstuk 11 aan bod.

8.1 Totale investeringskosten

8.1.1 Bedrag van de initiële investering

Het bedrag van de initiële investering voor de pyrolyse-installatie en activatie-oven blijft onveranderd. Er zal echter een extra investering noodzakelijk zijn voor een WKK-installatie, waarmee de bio-olie wordt omgezet in elektriciteit en warmte. De totale initiële investeringskosten bestaan uit de investeringskosten van de pyrolyse- en WKK-installatie, desgevallend de activatie-oven, en de opslagkosten voor bio-olie.

De opslagkosten voor bio-olie kunnen in formulevorm weergegeven worden (Bridgwater et al., 2002).

$$\text{Opslagkosten bio-olie} = 119 \cdot 10^3 \cdot (Q_{\text{conv}})^{0,4045} \quad (30)$$

met Q_{conv} = geproduceerde bio-olie in ton/uur = $0,70 \cdot Q_{\text{dry}}$

De WKK-installatie zal gebruik maken van een dieselmotor. Thewys en Kuppens (2008) gebruikten voor de berekening van de investeringskosten voor een WKK-installatie volgende formule.

$$\text{Investeringskosten WKK-installatie} = 1\,162,2 \cdot 10^3 \cdot [(a_e \cdot \text{LHV}_{\text{bio-olie}} \cdot 0,7 \cdot Q_{\text{dry}}) / 3,6]^{0,7813} \quad (31)$$

met:

- Q_{dry} = aangevoerde biomassa in tds/uur
- $\text{LHV}_{\text{bio-olie}}$ = lower heating value bio-olie = 16,17 GJ/ton
- a_e = percentage van de energie-inhoud van bio-olie dat wordt omgezet in elektriciteit (35%)

Thewys en Kuppens (2008) maken gebruik van α_e gelijk aan 35%. Ook Cogen (2006) en de Commissie Ampere (2000) vermelden α_e gelijk aan 35% als een typische waarde voor het percentage van de energie-inhoud dat wordt omgezet in elektriciteit. Het elektrisch rendement van een WKK-installatie is met andere woorden 35%.

Bij de conventionele elektriciteitsproductie gaat er veel warmte, die door gebruik te maken van een WKK-installatie voor het grootste deel gerecupereerd en op een nuttige manier toegepast kan worden, verloren. Als men een WKK-installatie gebruikt voor elektriciteitsproductie, kan men ervoor opteren enkel de geproduceerde elektriciteit te gebruiken en de warmte vrij te laten in de lucht via de warmtewisselaar die normaal gesproken zorgt voor de verbinding tussen de WKK-installatie en het warmtenet. De investering voor de productie van elektriciteit en warmte kan verondersteld worden gelijk te zijn, ongeacht of men de geproduceerde warmte via de warmtewisselaar vrijlaat in de lucht of op het warmtenet afzet (Ceunen, 2008). Er ontstaan echter extra kosten als gevolg van het afzetten van de geproduceerde warmte aan de omgeving. Deze zijn voor rekening van het warmtenet.

Bij de kosten voor het warmtenet kan een onderscheid gemaakt worden tussen de transport- en distributiekosten (Ceunen, 2008). Hoogsteen, Braber en Smit (2003) voerden een haalbaarheidsstudie uit voor de aanleg van een warmtenet in de regio Twente in Nederland. Afhankelijk van de voorgestelde warmtenetvariant, zijn er vervoersafstanden voor warmte tot 65 km. Indien de afstand waarover de warmte getransporteerd moet worden voldoende klein is, kunnen de kosten voor de transportleidingen beschouwd worden als niet-significante kosten ten opzichte van de totale investering (Ceunen, 2008).

Een gemiddeld gezin kent een warmtevraag van 23 260 kWh per jaar (VREG, 2007). België kende in 2005 een bevolkingsdichtheid van 342 inwoners per km² (FOD justitie, 2009). Een Belgisch gezin telde in 2005 gemiddeld 2,35 leden (Federaal rapport 2009). Dit betekent dat België 145 huishoudens telt per km², op basis van gegevens uit 2005. Als rekening gehouden wordt met een afgeronde warmtevraag van 23 000 kWh per gezin per jaar, kan er 3 335 000 kWh warmte afgezet worden per km² per jaar. Er wordt verondersteld dat de pyrolyse- en WKK-installatie zich in het midden van het cirkelvormige warmteafzetgebied bevindt, waardoor de maximale vervoersafstand berekend kan worden als de straal van deze cirkel. Uit figuur 10 kan afgeleid worden dat 50% van de energie aanwezig in de bio-olie door de WKK-installatie omgezet wordt in thermische energie, wat ertoe leidt dat de helft van de in de bio-olie aanwezige energie omgezet wordt in warmte. In volgende tabel wordt de vervoersafstand van de warmte berekend voor de drie inputniveaus.

Tabel 21: berekening van de grootte van het warmteafzetgebied

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
ton biomassa per jaar	3 500,00	7 000,00	10 500,00
ton bio-olie per jaar	2 450,00	4 900,00	7 350,00
energie in bio-olie per jaar (in kWh)	11 002 314,81	22 004 629,63	33 006 944,44
geproduceerde hoeveelheid warmte per jaar (in kWh)	5 501 157,41	11 002 314,81	16 503 472,22
grootte warmteafzetgebied (in km ²)	1,65	3,30	4,95
maximale vervoersafstand (in km)	0,72	1,03	1,26

Op basis van deze berekeningen wordt verondersteld dat de kosten voor de transportleidingen als niet-significant beschouwd kunnen worden.

De distributiekosten voor warmte bestaan uit de aansluitingskosten van particuliere gebruikers op het warmtenet (Ceunen, 2008). Schepers en van Valkengoed (2009) vermelden een gemiddelde aansluitingskost van 3 600 EUR per aansluiting. In onderstaande tabel worden de totale aansluitingskosten berekend voor de drie inputniveaus.

Tabel 22: berekening van de totale distributiekosten van de geproduceerde warmte

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
geproduceerde hoeveelheid warmte per jaar (in kWh)	5 501 157,41	11 002 314,81	16 503 472,22
aantal aansluitingen	239,18	478,36	717,54
totale distributiekost (EUR)	861 050,72	1 722 101,45	2 583 152,17

De aansluitingskosten worden gedragen door de gebruiker van het warmtenet (Schepers & van Valkengoed, 2009), waardoor deze geen onderdeel zijn van de initiële investering.

8.1.2 De ecologiepremie

Eerder in deze masterproef werd aangehaald dat de pyrolyse van biomassa enkel in aanmerking komt voor de ecologiepremie als er directe energie wordt opgewekt. De investering in een pyrolyse-installatie met elektriciteit- en warmteproductie uit bio-olie, komt, voor het gedeelte van de essentiële investeringscomponenten, in aanmerking voor de ecologiepremie.

Voor de berekening van de basis voor de ecologiepremie wordt gebruik gemaakt van een vaststelling van Ceunen (2008). De investering voor de productie van elektriciteit en warmte kan verondersteld worden gelijk te zijn, ongeacht of men de geproduceerde warmte via de warmtewisselaar vrijlaat in de lucht of op het warmtenet afzet, waardoor de investering in de WKK-installatie gezien wordt als een onderdeel van de investering in de pyrolyse-installatie.

Ringer et al. (2006) verdelen de totale investering in een pyrolyse-installatie in verschillende kostenposten. Ze berekenden de kost van elk van deze posten voor een pyrolyse-installatie die 550 ton droge stof per dag verwerkt. De kostenpost "overige uitrusting" werd in de analyse van Ringer et al. (2006) opgenomen om de onzekerheden in deze analyse weg te werken. Deze onzekerheden ontstonden doordat dit een technologie is die nog in de ontwikkelingsfase zit en er mogelijks uitrusting in een pyrolyse-installatie zit die niet onder één van de andere kostenposten valt. In onderstaande tabel wordt bepaald welk gedeelte van de investering als essentieel beschouwd kan worden.

Tabel 23: componenten van de investering die in aanmerking komen voor de ecologiepremie

kostenpost	aandeel in totaal (%)	in aanmerking voor ecologiepremie
behandeling en droging biomassa	20,43	
pyrolyse	14,37	pyrolyse
uitblussen	7,11	afhandeling reststof
productrecuperatie- en opslag	2,93	afhandeling reststof
hergebruik	5,06	afhandeling reststof
nutsvoorzieningen	11,48	
overige uitrusting	27,03	
stoom- en elektriciteitsproductie	11,59	
TOTAAL (%)	100,00	29,48

Bron: Ringer et al. (2006)

Volgens het Agentschap Economie (2008) komt ook de elektrotechnische uitrusting voor aansluiting op interne en/ of externe elektriciteitsnetten in aanmerking voor de ecologiepremie. Bovendien is het mogelijk dat de kostenpost "overige uitrusting" niet-geïdentificeerde, essentiële investeringscomponenten bevat. Voorzichtigheidshalve wordt geen rekening gehouden met de mogelijke aanwezigheid van essentiële investeringscomponenten in de kostenpost "overige uitrusting". Het percentage van de totale investering, zoals dit in tabel 23 werd berekend, zal echter wel licht verhoogd worden, om de kosten voor aansluiting op interne en/of externe elektriciteitsnetten mee op te nemen.

Er wordt verondersteld dat ongeveer een tiende van de kosten voor stoom- en elektriciteitsproductie gemaakt worden voor de aansluiting op interne en/of externe elektriciteitsnetten, waardoor 31% van de totale investering in aanmerking komt voor de ecologiepremie, met een meerkostpercentage van 50%.

Om een economische analyse te kunnen uitvoeren, is het belangrijk te weten wanneer de storting van de ecologiepremie op rekening van het bedrijf, gebeurt. Een onderneming wordt sowieso pas uitbetaald na een aanvraag tot uitbetaling van de ecologiepremie. De aanvraag tot uitbetaling dient te gebeuren binnen 6 maanden na beëindiging van de investering. 50% van het bedrag wordt uitbetaald ten vroegste 30 dagen na toekenning van de subsidie, op voorwaarde dat de investering reeds gestart is. 20% van het bedrag wordt uitbetaald ten vroegste 30 dagen na toekenning van de subsidie, op voorwaarde dat de investering voor 70% werd uitgevoerd. De overige 30% van het bedrag wordt uitbetaald ten vroegste 30 dagen na toekenning van de subsidie en na de beëindiging van de ecologie-investering, op voorwaarde dat de investering geëxploiteerd wordt in de onderneming en de onderneming geen achterstallige schulden heeft bij de RSZ (Agentschap Ondernemen, 2010). Er wordt verondersteld dat de investering in de pyrolyse-installatie in deze analyse voldoet aan alle voorwaarden om volledige uitbetaling van de ecologiepremie te bekomen. Er wordt verder verondersteld dat 70% van het bedrag wordt uitbetaald voor de beëindiging van de investering, terwijl de overige 30% wordt uitbetaald tijdens het eerste jaar dat de pyrolyse-installatie in werking is.

Wederom geldt een percentage van 40%. De berekeningen in onderstaande tabel verduidelijken dit. De jaaromzet wordt berekend door de opbrengsten uit de verkoop van actieve kool op te tellen bij de opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit en warmte. De berekening van de opbrengsten uit de verkoop van warmte en elektriciteit en het aantal personeelsleden bij de WKK-installatie komen verderop aan bod.

Tabel 24: berekening van het aantal personeelsleden en de jaaromzet bij het gebruik van char als grondstof voor actieve kool

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
aantal werknemers pyrolyse-installatie	1	2	2
aantal werknemers oven	1	1	2
aantal werknemers WKK-installatie	1	1	1
jaaromzet (EUR)	667 908,87	1 335 817,74	2 003 726,61

Gebruik makend van de formule voor de investeringskosten van een pyrolyse-installatie uit Bridgwater et al. (2002), kan de formule voor berekening van de basis voor de ecologiepremie opgesteld worden.

$$\text{Basis voor berekening ecologiepremie} = a_1 * m * [40,8 * 10^3 * (Q_{\text{dry}} * 1000)^{0,6194} + 1 162,2 * 10^3 * [(a_e * \text{LHV}_{\text{bio-olie}} * 0,7 * Q_{\text{dry}}) / 3 600]^{0,7813}] \quad (32)$$

met:

- m = meerkost percentage (50%)
- a_1 = percentage van de investering dat in aanmerking komt voor ecologiepremie (31%)
- Q_{dry} = aangevoerde biomassa in tds/uur
- a_e = percentage van de energie-inhoud van bio-olie dat wordt omgezet in elektriciteit (35%)
- $\text{LHV}_{\text{bio-olie}}$ = lower heating value bio-olie = 16,17 GJ/ton

Op basis van dit bedrag wordt de uiteindelijke ecologiepremie van 40% berekend. Het totale bedrag van de ecologiepremie mag niet hoger zijn dan 1,75 miljoen EUR.

70% van het bedrag van de ecologiepremie wordt afgetrokken van het investeringsbedrag van de pyrolyse-installatie in jaar 0, om de initiële investering te bepalen. De overige 30% wordt pas in het eerste jaar dat de installatie in werking is, ontvangen. Dit bedrag moet geactualiseerd worden naar het tijdstip waarop de initiële investering gebeurt. Dit kan door dit bedrag te vermenigvuldigen met de actualisatiefactor A_{1-r} (Mercken, 2004), met $A_{1-r} = 1/(1+r)$.

8.1.3 Investeringsaftrek

Voor de berekening van de verhoogde investeringsaftrek worden de pyrolyse-installatie en de WKK-installatie als twee aparte investeringen beschouwd.

De investeringskost van de pyrolyse-installatie komt in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek, omdat er elektriciteit en warmte uit de geproduceerde bio-olie opgewekt zal worden (van Droogenbroeck, 2010).

Op basis van de indeling uit Ringer et al. (2006) wordt het percentage van de investeringskost dat in aanmerking komt voor de verhoogde investeringsaftrek berekend. De berekening is terug te vinden in volgende tabel.

Tabel 25: componenten van de investering in de pyrolyse-installatie die in aanmerking komen voor de verhoogde investeringsaftrek

kostenpost	aandeel in totaal (%)	in aanmerking voor investeringsaftrek
behandeling en droging biomassa	20,43	bewerking van ingaande stoffen
pyrolyse	14,37	reactoren
uitblussen	7,11	bewerking van uitgaande stoffen
productrecuperatie- en opslag	2,93	opslag van in- en uitgaande stoffen
hergebruik	5,06	bewerking van in- en uitgaande stoffen
nutsvoorzieningen	11,48	
overige uitrusting	27,03	
stoom- en elektriciteitsproductie	11,59	bewerking van in- en uitgaande stoffen
Totaal (%)	100,00	61,50

Bron: Ringer et al., 2006

Op basis van deze gegevens zou 61,50% van het initiële investeringsbedrag in aanmerking komen voor de verhoogde investeringsaftrek. Het is mogelijk dat dit percentage in werkelijkheid wat hoger ligt. In de kostenpost "overige uitrusting" kunnen onderdelen van de investering opgenomen zijn die tot één van de, voor de verhoogde investeringsaftrek in aanmerking komende, investeringscomponenten behoort. Voorzichtigheidshalve wordt ervoor gekozen het percentage van 61,50% te hanteren.

Gebruik makend van de formule voor de totale investeringskosten uit Bridgwater et al. (2002), kan het bedrag van de verhoogde investeringsaftrek als volgt berekend worden:

$$\text{Verhoogde investeringsaftrek} = b * c * a_2 * 40,8 * 10^3 * (Q_{\text{dry}} * 1000)^{0,6194} \quad (33)$$

met:

- Q_{dry} = aangevoerde biomassa in tds/uur
- b = belastingvoet (33%)
- c = percentage van de investeringsaftrek (13,5%)
- a_2 = percentage van de investering dat in aanmerking komt voor de (verhoogde) investeringsaftrek (61,50%)

WKK-installaties vallen onder categorie 7 van de lijst van activa die in aanmerking komen voor verhoogde investeringsaftrek voor energiebesparende investeringen: warmte-kracht-koppelingsapparatuur.

De in aanmerking komende investeringen binnen de inrichting zijn:

- 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 snelheidsreduktoren, 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 (ecosubsibru[a]).

Deze investeringen komen slechts in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek indien de WKK-installatie gelijktijdig aan volgende drie voorwaarden voldoet:

- $a_E + 2/3 * a_Q \geq 50\%$
- $a_E / (a_E + a_Q) \geq 25\%$
- $a_Q / (a_E + a_Q) \geq 25\%$

met:

- a_E = de verhouding van de op jaarbasis geproduceerde mechanische of elektrische energie en de totale, aan het systeem toegevoerde energie op jaarbasis, berekend op de onderste verbrandingswaarde van de brandstof
- a_Q = de verhouding van de op jaarbasis gebruikte warmte-energie en de totale aan het systeem toegevoerde energie op jaarbasis, berekend op de onderste verbrandingswaarde van de brandstof (ecosubsibru[a]).

Het thermisch rendement van pyrolyse-olie naar warmte bedraagt 50%. Het elektrisch rendement bedraagt 35%. Ingevuld in bovenstaande vergelijkingen geeft dit volgend resultaat.

- $0,35 + 2/3 * 0,50 = 68,33\% \geq 50\%$
- $0,35 / (0,35 + 0,50) = 41,18\% \geq 25\%$
- $0,50 / (0,35 + 0,50) = 58,82\% \geq 25\%$

De investering in de WKK-installatie komt in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek.

Ceunen (2008) berekende de investeringskost van het opwekken van elektriciteit bij verbranding van biomassa. In volgende tabel worden de investeringscomponenten weergegeven als een percentage van de totale investeringskost voor een WKK-installatie met stoomturbine met een elektrische output van 5 MW_e. Ceunen (2008) geeft aan dat bij dit soort investeringen schaalvoordelen een rol spelen. De investeringskosten in de WKK-installatie zullen bijgevolg minder dan evenredig stijgen met de elektriciteitsoutput. Het werkelijke percentage van de voor verhoogde investeringsaftrek in aanmerking komende componenten van de investeringskost van de WKK-installatie, kan bijgevolg afwijken van het in tabel 26 berekende percentage. Het is bovendien niet zeker dat het percentage van de investeringskost dat in aanmerking komt voor verhoogde investeringsaftrek, hetzelfde is voor een WKK-installatie met dieselmotor als voor een WKK-installatie met stoomturbine. Bij gebrek aan bruikbare data over een WKK-installatie met dieselmotor, wordt verondersteld dat het percentage van de investeringskost dat in aanmerking komt voor de verhoogde investeringsaftrek berekend voor een WKK-installatie met stoomturbine ook van toepassing is voor een WKK-installatie met dieselmotor.

Tabel 26: componenten van de investering in de WKK-installatie die in aanmerking komen voor de verhoogde investeringsaftrek

kostenpost	aandeel in totaal (%)	in aanmerking voor investeringsaftrek
boiler	61,09	
stoomturbine	17,92	omzetting thermische in mechanische energie
condensator	10,15	
warmtewisselaar	1,75	warmtewisselaar
alternator	5,51	omzetting mechanische in elektrische energie
ventilatoren	0,87	
extractiepompen	0,27	
voedingspompen	1,40	transport van brandstof
andere pompen	1,02	
TOTAAL (%)	100,00	26,59

Bron: Ceunen, 2008

Er wordt verondersteld dat 26,59% van de initiële investering in de WKK-installatie in aanmerking komt voor de verhoogde investeringsaftrek. De verhoogde investeringsaftrek voor de WKK-installatie kan met volgende formule berekend worden.

$$\text{Verhoogde investeringsaftrek} = b * c * a_3 * 1\,162,2 * 10^3 * [(a_e * \text{LHV}_{\text{bio-olie}} * 0,7 * Q_{\text{dry}}) / 3\,600]^{0,7813} \quad (34)$$

met:

- Q_{dry} = aangevoerde biomassa in tds/uur
- b = belastingvoet (33%)
- c = percentage van de investeringsaftrek (13,5%)
- a_3 = percentage van de investering dat in aanmerking komt voor de (verhoogde) investeringsaftrek (26,59%)
- a_e = percentage van de energie-inhoud van bio-olie dat wordt omgezet in elektriciteit (35%)
- $\text{LHV}_{\text{bio-olie}}$ = lower heating value bio-olie = 16,17 GJ/ton

Het bedrag van de verhoogde investeringsaftrek wordt afgetrokken van de belastbare winst van het jaar waarin de investering plaats vindt. Het wordt afgetrokken van het investeringsbedrag van de pyrolyse-installatie in jaar 0, om de initiële investering te bepalen.

Om het belastingschild van de afschrijvingen te berekenen wordt gebruik gemaakt van het totale investeringsbedrag voor de investeringsaftrek. De formule voor de NCW-berekening uit Mercken (2004) wordt aangepast.

$$\text{NCW} = [(1-b) * (O_t - Q_t) + b * (I_0/n)] a_{n-r} - (1 - b * c * a_1) * I_0 \quad (35)$$

met:

- b = belastingvoet
- O_t = inkomende kasstromen
- Q_t = uitgaande kasstromen
- I_0 = initieel investeringsbedrag, zoals berekend in paragraaf 8.1.1
- n = looptijd van het project
- r = kapitaalkost na belastingen
- r^* = kapitaalkost voor belastingen
- $r = (1-b) * r^*$
- c = percentage van de investeringsaftrek
- a_1 = percentage van de investering dat in aanmerking komt voor de verhoogde investeringsaftrek

Tabel 27: berekening van de investeringskosten bij een input van 0,5 tds/uur

	actieve kool	biochar
INVESTERING (EUR)	4 041 729,65	2 546 675,73
pyrolyse-installatie (EUR)	1 916 029,47	1 916 029,47
investeringsaftrek (EUR)	61 128,30	61 128,30
WKK (EUR)	728 731,58	728 731,58
opslagkost voor bio-olie (EUR)	77 825,60	77 825,60
activatie-oven (EUR)	1 495 053,92	
ecologiepremie (EUR)	114 782,63	114 782,63

8.2 Operationele kosten

8.2.1 Kost korteomloophout en aanvoerkosten

De kosten voor aanleg, oogst en voorbehandeling van het korteomloophout blijven onveranderd, omdat het uitgangspunt voor de analyse hetzelfde blijft als bij de verkoop van bio-olie. De NCW zal berekend worden voor drie verschillende inputniveaus, namelijk 0,5, 1 en 1,5 tds/uur korteomloophout. Bijgevolg blijven ook de aanvoerkosten van korteomloophout onveranderd.

8.2.2 Onderhoudskosten

Cogen Vlaanderen verzamelde gegevens in verband met de onderhoudskosten van WKK-installaties. De onderhoudskosten worden door Cogen Vlaanderen weergegeven per MWh geproduceerde elektriciteit. De kosten per MWh geproduceerde elektriciteit nemen af naarmate het elektrisch vermogen in kW van de WKK-installatie toeneemt. Het elektrisch vermogen van de WKK-installatie dient berekend te worden bij een input van 0,5, 1 en 1,5 tds/uur. Dit kan door de jaarlijks geproduceerde hoeveelheid elektriciteit (in kWh) te delen door het aantal uren dat de WKK-installatie in werking is (7 000 uren). Vooreerst wordt de elektriciteitsproductie uit een ton droge stof wilg bepaald.

Een ton wilg kent een energiedichtheid van 13,6 MJ/kg bij een vochtigheidsgehalte van 30% (Rogers & Brammer, 2009). Uitgaande van een uiteindelijk vochtigheidspercentage van 0%, komt dit overeen met een energiedichtheid van 19,43 MJ/kg voor droge stof wilg. In paragraaf 6.3.3 is een energiedichtheid voor bio-olie van 19,4 GJ/m³ terug te vinden. Met een dichtheid voor bio-olie van 1,2 kg/l, komt dit overeen met een energiedichtheid van 16,17 MJ/kg.

Een ton droge stof wilg bevat 19,43 GJ energie. Uit een ton biomassa wordt, bij snelle pyrolyse, 700 kg bio-olie geproduceerd wat, met een energiedichtheid van 16,17 MJ/kg, 11,32 GJ energie oplevert bij verbranding. Met een elektrisch rendement voor een WKK-installatie van 35%, wordt uit deze 700 kg bio-olie 3,96 GJ elektriciteit geproduceerd.

In volgende tabel wordt berekend hoeveel kWh elektriciteit er jaarlijks geproduceerd wordt en wordt bepaald wat het vermogen van de WKK-installatie is.

Tabel 28: berekening van het vermogen van de WKK-installatie

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
aantal GJ elektriciteit per jaar	13 862,92	27 725,83	41 588,75
aantal kWh elektriciteit per jaar	3 850 810,19	7 701 620,37	11 552 430,56
vermogen WKK-installatie in kW	550,12	1 100,23	1 650,35

Cogen Vlaanderen stelde cijfers ter beschikking over de WKK met bio-olietmotor. Deze zullen gebruikt worden om de totale onderhoudskosten in onderstaande tabel te berekenen. De totale onderhoudskosten worden berekend door de kost per MWh te vermenigvuldigen met de jaarlijks geproduceerde hoeveelheid elektriciteit in MWh.

Tabel 29: berekening jaarlijkse onderhoudskosten WKK-installatie

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
onderhoudskost (EUR/MWh)	13,00	12,04	11,50
jaarlijkse onderhoudskost (EUR)	50 060,53	92 727,51	132 852,95

De jaarlijkse onderhoudskosten van de WKK-installatie worden opgeteld bij de jaarlijkse onderhoudskosten van de pyrolyse-installatie en, desgevallend, activatie-oven om de totale jaarlijkse onderhoudskosten te berekenen.

8.2.3 Personeelskosten

Net als het geval was bij de activatie-oven, zal ook voor de WKK-installatie minimaal één extra werknemer per shift aangenomen worden.

Bridgwater et al. (2002) berekenen het aantal werknemers per shift gebruik makend van volgende formule.

$$\text{Aantal personeelsleden WKK-installatie per shift} = 0,4847 \cdot (P_{e,\text{gross}} - P_{e,\text{gen}})^{0,483} \quad (36)$$

met:

- $P_{e,\text{gross}}$ = elektriciteitsoutput dieselmotor in MW_e
- $P_{e,\text{gen}}$ = intern benodigde elektriciteit dieselmotor in MW_e

Volgens Bridgwater et al. (2002) bedraagt de intern benodigde elektriciteit 3% van de totale hoeveelheid geproduceerde elektriciteit. Om $P_{e,\text{gen}}$ te berekenen wordt gebruik gemaakt van een productie van 3,96 GJ elektriciteit uit een ton droge stof wilg, zoals reeds in paragraaf 8.2.2 werd berekend.

De elektriciteitsoutput en intern benodigde hoeveelheid elektriciteit voor de dieselmotor worden in de formule van Bridgwater et al. (2002) uitgedrukt in MW_e . In onderstaande tabel worden deze gegeven voor de drie inputniveaus. De elektriciteitsoutput wordt berekend door het aantal GJ elektrische energie bekomen uit een ton biomassa, 3,96 GJ, te vermenigvuldigen met het aantal tds te verwerken biomassa, $Q_{\text{dry}} \cdot 7000$ uren.

Tabel 30: berekening van de elektriciteitsoutput en de intern benodigde elektriciteit van de WKK-installatie

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
elektrische output (GJ/jaar)	13 862,92	27 725,83	41 588,75
elektrische output (MW/jaar)	0,55	1,10	1,65
intern benodigde elektriciteit (MW/jaar)	0,02	0,03	0,05

De gegevens uit bovenstaande tabel kunnen ingevuld worden in formule (36) voor de berekening van het aantal werknemers voor de WKK-installatie. Resulteert dit in een niet-afgerond getal, dan wordt dit afgerond naar boven.

Tabel 31: berekening aantal arbeiders WKK-installatie

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
aantal arbeiders	0,36	0,50	0,61
aantal arbeiders afgerond	1,00	1,00	1,00

De jaarlijkse personeelskosten van de arbeiders voor de WKK-installatie worden in formulevorm weergegeven als volgt:

$$\text{Jaarlijkse personeelskost WKK-installatie} = 3 \text{ shiften} * 46\,000 \text{ EUR/arbeider/jaar} * \text{aantal arbeiders (naar boven afgerond)} \quad (37)$$

Deze kosten worden opgeteld bij de personeelskosten van de pyrolyse-installatie en, desgevallend, de activatie-oven berekend in paragraaf 6.2.4 om de totale jaarlijkse personeelskosten te berekenen.

8.2.4 Verzekeringskosten

De verzekeringskost van de WKK-installatie kan berekend worden als een vast percentage van de initiële investeringskost van de WKK-installatie. Volgens Cogen (2006) maken de verzekeringskosten 0,5 tot 2% uit van de initiële investeringskosten van de WKK-installatie. In het kader van deze masterproef wordt een percentage van 1,5% verondersteld, waardoor de totale verzekeringskosten berekend kunnen worden met behulp van onderstaande formule.

$$\text{Jaarlijkse verzekeringskost WKK-installatie} = 0,015 * 1\,162,2 * 10^3 * [(a_e * LHV_{\text{bio-olie}} * 0,7 * Q_{\text{dry}}) / 3\,600]^{0,7813} \quad (38)$$

met:

- Q_{dry} = aangevoerde biomassa in tds/uur
- a_e = percentage van de energie-inhoud van bio-olie dat wordt omgezet in elektriciteit (35%)
- $LHV_{\text{bio-olie}}$ = lower heating value bio-olie = 16,17 GJ/ton

Deze kosten worden opgeteld bij de jaarlijkse verzekeringskosten van de pyrolyse-installatie en, desgevallend, de activatie-oven uit paragraaf 6.2.5 om de totale jaarlijkse verzekeringskosten te bepalen.

8.2.5 Energiekosten

De WKK-installatie kent een elektriciteitsverbruik van 3% van de totale elektriciteitsoutput. Om in deze behoefte te voorzien, wordt een gedeelte van de geproduceerde elektriciteit gebruikt, waardoor de elektriciteitskosten voor de WKK-installatie eigenlijk een afname van de opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit zijn. Dit komt in paragraaf 8.3.2 aan bod.

De WKK-installatie verbruikt diesel om de omzetting van bio-olie in elektriciteit en warmte mogelijk te maken. De hoeveelheid diesel die hiervoor nodig is, is echter zeer klein. Hierdoor vormen de dieselkosten van de WKK-installatie slechts een verwaarloosbaar klein deel van de totale operationele kosten (Vanreppelen & Kuppens, 2010). Er zal met deze kost geen rekening gehouden worden bij het uitvoeren van de economische analyse.

De elektriciteitskosten, berekend in paragraaf 6.2.6, vallen weg indien de bio-olie gebruikt wordt voor elektriciteitsproductie. De geproduceerde elektriciteit zal aangewend worden om in de elektriciteitsbehoefte van de pyrolyse-installatie en, desgevallend, activatie-oven te voorzien.

8.2.6 Algemene overheadkosten

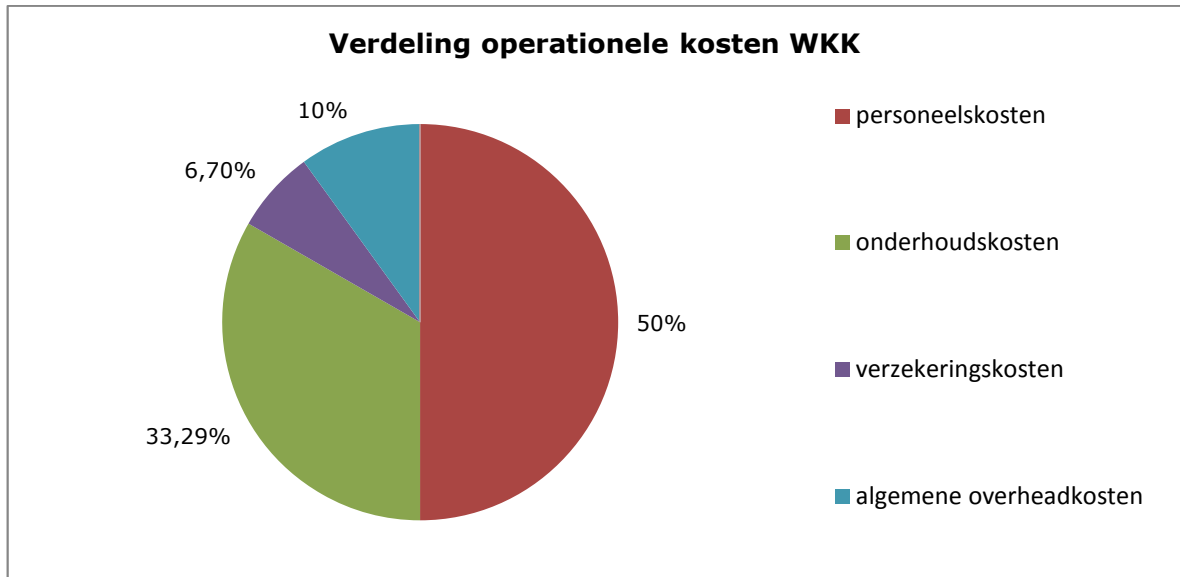
Door de toename van de totale operationele kosten, zullen de algemene overheadkosten, die 10% van de totale operationele kosten uitmaken, stijgen. De algemene overheadkosten die betrekking hebben op de WKK-installatie kunnen als volgt berekend worden.

$$\text{Jaarlijkse algemene overheadkosten WKK-installatie} = 0,10 * [(SOM(\text{onderhoudskost WKK-installatie, personeelskost WKK-installatie, verzekeringskost WKK-installatie})/90) * 100] \quad (39)$$

In onderstaande tabel is de berekening van de jaarlijkse operationele kosten van de WKK-installatie terug te vinden bij een input van 0,5 tds/uur. De jaarlijkse operationele kosten zijn gelijk bij de verkoop van biochar en de verkoop van actieve kool.

Tabel 32: berekening van de jaarlijkse operationele kosten van de WKK-installatie bij een input van 0,5 tds/uur

KOSTEN (EUR)	
onderhoudskosten WKK-installatie	50.060,53
personeelskosten WKK-installatie	138.000,00
verzekeringskosten WKK-installatie	10.930,97
algemene overheadkosten WKK-installatie	22.110,17



Figuur 11: verdeling van de operationele kosten bij de productie van elektriciteit en warmte uit bio-olie

Figuur 11 geeft de bijdragen van de verschillende kostencategorieën tot de totale operationele kosten weer bij de productie van warmte en elektriciteit uit bio-olie. De personeelskosten zijn hierbij de belangrijkste kostenpost, gevolgd door de onderhoudskosten. Om deze grafiek op te stellen, werd gebruik gemaakt van de gemiddelden van elke kostencategorie voor de drie inputniveaus.

8.3 Operationele opbrengsten

8.3.1 Opbrengsten uit de verkoop van char

De opbrengsten uit de verkoop van biochar of actieve kool blijven dezelfde als deze berekend in paragrafen 6.3.1 en 6.3.2.

8.3.2 Opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit

Als er elektriciteit geproduceerd wordt uit de bio-olie, zal een gedeelte van deze elektriciteit gebruikt worden om te voorzien in de energiebehoefte van de pyrolyse- en WKK-installatie en, desgevallend, activatie-oven. De resterende elektriciteit wordt verkocht.

Tabel 33: jaarlijks te verkopen hoeveelheid elektriciteit

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
aantal kWh elektriciteit per jaar (uit tabel 28)	3 850 810,19	7 701 620,37	11 552 430,56
verbruik pyrolyse (kWh)	350 000,00	700 000,00	1 050 000,00
verbruik activatie (kWh)	234 486,00	468 972,00	703 458,00
verbruik WKK (kWh)	115 524,31	231 048,61	346 572,92
te verkopen bij biochar (kWh)	3 385 285,88	6 770 571,76	10 155 857,64
te verkopen bij actieve kool (kWh)	3 150 799,88	6 301 599,76	9 452 399,64

Bij de berekening van de operationele kosten werd gebruik gemaakt van een aankoop prijs van 0,067 EUR/kWh. Deze verschilt van de verkoopprijs van elektriciteit, omdat de aankoop prijs ook de taksen en prijs voor gebruik van het elektriciteitsnet bevat, waar dit bij de verkoopprijs niet het geval is. De verkoopprijs is de opbrengst die de elektriciteitsproducent ontvangt per geproduceerde kWh (Electrabel, 2010).

De besparing in elektriciteitskosten wordt berekend in onderstaande tabel. Let wel, deze besparing wordt berekend ten opzichte van de situatie beschreven in hoofdstuk 6. Het verbruik van de WKK-installatie wordt niet meegerekend.

Tabel 34: berekening van de besparing van elektriciteitskosten

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
elektriciteitskost pyrolyse (EUR)	23 450,00	46 900,00	70 350,00
elektriciteitskost activatie (EUR)	15 710,56	31 421,12	47 131,69
besparing bij verkoop biochar (EUR)	23 450,00	46 900,00	70 350,00
besparing bij verkoop actieve kool (EUR)	39 160,56	78 321,12	117 481,69

Abucon (2010) vermeldt een verkoopprijs van 0,03 tot 0,06 EUR/kWh afhankelijk van het dag- of nachttarief. Per 24 uur worden 9 daluren aangerekend (VREG[a]).

Er wordt verondersteld dat de verkoopprijs in piekuren gelijk is aan 0,06 EUR/kWh en de verkoopprijs in daluren gelijk is aan 0,03 EUR/kWh. De gewogen gemiddelde verkoopprijs is dan 0,049 EUR/kWh. Dit is de verkoopprijs waarmee in deze analyse gewerkt wordt.

De opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit worden berekend door de verkoopprijs te vermenigvuldigen met de te verkopen hoeveelheid elektriciteit.

$$\begin{aligned} \text{Jaarlijkse opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit} = \\ 0,049 \text{ EUR/kWh} * \text{te verkopen elektriciteit (kWh)} \end{aligned} \quad (40)$$

8.3.3 Opbrengsten uit de verkoop van warmte

In tabel 21 werd reeds berekend hoeveel warmte er jaarlijks geproduceerd wordt bij een input van 0,5, 1 of 1,5 tds/uur. Om de opbrengsten uit de verkoop van warmte te berekenen, moet de warmteprijs bepaald worden.

Briffaerts et al. (2009) vermelden een warmteprijs van 18 EUR/MWh voor kleine projecten en een warmteprijs van 15 EUR/MWh voor grote projecten. Er wordt hierbij geen definitie gegeven van grote of kleine projecten. De warmteprijs die in deze analyse gebruikt wordt, is een verkoopprijs van 0,017 EUR/kWh.

De jaarlijkse opbrengsten uit de verkoop van warmte kunnen berekend worden met behulp van onderstaande formule.

$$\begin{aligned} \text{Jaarlijkse opbrengsten uit de verkoop van warmte} = \\ 0,017 \text{ EUR/kWh} * \text{hoeveelheid geproduceerde warmte (kWh)} \end{aligned} \quad (41)$$

8.3.4 Opbrengsten uit de verkoop van groenestroomcertificaten

Groenestroomcertificaten worden uitgereikt voor elke MWh elektriciteit geproduceerd uit hernieuwbare energiebronnen. Een elektriciteitsproducent ontvangt 107,14 EUR voor een certificaat met garantie van oorsprong. Voor een certificaat zonder garantie van oorsprong, ontvangt de producent 108,40 EUR. Om het aantal groenestroomcertificaten voor de elektriciteitsproducent te berekenen, wordt het aantal geproduceerde MWh elektriciteit afgerond naar beneden. Een elektriciteitsproducent ontvangt immers pas een groenestroomcertificaat voor de productie van een volledige MWh elektriciteit. Er dient een onderscheid gemaakt te worden tussen de verkoop van biochar en de verkoop van actieve kool. De activatie-oven zal namelijk ook een gedeelte van de geproduceerde elektriciteit verbruiken.

Tabel 35: aantal groenestroomcertificaten voor de elektriciteitsproducent bij de verkoop van biochar

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
zonder garantie van oorsprong	465	931	1 396
met garantie van oorsprong	3 385	6 770	10 155

Tabel 36: aantal groenestroomcertificaten voor de elektriciteitsproducent bij de verkoop van actieve kool

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
zonder garantie van oorsprong	700	1 400	2 100
met garantie van oorsprong	3 150	6 301	9 452

De opbrengsten uit de verkoop van verkregen groenestroomcertificaten kunnen berekend worden door het aantal certificaten te vermenigvuldigen met de gemiddelde prijs voor een certificaat en dit zowel voor de certificaten met garantie van oorsprong, als voor deze zonder garantie van oorsprong.

$$\text{Jaarlijkse opbrengsten uit de verkoop van verkregen groenestroomcertificaten} = \# \text{ certificaten zonder garantie van oorsprong} * 108,40 \text{ EUR} + \# \text{ certificaten met garantie van oorsprong} * 107,14 \text{ EUR} \quad (42)$$

8.3.5 Opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten

Er worden slechts warmtekrachtcertificaten uitgereikt indien aan vier voorwaarden voldaan werd. Deze voorwaarden zijn:

- de warmtekrachtcentrale is kwalitatief, wat in het geval van een mechanisch of elektrisch vermogen van meer dan 1 MW wil zeggen dat er jaarlijks een relatieve primaire energiebesparing van minimaal 10% is, bij een mechanisch of elektrisch vermogen van minder dan 1 MW is de warmtekrachtcentrale kwalitatief als ze op jaarbasis een relatieve primaire energiebesparing realiseert;
- de warmtekrachtcentrale ligt in het Vlaams gewest;
- de warmtekrachtcentrale werd voor het eerst in dienst genomen of ingrijpend veranderd na 1 januari 2002;

- de warmtekrachtcentrale is voorzien van de nodige meetapparatuur om permanent de netto elektriciteitsproductie te meten, voor installaties met een elektrisch/mechanisch vermogen groter dan 200 kW is ook meetapparatuur om de netto warmteproductie en het brandstof- of energieverbruik permanent te meten noodzakelijk (VREG[f]).

Er wordt verondersteld dat aan de tweede en vierde voorwaarde voldaan is. Aan de derde voorwaarde zal sowieso voldaan zijn, aangezien het in deze analyse gaat over de investering in een nieuwe WKK-installatie.

Om te bepalen of aan de eerste voorwaarde voldaan werd, dient de relatieve primaire energiebesparing berekend te worden. Om deze besparing te berekenen wordt gebruik gemaakt van de rendementen van de referentie-installaties vastgelegd op Europees niveau. Het thermisch referentierendement werd vastgelegd op 81%, het elektrisch referentierendement op 44,2% bij gebruik van biobrandstoffen. Deze zouden moeten gecorrigeerd worden voor de aansluitspanning en de gemiddelde buitentemperatuur (Cogen, 2006). Deze gegevens zijn echter niet bekend, waardoor de onaangepaste rendementen gebruikt worden. Het thermisch en elektrisch rendement van de WKK-installatie wordt bepaald aan de hand van de omzetting van de energie uit bio-olie naar elektriciteit of warmte. Het thermisch rendement is bijgevolg 50%, het elektrisch rendement is 35%. De relatieve primaire energiebesparing wordt berekend met behulp van onderstaande formule.

$$BPE = 1 - \frac{1}{\frac{W\eta}{Ref W\eta} + \frac{E\eta}{Ref E\eta}}$$

met:

(43)

- BPE = relatieve primaire energiebesparing
- $W\eta$ = warmterendement WKK-installatie
- $E\eta$ = elektrisch rendement WKK-installatie
- $Ref W\eta$ = referentierendement voor gescheiden warmteproductie
- $Ref E\eta$ = referentierendement voor gescheiden elektriciteitsproductie

Als de overeenkomstige waarden in bovenstaande formule ingevuld worden, dan levert dit een relatieve primaire energiebesparing op van 29,03%. Er wordt eveneens aan de eerste voorwaarde voldaan. Er zullen warmtekrachtcertificaten uitgereikt worden aan de producent van warmte en elektriciteit.

Om het aantal certificaten dat voor een installatie verkregen kan worden te berekenen, moet de absolute primaire energiebesparing van de WKK-installatie berekend worden (Cogen, 2006).

Dit kan door gebruik te maken van onderstaande formule, waarbij de referentierendementen deze zijn uit het ministerieel besluit van 6 oktober 2006 inzake de vastlegging van referentierendementen voor toepassing van de voorwaarden voor kwalitatieve warmtekrachtinstallaties. In dit besluit wordt een thermisch referentierendement van 81% en een elektrisch referentierendement van 44,2% vastgelegd bij gebruik van biobrandstoffen.

$$PEB = E \cdot (1/\eta_E + \alpha_Q / (\alpha_E \cdot \eta_Q) - 1/\alpha_E) \quad (44)$$

met:

- PEB = absolute primaire energiebesparing
- E = de binnen de beschouwde maand door de WKK-installatie geproduceerde hoeveelheid elektriciteit
- α_Q = thermisch rendement van de WKK-installatie
- η_Q = thermisch rendement van de referentieketel
- α_E = elektrisch rendement van de WKK-installatie
- η_E = elektrisch rendement van de referentiecentrale (Cogen, 2006)

Vanaf het vijfde jaar na indienstname of ingrijpende wijziging wordt er niet meer voor alle warmtekrachtbesparing warmtekrachtcertificaten uitgereikt. Dit gebeurt slechts nog voor een bepaald percentage X dat als volgt berekend wordt:

$$X = 100 \times (RPE - 0,2 \times (T-48)) / RPE \quad (45)$$

Hierin is RPE de relatieve primaire energiebesparing, en T de periode (in maanden) tussen de datum van indienstname en de maand waarin de warmtekrachtbesparing werd gerealiseerd (VREG[f]). De RPE werd berekend met behulp van formule (43) en bedraagt 29,03%.

In volgende tabel worden de opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten weergegeven voor de eerste vier jaar. Deze kunnen berekend worden door het aantal certificaten op jaarbasis, de PEB naar beneden afgerond, te vermenigvuldigen met de gemiddelde prijs van een warmtekrachtcertificaat, 38,56 EUR (uit paragraaf 7.5).

Tabel 37: berekening van de opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten voor jaar 1 tot en met 4

	aantal certificaten op jaarbasis voor jaar 1 t.e.m. 4	opbrengsten uit verkoop certificaten op jaarbasis voor jaar 1 t.e.m. 4 (EUR)
0,5 tds/uur	4 501	173 558,56
1 tds/uur	9 002	347 117,12
1,5 tds/uur	13 504	520 714,24

De opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten neemt af vanaf het vijfde jaar, doordat er vanaf dan slechts voor een bepaald percentage van de warmtekrachtbesparing certificaten uitgereikt worden. In onderstaande tabel zijn de jaarlijkse opbrengsten uit de verkoop van verkregen warmtekrachtcertificaten terug te vinden.

Tabel 38: opbrengsten uit de verkoop van verkregen warmtekrachtcertificaten

jaar	0,5 tds/uur (EUR)	1 tds/uur (EUR)	1,5 tds/uur (EUR)
1	173 558,56	347 117,12	520 714,24
2	173 558,56	347 117,12	520 714,24
3	173 558,56	347 117,12	520 714,24
4	173 558,56	347 117,12	520 714,24
5	165 769,44	331 577,44	497 385,44
6	151 425,12	302 888,80	454 352,48
7	137 080,80	274 200,16	411 280,96
8	122 736,48	245 472,96	368 248,00
9	108 392,16	216 784,32	325 176,48
10	94 047,84	188 095,68	282 143,52
11	79 664,96	159 368,48	239 072,00
12	65 320,64	130 679,84	196 039,04
13	50 976,32	101 991,20	153 006,08
14	36 632,00	73 302,56	109 934,56
15	22 287,68	44 575,36	66 901,60
16	7 943,36	15 925,28	23 830,08
17	0,00	0,00	38,56
18	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00

Onderstaande tabel vat de jaarlijkse operationele opbrengsten uit de verkoop van warmte en elektriciteit samen. Deze worden opgeteld bij de jaarlijkse opbrengsten uit de verkoop van de char om tot de totale jaarlijkse operationele opbrengsten te komen. De opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten worden hierin niet opgenomen, omdat deze sterk verschillen van jaar tot jaar.

Tabel 39: berekening van de opbrengsten uit de verkoop van warmte en elektriciteit bij een input van 0,5 tds/uur

	actieve kool	biochar
OPBRENGSTEN (EUR)	661 279,87	672 473,59
elektriciteit (EUR)	154 389,19	165 879,01
warmte (EUR)	93 519,68	93 519,68
groenestroomcertificaten (EUR)	413 127,82	413 074,90

8.4 NCW-berekening

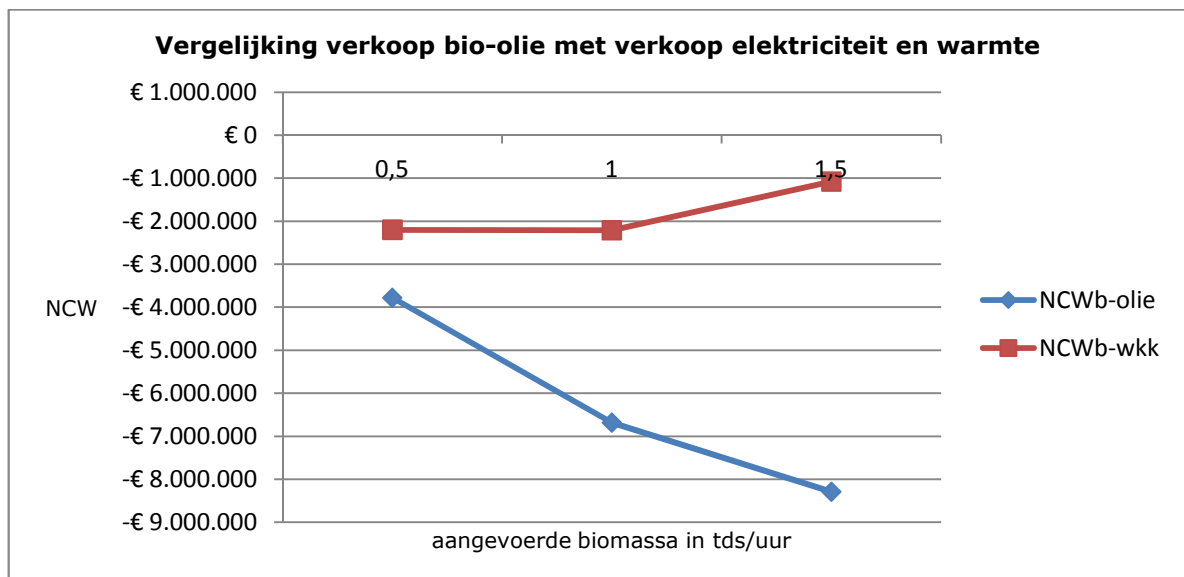
Eerst wordt de NCW berekend voor de verkoop van biochar. Bij de verkoop van biochar en bio-olie was deze voor de drie inputniveaus negatief. Elke verbetering in NCW zal een gevolg zijn van de verkoop van warmte, elektriciteit en de bijbehorende certificaten. De opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten worden niet opgenomen onder de jaarlijkse operationele opbrengsten, omdat deze sterk verschillen van jaar tot jaar. Deze opbrengsten worden via de geactualiseerde kasstroom in de NCW-berekening gebracht, door vermenigvuldiging met de actualisatiefactor A_{n-r} (Mercken, 2004), waarbij $A_{n-r} = 1/(1+r)^n$.

De NCW verbetert als de aangevoerde biomassa in tds/uur stijgt. De lichte daling in NCW bij een input van 1 tds/uur ten opzichte van 0,5 tds/uur kan verklaard worden door het in dienst nemen van een extra werknemer per shift voor de pyrolyse-installatie. In tabel 14 werd berekend dat bij een input van 0,5 tds/uur één arbeider per shift voldoende is, waar er bij een input van 1 tds/uur 2 arbeiders per shift nodig zijn. De personeelskosten stijgen niet evenredig met de stijging in aangevoerde biomassa, maar maken een sprong ter grootte van de jaarlijkse loonkost voor 3 arbeiders aangezien er drie shiften zijn.

Tabel 40: berekening van de NCW bij de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
investering (EUR)	2 546 675,73	4 021 355,84	5 261 590,34
jaarlijkse operationele opbrengsten (EUR)	672 473,58	1 345 055,57	2 017 529,15
jaarlijkse operationele kosten (EUR)	863 474,55	1 542 237,57	2 059 737,12
jaarlijkse kasstroom (EUR)	-191 000,97	-197 182,01	-42 207,97
geactualiseerde kasstroom (EUR)	346 502,86	1 811 984,97	4 181 233,96
annuïteit (EUR)	-900 704,42	-663 526,93	699 803,84
ecologiepremie in jaar 1 (EUR)	46 103,61	73 143,66	95 930,13
opbrengst uit warmtekrachtcertificaten (EUR)	1 201 103,66	2 402 368,24	3 385 499,99
NCW (EUR)	-2 200 172,87	-2 209 370,87	-1 080 356,37

Hoewel de NCW negatief is bij elk inputniveau, is er een verbetering ten opzichte van de situatie waarin bio-olie werd verkocht in plaats van elektriciteit en warmte.



Figuur 12: vergelijking van de evolutie van de NCW bij de verkoop van bio-olie (NCWb-olie) met de evolutie van de NCW bij de verkoop van warmte en elektriciteit (NCWb-wkk) bij de verkoop van biochar

In de grafiek in figuur 12 wordt de evolutie van de NCW bij de verkoop van warmte en elektriciteit vergeleken met de evolutie van de NCW bij de verkoop van bio-olie. In deze grafiek is duidelijk zichtbaar dat de kloof tussen de NCW bij de verkoop van bio-olie en de NCW bij de verkoop van warmte en elektriciteit groter wordt naarmate de per uur aangevoerde hoeveelheid biomassa stijgt.

In paragraaf 6.4 werd vermeld dat de dalende NCW bij de verkoop van biochar en bio-olie het gevolg is van een negatieve jaarlijkse kasstroom voor elk inputniveau, ook de extreem hoge niveaus. Uit tabel 40 kan afgeleid worden dat in het geval van de verkoop van biochar, warmte en elektriciteit de operationele kosten eveneens hoger zijn dan de operationele opbrengsten voor de drie inputniveaus. Het verschil tussen beiden wordt echter telkens kleiner en zal bij een grotere aanvoer van biomassa resulteren in operationele opbrengsten die hoger liggen dan de operationele kosten. Dit is een voorwaarde om een positieve NCW te kunnen bekomen.

De operationele opbrengsten liggen bij de verkoop van warmte en elektriciteit aanzienlijk hoger dan bij de verkoop van bio-olie. Dit grote verschil is uitsluitend het gevolg van de opbrengsten uit de verkoop van warmtekracht- en groenestroomcertificaten uitgereikt voor de productie van elektriciteit en warmte met een WKK. Dit wordt duidelijk uit de vergelijking van operationele opbrengsten in tabel B2.1 in bijlage 2. De opbrengsten uit de verkoop van verkregen certificaten is een reden voor de steeds groter wordende kloof tussen de NCW bij de verkoop van bio-olie en de NCW bij de verkoop van warmte en elektriciteit. De geactualiseerde opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten van het hele project, zijn al groter dan de investeringskost van de WKK (zie tabel B2.2 in bijlage 2). De extra investering in een WKK en de bijbehorende jaarlijkse operationele kosten, worden ruim gecompenseerd door de opbrengsten uit de verkoop van warmte, elektriciteit en uitgereikte certificaten.

Een gedeelte van de totale investeringskosten kan gerecupereerd worden door het systeem van de ecologiepremie en de verhoogde investeringsaftrek. Dit zorgt er, in combinatie met de extra inkomsten uit de verkoop van verkregen certificaten, voor dat de NCW mogelijk positief wordt.

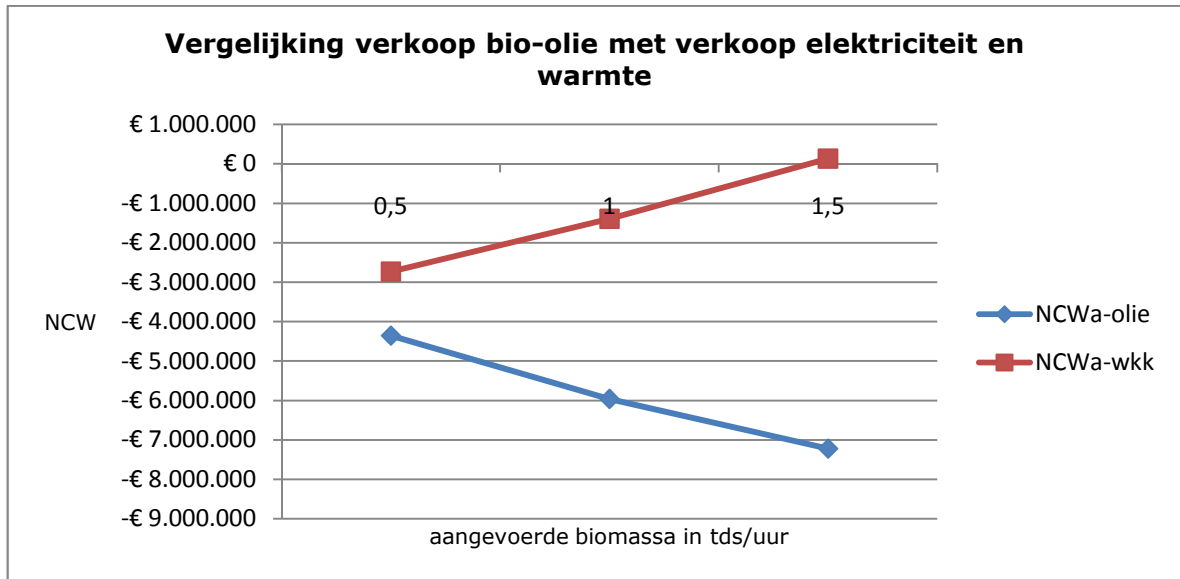
In tabel 41 is de NCW-berekening bij de verkoop van actieve kool terug te vinden. De NCW is negatief bij een input van 0,5 en 1 tds/uur, maar positief bij een input van 1,5 tds/uur. Net als bij de verkoop van biochar, treedt er een verbetering in NCW op bij de verkoop van elektriciteit en warmte in plaats van bio-olie. In de grafiek in figuur 13 wordt de evolutie van de NCW bij de verkoop van bio-olie vergeleken met de evolutie in de NCW bij de verkoop van warmte en elektriciteit. Ook in deze grafiek wordt de kloof tussen de NCW bij de verkoop van bio-olie en de NCW bij de verkoop van elektriciteit en warmte groter naarmate de per uur aangevoerde hoeveelheid biomassa toeneemt.

Tabel 41: berekening van de NCW bij de verkoop van actieve kool, elektriciteit en warmte

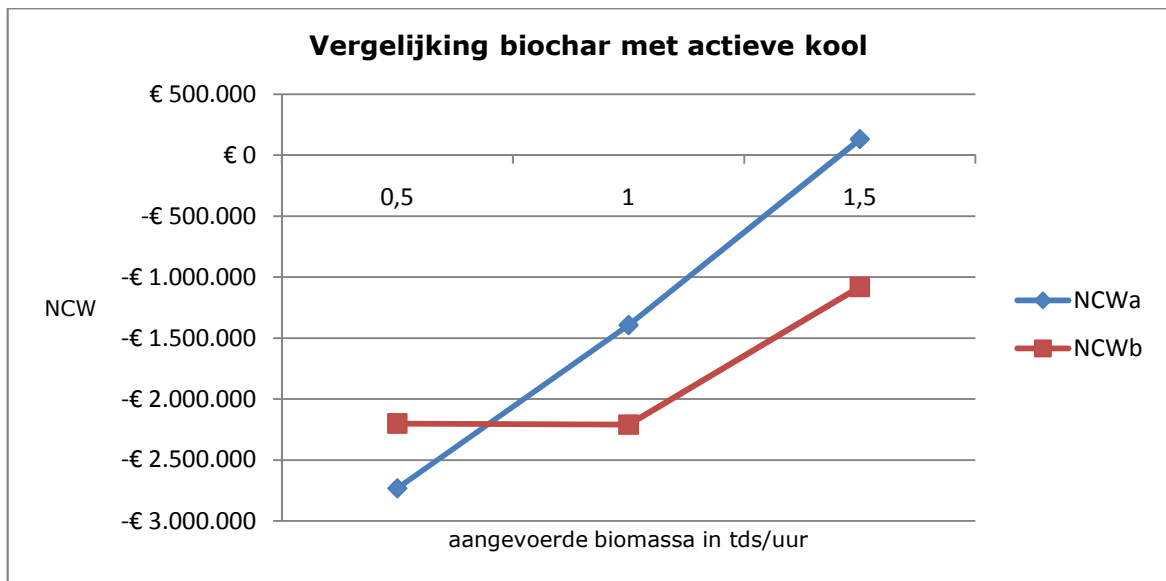
	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
investering (EUR)	4 041 729,65	6 318 111,72	8 214 062,16
jaarlijkse operationele opbrengsten (EUR)	1 081 279,87	2 162 666,88	3 244 053,89
jaarlijkse operationele kosten (EUR)	1 176 542,69	1 988 076,83	2 786 003,59
jaarlijkse kasstroom (EUR)	-95 262,82	174 590,05	458 050,30
geactualiseerde kasstroom (EUR)	1 309 731,93	4 924 493,81	8 344 735,75
annuïteit (EUR)	62 524,65	2 448 981,91	4 863 305,64
ecologiepremie in jaar 1 (EUR)	46 103,61	73 143,66	95 930,13
opbrengst uit warmtekrachtcertificaten (EUR)	1 201 103,66	2 402 368,24	3 385 499,99
NCW (EUR)	-2 731 997,72	-1 393 617,90	130 673,60

De jaarlijkse operationele opbrengsten zijn bij de verkoop van actieve kool reeds bij een input van 1 tds/uur groter dan de jaarlijkse operationele kosten, wat verklaart dat de NCW sneller positief is dan bij de verkoop van bio-olie. Net als bij de verkoop van biochar zijn de opbrengsten uit de verkoop van verkregen certificaten hiervoor verantwoordelijk en worden de investeringskost en operationele kosten van de WKK ruim gecompenseerd door de opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit, warmte en verkregen certificaten. Hiervoor wordt verwezen naar bijlage 2

In figuur 14 wordt de evolutie van de NCW bij de verkoop van biochar vergeleken met de evolutie van de NCW bij de verkoop van actieve kool bij de verkoop van warmte en elektriciteit. De NCW bij de verkoop van actieve kool stijgt sterker dan de NCW bij de verkoop van biochar. De NCW wordt ook eerder positief. De reden voor dit verschil is de extra winst die het gevolg is van de verkoop van actieve kool. Bij een input van 0,5 tds/uur zijn de opbrengsten uit de verkoop van actieve kool onvoldoende groot om de investeringskost van de activatie-oven en operationele kosten van activatie te compenseren. In dit geval kan beter niet geïnvesteerd worden in een activatie-oven om de verliezen van het project te beperken. Vanaf een input van 1 tds/uur is investeren in een oven voor de productie van actieve kool echter wel interessant.



Figuur 13: vergelijking van de evolutie van de NCW bij de verkoop van bio-olie (NCWa-olie) met de evolutie van de NCW bij de verkoop van warmte en elektriciteit (NCWa-wkk) bij de verkoop van actieve kool



Figuur 14: vergelijking van de evolutie van de NCW bij de verkoop van actieve kool (NCWa) met de evolutie van de NCW bij de verkoop van biochar (NCWb) bij de verkoop van warmte en elektriciteit

9 Maatschappelijke waarde

Biochar zou een oplossing kunnen bieden voor een aantal hedendaagse problemen. Zo is biochar een zeer stabiele vorm van koolstof. Koolstof die in stabiele vorm bewaard blijft, kan zich niet met zuurstof binden tot CO₂, waardoor biochar als middel tegen de klimaatsverandering waardevol kan zijn.

Elke ton koolstof die vrijkomt uit een bodem, voegt 3,67 ton CO₂ toe aan de atmosfeer (Winsley, 2007). Biochar, geproduceerd uit korteomloophout, bevat 85% koolstof (Krull et al., 2008). Een ton biochar, geproduceerd uit korteomloophout, bevat 850 kg koolstof en zou, als ze zou binden met zuurstof, 3 119,5 kg CO₂ toevoegen aan de atmosfeer. Dit valt binnen de waarden die Roberts et al. (2010) weergeven. Afhankelijk van de biomassa waaruit biochar geproduceerd wordt, kan een ton biochar toevoegen aan de bodem zorgen voor een vermindering van 2,6 tot 16 ton CO₂ in de atmosfeer. Een belangrijke opmerking hierbij is, dat deze CO₂-vermindering geldt voor elke ton geproduceerde biochar die niet verder verwerkt wordt. Aangezien de bodemverbeterende kwaliteiten van biochar in Vlaanderen (nog) niet bewezen zijn, is het stockeren van biochar in, bijvoorbeeld ongebruikte mijnschachten, een optie om deze CO₂-vermindering te bekomen. Om deze reden zal de maatschappelijke waarde van biochar berekend worden bij opslag van biochar in een Vlaamse bodem. In deze masterproef werd de bruikbaarheid van char als grondstof voor actieve kool onderzocht. De maatschappelijke waarde wordt eveneens berekend voor char als grondstof voor actieve kool.

Bij pyrolyse van biomassa wordt, naast char, ook bio-olie en biogas geproduceerd. Deze kunnen gebruikt worden om energie of warmte op te wekken. Op deze manier zorgen deze producten voor een bijkomende CO₂-vermindering door een verminderd gebruik van fossiele brandstoffen.

Bij de aanleg, oogst, voorbehandeling, aanvoer en pyrolyse van biomassa en bij de eventuele activatie van char wordt CO₂ gevormd. Met de hoeveelheid CO₂ die als gevolg van deze activiteiten in de atmosfeer terecht komt, moet rekening gehouden worden bij de bepaling van de maatschappelijke waarde van char.

In sommige gevallen kan toevoeging van biochar aan een bodem zorgen voor een verbetering van de bodem. Dit kan zich uiten in een verbeterde cation exchange capacity (CEC), hogere pH en een beter tot de planten ter beschikking staan van water, zoals eerder in deze masterproef vermeld werd. Aangezien er nog te weinig onderzoek gebeurde naar de gevolgen van toevoeging van biochar aan Vlaamse bodems, kan dit aspect niet opgenomen worden in de bepaling van de maatschappelijke waarde van biochar.

Productie van bio-olie en char door pyrolyse van biomassa heeft nog andere maatschappelijke voordelen. Zo wordt er bijvoorbeeld extra werkgelegenheid gecreëerd. Een bijkomend maatschappelijk voordeel wordt bekomen door het aanplanten van het kortoomloophout, wat ecosysteemdiensten levert. Deze ecosysteemdiensten kunnen onderverdeeld worden in vier functies, namelijk provisioning (= productiedienst), supporting (= ondersteunende dienst), regulating (= regulerende dienst) en cultural (= culturele dienst) services (Meire, 2007). Zo levert een kortoomloopbos de productiedienst hout, de regulerende diensten koolstofvastlegging en waterregulatie en de culturele dienst recreatie, al zal dit laatste slechts waar zijn indien het bos toegankelijk gemaakt wordt voor het grote publiek (Planbureau voor de Leefomgeving, 2010). Deze kunnen nog aangevuld worden met de aanwezigheid van bodemdierpjes, zoals regenwormen, die de bodem vruchtbaarder maken, wat een ondersteunende dienst is. Ecosysteemdiensten kunnen in een geldwaarde uitgedrukt worden, zoals in een rapport van het WWF uit 2009 gebeurde voor het Amazonewoud. Volgens Verweij et al. (2009), de auteurs van dit rapport, kan de waarde van een hectare van het Amazonewoud hoog oplopen als er actieve markten zouden zijn voor de ecosysteemdiensten. De gegevens uit dit rapport zijn echter niet bruikbaar om de waarde van de ecosysteemdiensten geleverd door een Vlaams kortoomloopbos te berekenen, wegens de grote verschillen tussen beide bossoorten. Bij de bepaling van de maatschappelijke waarde van char, zou de geldwaarde van de ecosysteemdiensten opgenomen moeten worden in de berekening. Het is echter niet mogelijk deze diensten op een juiste manier te valideren, zonder dat hier een grondige studie van de ecosysteemdiensten, geleverd door een Vlaams kortoomloopbos, aan vooraf gaat. Om deze reden zal met deze diensten geen rekening gehouden worden bij de bepaling van de maatschappelijke waarde van char.

De bepaling van de maatschappelijke waarde zal, in het kader van deze masterproef, gebeuren aan de hand van de CO₂-vermindering in de atmosfeer als gevolg van de productie van char en dit voor de snelle pyrolyse van biomassa met verkoop van biochar of actieve kool en bio-olie.

9.1 Opslag van biochar in de bodem

9.1.1 CO₂-sequestratie

Niet alle koolstof die door toevoeging van biochar in de bodem terecht komt, blijft in stabiele vorm in de bodem aanwezig. De veroudering van black carbon (BC), waartoe ook biochar behoort, werd door meerdere auteurs onderzocht en beschreven. Als significante hoeveelheden koolstof die in de biochar aanwezig zijn, toch binden met zuurstof tot CO₂ moet hier rekening mee gehouden worden bij de bepaling van de maatschappelijke waarde van biochar.

Er zijn twee verschillende typen onderzoek op dit vlak, namelijk incubatie-experimenten, waarbij de veroudering van biochar bekeken wordt in een geïsoleerde omgeving, en veldexperimenten. Het voordeel van een incubatie-experiment is, dat hierbij enkel het verdwijnen van koolstof door binding tot CO₂ gemeten wordt. Alle oorspronkelijk toegevoegde biochar wordt opnieuw geanalyseerd. Bij een veldexperiment is het mogelijk dat de toegevoegde biochar door regen of erosie naar diepere grondlagen of andere gronden beweegt. Dit kan een vertekend beeld opleveren van de hoeveelheid koolstof die werkelijk bindt tot CO₂.

Nguyen et al. (2008) spreken over een incubatie-experiment waarbij een verlies van 0,26 tot 0,78% koolstof na 60 dagen en minder dan 2% koolstof na 120 dagen werd gerapporteerd. In één van de weinige veldexperimenten die werden uitgevoerd, werd een verlies van koolstof van 47% gemeten na een periode van 50 jaar. Dit veldexperiment gebeurde in een gebied waar de grote hoeveelheid BC in de bodem een gevolg was van bosbrand. Cheng en Lehmann (2009) wijzen erop dat biochar die geproduceerd werd door pyrolyse van biomassa minder snel zal oxideren, dit wil zeggen binden tot CO₂, dan BC die ontstaat na brand.

Liang et al. (2008) onderzochten BC in gronden van 600-1000 jaar tot 6700-8700 jaar. Zij concludeerden dat BC even stabiel blijft, of deze nu enkele honderden of enkele duizenden jaren oud is. Zij geven echter duidelijk weer dat dit niet wil zeggen dat er geen oxidatie plaatsvindt, maar dat de BC een stabiele vorm bereikt die niet meer wijzigt. In de eerste maanden of jaren na vorming van BC zal er wel oxidatie plaatsvinden tot een stabiele vorm bereikt wordt.

Nguyen et al. (2008) melden dat de moleculaire samenstelling van BC meer wijzigt in de eerste 30 jaar van bestaan dan in de daaropvolgende 70 jaar. De BC is in deze studie afkomstig van onvolledige verbranding van hout door bosbrand of na vrijmaken van het land voor akkerbouw. Dit is niet hetzelfde als biochar geproduceerd door pyrolyse, maar is volgens de auteurs wel vergelijkbaar. Zij vergeleken de chemische samenstelling van BC die 2, 3, 5, 20, 30, 50, 80 of 100 jaar geleden werd gevormd. Het koolstofgehalte in de BC vermindert met 16% gedurende de eerste 5 jaar en is na 30 jaar in totaal 30% minder. Na deze 30 jaar beschouwen Nguyen et al. (2008) het koolstofniveau als constant. Het verlies aan koolstof wordt niet enkel verklaard door oxidatie, maar ook door wegvloeien van BC naar de diepere bodemlagen of naar nabijgelegen gronden. Bovendien worden de oorspronkelijk vrij grote BC-deeltjes in kleinere stukjes gebroken door landbewerking. Deze kleine deeltjes worden makkelijk vastgezet in de bodemstructuur waardoor de BC veel stabielier blijft. In veel studies zullen deze kleinere deeltjes niet opgenomen worden in de sample, omdat ze niet als BC-deeltjes herkend worden, waardoor het gedeelte van de koolstof dat verdwijnt, wordt overschat. Uit de resultaten van Nguyen et al. (2008) kan niet afgeleid worden hoeveel procent van de uit het BC-sample verdwenen koolstof oxideert.

Cheng et al. (2008a) vergeleken de chemische eigenschappen van vers gemaakte BC met de eigenschappen van oudere BC. De vers gemaakte BC bevatte 90,8% koolstof, 7,2% zuurstof en 1,7% waterstof en werd verzameld op de Hopewell Furnace National Historical Site en in het Greenwood Furnace State Park. Op beide plaatsen wordt, bij wijze van demonstratie van oude productietechnieken, houtskool geproduceerd. Op deze manier wordt een vorm van BC gemaakt die overeenkomt met de BC zoals deze op terreinen van oude houtskoolfabrieken wordt teruggevonden. BC dat al minimaal 100 jaar in een bodem zit, kent een grotere concentratie zuurstof en een kleinere concentratie koolstof, respectievelijk 24,8% en 70,5%. Na minimaal 100 jaar in een bodem, is het koolstofgehalte in de BC gedaald met 22,35%. De resultaten van dit onderzoek laten niet toe te bepalen welk percentage van de koolstof verdween door oxidatie.

Een onderzoek van Major et al. (2009) kan een antwoord bieden. Zij onderzochten de chemische eigenschappen van biochar na een verblijf van 2 jaar in een bodem bij een gemiddelde temperatuur van 26 °C met de chemische eigenschappen van verse biochar. Na 2 jaar bleek slechts een heel klein deel van de verspreide biochar tot meer dan 0.1 m diep weggevoerd. Een groot gedeelte spoelde echter weg met water. Minder dan 3% van de koolstof verdwijnt door binding tot CO₂.

Cheng en Lehmann (2008) onderzochten de chemische eigenschappen van vers gemaakte BC en vergeleken deze met de chemische eigenschappen van deze BC na een periode van 6 maanden en een periode van 12 maanden. De BC gebruikt in deze studie was afkomstig van de Hopewell Furnace National Historical Site in Pennsylvania. Het bijzondere aan dit incubatie-experiment, is dat deze vergelijking gemaakt werd voor verschillende omgevingstemperaturen, waardoor tegelijkertijd het effect van de gemiddelde temperatuur op de veroudering van BC onderzocht werd. Ze voerden het experiment uit bij temperaturen van -22 °C, 4 °C, 30 °C en 70 °C, waarvan de twee uiterste waarden voor een analyse in Vlaanderen niet interessant zijn. In tabel 42 worden de resultaten weergegeven voor temperaturen van 4 °C en 30 °C. Het koolstofgehalte in BC is na 12 maanden met 1,21% gedaald bij een temperatuur van 4 °C. Bij een temperatuur van 30 °C is dit met 2,86% gedaald. De grootste daling in koolstofgehalte vindt plaats bij een temperatuur van 30 °C en dit gedurende de eerste 6 maanden van bestaan van BC.

Tabel 42: veroudering van black carbon na 6 en 12 maanden

	koolstof (%)	waterstof (%)	zuurstof (%)	stikstof (%)
nieuw BC	90,8	2,2	6,8	0,2
na 6 maanden op 4 °C	90,1	2,5	7,2	0,2
na 6 maanden op 30 °C	88,4	2,2	9,2	0,2
na 12 maanden op 4 °C	89,7	2,2	7,9	0,2
na 12 maanden op 30 °C	88,2	2,4	9,2	0,2

Bron: Cheng en Lehmann, 2009

Roberts et al. (2010) gingen bij hun bepaling van de maatschappelijke waarde van biochar uit van een stabiel koolstofgehalte van 80%. De overige 20% van de koolstof uit biochar zou volgens hen tijdens de eerste jaren na toevoeging van de biochar aan de bodem in de vorm van CO₂ terecht komen in de atmosfeer. Lehmann (2007a) veronderstelt eveneens een verlies aan koolstof van 20% na toevoeging van biochar aan de bodem.

Voor het bepalen van de maatschappelijke waarde van biochar wordt, in het kader van deze masterproef, rekening gehouden met een verlies van 20% koolstof. Van elke ton koolstof uit biochar die aan een bodem wordt toegevoegd, zal 800 kg gedurende honderden jaren stabiel in de bodem aanwezig blijven. De biochar zal zich, door erosie en afvloeiing wel verspreiden over een grotere oppervlakte dan het oorspronkelijke gebied waar de biochar aan toegevoegd werd.

9.1.2 Effect op de uitstoot van N₂O

Bodems die koolstof vasthouden, houden tegelijkertijd ook stikstof vast (Winsley, 2007). Gebruik van stikstofhoudende meststoffen, verhoogt de uitstoot van N₂O. Dit broeikasgas draagt veel sterker bij tot de opwarming van de aarde dan CO₂. Een ton N₂O is equivalent aan 310 ton CO₂ (European Environment Agency). Roberts et al. (2010) wijzen er op dat toevoeging van biochar aan een bodem de uitstoot van N₂O enkel verminderd doordat de bodemverbeterende kwaliteiten van biochar leiden tot een verminderde nood aan bemesting met stikstof. Het is nog onduidelijk of biochar bodemverbeterend werkt in Vlaanderen.

Het is mogelijk dat gebruik van biochar in Vlaamse bodems tot gevolg heeft dat er meer stikstofbemesting nodig is. Dit kan de uitstoot van N₂O zelfs verhogen indien de stikstof die biochar vasthoudt later weer vrij zou komen in de bodem. Het effect van toevoeging van biochar aan een bodem op de uitstoot van N₂O kan niet in de bepaling van de maatschappelijke waarde van biochar opgenomen worden.

9.1.3 Vorming van CO₂ bij het vervoer van biomassa

Bij de aanvoer van biomassa komt CO₂ vrij. De hoeveelheid CO₂ die op deze manier in de atmosfeer terecht komt, moet mee opgenomen worden bij de bepaling van de maatschappelijke waarde van biochar.

De pyrolyse-installatie zal geplaatst worden in een gebied waar veel biomassa voorhanden is. Rogers en Bammers (2009) vermoeden om deze reden dat de wegen waarover de biomassa aangevoerd wordt, kleinere wegen zijn, waar een snelheidsbeperking van 50 km/uur geldt. De CO₂-uitstoot per km van een vrachtwagen is groter als deze op kleinere binnenwegen rijdt, dan bij vervoer over snelwegen. Bastin en Longden (2009) geven de CO₂-uitstoot voor een vrachtwagen met 7 ton en met 21 ton lading. Bij vervoer over kleine binnenwegen kent de vrachtwagen met een lading van 7 ton een CO₂-uitstoot van 104,93 gram per ton biomassa per km. Voor een vrachtwagen met een lading van 21 ton is dit 81,60 gram CO₂ per ton biomassa per km.

Er wordt verondersteld dat de CO₂-uitstoot van het vervoer van een ton biomassa gelijk is aan 90 gram per km, omdat niet zeker geweten is welke hoeveelheid biomassa per rit vervoerd zal worden. Snelle pyrolyse van biomassa levert een biocharopbrengst van 12%. Een ton biomassa resulteert in 120 kg biochar. Per ton geproduceerde biochar zorgt het vervoer van de benodigde biomassa voor een uitstoot van 750 gram CO₂ per km.

9.1.4 Vorming van CO₂ bij de productie van biochar

Voor de productie van biochar door pyrolyse van biomassa, is elektriciteit nodig. Bij de productie van elektriciteit komt CO₂ vrij in de atmosfeer. Per geproduceerde kWh elektriciteit wordt 320 gram CO₂ gevormd (Ecobouwers). Neosave Nederland (2010) maakt de vergelijking tussen verschillende elektriciteitsleveranciers, die verantwoordelijk zijn voor een gemiddelde uitstoot van 423 gram CO₂ per geproduceerde kWh elektriciteit. Deze gegevens zijn echter afkomstig van een organisatie die ijvert voor de productie van groene energie en moeten met de nodige voorzichtigheid bekeken worden. Volgens Energiek wordt er 225 gram CO₂ gevormd bij de productie van een kWh elektriciteit. Er zal bij de bepaling van de maatschappelijke waarde van biochar uitgegaan worden van een uitstoot van 300 gram CO₂ per geproduceerde kWh elektriciteit.

Voor de snelle pyrolyse van biomassa heeft men 100 kWh elektriciteit nodig per ton aangevoerde biomassa. Uitgaande van een opbrengst van 120 kg biochar per ton biomassa bij snelle pyrolyse, is de elektriciteitsbehoefte van een ton biochar 833,33 kWh.

De productie van de elektriciteit nodig om een ton biochar te produceren zorgt voor een vorming van 250 kg CO₂.

De bio-olie, geproduceerd bij pyrolyse van biomassa, kan gebruikt worden als alternatief voor fossiele brandstoffen. Verbranding van aardgas resulteert, volgens Lehmann et al. (2006) in een CO₂-uitstoot van 57 kg CO₂ per GJ. Bij de bepaling van de maatschappelijke waarde van biochar wordt rekening gehouden met een CO₂-uitstoot van 60 kg bij de verbranding van een GJ aardgas. Bio-olie kent een energiedichtheid van 16,17 MJ/kg. Bij gebruik van een ton bio-olie kan de CO₂-uitstoot als gevolg van de verbranding van 16,17 GJ aardgas, wat overeenkomt met 970,2 kg CO₂, vermeden worden. Bij de snelle pyrolyse van een ton biomassa wordt 700 kg bio-olie en 120 kg biochar gevormd, wat overeenkomt met 5,83 kg bio-olie per geproduceerde kg biochar. Indien de bio-olie geproduceerd naast een ton biochar gebruikt zou worden ter vervanging van aardgas, zou dit resulteren in een CO₂-reductie van 5,66 ton.

9.1.5 Bepaling van de maatschappelijke waarde

Om de maatschappelijke waarde van biochar te bepalen, moet aan de vermeden uitstoot van CO₂ een geldwaarde toegekend worden. De European Climate Exchange is de markt voor de verhandeling van CO₂-emissies in Europa. Er wordt gewerkt met twee contracttypes: de EU Allowances (EUA) en de Certified Emissions Reductions (CER). Beide geven de houder van het contract het recht om 1 000 ton CO₂ uit te stoten. De geldende marktprijs voor de contracten is de kostprijs van het recht om 1 000 ton CO₂ uit te stoten (ecx.eu).

EUA's zijn rechten om CO₂ uit te stoten, uitgegeven door de Europese Unie aan alle bedrijven die CO₂ uitstoten. Stoot een bedrijf minder CO₂ uit dan voorzien, dan kan het deze rechten verhandelen op de markt (ecx.eu).

Het Clean Development Mechanism (CDM) is een overeenkomst gesloten in navolging van het Kyoto-protocol. Het geeft geïndustrialiseerde landen die zich geëngageerd hebben om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen, het recht te investeren in uitstootreducerende projecten in derde wereldlanden indien dit goedkoper is dan investeren in uitstootreducerende projecten in eigen land. CER's worden gebruikt om deze projecten in derde wereldlanden te kwalificeren (ecx.eu).

De marktprijs die geldt voor een EUA contract, wordt gebruikt om de waarde van de vermeden uitstoot van CO₂ te bepalen. Deze contracten verbinden de koper en verkoper ertoe om de dag na afsluiting van het contract over te gaan tot uitvoering hiervan. Er wordt een gemiddelde genomen van de prijzen uit volgende tabel. Gemiddeld bedraagt deze prijs 0,01466 EUR per ton CO₂. Deze prijs zal gebruikt worden om de maatschappelijke waarde te berekenen.

Tabel 43: marktprijs voor EUA contracten in 2010

prijs CO ₂ per ton 13 april	0,01355
prijs CO ₂ per ton 15 april	0,01405
prijs CO ₂ per ton 17 april	0,01426
prijs CO ₂ per ton 19 april	0,01426
prijs CO ₂ per ton 22 april	0,01453
prijs CO ₂ per ton 29 april	0,01483
prijs CO ₂ per ton 10 mei	0,01537
prijs CO ₂ per ton 14 mei	0,01566
prijs CO ₂ per ton 16 mei	0,01547

Bron: ecx.eu

In onderstaande tabel wordt de maatschappelijke waarde van biochar berekend. De opslag van een ton biochar en gebruik van de tegelijkertijd geproduceerde hoeveelheid bio-olie ter vervanging van fossiele brandstoffen, resulteert in een CO₂-vermindering van 7,9 ton. De waarde hiervan op de koolstofmarkt is 0,115781 EUR.

Tabel 44: berekening van de maatschappelijke waarde van biochar bij een vervoersafstand van 8,61 km (input van 1,5 tds/uur)

	ton CO ₂ /ton biochar	waarde (EUR)
CO ₂ -vermindering door biochar	3,119500	
CO ₂ -vrijgave door toevoeging aan bodem	0,623900	
uitstoot bij vervoer	0,006458	
uitstoot bij elektriciteitsproductie	0,250000	
vermeden uitstoot door gebruik bio-olie	5,660000	
TOTAAL	7,900000	0,115781

De uitstoot van CO₂ bij het vervoer van de biomassa is verwaarloosbaar ten opzichte van de totale CO₂-vermindering door de productie en het gebruik van biochar en bio-olie. Het vervoer van de biomassa over grotere afstanden, zal weinig invloed hebben op de maatschappelijke waarde.

9.2 Gebruik van de char als grondstof voor actieve kool

Om de maatschappelijke waarde van char als grondstof voor actieve kool te bepalen is, naast kennis over het productieproces van actieve kool, ook kennis nodig over de verwerking van gebruikte actieve kool. Voor de activatie van char en de verwerking van gebruikte actieve kool is heel wat elektriciteit nodig.

De mogelijkheid bestaat dat de vorming van CO₂ bij de productie van deze energie zo groot is dat ze de vermindering van CO₂ in de atmosfeer door de productie van char teniet doet. De maatschappelijke waarde van char als grondstof voor actieve kool wordt berekend per ton geproduceerde actieve kool. Om de vergelijking met de maatschappelijke waarde van biochar mogelijk te maken, wordt de maatschappelijke waarde van actieve kool, geproduceerd uit char, nadien herrekend naar de maatschappelijke waarde van een ton char als grondstof voor actieve kool.

9.2.1 CO₂-sequestratie

Bij activatie van char moet rekening gehouden worden met een verlies aan grondstof van 50% (Vanreppelen & Kuppens, 2010). Uit een ton te activeren char zal 500 kg actieve kool geproduceerd worden. Deze bestaat voor 85% uit koolstof en zal bijgevolg per ton zorgen voor een vermindering van 3 119,5 kg CO₂ in de atmosfeer.

9.2.2 Vorming van CO₂ bij de productie van actieve kool

Voor de productie van een ton actieve kool is 2 ton char nodig. Eerder werd de CO₂-uitstoot bij het vervoer van biomassa berekend. Per ton geproduceerde char zorgt het vervoer van de benodigde biomassa voor een uitstoot van 750 gram per km. Om de uitstoot per ton geproduceerde actieve kool te berekenen, wordt dit vermenigvuldigd met 2. Het vervoer van de voor de productie van één ton actieve kool benodigde biomassa, zorgt voor een uitstoot van 1 500 gram CO₂ per km.

Voor de productie van char is elektriciteit nodig. Er is een uitstoot van 300 gram CO₂ per geproduceerde kWh elektriciteit. Eerder werd berekend dat de productie van de elektriciteit nodig om een ton char te produceren, zorgt voor de vorming van 250 kg CO₂. Om een ton actieve kool te produceren is 2 ton char nodig. De uitstoot waarmee bij de berekening van de maatschappelijke waarde rekening gehouden moet worden is een uitstoot van 500 kg CO₂ per ton actieve kool.

Ook bij de activatie van char wordt elektriciteit gebruikt. De activatie van de uit een ton biomassa geproduceerde char heeft een elektriciteitsbehoefte van 558,3 kWh, zoals wordt afgeleid uit formule (22) in paragraaf 6.2.6. Uit een ton biomassa wordt echter slechts 120 kg char geproduceerd. Bijgevolg is er 4 652,5 kWh elektriciteit nodig voor de activatie van een ton char. Om een ton actieve kool te produceren is 2 ton char nodig, wat overeenkomt met een elektriciteitsbehoefte van 9 305 kWh. Dit komt overeen met een CO₂-uitstoot van 2 791 kg.

Bij de activatie van char wordt aardgas gebruikt om het activatieproces van de nodige warmte te voorzien. Per ton te verwerken char is er een aardgasbehoefte van 7 236,36 kWh wat, rekening houdend met een uitstoot van 60 kg CO₂ bij verbranding van een GJ aardgas, overeenkomt met 1,56 ton CO₂ per ton te activeren char.

Als de bio-olie geproduceerd naast een ton char gebruikt zou worden ter vervanging van aardgas, resulteert dit in een vermindering van de CO₂-uitstoot van 5,66 ton. De bio-olie geproduceerd naast een ton actieve kool, resulteert bijgevolg in een vermindering van de CO₂-uitstoot van 11,31 ton.

Als de actieve kool verzadigd is, moet deze bij de gebruiker van de actieve kool opgehaald en verwerkt worden. In sommige gevallen kan actieve kool gereactiveerd worden, in alle andere gevallen wordt de gebruikte actieve kool als afval verwerkt. Deze verwerking zal een uitstoot van CO₂ met zich meebrengen. De precieze hoeveelheid gevormde CO₂ zal afhangen van de gekozen verwerkingstechniek. De bepaling van de maatschappelijke waarde van char als grondstof voor actieve kool zal voorlopig gebeuren zonder rekening te houden met de extra CO₂-uitstoot voor de verwerking van gebruikte actieve kool.

9.2.3 Bepaling van de maatschappelijke waarde

De maatschappelijke waarde van char als grondstof voor actieve kool wordt berekend, gebruikmakend van een waarde voor CO₂ van 0,01466 EUR per ton. Dit resulteert in de maatschappelijke waarde berekend in tabel 45. De productie van een ton actieve kool uit char en gebruik van de tegelijkertijd geproduceerde hoeveelheid bio-olie ter vervanging van aardgas resulteert in een CO₂-vermindering van 8 ton met een waarde van 0,117338 EUR op de koolstofmarkt. Hierbij is echter geen rekening gehouden met de CO₂-uitstoot veroorzaakt door de verwerking van verzadigde actieve kool. De werkelijke vermindering in CO₂-uitstoot zal kleiner zijn dan deze berekend in tabel 45. Het gebruik van een ton char als grondstof voor actieve kool en gebruik van de tegelijkertijd geproduceerde bio-olie ter vervanging van fossiele brandstoffen, resulteert in een CO₂-vermindering van 4 ton.

Tabel 45: berekening van de maatschappelijke waarde van char als grondstof voor actieve kool bij een vervoersafstand van 8,61 km (input van 1,5 tds/uur)

	ton CO ₂ /ton actieve kool	waarde (EUR)
CO ₂ -vermindering door biochar	3,119500	
uitstoot bij vervoer	0,012915	
uitstoot bij verbranding aardgas	3,126109	
uitstoot bij elektriciteitsproductie	3,291500	
vermeden uitstoot door gebruik bio-olie	11,310000	
TOTAAL	8,000000	0,117338
	ton CO ₂ /ton char	waarde (EUR)
TOTAAL	4,000000	0,058669

9.3 Conclusie maatschappelijke waarde

De CO₂-reductie van een ton biochar opgeslagen in de bodem is groter dan de CO₂-reductie van een ton char gebruikt als grondstof voor actieve kool.

Op basis van enkel de CO₂-reductie lijkt opslag van biochar in de bodem voordeliger voor de maatschappij. In paragraaf 4.2 werd reeds aangehaald dat de vraag naar actieve kool hoog is door de vele toepassingsmogelijkheden die actieve kool kent. Als verondersteld wordt dat aan deze vraag sowieso voldaan wordt, is het toch voordeliger om biochar te gebruiken als grondstof voor actieve kool. De gezamenlijke productie van bio-olie, gebruikt ter vervanging van fossiele brandstoffen, zorgt voor een compensatie van de CO₂-uitstoot als gevolg van de productie van actieve kool, wat bij de conventionele productieprocessen voor actieve kool niet het geval is.

10 Break-evenanalyse

De hoeveelheid output die verkocht wordt als de operationele kosten gelijk zijn aan de operationele opbrengsten, is het break-evenpunt. Managers zijn hierin geïnteresseerd, omdat zij operationele verliezen willen vermijden (Horngren et al., 2006). Het bepalen van het break-evenpunt kan echter ook een nuttig hulpmiddel zijn voor managers die beslissen over het al dan niet investeren in een nieuw project. Het break-evenpunt kan dan gedefinieerd worden als de hoeveelheid output die jaarlijks verkocht moet worden om de totale kosten van een investeringsproject terug te winnen, zonder er enige winst aan over te houden.

In deze masterproef werden vier situaties bekeken. In hoofdstuk 6 werd de NCW berekend bij de verkoop van bio-olie, waarbij een onderscheid gemaakt werd tussen de verkoop van biochar en de verkoop van actieve kool. De NCW wordt nooit positief bij de verkoop van biochar. Bij de verkoop van actieve kool wordt de NCW positief bij een input van 12 tds/uur (zie figuur B1.2 in bijlage 1). Het break-evenpunt ligt bij de verkoop van actieve kool en bio-olie bij een input van 12 tds/uur.

In hoofdstuk 8 werd de NCW berekend bij de verkoop van warmte en elektriciteit. De NCW werd bij de verkoop van warmte, elektriciteit en actieve kool positief bij een input van 1,5tds/uur. In figuur B3 in bijlage 3 wordt het verloop van de NCW bij de verkoop van warmte, elektriciteit en biochar weergegeven. Bij een input van 3 tds/uur wordt de NCW positief. Het break-evenpunt bij de verkoop van warmte en elektriciteit ligt bij een input van 1,5 tds/uur bij de verkoop van actieve kool en bij een input van 3 tds/uur bij de verkoop van biochar.

11 Scenarioanalyse

Bij de berekening van de NCW bij de verkoop van elektriciteit en warmte uit hoofdstuk 8 werd uitgegaan van een warmteafzet van 100%. In de realiteit zal dit niet haalbaar zijn, omdat de warmtevraag van huishoudens sterk seizoensgebonden is. In dit hoofdstuk wordt de NCW berekend bij een warmteafzet van 25%, 50% en 75%.

11.1 Warmteafzet van 25%

Bij een warmteafzet van 25% dalen de operationele opbrengsten uit de verkochte warmte ten opzichte van de opbrengsten bij een warmteafzet van 100%. Dit is echter niet de enige wijziging die plaatsvindt.

Het thermisch rendement van de WKK-installatie daalt tot 12,5% als slechts 25% van de geproduceerde warmte verkocht kan worden. Om in aanmerking te komen voor de verhoogde investeringsaftrek, dient de WKK-installatie, zoals in paragraaf 8.1.3 vermeld werd, aan volgende drie voorwaarden te voldoen:

- $a_E + 2/3 \cdot a_Q \geq 50\%$
- $a_E / (a_E + a_Q) \geq 25\%$
- $a_Q / (a_E + a_Q) \geq 25\%$

Met een thermisch rendement van 12,5% en een elektrisch rendement van 35% voldoet de WKK-installatie niet aan de eerste voorwaarde. De WKK-installatie komt dus niet in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek. De verhoogde investeringsaftrek voor de pyrolyse-installatie blijft wel behouden.

- $0,35 + 2/3 \cdot 0,125 = 43,33\% \leq 50\%$
- $0,35 / (0,35 + 0,125) = 73,68\% \geq 25\%$
- $0,125 / (0,35 + 0,125) = 26,32\% \geq 25\%$

Een derde wijziging treedt op bij de inkomsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten. Er worden slechts warmtekrachtcertificaten uitgereikt als de WKK-installatie kwalitatief is, met andere woorden als er een relatieve primaire energiebesparing (BPE) is van minimaal 10% bij een WKK-installatie met een elektrisch vermogen van minimaal 1 MW. Met behulp van formule (43) uit paragraaf 8.3.5 wordt de BPE berekend. Deze bedraagt -5,69%. Er worden geen warmtekrachtcertificaten uitgereikt voor de afgezette warmte.

Volgende tabel geeft de NCW bij de verkoop van biochar en actieve kool bij een warmteafzet van 25%.

Tabel 46: NCW bij een warmteafzet van 25%

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
biochar (EUR)	-3 919 582,81	-5 645 923,19	-6 015 244,01
actieve kool (EUR)	-4 270 343,01	-4 552 012,15	-4 446 642,78

Deze NCW is lager dan de NCW zoals deze in tabellen 19 en 20 werd berekend voor de verkoop van char en bio-olie bij een input van 0,5 tds/uur, zowel bij de verkoop van biochar als bij de verkoop van actieve kool. Bij een input van 1 of 1,5 tds/uur is de NCW echter hoger dan bij de verkoop van bio-olie. Voor de elektriciteit, geproduceerd met de WKK, worden groenestroomcertificaten uitgereikt. Bij een input van 1 en 1,5 tds/uur zijn de opbrengsten uit de verkoop van deze certificaten en geproduceerde elektriciteit voldoende hoog om de investeringskost van de WKK-installatie te compenseren, waar dit bij een input van 0,5 tds/uur niet het geval is. De investering in een WKK-installatie is niet interessant bij een input van 0,5 tds/uur, maar wel bij een input van 1 of 1,5 tds/uur.

11.2 Warmteafzet van 50%

Het thermisch rendement is bij een warmteafzet van 50% gelijk aan 25%. Met dit rendement voldoet de WKK-installatie aan de voorwaarden om in aanmerking te komen voor de verhoogde investeringsaftrek.

- $0,35 + 2/3 * 0,25 = 51,66\% \geq 50\%$
- $0,35 / (0,35 + 0,25) = 58,33\% \geq 25\%$
- $0,25 / (0,35 + 0,25) = 41,67\% \geq 25\%$

Bij een warmteafzet van 50% bedraagt de BPE 9,13%. De WKK-installatie is niet kwalitatief, behalve bij een input van 0,5 tds/uur. Bij een input van 0,5 tds/uur wordt 0,55 MW elektriciteit per jaar geproduceerd (zie tabel 30). Een WKK-installatie met een elektrisch vermogen van minder dan 1 MW is kwalitatief als ze op jaarbasis een relatieve primaire energiebesparing oplevert (VREG[f]), wat bij een warmteafzet van 50% het geval is. De opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten worden berekend op dezelfde manier als in paragraaf 8.3.5 en zijn terug te vinden in tabel B4.1 in bijlage 4. In onderstaande tabel wordt de NCW weergegeven bij een warmteafzet van 50% bij de verkoop van biochar en actieve kool.

Tabel 47: NCW bij een warmteafzet van 50%

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
biochar (EUR)	-3 446 195,00	-5 291 304,24	-5 485 204,04
actieve kool (EUR)	-3 796 955,19	-4 197 393,19	-3 916 602,81

Hoewel enkel warmtekrachtcertificaten worden uitgereikt bij een input van 0,5 tds/uur, is de NCW bij de verkoop van warmte en elektriciteit hoger dan de NCW bij de verkoop van bio-olie, zoals deze in tabel 19 werd berekend voor de verkoop van biochar en in tabel 20 voor de verkoop van actieve kool. De reden hiervoor zijn de jaarlijkse opbrengsten uit de verkoop van groenestroomcertificaten verkregen voor de elektriciteit die met de WKK-installatie geproduceerd wordt.

11.3 Warmteafzet van 75%

Bij een warmteafzet van 75% is het thermisch rendement van de WKK-installatie 37,5%. Met dit rendement komt de investering in de WKK-installatie in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek.

- $0,35 + 2/3 * 0,375 = 60\% \geq 50\%$
- $0,35 / (0,35 + 0,375) = 48,28\% \geq 25\%$
- $0,375 / (0,35 + 0,375) = 51,72\% \geq 25\%$

De BPE bedraagt 20,31%. Er zullen warmtekrachtcertificaten uitgereikt worden bij de drie inputniveaus. De opbrengsten uit warmtekrachtcertificaten zijn terug te vinden in tabel B4.2 in bijlage 4. De NCW bij een warmteafzet van 75% voor de verkoop van biochar en actieve kool is terug te vinden in onderstaande tabel.

Tabel 48: NCW bij een warmteafzet van 75%

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
biochar (EUR)	-2 823 150,46	-3 455 263,04	-2 867 069,48
actieve kool (EUR)	-3 173 910,65	-2 361 352	-1 298 468,26

De NCW is bij een warmteafzet van 75% altijd groter bij de verkoop van warmte en elektriciteit dan bij de verkoop van bio-olie, ongeacht het inputniveau en dit zowel bij de verkoop van biochar als bij de verkoop van actieve kool, zo blijkt uit een vergelijking van de NCW's uit tabel 48 met deze in tabellen 19 en 20. Investeren in een WKK-installatie is interessant, ongeacht het inputniveau.

11.4 Besluit

De hoogste NCW zal bekomen worden bij een warmteafzet van 100%, zoals deze in tabellen 40 en 41 berekend werd. Een warmteafzet van 100% zal in de realiteit echter niet haalbaar zijn.

Bij een warmteafzet van 25% komt de investering in de WKK-installatie niet in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek. De relatieve primaire energiebesparing (BPE) is negatief, waardoor geen warmtekrachtcertificaten uitgereikt worden. Investeren in een WKK-installatie is niet aantrekkelijk bij een input van 0,5 tds/uur. De NCW is lager bij de verkoop van elektriciteit en warmte dan bij de verkoop van bio-olie. De opbrengsten uit de verkoop van de uitgereikte groenestroomcertificaten en geproduceerde elektriciteit zijn onvoldoende hoog om de investeringskost en operationele kosten van de WKK-installatie te compenseren. Bij een input van 1 of 1,5 tds/uur zijn deze opbrengsten wel hoog genoeg om de investeringskost en operationele kosten van de WKK-installatie te compenseren. Er wordt een hogere NCW bekomen bij de verkoop van warmte en elektriciteit dan bij de verkoop van bio-olie, zowel bij de verkoop van biochar als actieve kool, waardoor investeren in een WKK-installatie interessant is. Hierbij dient echter opgemerkt te worden dat de gescheiden productie van elektriciteit mogelijk nog interessanter is bij een input van 1 of 1,5 tds/uur. Het elektrisch rendement bij gescheiden productie ligt hoger dan het elektrisch rendement van de WKK. Het referentierendement werd door de Vlaamse regering namelijk vastgelegd op 44,2%. Hierdoor zijn de opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit en groenestroomcertificaten hoger dan bij een WKK. Of de gescheiden productie van elektriciteit werkelijk interessanter is, kan op basis van de gegevens in deze masterproef niet bepaald worden.

Bij een warmteafzet van 50% komt de investering in de WKK-installatie in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek. Met een BPE van 9,13% zullen enkel warmtekrachtcertificaten uitgereikt worden bij een input van 0,5 tds/uur. Bij een input van 1 of 1,5 tds/uur is hiervoor een BPE van 10% vereist. De verkoop van warmte en elektriciteit resulteert in een hogere NCW dan de verkoop van bio-olie, zowel bij de verkoop van biochar als bij de verkoop van actieve kool, waardoor investeren in een WKK-installatie interessant is voor de drie inputniveaus. De jaarlijkse opbrengsten uit de verkoop van groenestroomcertificaten, maken een investering in een WKK-installatie aantrekkelijk, hoewel ook hier opgemerkt moet worden dat gescheiden productie van elektriciteit mogelijk een hogere NCW oplevert.

Bij een warmteafzet van 75% komt de investering in een WKK-installatie in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek en worden warmtekrachtcertificaten uitgereikt, ongeacht het inputniveau. De NCW is hoger bij de verkoop van elektriciteit en warmte dan bij de verkoop van bio-olie, waardoor investeren in een WKK-installatie interessant is. Eenzelfde opmerking over gescheiden elektriciteitsproductie, dient gemaakt te worden.

Enkel bij een input van 0,5 tds/uur en een warmteafzet van 25% is de investering in een WKK-installatie niet interessant. In alle andere in dit hoofdstuk bestudeerde situaties, leidt investeren in een WKK tot een hogere NCW.

12 Sensitiviteitsanalyse

In dit hoofdstuk zal de gevoeligheid van de NCW voor verandering in een aantal variabelen bepaald worden. Het hoofdstuk wordt ingedeeld in vier delen. De sensitiviteitsanalyse wordt eerst uitgevoerd voor de verkoop van biochar en bio-olie gevolgd door de verkoop van actieve kool en bio-olie. Vervolgens wordt deze uitgevoerd voor de verkoop van biochar, warmte en elektriciteit en tenslotte voor de verkoop van actieve kool, warmte en elektriciteit. Het vertrekpunt van de sensitiviteitsanalyse zal in de vier gevallen de NCW bij een input van 1,5 tds/uur zijn, omdat dit de hoeveelheid is die doorgaans minimaal gebruikt wordt in commerciële toepassingen. Voor elke situatie worden eerst de variabelen geïdentificeerd die het meest onzeker zijn of de belangrijkste inkomsten- en uitgavenposten bepalen.

In bijlage 5 worden de bijdragen van de verschillende kosten- en opbrengstencategorieën tot de totale operationele kosten en opbrengsten weergegeven. Op basis van deze figuren worden de variabelen geïdentificeerd die de belangrijkste kosten- en opbrengstenposten bepalen. Voor elk van de vier situaties worden vijf variabelen geïdentificeerd die opgenomen worden in de sensitiviteitsanalyse. Voor elk van deze variabelen wordt de standaardwaarde, zoals deze in hoofdstukken 6 en 8 berekend werd, verhoogd en verlaagd met 10%.

12.1 Verkoop van biochar en bio-olie

De kost voor korteomloophout (kost KOH) maakt het grootste deel uit van de totale operationele kosten en is de eerste variabele die opgenomen wordt in de sensitiviteitsanalyse. De investeringskost van de pyrolyse-installatie is erg groot in verhouding tot de geactualiseerde kasstroom, zoals te zien in tabel 19. Om deze reden wordt deze variabele eveneens opgenomen in de sensitiviteitsanalyse. De algemene overheadkosten werden berekend als een percentage van de investeringskosten. Dit percentage werd geschat aan de hand van een range opgesteld op basis van verschillende literatuurbronnen en kan als een onzekere variabele beschouwd worden. Het percentage van de investeringskost dat als onderhoudskost van de pyrolyse-installatie in rekening gebracht wordt, kan eveneens als onzeker beschouwd worden, zoals ook Cornelissen (2010) aangaf. Verder is ook het percentage van de aangevoerde biomassa dat wordt omgezet in bio-olie (bio-olie yield) per definitie een onzekere variabele. In paragraaf 3.1 werd een opsomming gegeven van bio-olieopbrengsten bekomen in verschillende onderzoeken. De bio-olieopbrengsten varieerden van 50 tot 78% in de beschouwde literatuur. In volgende tabel worden de resultaten van de sensitiviteitsanalyse weergegeven.

Tabel 49: resultaten sensitiviteitsanalyse bij de verkoop van biochar en bio-olie

variabele	minimum	gemiddelde	maximum	gevoeligheid NCW
investeringskost (EUR)	3 405 422,870	3 783 825,410	4 162 207,950	-10,800%
bio-olie yield (%)	63,000	70,000	77,000	+55,700%
kost KOH (EUR/tds)	67,880	75,420	82,960	-32,700%
onderhoudskost (%)	0,018	0,020	0,022	0,000%
overheadkost (%)	0,090	0,100	0,110	-0,800%
kans NCW > 0				0,000%

De gevoeligheid van de NCW wordt in de laatste kolom weergegeven. Zo wordt 55,7% van de variabiliteit van de NCW verklaard door de onzekerheid van de variabele "bio-olie yield". Een positief teken wil zeggen dat de NCW stijgt als de waarde van de variabele toeneemt, een negatief teken leidt tot een daling in de NCW als de waarde van de variabele toeneemt.

De NCW is het gevoeligst voor een verandering in de bio-olieopbrengst, wat een belangrijk gegeven is, aangezien alle opbrengsten het gevolg zijn van de verkoop van bio-olie. Een lagere bio-olieopbrengst dan de in deze masterproef veronderstelde 70%, zou de NCW sterk negatief beïnvloeden. De onzekerheid over de kost van kortoomloophout verklaart eveneens een groot deel van de variabiliteit van de NCW. Beide variabelen zouden met grote zekerheid vastgelegd moeten worden alvorens een NCW te berekenen. De NCW is ongevoelig voor een verandering in het percentage van de investeringskost dat als onderhoudskost in rekening gebracht wordt, tenminste binnen het beschouwde interval.

In de laatste rij wordt de kans op een positieve NCW weergegeven wanneer alle variabelen de standaardwaarde aannemen en de vijf variabelen uit de sensitiviteitsanalyse variëren binnen de opgelegde ranges. Deze kans is 0%, wat wil zeggen dat onder de voorwaarden in deze analyse de NCW nooit positief zal zijn bij de verkoop van biochar en bio-olie.

12.2 Verkoop van actieve kool en bio-olie

De kost voor aanleg, oogst en voorbehandeling van kortoomloophout maakt nog steeds het grootste deel uit van de operationele kosten. Ook de investeringskost blijft een belangrijk aspect in de NCW-berekening (zie tabel 20).

De algemene overheadkosten maken een groter deel uit van de totale operationele kosten dan de onderhoudskosten. Hoewel beiden onzeker zijn, wordt ervoor gekozen enkel de algemene overheadkosten op te nemen. De opbrengsten uit de verkoop van actieve kool maken iets meer dan de helft uit van de totale operationele opbrengsten. De verkoopprijs van actieve kool uit char, geproduceerd uit kortoomloophout, wordt door de actieve koolproducent geschat tussen de 1,5 en 2,5 EUR/kg, afhankelijk van de verkoopcondities, en wordt als een onzekere variabele opgenomen. De bio-olieopbrengst is de vijfde variabele die opgenomen wordt, wegens de grote onzekerheid over de waarde van deze variabele.

Tabel 50: resultaten sensitiviteitsanalyse bij de verkoop van actieve kool en bio-olie

variabele	minimum	gemiddelde	maximum	gevoeligheid NCW
investeringskost (EUR)	6 062 667,51	6 736 297,23	7 409 926,95	-19,90%
bio-olie yield (%)	63,00	70,00	77,00	+23,40%
kost KOH (EUR/tds)	67,88	75,42	82,96	-22,60%
verkoopprijs actieve kool (EUR/kg)	1,80	2,00	2,20	+33,90%
overheadkost (%)	0,09	0,10	0,11	-0,30%
kans NCW > 0				0,00%

De onzekerheid over de overheadkosten verklaart slechts een zeer klein gedeelte van de variabiliteit van de NCW. De onzekerheid over de verkoopprijs van actieve kool verklaart het grootste deel van de variabiliteit. Deze waarde zou met grote zekerheid bepaald moeten worden alvorens een NCW te berekenen. De kans op een positieve NCW is 0% onder de voorwaarden in deze analyse.

12.3 Verkoop van biochar, warmte en elektriciteit

De kosten voor kortoomloophout maken ook nu het grootste deel uit van de operationele kosten. Voor deze sensitiviteitsanalyse wordt ervoor gekozen het percentage van de investeringskosten dat de algemene overheadkosten bepaalt, niet op te nemen. De variabiliteit van de NCW werd bij de verkoop van biochar en bio-olie slechts voor minder dan 1% verklaard door de onzekerheid over dit percentage. Verwacht wordt dat dit bij de verkoop van biochar, warmte en elektriciteit niet anders zal zijn.

De personeelskosten zijn de op één na grootste kostenpost. De jaarlijkse loonkost voor een arbeider werd bepaald door indexering van een loonkost uit 2005 van Bloemen en Voets (2009). De veronderstelde loonkost kan afwijken van de werkelijke loonkost van een arbeider. Om deze reden wordt de jaarlijkse loonkost van een arbeider opgenomen in de sensitiviteitsanalyse. De totale investeringskosten worden ook opgenomen in de analyse, omdat deze een belangrijk deel uitmaken van de NCW-berekening (zie tabel 40). De opbrengsten uit de verkoop van groenestroomcertificaten zijn de belangrijkste operationele opbrengsten. Uit cijfers van de VREG (2010a) blijkt dat de gemiddelde prijs van groenestroomcertificaten van maand tot maand kan wijzigen, dit zowel voor een certificaat met als een certificaat zonder garantie van oorsprong. De prijs van een groenestroomcertificaat is per definitie een onzekere variabele. De prijs van een certificaat met garantie van oorsprong (prijs GSC met garantie van oorsprong) wordt opgenomen in de sensitiviteitsanalyse, omdat de meeste opbrengsten uit de verkoop van groenestroomcertificaten voortvloeien uit de verkoop van certificaten met garantie van oorsprong (zie tabel 35). De opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit maken eveneens een groot deel uit van de operationele opbrengsten. De verkoopprijs van elektriciteit werd afgeleid uit een interval gegeven door Abucon (2010) en wordt om deze reden beschouwd als een onzekere variabele. Het is mogelijk dat de werkelijke verkoopprijs afwijkt van de in deze masterproef veronderstelde 0,049 EUR/kWh. De verkoopprijs is eveneens afhankelijk van het feit of de elektriciteit verkocht wordt in dal- of piekuren.

Tabel 51: resultaten sensitiviteitsanalyse bij de verkoop van biochar, warmte en elektriciteit

variabele	minimum	gemiddelde	maximum	gevoeligheid NCW
Investeringskost (EUR)	4 735 431,3100	5 261 590,3400	5 787 749,3700	-16,0%
prijs GSC met garantie van oorsprong (EUR)	96,4300	107,4100	117,8500	+43,0%
kost KOH (EUR/tds)	67,8800	75,4200	82,9600	-26,9%
verkoopprijs elektriciteit (EUR/kWh)	0,0441	0,0490	0,0539	+7,0%
loonkost arbeider (EUR)	41 400,0000	46 000,0000	50 600,0000	-7,0%
kans NCW > 0				1,7%

De onzekerheid over de prijs van een groenestroomcertificaat met garantie van oorsprong bepaalt het grootste deel van de variabiliteit van de NCW. Het is echter onmogelijk om deze prijs precies in te schatten, omdat deze van maand tot maand wijzigt onder invloed van vraag en aanbod.

De kans op een positieve NCW is, onder de omstandigheden in deze analyse, gelijk aan 1,7%. Het is dus mogelijk om een positieve NCW te bekommen als alle variabelen, op de in deze paragraaf geïdentificeerde na, hun standaardwaarde aannemen. De vijf variabelen uit de sensitiviteitsanalyse zullen een waarde moeten aannemen die de NCW positief beïnvloedt.

Om met 95% zekerheid in een positieve NCW te resulteren, zou de kost voor korteomloophout moeten dalen tot 53,20 EUR/tds. In tabel 11 werd berekend dat de kost voor de teler van korteomloophout 48,76 EUR/tds bedraagt. Hierbij moeten de kosten voor extra verkleinen en drogen, van elk 13,33 EUR/tds, opgeteld worden. Het is weinig waarschijnlijk dat de kost voor korteomloophout zo sterk zal dalen.

Een andere mogelijkheid om met 95% zekerheid een positieve NCW te bekommen, is een prijsstijging van een groenestroomcertificaat tot 130,45 EUR. De gemiddelde prijs van een groenestroomcertificaat met garantie van oorsprong was sinds januari 2006 echter zelden hoger dan 110 EUR (VREG, 2010a). Een prijs voor een groenestroomcertificaat met garantie van oorsprong van 130,45 EUR wordt als niet-realistisch beschouwd.

12.4 Verkoop van actieve kool, warmte en elektriciteit

De totale investeringskost bepaalt de waarde van de NCW sterk (zie tabel 41) en wordt in de sensitiviteitsanalyse opgenomen. De personeelskost is de grootste kostenpost. Aangezien de jaarlijkse loonkost van een arbeider als onzeker beschouwd kan worden, wordt deze variabele opgenomen. De kost voor korteomloophout maakt een bijna even groot deel van de operationele kosten uit als de personeelskost. De kost voor korteomloophout in EUR/tds is de derde variabele die in de sensitiviteitsanalyse wordt opgenomen. Het percentage van de investeringskost dat gebruikt wordt om de algemene overheadkosten te bepalen, wordt niet opgenomen, om dezelfde reden als in paragraaf 12.3 vermeld werd. Bij de opbrengsten is de verkoop van actieve kool de grootste post. De verkoopprijs van actieve kool kan als onzeker beschouwd worden en wordt opgenomen in de analyse. De opbrengsten uit de verkoop van groenestroomcertificaten maken eveneens een groot deel uit van de operationele opbrengsten. De prijs van een groenestroomcertificaat met garantie van oorsprong wordt als onzekere variabele opgenomen, omdat de meeste opbrengsten uit de verkoop van groenestroomcertificaten voortvloeien uit de verkoop van dit soort certificaten.

Tabel 52: resultaten sensitiviteitsanalyse bij de verkoop van actieve kool, warmte en elektriciteit

variabele	minimum	gemiddelde	maximum	gevoeligheid NCW
investeringskost (EUR)	7 392 655,94	8 214 062,16	9 035 468,38	-25,60%
prijs GSC met garantie van oorsprong (EUR)	96,43	107,41	117,85	+19,30%
kost KOH (EUR/tds)	67,88	75,42	82,96	-15,60%
verkoopprijs actieve kool (EUR/kg)	1,80	2,00	2,20	+30,90%
loonkost arbeider (EUR)	41 400,00	46 000,00	50 600,00	-8,70%
kans NCW > 0				75,66%

Bovenstaande tabel vat de resultaten van de sensitiviteitsanalyse samen. De onzekerheid over de verkoopprijs van actieve kool verklaart het grootste deel van de variabiliteit van de NCW. De onzekerheid over de investeringskost verklaart eveneens een groot deel van deze variabiliteit. De kans om een positieve NCW te bekomen, is 75,66%. Dit percentage ligt heel wat hoger dan bij de verkoop van biochar, warmte en elektriciteit, wat een logisch gevolg is van het verschil in berekende NCW in het standaardgeval uit tabellen 40 en 41.

Om met 95% zekerheid te resulteren in een positieve NCW zou de totale investeringskost moeten dalen tot 7 712 390,06 EUR. Er kan niet bepaald worden in hoeverre de formules voor de berekening van de investeringskosten en subsidies resulteren in correcte waarden. Bijgevolg is het niet mogelijk de haalbaarheid van een totale investeringskost van 7 712 390,06 EUR te beoordelen. Een stijging van de verkoopprijs van actieve kool tot 17,50 EUR/kg resulteert eveneens met 95% zekerheid in een positieve NCW. De actieve kool, geproduceerd uit korteomloophout, kan, volgens de actieve koolproducent, verkocht worden aan 1,5 tot 2,5 EUR/kg. Een prijs van 17,50 EUR/kg is bijgevolg niet realistisch.

13 Juridisch aspect

In de Vlaamse wetgeving werd pyrolysechar nog niet opgenomen, omdat de productie van deze char in Vlaanderen nog niet op commerciële schaal plaatsvindt. Char kan aangewend worden als bodemverbeteraar of als grondstof voor actieve kool. De bestaande Vlaamse wetgeving hieromtrent wordt bekeken. Per geval wordt nagegaan of en hoe de char binnen deze wetgeving zou kunnen vallen.

13.1 Voldoet de char aan de wettelijke normen?

13.1.1 Gebruik als biochar

In het decreet bodemsanering en bodembescherming van 27 oktober 2006 wordt aangehaald dat een goede bescherming en sanering van de bodem noodzakelijk is om deze nog lang gezond te houden. Het decreet is er op gericht om, zo veel als mogelijk is, de richtwaarden die opgesteld werden inzake kwaliteit van de bodem, te realiseren. Deze richtwaarden werden opgesteld door de Vlaamse regering.

Het is van belang om deze richtwaarden te kennen, alvorens biochar grootschalig te produceren. Biochar zou niet in de bodem gebruikt mogen worden, als het gevolg hiervan zou zijn dat de richtwaarden worden overschreden. Krull et al. (2008) deden een onderzoek naar de chemische samenstelling van biochar afkomstig van verschillende soorten biomassa. De biochar die geproduceerd wordt uit hout kent volgende samenstelling:

Tabel 53: chemische samenstelling char

samenstelling char	%
koolstof	85,0
waterstof	2,8
stikstof	<1,0
zuurstof	12,2

Bron: Krull et al., 2008

Een kilo biochar bevat ongeveer 850 gram koolstof, 28 gram waterstof, minder dan 10 gram stikstof en 122 gram zuurstof. De richtwaarden die volgens het decreet bodemsanering en bescherming niet mogen overschreden worden, zijn terug te vinden in VLAREBO 2008. In bijlage 2 van dit besluit worden allerlei stoffen, die in bodems aanwezig zijn, opgesomd, samen met de richtwaarde die niet overschreden mag worden. In deze lijst zijn koolstof, waterstof, stikstof en zuurstof niet terug te vinden. Dit betekent dat toevoeging van koolstof, waterstof en zuurstof aan een bodem, geen gevaar oplevert voor het milieu of de volksgezondheid.

Een volgende belangrijke vraag die beantwoord moet worden is: kan biochar beschouwd worden als meststof? Lehmann et al. (2002) geven aan dat biochar geen of slechts zeer weinig nutriënten bevat. Om een verarmde bodem vruchtbaarder te maken, is toevoeging van onder andere stikstof noodzakelijk. Het decreet houdende de bescherming van water tegen de verontreiniging door nitraten uit agrarische bronnen van 22 december 2006, ook wel mestdecreet genaamd, definieert meststof. Volgens artikel 3 uit dit decreet is een meststof "elke één of meer stikstof- of fosforverbindingen bevattende stof die op het land wordt gebruikt ter bevordering van de gewasgroei, met inbegrip van dierlijke mest, afval van visteeltbedrijven en zuiveringsslib". Op basis van deze definitie zou biochar als meststof beschouwd kunnen worden, zoals blijkt uit de chemische samenstelling uit Krull et al. (2008). Biochar geproduceerd uit hout bevat stikstofverbindingen. De biochar kan echter enkel als meststof beschouwd worden als het doel van de productie van de biochar is, om deze te gebruiken op het land ter bevordering van de gewasgroei. Artikel 3 van het mestdecreet definieert kunstmest als "elke met een industrieel proces vervaardigde meststof, met inbegrip van het $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ uit spuiwater". Naar mijn mening kan biochar, op basis van deze definities, beschouwd worden als kunstmest. Het lijkt echter niet aangeraden deze bewoording te gebruiken, omdat biochar weinig nutriënten toevoegt aan een bodem. Het woord bodemverbeteraar lijkt een beter alternatief, omdat biochar wel bodemverbeterende kwaliteiten bevat die door meerdere onderzoeken werden aangetoond. Het gaat hier over het beter vasthouden van water, een hogere cation exchange capacity (CEC) en een hogere pH in bodems waaraan biochar werd toegevoegd (Glaser et al, 2002).

Het mestdecreet handelt over de toevoeging van nitraten aan de bodem. Artikel 12 bepaalt de hoeveelheid stikstof die maximaal aan een bodem toegevoegd mag worden. Dit artikel vermeldt dat bemesting enkel mogelijk is op landbouwgronden en groeimedium. Een groeimedium wordt in dit decreet gedefinieerd als "materiaal in vaste of vloeibare vorm, niet zijnde landbouwgrond, dat wordt gebruikt of bestemd is om te worden gebruikt als voedingsbodem voor planten". Er wordt in artikel 12 aangegeven dat kunstmest ook toegepast mag worden bij het aanleggen en het onderhouden van tuinen, parken en plantsoenen. Bij bemesting van tuinen, parken en plantsoenen, mag de toegevoegde hoeveelheid stikstof op jaarbasis niet groter zijn dan 170 kg stikstof per hectare. Rekening houdend met de chemische samenstelling van de geproduceerde char uit Krull et al. (2008), betekent dit dat er jaarlijks 17 ton biochar per hectare, of 1,7 kg per m^2 , zou mogen toegevoegd worden aan de bodem in een tuin, park of plantsoen. Als er op deze plaats een vorm van stikstofbemesting plaatsvindt, zal de maximaal toegelaten hoeveelheid biochar lager liggen. Artikel 13 van het mestdecreet regelt deze aangelegenheid voor landbouwgronden. Afhankelijk van het type gewas, mag er per hectare landbouwgrond maximaal 70 tot 250 kg stikstof per hectare per jaar, afkomstig uit kunstmest, toegevoegd worden. Voor bepaalde gewassen mag zelfs geen stikstof aan de bodem toegevoegd worden.

13.1.2 Gebruik als grondstof voor actieve kool

Volgens de actieve koolproducent bestaat er geen eenduidige norm over wat actieve kool mag bevatten. Actieve kool moet geen minimale hoeveelheid koolstof bevatten. De eigenschappen die wel van belang zijn, zijn de adsorptiecapaciteiten en enkele fysische eigenschappen zoals hardheid, dichtheid en asgehalte. Er bestaan wel normeringen naargelang de toepassing van de actieve kool.

Als de actieve kool als filtratiemiddel bij drinkwaterproductie wordt toegepast, moet de actieve kool voldoen aan de Europese norm EN 12915. Deze norm bepaalt onder andere het maximale asgehalte (15%) en watergehalte (5%) voor de actieve kool. Als de actieve kool in de voedingsindustrie wordt toegepast, moet deze voldoen aan de EU-regelgeving voor voedingsadditieven, de Ordinance on the sale and use of additives. Deze norm bevat een hele lijst van componenten en de maximaal toegelaten concentratie hiervan.

Bij elke toepassing van actieve kool als adsorptiemiddel heeft de klant bepaalde eisen. Elke klant heeft lozing- of emissienormen, opgelegd door milieuwetgeving of sociale druk, waaraan hij zich dient te houden. De klanten moeten sowieso voldoen aan de normen bepaald in VLAREM.

13.2 Pyrolysechar als afvalstof

Pyrolysechar kan mogelijk als afvalstof, bijproduct of product beschouwd worden. Het is van belang te bepalen onder welk van deze categorieën de char valt om verdere relevante wetgeving te kunnen bepalen. In de eerste plaats wordt bekeken of char als afvalstof beschouwd moet worden. Zou dit niet het geval zijn, dan wordt er nagegaan of char als bijproduct of product beschouwd kan worden.

Bij de opstelling van de afvalwetgeving in de landen van de EU werd geen rekening gehouden met char als een manier om koolstof op te slaan. Van den Bergh (2009) ging na of biochar volgens de richtlijnen van de Europese Unie als een afvalstof beschouwd moet worden. Van den Bergh (2009) maakt in haar bespreking van het wettelijk kader gebruik van de richtlijn 2008/98/EG. Deze richtlijn zal tegen december 2010 moeten omgezet zijn naar Vlaamse wetgeving. Dit gebeurt door de OVAM en zal resulteren in het decreet betreffende het duurzaam beheren van afvalstoffen en materiaalkringlopen dat het huidige afvalstoffendecreet van 2 juli 1981 zal vervangen (Windels, 2009).

In de richtlijn 2006/12/EG geeft de Europese Unie een definitie van afval. Onder een afvalstof wordt "elke stof of elk voorwerp behorende tot de in bijlage I genoemde categorieën waarvan de houder zich ontdoet, voornemens is zich te ontdoen of zich moet ontdoen" (artikel 1 uit richtlijn 2006/12/EG). Bijlage I van deze richtlijn omschrijft de afvalstoffencategorieën. Categorie Q16 omvat "alle stoffen, materialen of producten die niet onder de hierboven vermelde categorieën vallen". Elke stof kan met andere woorden als een afvalstof beschouwd worden.

Als een producent van bio-olie de char die ontstaat na pyrolyse van biomassa, niet gebruikt als energiebron voor het pyrolyseproces of op een of andere manier te gelde maakt, kan deze char als afval beschouwd worden. Aangezien het bepalen van een economische waarde van char een doel is van deze masterproef, zal de char die voor deze analyse gebruikt wordt, op basis van deze definitie, niet als afval beschouwd worden.

Het afvalstoffendecreet van 2 juli 1981, is het relevante decreet voor Vlaanderen. Het hanteert in artikel 2 dezelfde definitie voor afvalstof als de richtlijn 2006/12/EG. Bijlage 1.2.1 van dit decreet bevat de zogenaamde afvalstoffenlijst. Hoofdstuk 19 van de afvalstoffenlijst handelt over het afval van installaties voor afvalbeheer, off-site waterzuiveringsinstallaties en de bereiding van, voor de menselijke consumptie bestemd, water en water voor industrieel gebruik. De door pyrolyse geproduceerde char zou kunnen vallen onder subcategorie 19 01 17 "afval van pyrolyse dat gevaarlijke stoffen bevat" of 19 01 18 "niet onder 19 01 17 vallend afval van pyrolyse".

Een belangrijke vaststelling in het afvalstoffendecreet is wel dat elke afvalstof indien ze gebruikt kan worden als secundaire grondstof, niet langer als een afvalstof gecatalogeerd wordt. In artikel 11 van dit decreet wordt namelijk aangehaald dat de Vlaamse regering een lijst opgesteld heeft met afvalstoffen die als secundaire grondstof gebruikt mogen worden. Indien de char in deze lijst voorkomt, zal deze volgens dit decreet niet langer als een afvalstof beschouwd worden.

Hier komt het besluit van 5 december 2003, ook wel VLAREA genaamd, aan bod. Hoofdstuk IV van het VLAREA handelt over de bruikbaarheid van materialen als secundaire grondstof. Artikel 4.1.1 onder dit hoofdstuk verwijst naar bijlage 4.1, die een lijst bevat met alle stoffen die als secundaire grondstof gebruikt kunnen worden. In afdeling 1 van deze bijlage worden de secundaire grondstoffen die gebruikt worden in of als bodemverbeterend middel, opgesomd. De vaste fractie die ontstaat na de pyrolyse van biomassa komt niet voor in deze lijst.

In artikel 4.1.1 van het VLAREA wordt aangehaald dat de Vlaamse overheid kan toelaten om bepaalde afvalstoffen als secundaire grondstof te gebruiken, onder meer als deze afvalstof als bodemverbeteraar zou gebruikt worden. In dit artikel worden een aantal voorwaarden inzake maximale hoeveelheid van bepaalde schadelijke of gevaarlijke stoffen opgesomd waaraan de afvalstof moet voldoen om hiervoor in aanmerking te komen. Een afvalstof die van de Vlaamse overheid te toelating kreeg, kan enkel als secundaire grondstof gebruikt worden "als ze geen grotere hoeveelheid van de volgende stoffen bevat dan die welke bij oordeelkundig gebruik van deze afvalstof een gevaar voor de gezondheid van de mens of nadelige gevolgen voor het milieu kunnen inhouden:

- geen gevaarlijke stoffen zoals bepaald in de Richtlijn 67/548/EEG van 27 juni 1967 betreffende de aanpassing van de wettelijke en bestuursrechtelijke bepalingen inzake de indeling, de verpakking en de kenmerken van gevaarlijke stoffen;
- geen andere schadelijke stoffen dan de genormeerde stoffen in dit hoofdstuk;
- geen schadelijke organismen zoals bepaald in het Koninklijk Besluit van 7 januari 1998 betreffende de handel in meststoffen, bodemverbeterende middelen en teeltsubstraten."

Om te bepalen of de uit kortetoomloophout geproduceerde biochar in aanmerking komt voor gebruik als secundaire grondstof, is meer kennis nodig over de precieze samenstelling van deze biochar. Als de uit kortetoomloophout geproduceerde biochar voldoet aan de voorwaarden uit hoofdstuk 4 van het VLAREA, komt deze zeker in aanmerking als secundaire grondstof voor gebruik als bodemverbeteraar (OVAM, 2009). De vraag of de biochar als afvalstof of als secundaire grondstof geclassificeerd moet worden, kan voorlopig niet beantwoord worden.

Indien biochar als secundaire grondstof beschouwd kan worden, dan kan deze benaming pas gebruikt worden vanaf het ogenblik dat de biochar wordt afgeleverd bij een gebruiker die beschikt over de nodige vergunningen en/of voldoet aan de voorwaarden om de biochar als secundaire grondstof te beschouwen. Deze voorwaarden zijn terug te vinden in artikel 11 van het afvalstoffendecreet.

Als biochar als secundaire grondstof beschouwd wordt, kan een bedrijf dit verder verwerken tot een product, zonder onder de bepalingen van het afvalstoffendecreet voor de nuttige toepassing van een afvalstof te vallen. Het bedrijf in kwestie dient zich dan wel te houden aan wetgeving van toepassing op het productieproces.

De pyrolysechar kan, als deze gebruikt wordt als grondstof voor actieve kool, niet als secundaire grondstof beschouwd worden.

Een afvalstof kan slechts als secundaire grondstof beschouwd worden als deze gebruikt wordt in of als bodemverbeterend middel, als bouwstof, als bodem of in kunstmatige afdichtingslagen met waterglas (artikel 4.1.1 en bijlage 4.1 van het VLAREA).

Als de geproduceerde char als afvalstof beschouwd wordt, is het afvalstoffendecreet van 2 juli 1981 de relevante wetgeving tot eind 2010. Vanaf dan wordt dit het decreet betreffende het duurzaam beheren van afvalstoffen en materiaalkringlopen. De doelstelling van het afvalstoffendecreet is het beschermen van milieu en volksgezondheid tegen de schadelijke invloeden van afvalstoffen en de verspilling van grondstoffen en energie tegengaan (artikel 5). Dit houdt onder meer in, dat het nuttig gebruik van afvalstoffen zoveel mogelijk moet plaatsvinden. Afvalstoffen die geen nuttige toepassing kennen moeten verwijderd, dit wil zeggen vernietigd of definitief in de bodem opgeslagen worden. Het verwijderen van afvalstoffen is, volgens artikel 14, een vergunningsplichtige handeling, wat wil zeggen dat het decreet van 28 juni 1985 betreffende de milieuvergunning van toepassing is.

Richtlijn 2008/98/EG voert de benaming bijproduct in. Artikel 5 uit richtlijn 2008/98/EG vermeldt vier voorwaarden waaraan een stof of voorwerp moet voldoen om als bijproduct beschouwd te worden. Als een stof of voorwerp het resultaat is van een productieproces dat niet in de eerste plaats bedoeld is om dit voorwerp of deze stof te produceren, kan dit slecht als een bijproduct in plaats van afvalstof beschouwd worden als aan volgende voorwaarden is voldaan:

- het is zeker dat de stof of het voorwerp zal worden gebruikt;
- de stof of het voorwerp kan onmiddellijk worden gebruikt zonder verdere andere behandeling dan die welke bij de normale productie gangbaar is;
- de stof of het voorwerp wordt geproduceerd als een integraal onderdeel van een productieproces;
- verder gebruik is rechtmatig, m. a. w. de stof of het voorwerp voldoet aan alle voorschriften inzake producten, milieu en gezondheidsbescherming voor het specifieke gebruik en zal niet leiden tot over het geheel genomen ongunstige effecten op het milieu of de menselijke gezondheid.

Als een stof als bijproduct beschouwd kan worden, zijn de bepalingen van richtlijn 2008/98/EG niet langer van toepassing. Het afvalstoffendecreet en het VLAREA maken reeds melding van het begrip "secundaire grondstof". De voorwaarden om een stof als bijproduct te mogen beschouwen, die in richtlijn 2008/98/EG gegeven worden, verschillen duidelijk van de voorwaarden die het VLAREA aanhaalt om een afvalstof als secundaire grondstof te kunnen beschouwen.

Het is echter wel mogelijk dat de definiëring van een bijproduct, met de daaraan gekoppelde voorwaarden om een stof als bijproduct te mogen beschouwen, uit richtlijn 2008/98/EG worden opgenomen in het nieuwe decreet betreffende het duurzaam beheren van afvalstoffen en materiaalkringlopen. Het is mogelijk dat het begrip "secundaire grondstof" hierdoor een andere betekenis krijgt of uit de Vlaamse wetgeving verdwijnt.

Indien gebruik gemaakt wordt van snelle pyrolyse, is het hoofddoel van de pyrolyse van biomassa de productie van bio-olie. De char zal zeker gebruikt worden als bodemverbeteraar of als grondstof voor actieve kool en is een integraal onderdeel van het pyrolyseproces. Bij verkoop van biochar is geen verdere behandeling nodig. Als de char gebruikt wordt als grondstof voor actieve kool, moet deze eerst geactiveerd worden. Bij de productie van actieve kool wordt een koolstofrijke grondstof gecarboniseerd en vervolgens geactiveerd. Activatie is met andere woorden een behandeling die gangbaar is bij de productie van actieve kool. Of de char voldoet aan de voorschriften inzake producten, milieu en gezondheidsbescherming is afhankelijk van verschillende factoren, zoals de kwaliteit van het gebruikte korteomloophout en de toepassing van char. Als het korteomloophout geplant wordt op vervuilde bodems, kan het gevolg zijn dat de char niet voldoet aan de wettelijke normen. Gebruikt men de char als grondstof voor actieve kool, dan bepaalt de toepassing van de actieve kool aan welke normen deze dient te voldoen. De actieve koolproducent vermeldt onder andere regelgeving voor actieve kool als filtratiemiddel bij drinkwaterproductie of bij gebruik in de voedingsindustrie. Er kan geconcludeerd worden dat de door snelle pyrolyse uit korteomloophout geproduceerde char, voldoet aan drie van de vier voorwaarden om als bijproduct beschouwd te worden. Of de char voldoet aan de vierde voorwaarde, moet geval per geval bekeken worden.

Als gebruik gemaakt zou worden van trage pyrolyse, dan is het hoofddoel de productie van char. In dit geval zou de char als product beschouwd worden (Van den Bergh, 2009), aangezien het de bedoeling van de pyrolyse van korteomloophout is, om een zuivere, als grondstof voor actieve kool of bodemverbeteraar bruikbare char te bekomen. De char zou in dit geval onder de wetgeving voor producten vallen.

Zo is er de wet van 25 februari 1991 betreffende de aansprakelijkheid voor producten met gebreken. De aansprakelijkheid geldt voor de producent van het product dat gedefinieerd wordt als "elk lichamenlijk roerend goed, ook indien het een bestanddeel vormt van een ander roerend of onroerend goed, of indien het door bestemming onroerend is geworden".

Aangezien de geproduceerde biochar rechtstreeks gebruikt kan worden als bodemverbeteraar, kan verondersteld worden dat de producent van biochar altijd onder de wet productaansprakelijkheid valt. Dit is ook het geval indien de char gebruikt wordt als grondstof voor actieve kool, omdat de activatie van char plaatsvindt op dezelfde site als de pyrolyse van biomassa.

De wet van 21 december 1998 betreffende de productnormen ter bevordering van duurzame productie- en consumptiepatronen en ter bescherming van het leefmilieu en de volksgezondheid kan van toepassing zijn. In deze wet wordt in de definitie voor product melding gemaakt van "lichamelijke roerende zaken, (met inbegrip van biobrandstoffen, stoffen, preparaten, biociden en verpakkingen, doch uitgezonderd afvalstoffen)". De geproduceerde char valt altijd onder deze definitie, behalve in het geval het gecatalogeerd moet worden als afvalstof. Deze wet stelt dat alle producten die op de markt gebracht worden, zodanig ontworpen moeten zijn dat hun fabricage, voorziene gebruik en verwijdering de volksgezondheid niet aantasten en niet of zo weinig mogelijk bijdragen tot een toename van de hoeveelheid en de mate van schadelijkheid van afvalstoffen en tot andere vormen van verontreiniging.

13.3 Aanbevelingen voor het juridisch kader

In Vlaanderen bestaan heel wat subsidiëringstelsels voor het gebruik van zonnepanelen, warmtekrachtkoppeling, het plaatsen van extra isolatie en andere energiebesparende investeringen. Zo werd in paragraaf 7.4 van deze masterproef reeds melding gemaakt van de groenestroomcertificaten en in paragraaf 7.5 van de warmtekrachtcertificaten. De productie en opslag van char levert een aanzienlijke CO₂-reductie in de atmosfeer op. De bio-olie die tegelijkertijd ontstaat en een alternatief kan zijn voor fossiele brandstoffen, verhoogt de maatschappelijke voordelen van de pyrolyse van biomassa. Een algemeen subsidiestelsel, dat subsidie van pyrolyse van biomassa mogelijk maakt, kan investeerders aanmoedigen te investeren in de pyrolyse van biomassa. Het is hierbij van belang de maatschappelijke waarde van de productie van char te vergelijken met de maatschappelijke waarde van andere energiebesparende investeringen. Zo zullen er gebieden in Vlaanderen zijn, bijvoorbeeld aan de kust, waar het plaatsen van windmolens mogelijk meer voordelen oplevert dan de pyrolyse van biomassa. Het invoeren van een algemeen subsidiestelsel dat toepasbaar is op alle energiebesparende investeringen in Vlaanderen zou ervoor zorgen dat in elke situatie geïnvesteerd wordt in de techniek die de meeste maatschappelijke voordelen oplevert, al zal zo een systeem in de praktijk moeilijk realiseerbaar zijn.

Biochar zou in Vlaanderen een toekomst kunnen hebben als bodemverbeteraar, hoewel de bodemverbeterende kwaliteiten van biochar in Vlaanderen nog niet bewezen werden. VLAREA vermeldt in bijlage 4.1 afdeling 1 een lijst van afvalstoffen die in aanmerking komen voor gebruik als secundaire grondstof in of als meststof of bodemverbeterend middel. De char die ontstaat na pyrolyse van biomassa staat niet in deze lijst. Als de bodemverbeterende kwaliteiten van biochar in Vlaanderen in de toekomst bewezen zouden worden, is een uitbreiding van deze lijst wenselijk.

14 Fytoremediatie

14.1 Oplossing voor historische vervuiling

In Noord-Limburg zitten verhoogde concentraties zware metalen, voornamelijk cadmium en zink, in de bodem als gevolg van historische vervuiling. De oude zinkfabrieken in deze streek maakten vroeger gebruik van sterk vervuilende productieprocessen, waardoor zware metalen zoals cadmium, lood en zink, in de lucht terecht kwamen en neersloegen op de omringende bodems (Staessen et al., 1995). Fytoremediatie is het gebruik van planten voor het verwijderen, afbreken of vastleggen van schadelijke stoffen uit bodem of water, waarbij drie vormen onderscheiden kunnen worden. Bij fytostabilisatie worden planten gebruikt om de verontreiniging vast te zetten in de bodem. Bij fytoextractie gebruikt men planten om de vervuiling uit de bodem te verwijderen, doordat de planten deze via de wortels opnemen. Bij fytotransformatie nemen de planten de verontreiniging op om ze om te zetten naar minder schadelijke verbindingen (CMK).

14.2 Gevolgen voor de geproduceerde biochar

De bedoeling van pyrolyse van met zware metalen vervuild hout, is om de zware metalen te concentreren in de door pyrolyse gevormde char. Stals et al. (2009) voerden hierover een studie uit. In deze studie werd gebruik gemaakt van een bepaalde cultivar van wilg, als plant voor fytoextractie, omdat deze zeer geschikt is om op de zandgronden van de Limburgse Kempen veel cadmium en zink op te nemen. Na bestudering van hun resultaten lijkt pyrolyse van hout en bladeren op een temperatuur van 723 K (450°C) de beste manier om de concentratie zware metalen in de char te maximaliseren. Op deze manier wordt een nagenoeg zuivere pyrolyse-olie gevormd. Deze kan als zuivere bio-olie gebruikt worden om groene energie te produceren. De resultaten van de door Stals et al. (2009) uitgevoerde studie worden gebruikt om de metaalbalansen op te stellen.

Uit Stals et al. (2009) blijkt dat als men een mengeling van hout en bladeren op 450°C pyrolyseert, men 21% char, 41% olie en 38% gas verkrijgt. Uit het onderzoek van Stals et al. (2009) komen volgende gehalten aan zware metalen in het aangeplante korteomloophout naar voor. De totalen werden berekend rekening houdend met een 4:1 ratio stam:bladeren. Deze ratio komt overeen met de natuurlijk voorkomende ratio droge stof stam:droge stof bladeren.

Tabel 54: zware metalen in biomassa

mg/kg droge stof			
element	stam	bladeren	totaal
zink	822,00	4636,00	1584,80
cadmium	40,90	80,00	48,72
koper	11,40	14,80	12,08
lood	26,30	14,40	23,92

Bron: Stals et al, 2009

Deze metalen komen hoofdzakelijk in de char terecht. Zo zal 65% van het door de biomassa opgenomen zink, in de char terechtkomen. Voor cadmium is dit 60% en voor lood 75%. De hoeveelheid zware metalen die toch in de pyrolyse-olie terecht komen, vallen volgens Stals et al. (2009) binnen de in Vlaanderen geldende normen.

Tabel 55: concentratie zware metalen in char en bio-olie

char		olie	
element	mg/kg	element	mg/kg
zink	1.030,12	zink	7,5
cadmium	29,23	cadmium	1,5
lood	17,94	lood	1,0
Zware metalen in char		Zware metalen in bio-olie	
		Bron: Stals et al, 2009	

14.3 Wetgevend aspect

Als char geproduceerd wordt uit met zware metalen verontreinigde biomassa, bevat deze een bepaalde hoeveelheid zink, lood en cadmium. Voordat men deze char op de markt brengt, moet gecontroleerd worden of de opgenomen hoeveelheid zware metalen binnen de wettelijk opgelegde normen valt.

Indien de char gebruikt wordt als grondstof voor actieve kool, mag deze slechts beperkte hoeveelheden zware metalen bevatten. Er zijn acceptatievoorwaarden voor heractivatie van actieve kool opgelegd door de overheid. Het opstellen van algemene acceptatievoorwaarden voor gebruikte actieve kool is echter niet mogelijk. Voor sommige chemische parameters worden limieten opgesteld, maar dit wil niet zeggen dat alle kool die aan deze voorwaarden voldoet, onvoorwaardelijk wordt geaccepteerd voor regeneratie. Er zijn eveneens terugnamevoorwaarden voor verwerking van gebruikte actieve kool (informatie van actieve koolproducent).

In onderstaande tabel worden de maximale concentraties voor de relevante chemische parameters weergegeven. De gehele lijst chemische parameters met hun maximale toegestane concentratie is echter veel langer en bevat, naast andere metalen zoals kwik, tin en ijzer, ook andere chemische stoffen zoals stikstof, zwavel en chloor.

Tabel 56: terugnamevoorwaarden voor gebruikte actieve kool

element	heractivatie (mg/kg)	verwerking (mg/kg)	char (mg/kg)
cadmium	10,00	100,00	29,23
lood	500,00	1 000,00	17,49
zink	g.d.	5 000,00	1 030,12

g.d.: geen gegevens beschikbaar

Uit deze opsomming blijkt dat de actieve kool die geproduceerd wordt uit met zware metalen vervuuld korteomloophout al voordat dit als adsorptiemiddel gebruikt werd, voor cadmium niet meer binnen de norm valt voor heractivatie van de actieve kool. Op basis van deze gegevens kan besloten worden dat de char van de zware metalen ontdaan moet worden, voordat dit als grondstof voor actieve kool kan gebruikt worden. Er wordt namelijk verondersteld dat de waarden die in de acceptatievoorwaarden voor gebruikte actieve kool voor regeneratie opgesomd worden, ook van toepassing zijn op de grondstof die gebruikt wordt voor de productie van actieve kool.

De relevante normen voor het gebruik van de biochar als bodemverbeterend middel zijn terug te vinden in bijlage 4.2.1.A van het VLAREA. Om de char als bodemverbeteraar te kunnen toepassen, zouden de zware metalen eerst uit de char verwijderd moeten worden. Enkel het loodgehalte in de char valt binnen de normen.

Tabel 57: maximale gehalte zware metalen in bodemverbeteraar.

bodemverbeteraar	VLAREA	char
element	mg/kg ds	mg/kg
arseen	150,00	
cadmium	6,00	29,23
chroom	250,00	
koper	375,00	
kwik	5,00	
lood	300,00	17,94
nikkel	50,00	
zink	900,00	1 030,12

Bron: VLAREA

De zware metalen zullen uit de char verwijderd moeten worden, alvorens deze als bodemverbeteraar of grondstof voor actieve kool gebruikt kan worden. Uit wetenschappelijk onderzoek blijkt dat elektrolyse toepassen voor het verwijderen van zware metalen de beste resultaten gaf bij assen uit de verbranding van hout of huishoudelijk afval. Bij elektrolyse worden de assen in een waterige oplossing gebracht en tussen twee elektroden geplaatst. Als de elektrolysecel die op deze manier ontstaat onder gelijkstroom met een lage spanning gebracht wordt, verplaatsen de metaalionen uit de assen zich naar de positieve (anode) of negatieve (kathode) elektrode, afhankelijk van hun eigen lading (Pedersen, 2002). Elektrolyse is echter erg duur en het is niet bewezen dat dit ook de beste methode is voor het verwijderen van zware metalen uit char (Vangronsveld, 2010). Verder onderzoek is noodzakelijk om te bepalen hoe de zware metalen het best uit de char verwijderd kunnen worden en wat het effect hiervan zou zijn op de totale kosten voor de productie van biochar of char als grondstof voor actieve kool.

15 Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek

15.1 Is de productie van biochar haalbaar in Vlaanderen?

De analyse in deze masterproef werd uitgevoerd uitgaande van een bepaalde hoeveelheid gedroogde biomassa per uur. Zo zou bij een input van 0,5 tds/uur bij 7 000 werkuren per jaar een jaarlijkse aanvoer van biomassa van 3 500 tds nodig zijn. Om de pyrolyse-installatie met een input van 0,5 tds/uur van de nodige biomassa te voorzien zou, rekening houdend met een jaarlijkse opbrengst van 10 tds/ha, een gebied van 350 ha met kortecomloophout aangeplant moeten zijn.

In Vlaanderen zijn momenteel niet genoeg hectaren beplant met kortecomloophout om in deze behoefte te voorzien. Tot op dit moment blijft de aanplanting van kortecomloophout in Vlaanderen beperkt tot enkele proefvelden en kleinere projecten. Er zal mogelijk een extra inspanning van de overheid, in de vorm van een subsidieregeling, noodzakelijk zijn om de aanplanting van kortecomloophout te stimuleren. Pyrolyse van snoeihout uit bossen zou gebruikt kunnen worden om pyrolysechar te produceren. Dit is een mogelijke piste voor verder onderzoek.

Kortecomloophout is geschikt voor fyto-remediatie van met zware metalen vervuilde gronden, zoals deze in Noord-Limburg voorkomen. De zware metalen die door het kortecomloophout opgenomen worden, komen bij snelle pyrolyse bijna volledig in de pyrolysechar terecht. De hoeveelheid zware metalen die deze pyrolysechar zou bevatten, is te groot om de pyrolysechar rechtstreeks als bodemverbeteraar of grondstof voor actieve kool te gebruiken. Er is echter verder onderzoek nodig om te bepalen welke methode voor metaalrecuperatie het meest geschikt is voor de verwijdering van de zware metalen uit de pyrolysechar (Vangronsveld, 2010). De kosten voor metaalrecuperatie zouden in de economische analyse opgenomen moeten worden om een beeld te krijgen van de economische haalbaarheid van pyrolyse van met zware metalen vervuilde biomassa. Biochar zorgt voor een grotere verbetering van arme zandgronden dan van rijkere leemgronden. Dit biedt, als de bodemverbeterende kwaliteiten van biochar in de toekomst bewezen worden, een extra argument voor het produceren van biochar uit kortecomloophout in Noord-Limburg, waar dit soort gronden voorkomen. Als de met zware metalen vervuilde biochar op een veilige manier gestockeerd zou kunnen worden, levert de pyrolyse van met zware metalen vervuild kortecomloophout twee voordelen op. Enerzijds wordt de vervuiling uit een ton kortecomloophout geconcentreerd in 120 kg biochar (Stals et al., 2009), anderzijds zorgt de opslag van biochar in de bodem voor een CO₂-reductie van 7,9 ton.

Snelle pyrolyse van de organische fractie van huishoudelijk afval en landbouwafval wordt reeds toegepast door Bio-oil Tessenderlo.

Dit bedrijf richt zich op de productie van bio-olie, waarbij de geproduceerde pyrolysechar verbrand wordt om het pyrolyseproces van de nodige energie te voorzien. Het is mogelijk dat deze pyrolysechar bruikbaar is als grondstof voor actieve kool. Hiervoor zou de pyrolysechar een voldoende grote hoeveelheid elementaire koolstof moeten bevatten (Paraskeva et al., 2008). De pyrolysechar mag ook geen ziektekiemen, asbest, radioactieve producten, zware metalen en explosieve stoffen bevatten (informatie van actieve koolproducent). Als pyrolysechar uit de organische fractie van huishoudelijk afval aan deze voorwaarden voldoet, dan is er in Vlaanderen genoeg potentieel voor de productie van actieve kool en bio-olie uit huishoudelijk afval.

De organische fractie van huishoudelijk afval zou geschikt zijn voor de biocharproductie als de richtwaarden voor de bodemkwaliteit, vastgesteld in VLAREBO 2008, niet overschreden worden bij gebruik van deze biochar.

De beschikbaarheid van andere soorten biomassa, geschikt voor de productie van pyrolysechar, werd onderzocht in het kader van deze masterproef. Er bleek in Vlaanderen en Nederland vrij weinig geschikt biomassa-afval beschikbaar te zijn. Bij de berekening van de maatschappelijke waarde van pyrolysechar, zowel bij gebruik als bodemverbeteraar als bij gebruik als grondstof voor actieve kool, bleek de CO₂-uitstoot bij het vervoer van biomassa verwaarloosbaar te zijn ten opzichte van de totale CO₂-reductie als gevolg van de productie en het gebruik van pyrolysechar en bio-olie. Aanvoer van biomassa kan over veel grotere afstanden plaatsvinden, bijvoorbeeld vanuit Frankrijk of Duitsland, zonder dat dit een groot effect heeft op de maatschappelijke waarde van pyrolysechar. Op deze manier kan er mogelijk wel genoeg aanvoer van korteomloophout of geschikt biomassa-afval zijn om te voorzien in de behoefte aan biomassa.

15.2 De NCW bij de verkoop van pyrolysechar en bio-olie

15.2.1 De NCW bij de verkoop van biochar en bio-olie

De investering in de pyrolyse-installatie komt niet in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek of ecologiepremie. De verkoopwaarde van biochar is 0 EUR, omdat de bodemverbeterende kwaliteiten van biochar in Vlaanderen nog niet bewezen werden, waardoor de enige operationele opbrengsten deze uit de verkoop van bio-olie zijn. Aan de kostenzijde maken de kosten voor de aanleg, oogst en voorbehandeling van het korteomloophout met 41,75% het grootste deel uit van de jaarlijkse operationele kosten. Als de aanvoerkosten van het korteomloophout hierbij opgeteld worden, blijkt dat de totale kosten voor het ter beschikking stellen van het korteomloophout bijna de helft uitmaken van de jaarlijkse operationele kosten.

De verzekeringskosten zijn verwaarloosbaar klein (0,07% van de jaarlijkse operationele kosten) en ook de elektriciteits- en onderhoudskosten maken elk minder dan 5% uit van de jaarlijkse operationele kosten.

De NCW is voor de drie inputniveaus negatief en daalt naarmate de hoeveelheid aangevoerde biomassa stijgt. Uit verder onderzoek blijkt dat de jaarlijkse kasstroom nooit positief wordt, ook niet bij een input van 300 tds/uur (zie tabel B1.2 in bijlage 1). Hierdoor blijft de NCW verder dalen, naarmate de input in tds/uur toeneemt.

Uit de sensitiviteitsanalyse blijkt dat de NCW het gevoeligst is voor een verandering in de bio-olieopbrengst en de kost voor de aanleg, oogst en voorbehandeling van het kortecomloophout. Aangezien de kost voor de aanleg, oogst en voorbehandeling van het kortecomloophout ook een groot deel uitmaakt van de totale operationele kosten, is dit de kostenpost waar een besparing tot een verbetering in de NCW kan leiden. Dit kan bijvoorbeeld door gebruik te maken van afvalhout dat voldoende zuiver is.

15.2.2 De NCW bij de verkoop van actieve kool en bio-olie

De investering in de pyrolyse-installatie en activatie-oven komt niet in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek of ecologiepremie. Na activatie kan de pyrolysechar verkocht als actieve kool 2 EUR/kg opleveren. De opbrengsten uit de verkoop van actieve kool en uit de verkoop van bio-olie maken elk ongeveer de helft uit van de jaarlijkse opbrengsten, met iets meer opbrengsten uit de verkoop van actieve kool. Door de extra operationele kosten van activatie, daalt het aandeel van de kost voor de aanleg, oogst en voorbehandeling van het kortecomloophout in de jaarlijkse operationele kosten, hoewel het met 29,48% nog steeds de grootste kostencategorie vormt. Het aandeel van de jaarlijkse onderhouds-, elektriciteits- en verzekeringskosten stijgt als gevolg van de extra operationele kosten van activatie. De verzekeringskosten zijn echter nog steeds verwaarloosbaar klein (0,09% van de jaarlijkse operationele kosten).

De NCW is voor de drie inputniveaus negatief en daalt naarmate de hoeveelheid aangevoerde biomassa stijgt. De jaarlijkse kasstroom wordt positief vanaf een input van 3 tds/uur, wat in een positieve NCW resulteert vanaf een input van 12 tds/uur (zie tabel B1.1 en figuur B1.2 in bijlage 1).

Uit de sensitiviteitsanalyse blijkt dat de onzekerheid over de verkoopprijs van actieve kool het grootste deel van de variabiliteit van de NCW verklaart. De verkoopprijs van actieve kool uit pyrolysechar zou met zo groot mogelijke zekerheid vastgesteld moeten worden alvorens de NCW van het investeringsproject te berekenen.

De NCW blijft gevoelig voor een verandering in de kost voor de aanleg, oogst en voorbehandeling van het korteomloophout en de bio-olieopbrengst.

15.2.3 Vergelijking van de NCW bij de verkoop van biochar en bio-olie en de NCW bij de verkoop van actieve kool en bio-olie

Bij een input van 0,5 tds/uur is de NCW bij de verkoop van biochar en bio-olie hoger dan de NCW bij de verkoop van actieve kool en bio-olie, wat erop wijst dat de extra kosten als gevolg van de activatie van de pyrolysechar niet gecompenseerd worden door opbrengsten uit de verkoop van actieve kool. Bij een input vanaf 1 tds/uur is de NCW bij de verkoop van actieve kool en bio-olie hoger. Bij een grotere aanvoer van biomassa is het bijgevolg voordeliger te investeren in een activatie-oven om de verliezen van het project te beperken en vanaf een input van 12 tds/uur een positieve NCW te bereiken.

15.3 De NCW bij de verkoop van pyrolysechar, elektriciteit en warmte

Er wordt geïnvesteerd in een warmtekrachtkoppeling (WKK-installatie) voor de omzetting van de bio-olie in elektriciteit en warmte. De pyrolyse- en WKK-installatie komen beide in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek en ecologiepremie. De totale investeringskost, na aftrek van de verhoogde investeringsaftrek en ecologiepremie, bij de verkoop van warmte en elektriciteit is groter dan de totale investeringskost bij de verkoop van bio-olie, zowel bij de verkoop van biochar als bij de verkoop van actieve kool. Er worden groenestroom- en warmtekrachtcertificaten uitgereikt voor de productie van elektriciteit en warmte met de WKK-installatie.

15.3.1 De NCW bij de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte

De opbrengsten uit de verkoop van verkregen groenestroomcertificaten maken met 52,89% het grootste deel uit van de jaarlijkse operationele kosten. Aan de kostzijde is de kost voor de aanleg, oogst en voorbehandeling van het korteomloophout de belangrijkste categorie. Met 35,34% is dit echter een daling van het aandeel in de jaarlijkse operationele kosten ten opzichte van de situatie met de verkoop van biochar en bio-olie als gevolg van de extra operationele kosten van de WKK-installatie. De elektriciteitskosten vallen weg, omdat een gedeelte van de geproduceerde elektriciteit aangewend zal worden om het productieproces van de nodige elektriciteit te voorzien. Als gevolg van de extra kosten van de WKK-installatie stijgt het aandeel van de jaarlijkse onderhouds- en verzekeringskosten in de jaarlijkse operationele kosten ten opzichte van de de situatie met de verkoop van biochar en bio-olie.

De NCW is negatief voor de drie inputniveaus, maar stijgt wel naarmate de hoeveelheid aangevoerde biomassa toeneemt. De lichte daling van de NCW bij een input van 1 tds/uur ten opzichte van een input van 0,5 tds/uur wordt verklaard door de stijging van het aantal personeelsleden van de pyrolyse-installatie van één naar twee per shift. De NCW wordt positief vanaf een input van 3 tds/uur.

De verbetering van de NCW bij de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte is uitsluitend het gevolg van de opbrengsten uit de verkoop van verkregen groenestroom- en warmtekrachtcertificaten en het in aanmerking komen voor de verhoogde investeringsaftrek en ecologiepremie. De jaarlijkse opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit en warmte zijn namelijk lager dan de opbrengsten uit de verkoop van bio-olie bij elk inputniveau (zie tabel B2.1 in bijlage 2). Zonder overheidssteun zou de verkoop van biochar en bio-olie interessanter zijn dan de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte.

Uit de resultaten van de sensitiviteitsanalyse kan afgeleid worden dat de NCW het gevoeligst is voor een verandering in de prijs van groenestroomcertificaten met garantie van oorsprong. Meer dan de helft van de jaarlijkse operationele opbrengsten vloeien voort uit de verkoop van groenestroomcertificaten en er worden opvallend meer certificaten met garantie van oorsprong dan certificaten zonder garantie van oorsprong verkregen (zie tabel 35). De prijs van de groenestroomcertificaten met garantie van oorsprong zou met zekerheid gekend moeten zijn, maar uit cijfers van de VREG (2010a) blijkt dat deze sterk kan schommelen van maand tot maand, waardoor deze prijs altijd onzeker zal zijn.

15.3.2 De NCW bij de verkoop van actieve kool, elektriciteit en warmte

Door de extra opbrengsten uit de verkoop van actieve kool daalt het aandeel van de opbrengsten uit de verkoop van groenestroomcertificaten in de jaarlijkse operationele kosten tot 34,75%. De opbrengsten uit de verkoop van actieve kool zijn met 35,30% de grootste opbrengstencategorie. De elektriciteitskosten vallen weg, maar omdat de activatie-oven ook een zekere elektriciteitsbehoefte heeft, zal de hoeveelheid elektriciteit die verkocht kan worden, en bijgevolg ook de opbrengsten uit deze verkoop, kleiner zijn dan bij de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte. Het aandeel van de onderhoudskosten in de jaarlijkse operationele kosten is groter dan in de situatie met de verkoop van actieve kool en bio-olie of de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte. Het aandeel van de verzekeringskosten in de jaarlijkse operationele kosten is groter dan in de situatie met de verkoop van actieve kool en bio-olie, maar kleiner dan in de situatie met de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte.

De NCW is negatief bij een input van 0,5 en 1 tds/uur, maar positief bij een input van 1,5 tds/uur. De verbetering van de NCW ten opzichte van de NCW bij de verkoop van actieve kool en bio-olie is ook in dit geval uitsluitend het gevolg van de overheidssteun. Zonder deze overheidssteun zou de verkoop van actieve kool en bio-olie interessanter zijn. De verbetering van de NCW ten opzichte van de NCW bij de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte is een gevolg van de extra operationele opbrengsten uit de verkoop van actieve kool.

De NCW is ook bij de verkoop van elektriciteit en warmte het gevoeligst voor een verandering in de verkoopprijs van actieve kool. De onzekerheid over de totale investeringskost verklaart eveneens een groot deel van de variabiliteit van de NCW.

15.3.3 Vergelijking van de NCW bij de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte en de NCW bij de verkoop van actieve kool, elektriciteit en warmte

Net als bij de verkoop van pyrolysechar en bio-olie is de NCW bij een input van 0,5 tds/uur hoger bij de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte dan bij de verkoop van actieve kool, elektriciteit en warmte. Dit wijst er wederom op dat bij een input van 0,5 tds/uur de extra kosten van activatie van de pyrolysechar niet gecompenseerd worden door opbrengsten uit de verkoop van actieve kool. Bij een input van 1 of 1,5 tds/uur is de NCW hoger bij de verkoop van actieve kool. Vanaf een input van 1 tds/uur is investeren in een activatie-oven aangewezen.

15.4 Biochar als bodemverbeteraar

Het effect van toevoeging van biochar op de vruchtbaarheid van Vlaamse bodems werd nog niet voldoende onderzocht om een uitspraak te kunnen doen over de bodemverbeterende kwaliteiten van biochar in Vlaanderen. Er zouden zich drie situaties kunnen voordoen: biochar is zowel op korte als op lange termijn bodemverbeterend, biochar houdt zowel op korte als lange termijn stikstof vast of biochar houdt stikstof vast op korte termijn, maar geeft dit op langere termijn weer vrij.

Het is mogelijk dat biochar zowel op korte als op lange termijn als bodemverbeteraar bruikbaar is in Vlaanderen. Zou dit het geval zijn, dan kan pyrolyse van biomassa tot bio-olie en biochar economisch interessant worden als de verkoopprijs van biochar voldoende hoog is. Indien de bodemverbeterende kwaliteiten van biochar in Vlaanderen in de toekomst bewezen zouden worden, kan biochar als een belangrijke koolstof sink dienst doen. Uit de berekening van de maatschappelijke waarde van biochar als bodemverbeteraar bleek de CO₂-reductie per ton biochar erg groot te zijn.

Het is echter mogelijk dat toevoeging van biochar aan een Vlaamse bodem zorgt voor een grotere mestbehoefte. In dit geval zou er meer stikstof aan de bodem toegevoegd moeten worden, wat leidt tot een grotere vorming van het broeikasgas N_2O . Een ton van dit broeikasgas wordt gelijk gesteld aan 310 ton CO_2 (European Environment Agency), waardoor de CO_2 -reductie door de opslag van biochar in de bodem mogelijk teniet gedaan wordt. Dit zou het geval zijn moest biochar de stikstof voor een zeer lange tijd vastleggen.

Als de biochar op korte termijn stikstof vasthoudt, maar deze op de langere termijn weer zou vrijgeven, dan zou biochar in Vlaanderen als een meststof op langere termijn gebruikt kunnen worden. Als het moment waarop biochar het stikstof weer vrijlaat, uit onderzoek bepaald kan worden, kan het toegevoegd worden aan een bodem die nog een voldoende lange periode braak kan liggen. Als deze bodem aangeplant wordt op het moment dat biochar de vastgelegde stikstof begint vrij te geven, is minder bemesting met dierlijke of kunstmest nodig.

De bodemverbeterende kwaliteiten van biochar in tropische gronden werden door meerdere auteurs beschreven. Voor de analyse in het kader van deze masterproef werd uitgegaan van Vlaanderen als afzetgebied voor biochar als bodemverbeteraar. Bij aanvoer over de weg, bleek de CO_2 -uitstoot als gevolg van vervoer van de benodigde biomassa verwaarloosbaar te zijn ten opzichte van de CO_2 -reductie als gevolg van de productie en het gebruik van biochar en bio-olie. De productie van biochar in Vlaanderen om het uit te voeren naar gebieden waar de bodemverbeterende kwaliteiten van biochar wel bewezen zijn, kan mogelijk resulteren in een CO_2 -reductie, ondanks het feit dat de biochar over grote afstanden vervoerd zou moeten worden. Dit kan, zolang niet duidelijk is of biochar in Vlaanderen al dan niet bodemverbeterend werkt, een manier zijn om biochar te gebruiken als bodemverbeteraar.

15.5 Is biochar het nieuwe goud in de strijd tegen de klimaatsverandering?

Het stockeren van een ton biochar in de bodem zorgt voor een CO_2 -reductie van 7,9 ton. Er wordt in dit geval gesproken over het stockeren van biochar, omdat de bodemverbeterende kwaliteiten van biochar in Vlaanderen nog niet bewezen werden. In paragraaf 15.4 werd reeds aangehaald dat de mogelijkheid bestaat dat biochar stikstof vastlegt in de bodem waardoor er meer stikstofbemesting noodzakelijk is. Dit zou de uitstoot van N_2O verhogen wat mogelijk de CO_2 -reductie teniet doet.

Als de pyrolysechar gebruikt wordt als grondstof voor actieve kool, dan resulteert het gebruik van een ton pyrolysechar in een CO_2 -reductie van 4 ton, wat beduidend minder is dan de CO_2 -reductie bij het stockeren van een ton biochar.

Er moet hierbij echter rekening gehouden worden met de vraag naar actieve kool. Als verondersteld wordt dat aan deze vraag sowieso voldaan wordt, is het toch voordeliger om de pyrolysechar te gebruiken als grondstof voor actieve kool. De gezamenlijke productie van bio-olie, gebruikt ter vervanging van fossiele brandstoffen, zorgt voor een compensatie van de CO₂ uitstoot als gevolg van de productie van actieve kool, wat bij de conventionele productieprocessen voor actieve kool niet het geval is.

Er kan geconcludeerd worden dat de productie en het gebruik van pyrolysechar en bio-olie altijd een positief effect zal hebben voor het milieu. Het is echter moeilijk te zeggen of biochar hét goud is. Om hierover een uitspraak te kunnen doen, is vergelijking van de productie van pyrolysechar en bio-olie met andere technieken die resulteren in een CO₂-reductie noodzakelijk. De Vlaamse overheid zou bij het opstellen van subsidiëringstelsels rekening moeten houden met de mogelijkheden van de productie en het gebruik van pyrolysechar en bio-olie als bron voor CO₂-reductie. Momenteel is dit echter nog niet het geval.

16 Lijst van geraadpleegde werken

Abucon (2010). *Economisch rendement van de biogasinstallatie*. Geraadpleegd op 27 april 2010, via <http://www.abucon.nl/?p=27>.

Afvalstoffendecreet. Decreet van 2 juli 1981 betreffende de voorkoming en het beheer van afvalstoffen. (z.d.). Geraadpleegd op 24 maart 2010, via <http://navigator.emis.vito.be/milnav-consult/>.

Agentschap Economie. Vlaams energieagentschap. Limitatieve technologieën lijst. (2008). Geraadpleegd op 16 maart 2010, via <http://ewbl-publicatie.vlaanderen.be/Uploads/LTL-call-200803-pertype.pdf>.

Agentschap Ondernemen. Call ecologiepremie, algemene informatie. (2010). Geraadpleegd op 18 maart 2010, via <http://ewbl-publicatie.vlaanderen.be/Uploads/EP-call%20Algemene%20infoteksten%2020100115,0.pdf>.

Agentschap Ondernemen. Ecologiepremie. (z.d.). Geraadpleegd op 15 maart 2010, via http://ae.vlaanderen.be/html_ondernemingen/ondernemingen_ecologiepremie.html.

Ahmadpour, A. & Do, D. D. (1996). The preparation of active carbons from coal by chemical and physical activation. *Carbon*, 34(4), 471-479.

Baker, S. L. (2000). *Perils of the Internal Rate of Return*. Geraadpleegd op 6 maart 2010, via <http://hspm.sph.sc.edu/COURSES/ECON/Invest/invest.html>.

Bastin, L. & Longden, D. M. (2009). Comparing transport emissions and impacts for energy recovery from domestic waste (EfW): Centralized and distributed disposal options for two UK Counties. *Computers, environment and urban systems*, 33, 492-503.

Bennink, D. & Benner, J. H. B. (2009). *Cost drivers warmtelevering in Nederland. Inzicht in de belangrijkste cost drivers van warmteleveranciers in Nederland*. Geraadpleegd op 24 april 2010, via http://www.energiekamer.nl/images/CE_Delf-Cost_drivers_warmtelevering_in_Nederland_tcm7-131487.pdf.

Besluit van 5 maart 2004 van de Vlaamse Regering inzake de bevordering van elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen. (z.d.). Geraadpleegd op 20 maart 2010, via <http://navigator.emis.vito.be/milnav-consult/>.

Besluit van de Vlaamse Regering van 7 juli 2006 ter bevordering van de elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekrachtcentrales. (2006). Geraadpleegd op 17 mei 2010, via http://www.ejustice.just.fgov.be/mopdf/2006/12/01_1.pdf#page=58.

Bilaey, E. (2009). Belcolade: chocoladeproducent; industrielaan 16, I.Z. Zuid 3, 9320 Erembodegem. Gecontacteerd via info@belcolade.com.

Bloemen, A. & Voets, T. (2009). *Hout als energiebron: vergelijking van vergassing en pyrolyse voor de omzetting van korte omloophout in warmte en elektriciteit via kosten-batenanalyse*. Hasselt: Universiteit Hasselt.

Boontjes, A. (2009). De West-Friese pindabrandery: verkoop van pinda's, noten en gedroogde zuidvruchten; De Veken 220, 1716KJ Opmeer, Nederland. Gecontacteerd via andre@pindabrandery.nl.

Bosdecreet van 13 juni 1990. (z.d.). Geraadpleegd op 20 maart 2010, via <http://navigator.emis.vito.be/milnav-consult/>.

Boukris, I. Ph., Grammelis, P., Bezergianni, S. & Bridgwater, A. V. (2007a). CFB air-blown flash pyrolysis. Part I: Engineering design and cold model performance. *Fuel*, 86, 1372-1386.

Boukris, I. Ph., Grammelis, P., Bezergianni, S. & Bridgwater, A. V. (2007b). CFB air-blown flash pyrolysis. Part II: Operation and experimental results. *Fuel*, 86, 1387-1395.

Bridgwater, A.V. (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical engineering journal*, 91, 87-102.

Bridgwater, A.V. , Toft, A. J. & Brammer, J. G. (2002). A techno- economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6, 181-248.

Bridgwater, T. (2006). Review. Biomass for energy. *Journal of the science of food and agriculture*, 86, 1755-1768.

Briffaerts, K., Cornelis, E., Dauwe, T., Devriendt, N., Guisson, R., Nijs, W. & Vanassche, S. (2009). *Prognoses voor hernieuwbare energie en warmtekrachtkoppeling tot 2020. Tussentijds rapport.* Geraadpleegd op 15 mei 2010, via http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/milieuvriendelijke/Cijfers&statistieken/Prognosestudie_HEB_WKK_tot_2020.pdf.

Brinkmann, A. J. F. (z.d.). *Vergisting van vast afval: praktijkervaringen en perspectieven in de Nederlandse context*. Geraadpleegd op 25 mei 2010, via <http://www.vagron.nl/pdf/vergisting.pdf>.

Brussels Agentschap voor de Onderneming. De fiscale en boekhoudkundige verplichtingen (2009). Geraadpleegd op 6 maart 2010, via <http://www.monstarterkit.be/documents/ch91.pdf>.

Campens, V. (2009). *Hoe ver kunnen boeren broeikasgas reduceren?* Geraadpleegd op 19 april 2010, via http://www.vilt.be/Veerle_Campens_-_Landbouw_en_Visserij_-_Hoe_ver_kunnen_boeren_broeikasgas_reduceren.

Cantillon, B., Marx, I., Rottiers, S & Van Rie, T. (2007). *Annex bij: Een vergelijking van België binnen de Europese kopgroep: Postremus inter pares*. Geraadpleegd op 14 mei 2010, via <http://www.centrumvoorsociaalbeleid.be/docs/20070220153848SBSY.pdf>.

Carleer, R. (2009). Gesprek aan Universiteit Hasselt.

Carleer, R., Vangronsveld, J. & Yperman, J. (2009). Gesprek aan Universiteit Hasselt.

Ceunen, S. (2008). *Economische haalbaarheid van verbranding voor de omzetting van biomassa in energie*. Hasselt: Universiteit Hasselt.

CMK, Centrum voor milieukunde. (z.d.). Geraadpleegd op 13 februari 2010, via <http://www.cmk.uhasselt.be/onderzoek/groepen/milieubiologie.asp>.

Cheng, C. & Lehmann, J. (2009). Ageing of black carbon along a temperature gradient. *Chemosphere*, 75, 1021-1027.

Cheng, C., Lehmann, J. & Engelhard, M. H. (2008a). Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochimica et cosmochimica acta*, 72, 1598-1610.

Cheng, C., Lehmann, J., Thies, J. E. & Burton, S. D. (2008b). Stability of black carbon in soils across a climatic gradient. *Journal of geophysical research*, 113, 1-10.

Cogen Vlaanderen. Basishandboek Warmtekrachtkoppeling. (2006). Geraadpleegd op 13 mei 2010, via http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/wkk_basishandboekcogen.pdf.

Cogen Vlaanderen, WKK: onderhouds- en uitbatingskosten. Kantoor "de Dijlemolens", Zwarte Zustersstraat 16 bus 9, 3000 Leuven. Tel.: 016/58 59 97.

Commissie Ampere. Warmte-Kracht koppeling. (2000). Geraadpleegd op 13 mei 2010, via http://www.internet-observatory.be/energy/ampere_commission/d7.pdf.

Cornelissen, T (2009). Gecontacteerd via tom_biooil@yahoo.com.

Cornelissen, T (2010). Gecontacteerd via tom_biooil@yahoo.com.

De Bruijn, F. (2009). Horizon Natuurvoeding: verkoop van notenpasta's, noten en zuidvruchten; postbus 77, 3400AB IJsselstein, Nederland. Gecontacteerd via info@horizonnatuurvoeding.nl.

De Schutter, P., Neels, L., Palmans, R. & Van der Mueren, M. (2004). *Bioskoop*. Kapellen: uitgeverij Pelckmans.

De Somviele, B., Meiresonne, L. & Verdonckt, P. (2009). *Van wilg tot warmte: potenties van korte omloophout in Vlaanderen.* Geraadpleegd op 7 februari 2010, via http://www.vbv.be/Van_Wilg_Warmte.pdf.

Decreet van 27 oktober 2006 betreffende de bodemsanering en bodembescherming. (z.d.). Geraadpleegd op 3 februari 2010, via <http://navigator.emis.vito.be/milnav-consult/>.

Defays, E. (2010). *Bos- en houtproducten, een koolstofopslagplaats.* Geraadpleegd op 20 april 2010, via <http://www.houtnieuws.be/files/hn15029n.pdf>.

Dossier koolstof. (2008). *Gaat de bodem bergaf?* Geraadpleegd op 30 december 2009, via http://www.vilt.be/Koolstof/Gaat_de_bodem_bergaf.

Ecobouwers. Kostprijs van de besparing op CO₂ uitstoot. (z.d.). Geraadpleegd op 10 april 2010, via <http://www.ecobouwers.be/node/42944>.

ecosubsibru[a]. Subsidieportaal van het Brussels hoofdstedelijk gewest. Verhoogde investeringsaftrek voor energiebesparende investeringen. (z.d.). Geraadpleegd op 19 maart 2010, via <http://www.ecosubsibru.be/documents/Verhoogde%20investeringsaftrek%20energiebesparende.doc>.

ecosubsibru[b]. Subsidieportaal van het Brussels hoofdstedelijk gewest. Investeringsaftrek. (z.d.). Geraadpleegd op 31 maart 2010, via http://www.ecosubsibru.be/index.cfm?fuseaction=aides.aides_one&aide_id=76&language=NL.

Electrabel: milieu informatiedag centrale Langerlo, 7 oktober 2009. Swinnenwijerweg 30, 3600 Genk.

Electrabel, prijzen en factuur. Samenstelling van de energieprijz. (2010). Geraadpleegd op 17 mei 2010, via http://www.electrabel.be/soho/offer/pricesinvoice_compositionprices_nl.aspx.

Enerpedia. Subsidies energiegewassen. (z.d.). Geraadpleegd op 19 april 2010, via <http://www.enerpedia.be/nl/subsidies>.

Engineer toolbox. The gross (high) and net (low) heating values. (z.d.). Geraadpleegd op 26 april 2010, via http://www.engineeringtoolbox.com/gross-net-heating-value-d_824.html.

European Environment Agency. Total energy and non-energy related greenhouse gas emissions by sector, EU-25. (z.d.). Geraadpleegd op 15 mei 2009, via http://themes.eea.europa.eu/Sectors_and_activities/energy/indicators/EN01,2007.04/Fig1.gif/view.

Fahmi, R., Bridgwater, A. V., Donnison, I., Yates, N. & Jones, J. M. (2008). The effect of lignin and inorganic species in biomass on pyrolysis oil yields, quality and stability. *Fuel*, 87, 1230-1240.

Federaal rapport 2009, gezinsgrootte. (2009). Geraadpleegd op 16 mei 2010, via http://www.plan.be/websites/tfdd_88/nl/r5nl_fichesite74.html.

Federale Overheidsdienst Financiën. Bericht in verband met de investeringsaftrek. (z.d.). Geraadpleegd op 26 april 2010, via <http://fiscus.fgov.be/interfaoifnl/Investeringsaftrek/Bericht-aj2011.pdf>.

FNR (2005). Leitfaden Bioenergie. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, Duitsland.

FOD justitie. (2009). Geraadpleegd op 16 mei 2010, via http://www.just.fgov.be/statistique_parquets/jstat2005/n/c01.html.

Garcia, C., Mathijs, E., Nevens, F. & Reheul, D. (2003). Energiegewassen in de Vlaamse landbouwsector. *Steunpunt duurzame landbouw, publicatie 1*, 94p.

Geens, T. (2009). Bingonuts: import van noten en gedroogde vruchten; Steenoven 5, 3945 Ham. Gecontacteerd via bingonuts@telenet.be.

Glaser, B, Lehmann, J. & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biology and fertility of soils*, 35, 219-230.

Hastaoglu, M. A. & Hassam, M. S. (1995). Application of a general gas-solid reaction model to flash pyrolysis of wood in a circulating fluidized bed. *Fuel*, 74(5), 697-703.

Hoogsteen, R., Braber, K. J. & Smit, R. W. (2003). *Haalbaarheid warmtenet regio Twente*. Geraadpleegd op 16 mei 2010, via <http://www.dbt.ugent.be/pdf/Warmtenet%20in%20Twente.pdf>.

Horngren, C. T., Datar, S. M. & Foster, G. (2006). *Cost accounting, a managerial emphasis. Twelfth edition*. New Jersey USA: Pearson Prentice Hall.

IEA, reactors. (z.d.). Geraadpleegd op 7 mei 2010, via http://www.pyne.co.uk/?_id=69.

INBO. Van snoeihout tot warmte: een gesloten cyclus (2007). Geraadpleegd op 23 november 2009, via <http://www.inbo.be/docupload/3648.pdf>.

Ioannidou, O. & Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production – A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 11, 1966-2005.

Jones, S. B. & Zhu, Y. (2009). *Preliminary Economics for the Production of Pyrolysis Oil from Lignin in a Cellulosic Ethanol Biorefinery*. U.S. Departement of Energy. Geraadpleegd op 20 mei 2010, via http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-18401.pdf.

Krull, E., Sohi, S., Lopez-Capel, E. & Bol, E. (2008). *Biochar, climate change and soil: A review to guide future research*. Geraadpleegd op 6 april 2009, via <http://www.geos.ed.ac.uk/scs/biochar/>.

Kuppens, T. (2009). Gesprek aan Universiteit Hasselt.

Laird, D. A., Brown, R. C., Amonette, J. E. & Lehmann, J. (2009). Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels, bioproducts and biorefining*, 3, 547-562.

Lehmann, J. (2007a). A handful of carbon. *Nature*, 447, 143-144.

Lehmann, J. (2007b). Bio-energy in the black. *Frontiers in ecology and the environment*, 5(7), 381-387.

Lehmann, J. (2009). Biological carbon sequestration must and can be a win-win approach. *Climatic change*, 97, 459-463.

Lehmann, J. & Rondon, M. (2006). Bio-Char soil management on Highly Weathered Soils in the Humid Tropics. In N. Uphoff, A. S. Ball, E. Fernandes, H. Herren, O. Husson, M. Liang, C. Palm, J. Pretty, P. Sanchez, N. Sangina & J. Thies (Eds.), *Biological approaches to sustainable soil systems* (p. 517-530). Boca Raton: Taylor & Francis group.

Lehmann, J., Pereira da Silva Jr., J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W. & Glaser, B. (2003). Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and soil*, 249, 343-357.

Lehmann, J., Gaunt, J. & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 11, 403-427.

Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J. O., Thies, J., Luizão, F. J., Petersen, J. & Neves, E. G. (2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil science society of America*, 70, 1719-1730.

Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Sohi, S., Thues, J. E., Skjemstad, J. O., Luizão, F. J., Engelhard, M. H., Neves, E. G. & Wirrick, S. (2008). Stability of biomass-derived black carbon in soils. *Geochimica et cosmochimica acta*, 72, 6069-6078.

Liang, B., Lehmann, J., Sohi, S. P., Thies, J. E., O'Neill, B., Trujillo, L., Gaunt, J., Solomon, D., Grossman, J., Neves, E. G. & Luizão, F. J. (2010). Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. *Organic geochemistry*, 41, 206-213.

Lommel. Oogstdemonstratie korte omloophout (2009). Geraadpleegd op 19 april 2010, via <http://www.inbo.be/docupload/4136.pdf>.

Major, J., Lehmann, J., Rondon, M. & Goodale, C. (2009). Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. *Global change biology*, 1-14.

Managementadviesbureau Berenschot. www.kenniscentrumbenchmarking.be.

Matthews, J. (2008). Carbon-negative biofuels. *Energy Policy*, 36 (2008), 940-945.

McCarl, B. A., Peacocke, C., Chrisman, R., Kung, C.-C. & Sands, R. D. (2009). Economics of Biochar Production, Utilization and Greenhouse Gas Offsets. In J. Lehmann, & S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management. Science and technology* (p. 341-356). Londen: Earthscan.

Meire, P. (2007). *Ecosysteem services: welke, waar en hoeveel, kan dat gemeten worden?* Geraadpleegd op 9 mei 2010, via <http://www.tijdschriftwater.be/water28-5-06HI.pdf>.

Meiresonne, L. (2006). *Kansen, mogelijkheden en toekomst voor populierenteelt in Vlaanderen.* Geraadpleegd op 27 maart 2010, via <http://www.inbo.be/files/Bibliotheek/30/169630.pdf>.

Mercken, R. (2004). *De investeringsbeslissing. Een beleidsgerichte analyse.* Antwerpen – Apeldoorn: Garant.

Mercken, R. & Siau, C. (2004). *Boekhouding en financiële rapportering. Boek 2.* Antwerpen – Apeldoorn: Garant.

Mestdecreet. Decreet van 22 december 2006 houdende de bescherming van water tegen de verontreiniging door nitraten uit agrarische bronnen. (z.d.). Geraadpleegd op 17 maart 2010, via <http://navigator.emis.vito.be/milnav-consult/>.

Microsoil. Cation exchange capacity. (z.d.). Geraadpleegd op 31 maart 2010 via, <http://www.microsoil.com/CEC.htm>.

Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit Nederland. Mest en milieu. (z.d.). Geraadpleegd op 9 mei 2009, via http://www.minInv.nl/portal/page?_pageid=116,1640722&_dad=portal&_schema=PORTAL.

Ministerieel besluit van 6 oktober 2006 inzake de vastlegging van referentierendementen voor toepassing van de voorwaarden voor kwalitatieve warmtekrachtinstallaties. (2006). Geraadpleegd op 17 mei 2010, via http://www.ejustice.just.fgov.be/mopdf/2006/12/01_1.pdf.

MIRA, Milieurapport Vlaanderen. Totale emissie van broeikasgassen. (2007a). Geraadpleegd op 25 april 2009, via <http://www.milieurapport.be/default.aspx?PageID=86&ChapID=2749&NodeID=4158>.

MIRA, Milieurapport Vlaanderen. Elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen (groene stroom). (2007b). Geraadpleegd op 20 maart 2010, via [http://www.milieurapport.be/nl/feiten-cijfers/MIRA-T/sectoren/energiesector/milieuvriendelijke-energieproductie/elektriciteitsproductie-uit-hernieuwbare-energiebronnen-\(groene-stroom\)/](http://www.milieurapport.be/nl/feiten-cijfers/MIRA-T/sectoren/energiesector/milieuvriendelijke-energieproductie/elektriciteitsproductie-uit-hernieuwbare-energiebronnen-(groene-stroom)/).

Mitchell, C. P., Stevens, E. A. & Watters, M. P. (1999). Short-rotation forestry – operations, productivity and costs based on experience gained in the UK. *Forest ecology and management*, 121, 123-126.

Mui, E. L. K., Ko, D. C. K. & McKay, G. (2004). Production of active carbons from waste tyres – a review. *Carbon*, 42, 2789-2805.

Neels, T. (2010). Gecontacteerd via tom.neels@lne.vlaanderen.be.

Nelissen, V. (2010). ILVO. Gecontacteerd via Victoria.nelissen@ilvo.vlaanderen.be.

Neosave. CO₂ uitstoot per kWh per energieleverancier. (2010). Geraadpleegd op 10 april 2010, via http://www.neosave.nl/html/co2_uitstoot_per_kwh.html.

Ng, C., Marshall, W. E., Rao, R. M., Bansode, R. R. & Losso, J. N. (2003). Activated carbon from pecan shell: process description and economic analysis. *Industrial crops and products*, 17, 209-217.

Nguyen, B. T., Lehmann, J., Kinyangi, J., Smernik, R., Riha, S. J. & Engelhard, M. H. (2008). Long-term black carbon dynamics in cultivated soil. *Biochgeoemistry*, 89, 295-308.

NIS, NACEBEL codes. (2008a). Geraadpleegd op 14 mei 2010, via <http://statbel.fgov.be/nl/statistieken/gegevensinzameling/nomenclaturen/nacebel/index.jsp>.

NIS, kwartaalindex van de arbeidskosten. (2008b). Geraadpleegd op 14 mei 2010, via <http://statbel.fgov.be/nl/statistieken/cijfers/economie/indicatoren/loonkost/index.jsp>.

Ochelen, S. & Putzeijs, B. (2008). *Milieubeleidskosten. Begrippen en berekeningsmethoden. Departement Leefmilieu, natuur en energie.* Opgevraagd op 6 maart 2010, via http://www.lne.be/themas/beleid/milieueconomie/downloadbare-bestanden/ME2_rapport%20Milieukosten.pdf.

OVAM (2009). Gecontacteerd via info@ovam.be.

Paraskeva, P., Kalderis, D. & Diamadopoulos, E. (2008). Review. Production of activated carbon from agricultural by-products. *Journal of chemical technology and biotechnology*, 83, 581-592.

Peacocke, G. V. C., Bridgwater, A. V. & Brammer, J. G. (z.d.). *Techno-economic assessment of power production from the Wellman and BTG fast pyrolysis processes.* Geraadpleegd op 25 mei 2010, via <http://www.aston-berg.co.uk/docs/J%20Brammar%20-%20Techno-economic%20Assessment.pdf>.

Pedersen, A. J. (2002). Evaluation of assisting agents for electro-dialytic removal of Cd, Pb, Zn, Cu and Cr from MSWI fly ash. *Journal of hazardous materials*, B95, 185-198.

Project Gazenbois (2009). Geraadpleegd op 19 april 2010, via http://www.vbv.be/persberichten/2009/20090417_perstekst_bezoek_aan_Groene-energiestad_Doorik_VBV_INBO_PROCLAM.pdf.

Planbureau voor de Leefomgeving (2010). *Wat natuur de mens biedt: ecosysteemdiensten in Nederland.* Geraadpleegd op 9 mei 2010, via <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/500414002.pdf>.

Richtlijn 2006/12/EG van het Europees Parlement en de Raad van 5 april 2006 betreffende afvalstoffen. (z.d.). Geraadpleegd op 8 mei 2010, via <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:114:0009:0009:NL:PDF>.

Richtlijn 2008/98/EG van het Europees Parlement en de Raad van 19 november 2009 betreffende afvalstoffen en tot intrekking van een aantal richtlijnen. (z.d.). Geraadpleegd op 8 mei 2010, via <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0003:NL:PDF>.

Rijckevelde, Brugge. Oogst korteomloophout. (2009). Geraadpleegd op 19 april 2010, via http://www.vbv.be/persberichten/2009/20090206_Persbericht_voor_Demodag_Exploitatie.pdf.

Ringer, M., Putsche, V. & Scahill, J. (2006). Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economic Analysis. *Technical report of National renewable energy laboratory, NREL/TP-510-37779, November 2006.*

Roberts, K. G., Gloy, B. A., Joseph, S., Scott, N. R. & Lehmann, J. (2010). Life Cycle Assessment of Biochar Systems: Estimating the Energetic, Economic and Climate Change Potential. *Environmental science and technology*, 44(2), 827-833.

Rogers, J. G. & Brammer, J. G. (2009). Analysis of transport costs for energy crops for use in biomass pyrolysis networks. *Biomass and bioenergy*, 33, 1367-1375.

Ruysschaert, G. (2010). ILVO. Gecontacteerd via greet.ruysschaert@ilvo.vlaanderen.be.

Schepers, B. L. & van Valkengoed, M. P. J. (2009). *Warmtenetten in Nederland. Overzicht van grootschalige en kleinschalige warmtenetten in Nederland.* Geraadpleegd op 16 mei 2010, via http://www.energiekamer.nl/images/CE_Delft-Warmtenetten_in_Nederland_tcm7-131486.pdf.

Schröder, E., Thomauske, K., Weber, C., Hornung, A. & Tumiatti, V. (2007). Experiments on the generation of activated carbon from biomass. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 79, 106-111.

Senternovem. Productie van biomateriaal: teelt en verwerking – uitgebreid. (2007). Geraadpleegd op 25 mei 2010, via http://www.senternovem.nl/duurzameenergie/projecten/zoeken_in_werkvelden/productie_van_biomateriaal_teelt_en_verwerking_uitgebreid.asp.

Siemons, R.V. (2005). *Pyrolyse in Groningen. Onderzoek naar de haalbaarheid van een transitiecoalitie.* Geraadpleegd op 6 maart 2010, via <http://www.cleanfuels.nl/Projects%20&%20publications/Eindrapport%20Pyrolyse%20in%20Groningen%20p.pdf>.

Sintzoff, I., Martin, J., Menu, J. F., Temmerman, M., Thiry, J., Tyteca, D., de Raedt, W., Casella, E., Ceulemans, R., Dubuisson, X., Jossart, J.-M. & Ledent, J. F. (2001). Woodsustain. Contributions of wood energy to sustainable development in Belgium. Final summary. Belgian science policy, Brussel.

Snoek, C. & Spurr, M. (z.d.). *The Role of District Heating & Cooling and Combined Heat and Power Systems in Reducing Fossil Fuels Use and Combating Harmful Emissions*. Geraadpleegd op 16 mei 2010, via http://www.iea-dhc.org/download/dhcchp_integrated_energy_systems-position_paper.pdf.

Spinelli, R., Ward, S. M. & Owende, P. M. (2009). A harvest and transport cost model for Eucalyptus spp. fast-growing short rotation plantations. *Biomass and bioenergy*, 33(9), 1265-1270.

Staessen, J., Roels, H., Vangronsveld, J., Clijsters, H., De Schrijver, K., De Temmerman, L., Dondeyne, F., Van Hulle, S., Wildemeersch, D. & Wilms, L. (1995). Preventiemaatregelen voor bodemverontreiniging met cadmium. *Tijdschrift voor geneeskunde*, 51(20), 1387-1395.

Stals, M., Thijssen, E., Vangronsveld, J., Carleer, R., Schreurs, S. & Yperman, J. (2009). Flash pyrolysis of heavy metal contaminated biomass from phytoremediation: Influence of temperature, entrained flow and wood/leaves blended pyrolysis on the behaviour of heavy metals. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 1-7.

Sustainable agriculture and soil conservation 2007-2009. Informatieblad nr. 3. Afname van het organische stofgehalte. (2009). Geraadpleegd op 30 december 2009, via <http://soco.jrc.ec.europa.eu/documents/NLFactSheet-03.pdf>.

Thewys, T. & Kuppens, T. (2008). Economics of willow pyrolysis after phytoextraction. *International journal of phytoremediation*, 10, 561-583.

Thewys, T. & Kuppens, T. (2009). *Methode voor de bepaling van de prijs voor korteomloophout uit fytoextractie*. Geraadpleegd op 3 februari 2010, via <http://doclib.uhasselt.be/dspace/bitstream/1942/10254/1/Paper%20VVE-dag%20Kuppens%20Thewys%20-%20Prijs%20KOH%20uit%20fytoextractie.pdf>

Valentine, J., Heaton, R., Randerson, P. & Duller, C. J. (2008). The economics of short-rotation coppice willow in the UK. *Proceedings of the 16th European Biomass Conference & Exhibition, Feria de Valencia, Valencia, Spanje, 2-6 juni 2008*, 527-528.

Van den Bergh, C. (2009). Biochar and waste law: a comparative analysis. *European energy and environmental law review*, 243-253.

van der Kooy, A. (2010). van der Kooy Pijnacker BV. Telefonisch contact via 0031-15/36 94 240.

van der Wal, E. (2010). Everda heat supplies; Josephine Bakerstraat 35, 1311GB Almere, Nederland. Gecontacteerd via info@everda.nl.

van Droogenbroeck, F. (2010). Ministerie van de Vlaamse gemeenschap, telefonisch contact via 02/553 46 17.

Vangronsveld, J. (2010). Gecontacteerd via jaco.vangronsveld@uhasselt.be.

Vanreppelen, K. & Kuppens, T. (2010). Gesprek aan Universiteit Hasselt.

Verweij, P., Schouten, M., van Beukering, P., Triana, J., van der Leeuw, K. & Hess, S. (2009). *Keeping the Amazon forests standing: a matter of values*. Geraadpleegd op 9 mei 2010, via http://assets.wnf.nl/downloads/wnf_amazonerapport_def_1.pdf.

Vlaams Energieagentschap. Contact via mailbox ecologiepremie: christiaan.todts@agentschapondernemen.be.

Vlaams klimaatbeleidsplan 2006-2012. (2006). Geraadpleegd op 20 maart 2010, via http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/klimaatconferentie/vlaams-klimaatbeleidsplan-2006-2012/vkp_2006-2012_def.pdf.

Vlaamse Codex Ruimtelijke Ordening. (z.d.). Geraadpleegd op 9 mei 2010, via <http://www2.vlaanderen.be/ruimtelijk/wetgeving/codex/codex.pdf>.

Vlaamse overheid, Vlaams Energieagentschap. Verhoogde investeringsaftrek voor energiebesparende investeringen. (2009). Geraadpleegd op 19 maart 2010, via http://www.sollux.be/Content/Documents/PV/verhoogde_investeringsaftrek_bijlage_2009.pdf.

VLAREA. Geraadpleegd op 24 maart 2010, via <http://navigator.emis.vito.be/milnav-consult/>.

VLAREBO 2008. Geraadpleegd op 29 december 2009, via <http://navigator.emis.vito.be/milnav-consult/>.

VLAREM II. Geraadpleegd op 20 maart 2010, via <http://navigator.emis.vito.be/milnav-consult/>.

VREG, Meteropneming – gemiddeld verbruik. (2007). Geraadpleegd op 16 mei 2010, via http://www.vreg.be/nl/04_privé/05_meteropneming/04_verbruik.asp.

VREG, Aantal verhandelde groenestroomcertificaten en gemiddelde prijs. (2010a). Geraadpleegd op 26 april 2010, via <http://www.vreg.be/vreg/documenten/Statistieken/54946.pdf>.

VREG, Aantal verhandelde warmtekrachtcertificaten en gemiddelde prijs. (2010b). Geraadpleegd op 14 mei 2010, via <http://www.vreg.be/vreg/documenten/Statistieken/54945.pdf>.

VREG[a], Meteropneming – soorten meters. Geraadpleegd op 14 mei 2010, via http://www.vreg.be/nl/04_privé/05_meteropneming/03_soorten.asp.

VREG[b], Leveranciers – openbaredienstverplichtingen – bewijsplicht levering groene stroom. (z.d.). Geraadpleegd op 26 april 2010, via http://www.vreg.be/nl/06_sector/02_leveranciers/02_openbaredienstverplichtingen/05_levering_groenestroom.asp.

VREG[c], Leveranciers – openbaredienstverplichtingen – quotumverplichting groenestroomcertificaten. (z.d.). Geraadpleegd op 26 april 2010, via http://www.vreg.be/nl/06_sector/02_leveranciers/02_openbaredienstverplichtingen/03_groene_stroomcertificaten.asp.

VREG[d], Energiemarkt – wie doet wat? – het systeem van warmtekrachtcertificaten (WKC). (z.d.). Geraadpleegd op 12 mei 2010, via http://www.vreg.be/nl/03_algemeen/02_energiemarkt/02_wiedoetwat/08_warmtekracht.asp.

VREG[e], Leveranciers – openbaredienstverplichting – bewijsplicht levering WKK-stroom. (z.d.). Geraadpleegd op 13 mei 2010, via http://www.vreg.be/nl/06_sector/02_leveranciers/02_openbaredienstverplichtingen/06_levering_wkk.asp.

VREG[f], WKK-producenten – de aanvraag – voorwaarden voor goedkeuring en aanvaardbaarheid. (z.d.). Geraadpleegd op 17 mei 2010, via http://www.vreg.be/nl/06_sector/05_wkkproducenten/02_aanvraag/01_voorwaarden.asp.

Wet van 21 december 1998 betreffende de productnormen ter bevordering van duurzame productie- en consumptiepatronen en ter bescherming van het leefmilieu en de volksgezondheid. (z.d.). Geraadpleegd op 8 mei 2010, via http://www.juridat.be/cgi_loi/loi_a.pl?language=nl&caller=list&la=n&fromtab=wet&tri=dd+as+rank&rech=1&numero=1&cn=1998122141&sql=dd+=+date'1998-12-21'.

Wet van 25 februari 1991 betreffende de aansprakelijkheid voor producten met gebreken. (z.d.). Geraadpleegd op 8 mei 2010, via http://www.juridat.be/cgi_loi/loi_a1.pl?language=nl&caller=list&cn=1991022530&la=n&fromtab=wet&sql=dt='wet'&tri=dd+as+rank&rech=1&numero=1.

Windels, T. (2009). *Nieuw decreet afvalstoffen op komst.* Geraadpleegd op 8 mei 2010, via <http://www.voka.be/milieu/nieuws/Pages/Nieuwdecreetafvalstoffenopkomst.aspx>.

Winsley, P. (2007). Biochar and bioenergy production for climate change mitigation. *New Zealand Science Review Vol 64(1)*, 5-10.

Woolf, D. (2008). *Biochar as a soil amendment: A review of the environmental implications.* Geraadpleegd op 6 april 2009, via http://orgprints.org/13268/01/Biochar_as_a_soil_amendment_-_a_review.pdf.

Yperman, J. & Vanderzande, D. (2006). *Chemische technologie.* Hasselt: Universiteit Hasselt.

Geraadpleegde websites

www.bio-oil-holding.eu

www.ecx.eu

www.tuinadvies.be

BIJLAGEN

Inhoudsopgave bijlagen

Bijlage 1: verklaring van de dalende NCW bij de verkoop van bio-olie

Bijlage 2: verklaring voor het verloop van de NCW bij de verkoop van warmte en elektriciteit

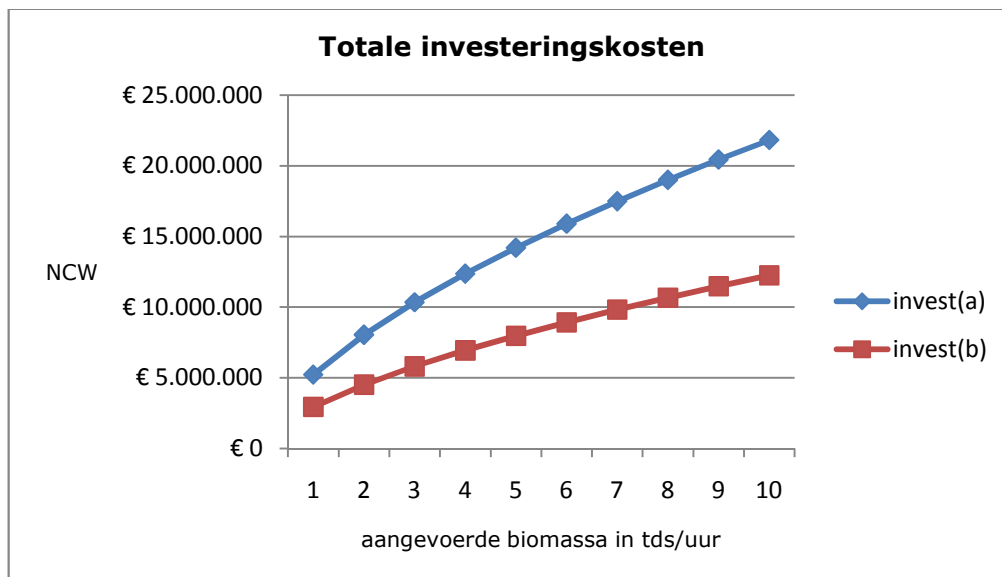
Bijlage 3: verloop van de NCW bij de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte

Bijlage 4: opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten bij een warmteafzet van 50% en 75%

Bijlage 5: bijdragen van de verschillende kostencategorieën tot de totale operationele kosten en bijdragen van de verschillende opbrengstencategorieën tot de totale operationele opbrengsten

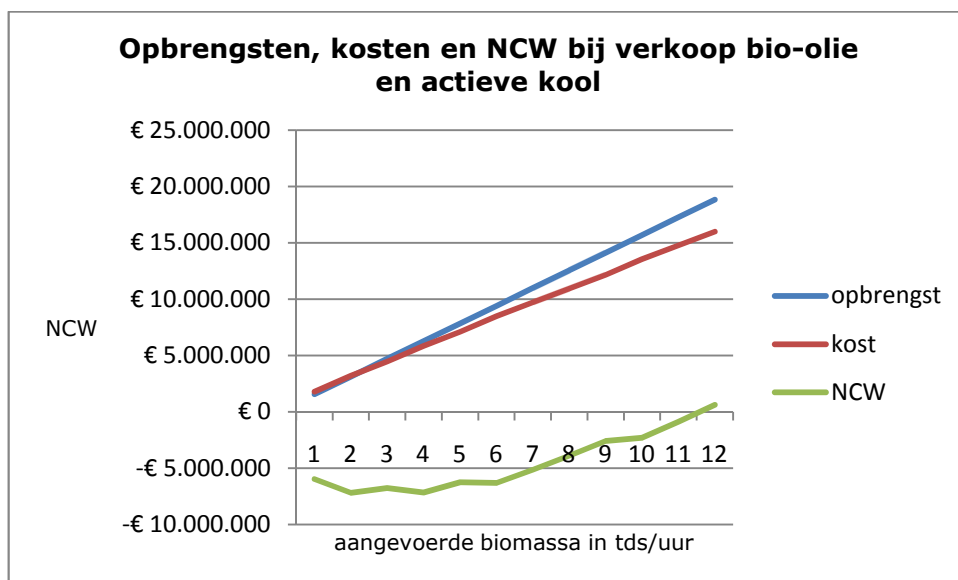
Bijlage 1: verklaring van de dalende NCW bij de verkoop van bio-olie

Verloop van de totale investeringskosten



Figuur B1.1: verloop van de totale investeringskosten bij de verkoop van bio-olie, waarbij invest(a) de totale investeringskosten zijn bij de verkoop van bio-olie en actieve kool en invest(b) de totale investeringskosten bij de verkoop van biochar en bio-olie

Verloop van de NCW, de operationele opbrengsten en de operationele kosten bij de verkoop van actieve kool en bio-olie



Figuur B1.2: verloop van de NCW, de operationele opbrengsten en de operationele kosten bij de verkoop van actieve kool en bio-olie

jaar	jaarlijkse opbrengst (EUR)	jaarlijkse kost (EUR)	NCW (EUR)
1	1 569 735,93	1 797 862,14	-5 960 168,40
2	3 139 471,86	3 217 299,98	-7 175 164,81
3	4 709 207,78	4 468 295,84	-6 746 049,93
4	6 278 943,72	5 864 363,30	-7 141 373,81
5	7 848 679,65	7 101 622,05	-6 230 455,71
6	9 418 415,58	8 488 216,17	-6 293 519,87
7	10 988 151,51	9 718 379,29	-5 133 735,76
8	12 557 887,44	10 946 043,71	-3 886 314,42
9	14 127 623,37	12 171 632,87	-2 566 106,96
10	15 697 359,30	13 548 793,14	-2 298 296,97
11	17 267 095,23	14 771 097,42	-862 878,42
12	18 836 831,16	15 992 067,40	619 337,86

Tabel B1.1: weergave van de jaarlijkse operationele opbrengsten, de operationele kosten en de NCW bij de verkoop van actieve kool en bio-olie voor verschillende inputniveaus

Verloop van de NCW, de operationele opbrengsten en de operationele kosten bij de verkoop van biochar en bio-olie

input (tds/u)	jaarlijkse opbrengst (EUR)	jaarlijkse kost (EUR)	NCW (EUR)
2	1 459 471,86	2 297 219,35	-9 800 203,17
3	2 189 207,79	3 270 941,10	-12 633 092,64
5	3 648 679,65	5 362 418,06	-19 001 894,30
10	7 297 359,30	10 335 966,67	-32 140 891,73
15	10 946 038,95	15 138 874,06	-43 400 439,69
20	14 594 718,60	20 085 650,44	-55 355 738,28
25	18 243 398,25	24 872 821,13	-65 919 508,50
30	21 892 077,90	29 808 745,21	-77 394 986,89
40	29 189 437,20	39 363 967,20	-97 677 188,62
50	36 486 796,50	49 062 886,68	-118 647 558,30
75	54 730 194,75	73 206 050,80	-169 301 922,76
100	72 973 593,00	97 170 234,85	-217 708 146,25
125	91 216 991,25	121 117 421,86	-265 362 867,52
150	109 460 389,50	145 052 198,03	-312 468 859,93
200	145 947 186,00	192 741 428,42	-404 373 374,60
250	182 433 982,50	240 557 880,67	-496 237 608,26
300	218 920 779,00	288 201 933,62	-586 144 660,94

Tabel B1.2: weergave van de jaarlijkse operationele opbrengsten, de operationele kosten en de NCW bij de verkoop van biochar en bio-olie voor verschillende inputniveaus

Bijlage 2: verklaring voor het verloop van de NCW bij de verkoop van warmte en elektriciteit

Vergelijking van de operationele opbrengsten bij de verkoop van warmte en elektriciteit met de operationele opbrengsten bij de verkoop van bio-olie

De vergelijking gebeurt voor jaar 1 van het project bij de verkoop van biochar. Zoals blijkt uit tabel 33 zullen de opbrengsten uit verkoop van elektriciteit lager liggen bij verkoop van actieve kool. De verkoop van biochar levert de grootst mogelijke opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit op. Vanaf jaar 18 zijn er geen opbrengsten meer uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten (WKC). De opbrengsten uit de verkoop van bio-olie, elektriciteit, warmte en de verkoop van groenestroomcertificaten (GSC) blijft hetzelfde gedurende de hele looptijd van het project.

	0,5 tds/uur	1 tds/uur	1,5 tds/uur
bio-olie (EUR)	364 867,97	729 735,93	1 094 603,90
warmte (EUR)	93 519,68	187 039,35	280 559,03
elektriciteit (EUR)	165 879,19	331 758,02	497 637,03
GSC (EUR)	413 074,90	826 258,20	1 239 333,10
WKC (EUR)	173 558,56	347 117,12	520 714,24

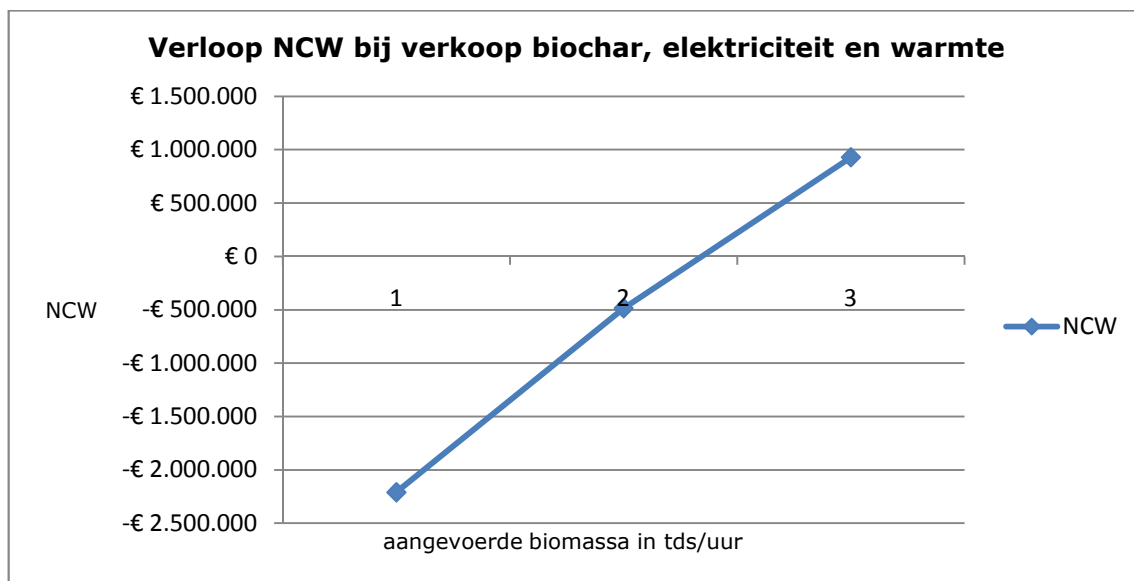
Tabel B2.1: vergelijking van de operationele opbrengsten uit de verkoop van warmte, elektriciteit, groenestroom- en warmtekrachtcertificaten met de operationele opbrengsten uit de verkoop van bio-olie bij de verkoop van biochar

Vergelijking van de investeringskost van de WKK-installatie met de geactualiseerde opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten (WKC) verkregen gedurende de hele looptijd van het project

	investeringskost WKK (EUR)	geactualiseerde opbrengsten uit de verkoop van WKC (EUR)
0,5 tds/uur	728 731,58	1 201 103,66
1 tds/uur	1 252 455,57	2 402 368,24
1,5 tds/uur	1 719 263,44	3 385 499,99

Tabel B2.2: vergelijking van de investeringskost van de WKK-installatie met de geactualiseerde opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten (WKC) verkregen gedurende de hele looptijd van het project

Bijlage 3: verloop van de NCW bij de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte



Figuur B3: verloop van de NCW bij de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte

tds/uur	NCW (EUR)
1	-2 209 370,90
2	-485 538,94
3	927 862,71

Tabel B3: weergave van de NCW bij de verkoop van biochar, elektriciteit en warmte

Bijlage 4: opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten bij een warmteafzet van 50% en 75%

Opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten bij een warmteafzet van 50%

jaar	0,5 tds/uur (EUR)	1 tds/uur (EUR)	1,5 tds/uur (EUR)
1	42 608,80	0,00	0,00
2	42 608,80	0,00	0,00
3	42 608,80	0,00	0,00
4	42 608,80	0,00	0,00
5	40 719,36	0,00	0,00
6	37 171,84	0,00	0,00
7	33 662,88	0,00	0,00
8	30 115,36	0,00	0,00
9	26 606,40	0,00	0,00
10	23 097,44	0,00	0,00
11	19 549,92	0,00	0,00
12	16 040,96	0,00	0,00
13	12 493,44	0,00	0,00
14	8 984,48	0,00	0,00
15	5 475,52	0,00	0,00
16	1 928	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00

Tabel B4.1: opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten bij een warmteafzet van 50%

Opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten bij een warmteafzet van 75%

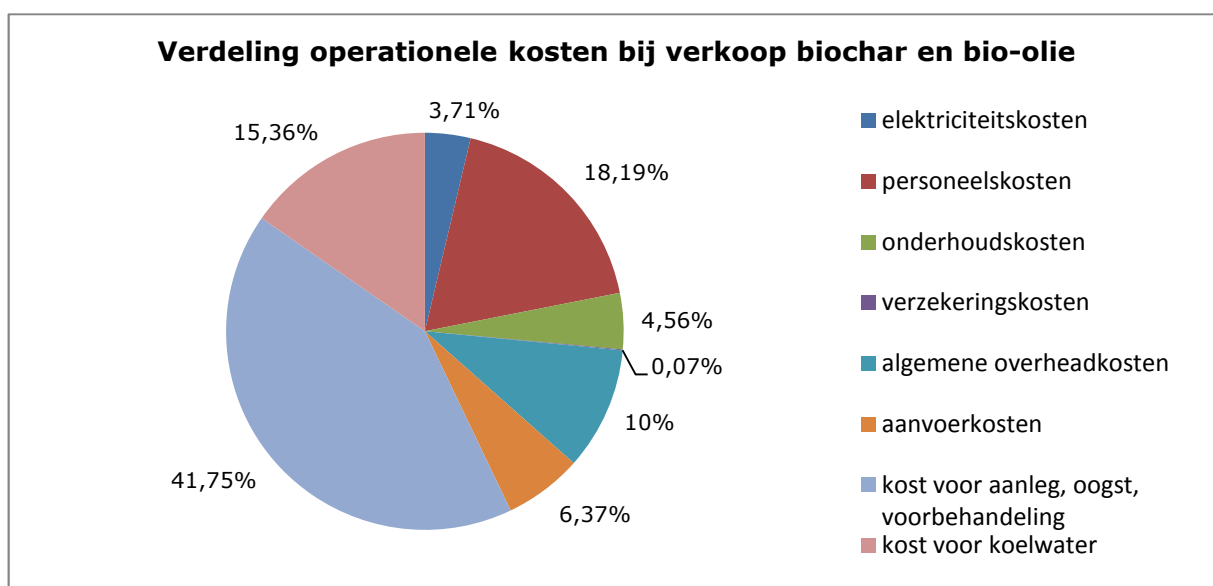
jaar	0,5 tds/uur (EUR)	1 tds/uur (EUR)	1,5 tds/uur (EUR)
1	108 083,68	216 205,92	324 289,60
2	108 083,68	216 205,92	324 289,60
3	108 083,68	216 205,92	324 289,60
4	108 083,68	216 205,92	324 289,60
5	103 263,68	206 527,36	309 791,04
6	94 317,76	188 635,52	282 953,28
7	85 371,84	170 743,68	256 154,08
8	76 425,92	152 890,40	229 354,88
9	67 480,00	134 998,56	202 517,12
10	58 572,64	117 145,28	175 717,92
11	49 626,72	99 253,44	148 918,72
12	40 680,80	81 400,16	122 080,96
13	31 734,88	63 508,32	95 281,76
14	22 827,52	45 655,04	68 482,56
15	13 881,60	27 763,20	41 644,80
16	4 935,68	9 909,92	14 845,60
17	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00

Tabel B4.2: opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten bij een warmteafzet van 75%

Bijlage 5: bijdragen van de verschillende kostencategorieën tot de totale operationele kosten en bijdragen van de verschillende opbrengstencategorieën tot de totale operationele opbrengsten

In deze bijlage worden de bijdragen van de verschillende kosten- en opbrengstencategorieën tot de totale operationele kosten en opbrengsten weergegeven. Op basis van deze figuren worden de variabelen geïdentificeerd die de belangrijkste kosten- en opbrengstenposten bepalen. De opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten dalen naarmate de jaren verstrijken. Deze opbrengsten worden in de figuren opgenomen als de gemiddelde opbrengst uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten gedurende de jaren dat er warmtekrachtcertificaten worden uitgereikt. In de laatste jaren van het project zullen deze opbrengsten met andere woorden gelijk zijn aan 0 EUR, maar deze situatie wordt hier buiten beschouwing gelaten.

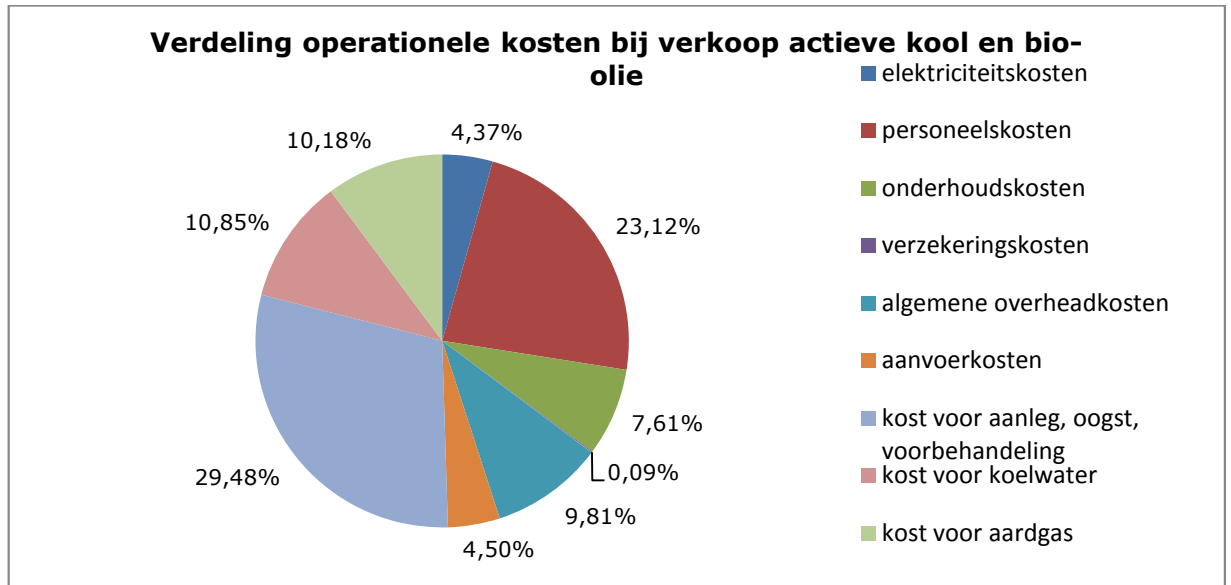
Verkoop van biochar en bio-olie



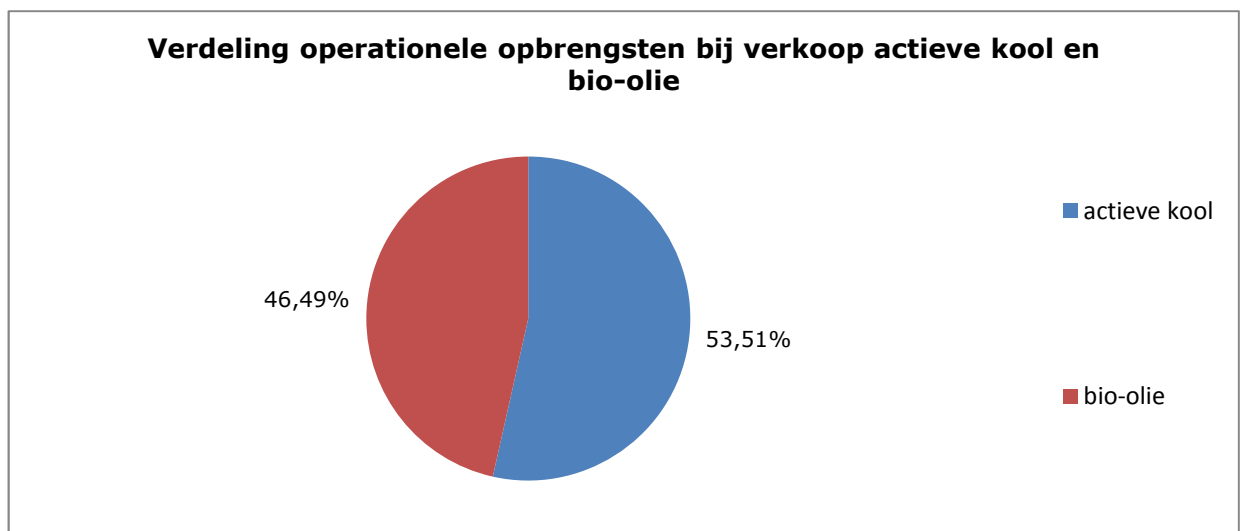
Figuur B5.1: verdeling van de operationele kosten bij de verkoop van biochar en bio-olie.

Aangezien biochar in Vlaanderen geen verkoopwaarde heeft, worden de volledige opbrengsten bepaald door de opbrengsten uit de verkoop van bio-olie.

Verkoop van actieve kool en bio-olie

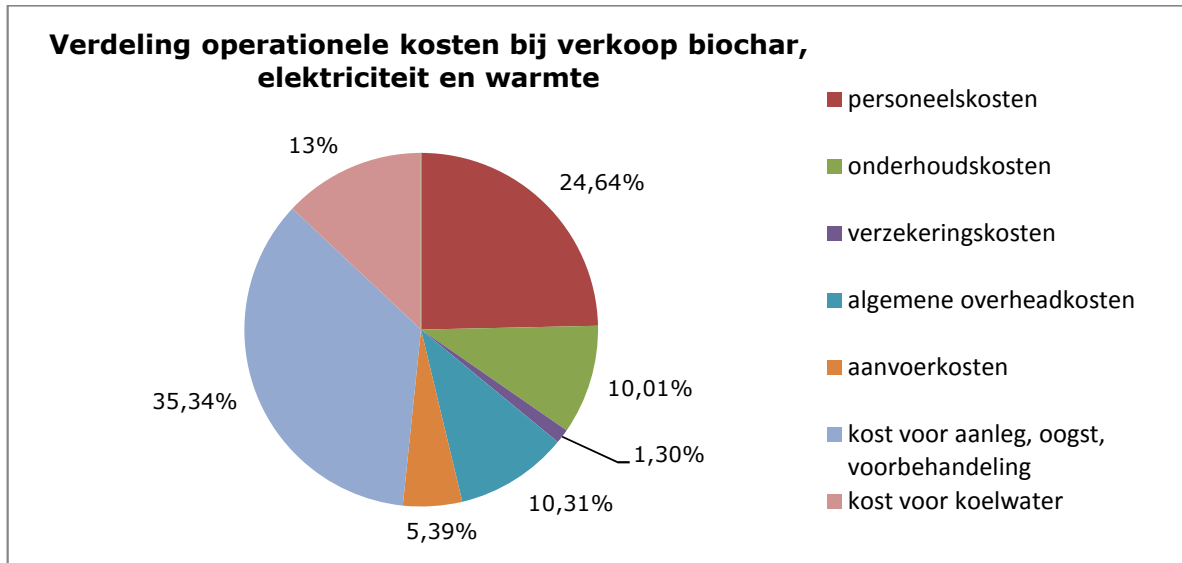


Figuur B5.2: verdeling van de operationele kosten bij de verkoop van actieve kool en bio-olie

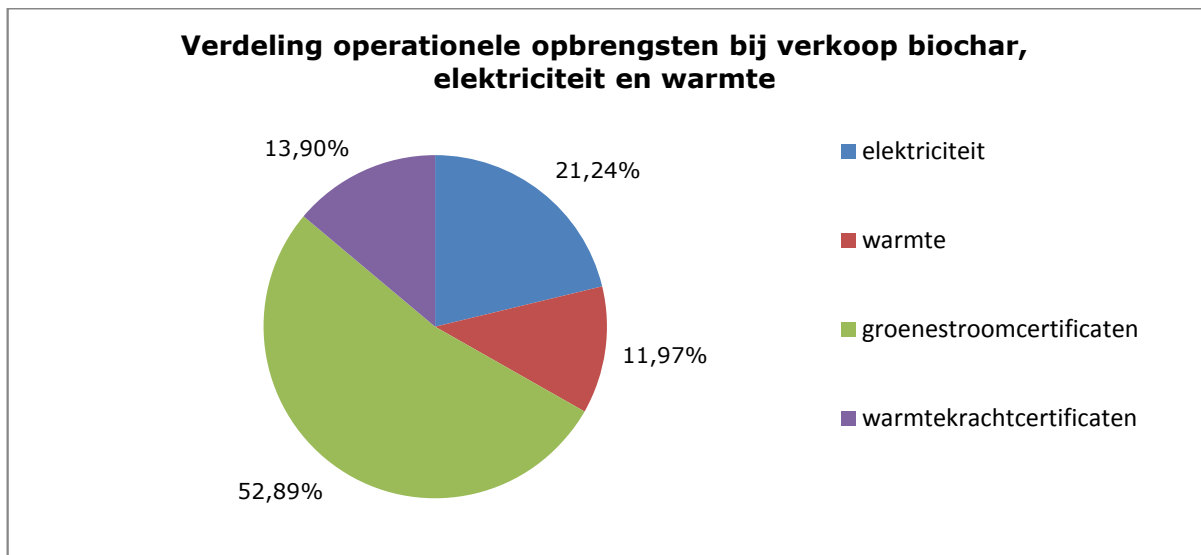


Figuur B5.3: verdeling van de operationele opbrengsten bij de verkoop van actieve kool en bio-olie

Verkoop van biochar, warmte en elektriciteit

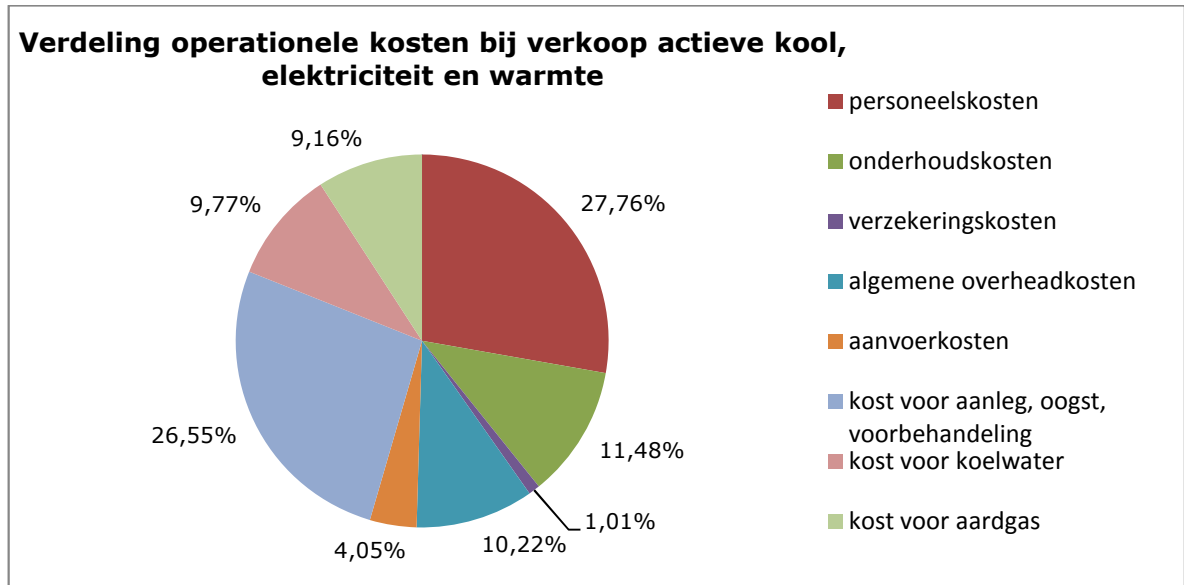


Figuur B5.4: verdeling van de operationele kosten bij de verkoop van biochar, warmte en elektriciteit

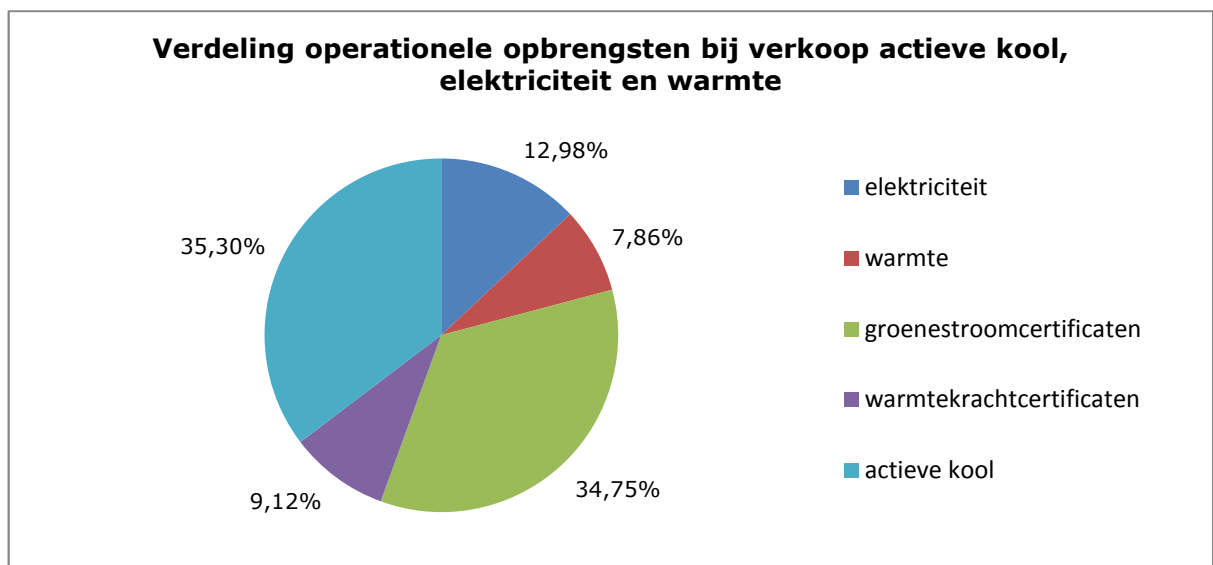


Figuur B5.5: verdeling van de operationele opbrengsten bij de verkoop van biochar, warmte en elektriciteit

Verkoop van actieve kool, warmte en elektriciteit



Figuur B5.6: verdeling van de operationele kosten bij de verkoop van actieve kool, warmte en elektriciteit



Figuur B5.7: verdeling van de operationele opbrengsten bij de verkoop van actieve kool, warmte en elektriciteit

Auteursrechtelijke overeenkomst

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

Haalbaarheidsstudie voor de aanwending van pyrolysechar als bodemverbeteraar of grondstof voor actieve koolproductie. Een eerste analyse

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen: handelsingenieur-accountancy en financiering**

Jaar: **2010**

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.

Voor akkoord,

Houbrechts, Anne