

2011
2012

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur: operationeel management en logistiek*

Masterproef

*Rendabiliteit van mobiele pyrolyse ("verhitting zonder
zuurstof") voor de productie van bio-olie*

Promotor :
Prof. dr. Theo THEWYS

Copromotor :
De heer Tom KUPPENS

Dimitri Geuens

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste
economische wetenschappen: handelsingenieur , afstudeerrichting operationeel management
en logistiek*

2011
2012

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur: operationeel management en logistiek*

Masterproef

*Rendabiliteit van mobiele pyrolyse ("verhitting zonder
zuurstof") voor de productie van bio-olie*

Promotor :
Prof. dr. Theo THEWYS

Copromotor :
De heer Tom KUPPENS

Dimitri Geuens

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste
economische wetenschappen: handelsingenieur , afstudeerrichting operationeel management
en logistiek*

Woord vooraf

Deze masterproef kwam tot stand als afsluiting van mijn vijfjarige opleiding als Master Handelsingenieur, optie Operationeel Management en Logistiek, aan de Universiteit Hasselt.

De keuze voor het onderwerp van deze masterproef, rendabiliteit van mobiele pyrolyse, komt voort uit een algemene interesse naar duurzame technologieën en in het bijzonder de ontwikkelingen in groene energiebronnen. De technologie rond pyrolyse was mij onbekend waardoor dit onderwerp mij de kans bood om veel bij te leren. Hierbij zou ik graag enkele mensen willen bedanken die hebben bijgedragen tot de totstandkoming van deze masterproef.

Bijzondere dank gaat in de eerste plaats naar mijn promotor prof. dr. Theo Thewys die mij de kans bood om dit onderwerp te mogen behandelen en de globale begeleiding voor zijn rekening nam. Vervolgens wil ik uitdrukkelijk mijn co-promotor Tom Kuppens en de heer Thomas Voets bedanken voor de begeleiding en hulp, het antwoorden op vragen, verschaffen van informatie en uiteraard de tijd die zij voor mij hebben willen vrijmaken bij de uitwerking van mijn masterproef.

Daarnaast wil ik mijn dank uiten aan alle personen die elk op hun eigen manier hebben bijgedragen tot het eindresultaat van deze masterproef. Ik dank Marinus van Stijn en Tom Cornelissen van Bio-oil N.V. voor de 2 leerrijke bedrijfsbezoeken en de gesprekken betreffende pyrolyse waardoor ik meer inzicht verkreeg in de technische aspecten van pyrolyse. Ook ben ik zeer dankbaar voor alle personen, bedrijven en instellingen die mij informatie hebben verschaft via het beantwoorden van mails en telefoongesprekken.

Samenvatting

In deze masterproef wordt onderzocht onder welke omstandigheden mobiele pyrolyse te verkiezen valt boven centrale pyrolyse. Meer specifiek, voeren we een onderzoek uit naar de economische haalbaarheid van mobiele pyrolyse in de Vlaamse Kempen waar vervuild hout uit fyto-remediatie als grondstof gebruikt wordt voor de productie van pyrolyse-olie.

In het eerste hoofdstuk wordt de probleemstelling geschetst. Hierbij baseert men zich op een praktijkprobleem. Dit probleem handelt over de bodemverontreiniging in de Vlaamse Kempen ten gevolge van de jarenlange aanwezigheid van de zinkindustrie in de regio. Vervolgens wordt een oplossing voor deze bodemverontreiniging aangeboden waarbij energiegewassen via fyto-remediatie zware metalen uit de grond extraheren en opslaan in de plantdelen. Deze energiegewassen kunnen via pyrolyse omgezet worden in duurzame energie. Of dit proces eerder lokaal met een mobiele installatie dan wel centraal dient te gebeuren wordt onderzocht in deze masterproef.

Alvorens een analyse uit te voeren, worden in het eerste deel van dit werkstuk de technische aspecten via een literatuurstudie besproken. Deze technische aspecten worden verduidelijkt in de drie volgende hoofdstukken die elk een essentieel element in de biomassaketten voorstellen: namelijk de productie, de verwerking, en de omzetting van biomassa.

In hoofdstuk 2 bespreken we het probleem rond de bodemverontreiniging in de Kempen. De omschrijving en de situering van het probleem worden verder toegelicht en een mogelijke oplossing wordt aangeboden. Vervolgens wordt dieper ingegaan op de kenmerken en het gebruik van wilg als energiegewas voor fyto-remediatie. In het volgende hoofdstuk van de literatuurstudie worden vervolgens de verwerkingsprocessen voor biomassa omschreven. De aangevoerde biomassa voor pyrolyse moet namelijk aan verschillende criteria voldoen waardoor een voorbehandeling vereist is. Het betreft processen zoals onder meer het oogsten, transporteren, drogen, verkleinen, en opslaan van biomassa. Na de productie en voorbehandeling kan de biomassa omgezet worden in pyrolyse-olie en andere energiedragers via pyrolyse. Een verdere bespreking van de

pyrolysetechnieken, reactoren en een omschrijving van de eindproducten worden gegeven in het laatste hoofdstuk van de literatuurstudie.

Nadat de technische aspecten van het praktijkprobleem besproken zijn, wordt er dieper ingegaan op de economische aspecten van deze masterproef. De economische analyse gaat van start met het ontwikkelen van een basismodel voor mobiele pyrolyse. Het basismodel wordt toegepast op de gevalstudie van de Vlaamse Kempen en wordt ontworpen zodat het snel en eenvoudig omgevormd kan worden tot verschillende scenario's waarin verschillende parameters een andere waarde toebedeeld krijgen. Zo laat het basismodel bijvoorbeeld toe om te onderzoeken wat er gebeurt wanneer het aantal mobiele reactoren of het aantal opslagplaatsen verandert.

Om de rendabiliteit van mobiele en centrale pyrolyse te vergelijken worden eerst de kosten en opbrengsten geïdentificeerd en wordt er vervolgens gebruik gemaakt van de NCW-methode (netto contante waarde). De NCW komt tot stand door de jaarlijkse kasstromen te actualiseren naar de huidige waarde. In jaar 0 omvat deze kasstroom een initiële investeringskost voor het pyrolysesysteem. In de daaropvolgende jaren worden de kasstromen samengesteld door de jaarlijkse operationele kosten en opbrengsten. De operationele kosten worden gevormd door de som van de kostprijs voor biomassa, de transportkosten, arbeidskosten, energiekosten, opstartkosten, herstelling- en onderhoudskosten, overheadkosten en de kost verbonden aan de afvoer van char en assen. De operationele opbrengsten bestaan uit de verkoop van pyrolyse-olie en het innen van subsidies. Wanneer de schattingen voor de betreffende kosten en opbrengsten voldoende zijn verantwoord worden zij vervolgens onderling vergeleken. Dit maakt het mogelijk om de voor- en nadelen van beide pyrolysesystemen te identificeren.

Door middel van een scenarioanalyse wordt in hoofdstuk 8 onderzocht of mobiele pyrolyse niet economisch voordeliger uitgevoerd kan worden door gebruik te maken van een andere opstelling. Bovendien wordt de analyse uitgebreid met een alternatief saneringsproject van 42 jaar (2 opeenvolgende saneringsperioden) waarbij in de eerste saneringsperiode meer biomassa vrijkomt, terwijl tijdens de tweede saneringsperiode de hoeveelheid beschikbare biomassa eerder beperkt blijft. Ten slotte wordt ook onderzocht hoeveel de NCW bedraagt wanneer de grondstof niet afkomstig zou zijn uit fytoremediatie, en bijgevolg dus zuiver is van zware metalen.

Tijdens de sensitiviteitsanalyse in hoofdstuk 9 wordt een antwoord gegeven op het veranderlijke karakter van bepaalde parameters, alsook de onzekerheid bij het bepalen van enkele parameterwaarden. Diverse wetenschappelijke bronnen geven immers niet altijd gelijkaardige waarden voor een variabele. Met behulp van Crystal Ball worden onzekere parameters omgevormd van een constante puntschatting tot een parameter met een triangulaire verdeling (Min, Gem, Max). Door rekening te houden met deze kansverdeling in de variabelen is het mogelijk om een accuraat beeld te schetsen van de rendabiliteit van beide pyrolysesystemen.

Tot slot wordt deze masterproef afgesloten met hoofdstuk 10. Hierin worden de conclusies van de masterproef geformuleerd, alsook de aanbevelingen voor verder onderzoek. Algemeen kan worden gesteld dat de bodemsanering in de Kempen niet rendabel uitgevoerd kan worden doormiddel van pyrolyse aangezien de NCW van zowel mobiele als centrale pyrolyse negatief is. De meest voordelige NCW voor mobiele pyrolyse is deze waarbij één mobiele reactor wordt ingezet, en bedraagt -10 239 034 EUR. Voor centrale pyrolyse wordt één scenario uitgewerkt waarvan de NCW -17 208 242 EUR bedraagt. Centrale pyrolyse is om 2 redenen niet aangewezen voor de gevalstudie in de Kempen. De investeringskost van een centraal pyrolysesysteem is te hoog terwijl de jaarlijkse netto kasstroom te laag is om deze investeringskost terug te verdienen. De lagere investeringskost van een mobiel pyrolysesysteem maakt deze techniek aantrekkelijker dan centrale pyrolyse. Daarnaast wordt bij mobiele pyrolyse ook bespaard op de operationele kosten. Toch is dit niet toe te schrijven aan lagere transportkosten, welke in het kleine aanvoergebied van de Kempen weinig invloed uitoefenen op de rendabiliteit. De lagere operationele kosten zijn voornamelijk het resultaat van lagere herstelling- & onderhoudskosten, en overheadkosten tengevolge van een lagere investeringskost.

Inhoudsopgave

Woord Vooraf.....	I
Samenvatting.....	II
Inhoudsopgave.....	V
Lijst van figuren.....	X
Lijst van tabellen.....	X

Hoofdstuk 1: Probleemstelling

1.1	Praktijkprobleem	- 1 -
1.2	Centrale onderzoeksvraag en deelvragen.....	- 4 -
1.3	Onderzoeksstrategie	- 4 -
1.3.1	Literatuurstudie.....	- 4 -
1.3.2	Gevalstudie.....	- 5 -
1.3.3	Vergelijkende analyse: Economische, scenario- en sensitiviteitsanalyse	- 5 -

DEEL I: Technische aspecten

Hoofdstuk 2: Productie van biomassa uit fyto-remediatie in de Kempen

2.1	Omschrijving en situering.....	- 9 -
2.1.1	Risico's.....	- 10 -
2.1.1.1	Economische risico's	- 10 -
2.1.1.2	Maatschappelijke risico's	- 11 -
2.1.2	Fyto-remediatie	- 11 -
2.2	Wilg als biomassa	- 13 -
2.2.1	Wilg voor fyto-remediatie	- 13 -
2.2.2	Wilg als energiegewas.....	- 14 -
2.3	Jaarlijkse productie van biomassa.....	- 15 -

Hoofdstuk 3: Verwerking van biomassa

3.1	Houtoogst.....	- 19 -
3.2	Transport.....	- 20 -
3.2.1	Transport van biomassa	- 21 -
3.2.2	Transport van Pyrolyse-olie.....	- 22 -
3.3	Opslag.....	- 22 -
3.3.1	Opslag van biomassa	- 23 -
3.3.2	Opslag van pyrolyse-olie	- 24 -
3.4	Voorbehandeling.....	- 24 -
3.4.1	Verkleinen	- 26 -
3.4.1.1	Drogen.....	- 27 -

Hoofdstuk 4: Omzetting van biomassa

4.1	Pyrolyse van hout uit fyto-remediatie.....	- 29 -
4.2	Reactoren	- 32 -
4.2.1	Centrale reactor	- 33 -
4.2.2	Modulaire reactor	- 33 -
4.2.3	Mobiele reactor.....	- 33 -
4.3	Eindproducten.....	- 35 -
4.3.1	Pyrolyse-olie	- 35 -
4.3.2	Biochar.....	- 38 -
4.3.3	Syngas.....	- 40 -

DEEL II: Economische aspecten

Hoofdstuk 5: Methodologie

5.1	Logistiek model	- 43 -
5.2	gevalstudie	- 47 -

5.3	Beoordeling van investeringen	- 49 -
5.4	Kasstromen.....	- 50 -
5.4.1	de initiële investeringskost.....	- 50 -
5.4.2	Kasstromen voortvloeiend uit het investeringsproject.....	- 51 -
5.5	Netto contante waarde	- 52 -

Hoofdstuk 6: Mobiele pyrolyse

6.1	Productie en reactor veronderstellingen	- 55 -
6.1.1	Capaciteit.....	- 55 -
6.1.2	Omzettingsfractie	- 56 -
6.2	De initiële investering.....	- 57 -
6.2.1	De totale investeringskosten.....	- 57 -
6.2.1.1	Investeringskost van een mobiele pyrolyse reactor	- 57 -
6.2.1.2	Opslagkosten	- 59 -
6.2.2	De verhoogde investeringsaftrek	- 63 -
6.2.3	De initiële investering.....	- 64 -
6.3	De jaarlijkse kasstroom	- 64 -
6.3.1	De jaarlijkse werkingskosten	- 64 -
6.3.1.1	Kostprijs voor biomassa	- 65 -
6.3.1.2	Transportkosten	- 69 -
6.3.1.3	Energiekosten.....	- 74 -
6.3.1.4	Personeelskosten	- 78 -
6.3.1.5	Afvoer van de assen en char	- 79 -
6.3.1.6	Herstellingen en onderhoudskosten.....	- 80 -
6.3.1.7	Overheadkosten	- 80 -
6.3.2	Kasopbrengsten.....	- 81 -
6.3.2.1	Opbrengsten uit de verkoop van geproduceerde pyrolyse-olie	- 82 -
6.3.2.2	Opbrengsten aan subsidies	- 83 -
6.4	Netto contante waarde	- 84 -

Hoofdstuk 7: Centrale pyrolyse

7.1	Productie en reactor veronderstellingen	- 87 -
7.2	De initiële investering.....	- 88 -
7.2.1	De totale investeringskosten.....	- 88 -
7.2.1.1	Opslagkosten.....	- 89 -
7.2.2	Totale investeringskost	- 91 -
7.2.3	De verhoogde investeringsaftrek.....	- 91 -
7.2.4	De initiële investering.....	- 92 -
7.3	De jaarlijkse kasstroom	- 92 -
7.3.1	De jaarlijkse werkingskosten.....	- 92 -
7.3.1.1	Kostprijs voor biomassa	- 92 -
7.3.1.2	Fase 2: transport van biomassa tot centrale reactor	- 93 -
7.3.1.3	Energiekosten.....	- 95 -
7.3.1.4	Personeelskosten	- 96 -
7.3.1.5	Afvoer van de assen/char.....	- 97 -
7.3.1.6	Herstellingen en onderhoudskosten.....	- 97 -
7.3.1.7	Overheadkosten	- 97 -
7.3.2	Kasopbrengsten.....	- 97 -
7.3.2.1	Opbrengsten uit de verkoop van geproduceerde pyrolyse-olie	- 98 -
7.4	De netto contante waarde	- 100 -

Hoofdstuk 8: Scenarioanalyse

8.1	Scenario 1: Eén mobiele pyrolyse reactor	- 103 -
8.2	Scenario 2: Opslag van biomassa bij de landbouwer	- 106 -
8.3	Scenario 3: 42-jarig saneringsproject.....	- 107 -
8.4	Scenario 4: Het gebruik van een zuivere grondstof	- 110 -

Hoofdstuk 9: Sensitiviteitsanalyse

9.1	enkelvoudige sensitiviteitsanalyse.....	115
9.2	Meervoudige sensitiviteitsanalyse.....	117

Hoofdstuk 10: Conclusies en aanbevelingen

10.1	Conclusies.....	123
10.2	Aanbevelingen voor verder onderzoek.....	126

Hoofdstuk 11: Bijlagen

Lijst van figuren

<i>Figuur 1 : Cd concentratie in de Belgische Kempen</i>	- 10 -
<i>Figuur 2 : Vergelijking van de goederenstromen</i>	- 20 -
<i>Figuur 3 : Basismodel voor een één- en drie-reactor opstelling</i>	- 44 -
<i>Figuur 4 : Vergelijking van goederenstromen</i>	- 46 -
<i>Figuur 5 : Aanvoergebieden per intermediaire opslagplaats en per regio</i>	- 48 -
<i>Figuur 6 : Energieverbruik bij verschillende temperaturen</i>	- 76 -
<i>Figuur 7 : Aanvoergebied in Google Earth</i>	128
<i>Figuur 8 : Sensitiviteitsanalyse basismodel mobiele pyrolyse</i>	135
<i>Figuur 9 : Sensitiviteitsanalyse basismodel centrale pyrolyse</i>	136
<i>Figuur 10 : Sensitiviteitsanalyse scenario 1 : 1 mobiele reactor</i>	137
<i>Figuur 11 : Sensitiviteitsanalyse scenario 2 : Landbouwer tot landbouwer</i>	138
<i>Figuur 12 : Sensitiviteitsanalyse scenario 3: 42 jarig saneringsproject</i>	139
<i>Figuur 13 : Sensitiviteitsanalyse scenario 4: Zuivere biomassa</i>	140

Lijst van tabellen

<i>Tabel 1 : Typische opbrengsten en energie-inhoud uit fast pyrolyse</i>	- 30 -
<i>Tabel 2 : Pyrolyse-opbrengsten bij verschillende procestemperaturen</i>	- 31 -
<i>Tabel 3 : Jaarlijkse in- en output</i>	- 57 -
<i>Tabel 4 : Ovezicht van de investeringskost van mobiele pyrolysereactoren</i>	- 58 -
<i>Tabel 5 : Gemiddelde investeringskost voor een 10 tds/d reactor</i>	- 59 -
<i>Tabel 6: Opslagkost voor 3 scenario's</i>	- 60 -
<i>Tabel 7 : Kenmerken voor de opslagmethode bunker en silo</i>	- 60 -
<i>Tabel 8 : Afweging tussen één of meerdere opslagplaatsen per rit</i>	- 62 -
<i>Tabel 9 : Samenstelling van de totale investeringskost</i>	- 63 -
<i>Tabel 10 : Berekening van de initiële investeringskost</i>	- 64 -
<i>Tabel 11 : Productiekost van wilg</i>	- 65 -
<i>Tabel 12 : Berekening van de productiekost van houtchips uit wilg in België</i> ...	- 66 -
<i>Tabel 13 : Marktprijs voor wilg</i>	- 67 -
<i>Tabel 14 : Kostprijs van verkleinen en drogen van biomassa</i>	- 68 -
<i>Tabel 15 : Vergelijking tussen een tankwagen en tankoplegger</i>	- 71 -
<i>Tabel 16 : Transportkost bij het gebruik van tankwagen en -oplegger</i>	- 73 -
<i>Tabel 17 : Berekening van energieverbruik</i>	- 78 -
<i>Tabel 18 : Overzicht van jaarlijkse kaskosten</i>	- 81 -

<i>Tabel 19 : Samenstelling totale opbrengsten</i>	<i>- 84 -</i>
<i>Tabel 20 : Berekening van de totale netto kasstroom na belastingen.....</i>	<i>- 85 -</i>
<i>Tabel 21 : Jaarlijkse in- en output.....</i>	<i>- 87 -</i>
<i>Tabel 22 : Investeringskost van een centraal pyrolysesysteem.....</i>	<i>- 89 -</i>
<i>Tabel 23 : Berekening van de initiële investeringskost.....</i>	<i>- 92 -</i>
<i>Tabel 24 : Berekening van energieverbruik.....</i>	<i>- 96 -</i>
<i>Tabel 25 : Samenstelling en vergelijking van de jaarlijkse netto kasstroom</i>	<i>- 98 -</i>
<i>Tabel 26 : Berekening van de totale netto kasopbrengsten na belastingen</i>	<i>- 100 -</i>
<i>Tabel 27 : Berekening en vergelijking van de netto contante waarde.....</i>	<i>- 101 -</i>
<i>Tabel 28 : Vergelijking investeringskost van mobiele reactoren.....</i>	<i>- 104 -</i>
<i>Tabel 29 : Investeringskost van mobiele reactoren (50 en 20 tds/d).....</i>	<i>- 108 -</i>
<i>Tabel 30 : Directe kosten voor eerste en tweede saneringsperiode</i>	<i>- 109 -</i>
<i>Tabel 31 : Totale investeringskost over verschillende scenario's</i>	<i>8.4-113</i>
<i>Tabel 32 : Kosten en opbrengsten over verschillende scenario's</i>	<i>8.4-114</i>
<i>Tabel 33 : Enkelvoudig sensitiviteitsanalyse mobiele pyrolyse (1 reactor)</i>	<i>116</i>
<i>Tabel 34 : Enkelvoudig sensitiviteitsanalyse centrale pyrolyse</i>	<i>116</i>
<i>Tabel 35 : Veranderlijke variabelen</i>	<i>118</i>
<i>Tabel 36 : NCW op basis van veranderlijke variabelen.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabel 37 : Enkelvoudig sensitiviteitsanalyse mobiele pyrolyse (1 reactor)</i>	<i>133</i>
<i>Tabel 38 : Enkelvoudig sensitiviteitsanalyse centrale pyrolyse</i>	<i>134</i>

Hoofdstuk 1: Probleemstelling

1.1 Praktijkprobleem

In de Kempen heerst er een probleem van bodemverontreiniging. Het getroffen gebied strekt zich uit over grote delen van de Nederlandse provincies Noord-Brabant en Limburg en de Belgische provincies Antwerpen en Limburg. (Glas et al., 2008) In dit onderzoek beperken we ons tot de Noorderkempen in België. Deze regio strekt zich uit over de gemeenten Balen, Overpelt en Lommel, waar de non-ferro industrie sinds het einde van de 19^e eeuw gevestigd is. De fabriek in Lommel (Maatheide) werd rond 1970 gesloten, maar de zinkfabrieken, gevestigd in Balen en Overpelt, zijn momenteel nog actief. (OVAM, 2003-2011a) De bodemvervuiling strekt zich uit tot gebieden in aangrenzende gemeenten zoals Hamont-Achel, Neerpelt, Hechtel-Eksel en Mol.

De zinkfabrieken in de regio werden gebruikt om het zink van het zinkerts te scheiden via thermische raffinage. Tijdens dit proces komen zware metalen vrij zoals onder meer zink, cadmium, koper, lood en arseen. In de praktijk wordt onder zware metalen verstaan, alle metalen waarvan werd vastgesteld dat de blootstelling potentieel schadelijk is voor de mens. (MIRA, 2010) Via emissies, het dumpen in waterwegen of door het gebruik van zinkassen als bouwstoffen kwamen deze zware metalen in de onmiddellijke omgeving van de lokale bevolking terecht.

Het metaal cadmium is het enige zware metaal dat de richtwaarde overschrijdt en houdt gezondheidsrisico's in voor de mens. (Witters et al., 2009) Bij overmatige opname in het lichaam kan cadmium schade aan de nieren en het skelet veroorzaken, en de fertiliteit verminderen. Bij inademing bestaat het risico van acute longaantasting. (MIRA, 2010)

Ook voor de landbouwer vormt de bodemverontreiniging een risico. De landbouwer wil namelijk veilige en vermarktbare gewassen telen die voldoen aan de Europese productnormen voor zware metalen. Dit is niet mogelijk wanneer de bodem te sterk vervuild is. In Vlaanderen heeft de groenteverwerkende sector zelfs besloten geen contracten meer af te sluiten met landbouwers in gemeenten waar de kans op normoverschrijding bestaat. (Glas et al., 2008)

Dit onderzoek spitst zich toe op de problematiek rond landbouw. Een groot gedeelte van de vervuilde gronden zijn namelijk landbouwgronden. Dit resulteert in voedsel en veevoeder met Cd-concentraties die de richtwaarden overschrijden. (Witters et al., 2009) De opname van zware metalen via voeding blijkt nog steeds één van de belangrijkste bronnen van zware metalen voor de lokale bewoners te zijn. (OVAM, 2003-2011a; Glas, 2008) Het eten van voedingsgewassen, afkomstig van met zware metalen vervuilde landbouwgronden, vormt daardoor één van de belangrijkste gezondheidsrisico's.

Een mogelijke oplossing om vervuilde landbouwgebieden te zuiveren is het aanplanten van energiegewassen met een hoge metaaltolerantie in plaats van landbouwgewassen, bestemd voor consumptie. Deze energiegewassen kunnen via fyto-remediatie zware metalen uit de bodem opnemen. De fytotechnologieën hebben het voordeel dat zij 40% goedkoper uitgevoerd kunnen worden dan andere in-situ saneringstechnieken en 90% goedkoper zijn dan ex-situ technologieën zoals afgravingen. (Mueller & Goswami, 2001) Meer bepaald worden de kosten voor fyto-remediatie geschat op 250 000 EUR per hectare in vergelijking met 3 000 000 EUR per hectare voor conventionele ex-situ saneringstechnieken. (Stals et al., 2010a)

Door het gebruik van energiegewassen wordt de bodem niet enkel via deze in-situ techniek gezuiverd, maar kan de landbouwer ook gecompenseerd worden voor zijn inkomstenverlies bij het wegvallen van de verkoop van traditionele gewassen. Ter vervanging genereert de landbouwer namelijk opbrengsten uit de verkoop van energiegewassen. (Glas et al., 2008) Bovendien kunnen deze energiegewassen aangewend worden voor de productie van groene energie op CO₂-neutrale basis.

Energiegewassen kunnen omgezet worden in energie door thermische processen zoals verbranding, vergassing en pyrolyse. Pyrolyse heeft het voordeel lagere procestemperaturen te gebruiken in vergelijking met vergassing en verbranding waardoor de zware metalen in de energiegewassen niet vervluchtigen naar de productgassen, maar verzameld worden in de char. (Stals et al., 2010b) Bovendien is fast pyrolyse op kleine schaal economisch voordeliger in het opwekken van energie en bestaat de mogelijkheid tot ontkoppeling van de energieproductie. (Bridgwater et al., 2002)

Voor de omzetting van de energiegewassen in energie wordt in dit onderzoek gekozen voor de toepassing van pyrolyse. Volgens Bridgwater et al. (2002) wordt pyrolyse omschreven als de thermische afbraak van biomassa in de afwezigheid van zuurstof,

waarbij de vluchtige componenten van een koolstofhoudende grondstof worden verdampt in primaire reacties door verhitting, waarbij een restant van char en as wordt overgehouden. De vluchtige componenten worden opgevangen en afgekoeld waardoor gecondenseerde pyrolyse-olie en niet condenseerbare gassen ontstaan, die aangewend kunnen worden voor energieproductie. In de praktijk wordt via fast pyrolyse 45-70% van de droge biomassa omgezet in pyrolyse-olie, 10-25% in biochar en 10-30% omgezet naar niet condenseerbare gassen. (Brem & Bramer, 2006)

Tot op heden is het opwekken van energie via biomassa relatief duur door zowel technologische als logistieke beperkingen. Om de impact van logistiek op de winstgevendheid te beoordelen, moeten de effecten van de belangrijkste logistieke variabelen onderzocht worden zoals de transportkost van het gekozen vervoersmiddel, de vervoerscapaciteit, de locatie en hoeveelheid van de opslagcapaciteit, de beschikbaarheid en distributiedichtheid van biomassa. Ondanks het groeipotentieel van bio-energie, kent de energievorm enkele beperkingen zoals het seizoensgebonden karakter van biomassa, en de uiteenlopende geografische spreiding binnen een regio waardoor het verzamelen, transport en opslag van biomassa een complex en duur proces wordt. Deze logistieke aspecten beïnvloeden de economische winstgevendheid van een bio-energie centrale. (Caputo et al., 2005)

De mogelijkheid bestaat om pyrolysereactoren modulair en transporteerbaar te maken. Deze mobiele pyrolysereactoren kunnen geplaatst worden bij diverse biomassabronnen waar de biomassa rechtstreeks omgezet kan worden in pyrolyse-olie. De pyrolyse-olie kan vervolgens efficiënt opgeslagen en verplaatst worden door de hogere energiedichtheid van pyrolyse-olie t.o.v. biomassa. De toepassing van mobiele pyrolyse kan bijgevolg besparen op de verwerking- en transportkosten. (Ten Bolscher, 2007)

De vraag stelt zich nu of de met zware metalen vervuilde energiegewassen die ontstaan door fyto-remediatie in de Kempen beter centraal, of lokaal via mobiele pyrolyse verwerkt kunnen worden. Via de uitwerking van deze masterproef wordt er onderzocht of de actuele pyrolysetechnieken (centrale pyrolyse) op een efficiëntere en meer economische wijze uitgevoerd kunnen worden door gebruik te maken van mobiele pyrolyse. Hiertoe worden in een gevalstudie beide pyrolysesystemen met elkaar vergeleken bij de verwerking van vervuild wilgenhout tot pyrolyse-olie.

1.2 Centrale onderzoeksvraag en deelvragen

Het doel van deze masterproef is het onderzoeken van de rendabiliteit van mobiele pyrolyse bij de productie van pyrolyse-olie. Hierdoor kunnen we afleiden of mobiele pyrolyse te verkiezen valt boven het gecentraliseerd pyrolysesysteem. Om een kwalitatief onderzoek te verrichten is het belangrijk een vooropgestelde onderzoeksstrategie te hanteren. Allereerst wordt een centrale onderzoeksvraag opgesteld die op volgende wijze omschreven kan worden:

Onder welke omstandigheden is mobiele pyrolyse meer rendabel dan centrale productie van pyrolyse-olie voor de economische valorisatie van kortomloophout uit fyto-remediatie in de Kempen?

Om te kunnen antwoorden op de centrale onderzoeksvraag wordt deze opgedeeld in de volgende drie deelvragen.

1. Hoeveel bedraagt het verschil in investeringsuitgave?
2. Hoeveel verschillen de transport- en verwerkingskosten, die een belangrijke uitgave vormen voor een bio-energiecentrale, bij het gebruik van mobiele pyrolyse in vergelijking met een centrale reactor?
3. Hoeveel bedragen de inkomsten en uit welke bronnen worden zij verkregen?

1.3 Onderzoeksstrategie

1.3.1 Literatuurstudie

Het onderzoek begint met een literatuurstudie. Wetenschappelijke literatuur, publicaties van relevante instellingen en het internet worden aangewend als basis voor deze literatuurstudie. Via de uitwerking van deze masterproef wordt getracht een vergelijkend kader op te stellen van de bestaande pyrolysetechnologieën, opportuniteiten en beperkingen te identificeren, en de toepasbaarheid van mobiele pyrolyse binnen een gevalstudie te onderzoeken.

De literatuurstudie wordt opgebouwd rond de 3 belangrijkste stappen van de biomassaketten bij de omzetting van biomassa tot energie, namelijk:

- Productie van biomassa (hoofdstuk 2)
- Voorverwerking van de biomassa (hoofdstuk 3)
- Omzetting tot pyrolyse-olie (hoofdstuk 4)

1.3.2 Gevalstudie

In vele studies wordt de opportuniteit van een mobiele reactor aangehaald om de hoge verwerkingskosten te verlagen. Via een mobiele pyrolyse eenheid is het namelijk mogelijk om het verzamelen, verwerken en het omzetten van biomassa op locatie uit te voeren. Badger & Fransham (2006) stellen dat pyrolyse-olie economisch geproduceerd en vervoerd kan worden naar de eindgebruiker door het toepassen van mobiele pyrolyse. Hiertoe stellen zij dat pyrolyse-olie tot wel tweemaal efficiënter vervoerd kan worden dan houtchips.

In deze masterproef wordt onderzocht of mobiele pyrolyse wel degelijk een economisch alternatief is voor centrale pyrolyse. Om mobiele pyrolyse te kunnen vergelijken met centrale pyrolyse moet een gevalstudie worden opgesteld waarbij voor beide systemen de kosten en baten worden geïdentificeerd. Op basis van deze gegevens wordt een kosten-batenanalyse en een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd waarin de voor- en nadelen van ieder pyrolysesysteem duidelijk worden.

De gevalstudie wordt opgebouwd rond de gegevens uit onderzoek naar bodemsanering via fyto-remediatie in de Kempen. Dit onderzoek betreft landbouwgronden in de Kempen die in aanmerking komen voor fyto-remediatie doordat ze doorheen de jaren sterk vervuild zijn geworden en de toegelaten Cd-concentratie overschrijden.

1.3.3 Vergelijkende analyse: Economische, scenario- en sensitiviteitsanalyse

Alvorens beide pyrolysesystemen onderling te vergelijken, moeten eerst alle inkomende en uitgaande kasstromen geïdentificeerd worden. In Microsoft Excel wordt een model opgesteld waarbij alle voorkomende kosten en opbrengsten worden berekend, gebaseerd

op assumpties en gegevens uit vergelijkende onderzoeken, meningen en informatie van experts, en kostschattingen van potentiële dienstverleners zoals transport- en biomassaverwerkingsbedrijven. Vanuit dit model worden vervolgens de jaarlijkse kasstromen berekend.

Eens alle kasstromen van het investeringsproject gekend zijn is het mogelijk de netto contante waarde (NCW) te berekenen voor de beide pyrolysesystemen. Om de NCW van een investeringsproject te bepalen worden de actuele waarden van de kasstromen van het project berekend door die kasstromen te verdisconteren tegen een gekende kapitaalkost. De NCW van een project is vervolgens de som van de geactualiseerde kasstromen over de levensduur van het investeringsproject. De economische haalbaarheid van ieder investeringsproject kan vervolgens bepaald en vergeleken worden. Een project is rendabel wanneer de NCW positief is.

Doordat het model is opgesteld in een MS Excel document is het mogelijk om meerdere parameters in het basismodel simultaan te wijzigen, waarbij geheel nieuwe scenario's ontstaan. Hierdoor kan het model omgevormd worden tot scenario's waarbij bijvoorbeeld het aantal reactoren of opslagplaatsen wijzigt en kan het effect van een dergelijk wijziging berekend worden. Verder zijn de berekeningen van de NCW gebaseerd op veronderstellingen en schattingen uit de literatuur. Deze schattingen kunnen echter afwijken van de werkelijkheid waardoor ook het eindresultaat een bepaalde onzekerheid bevat. Deze masterproef wordt bijgevolg afgesloten met een sensitiviteitsanalyse om zo een antwoord te bieden op deze onzekerheid. In de sensitiviteitsanalyse wordt namelijk de invloed van onzekere parameters op de rendabiliteit bepaald.

DEEL I: TECHNISCHE ASPECTEN

Hoofdstuk 2: Productie van biomassa uit fytoremediatie in de Kempen

2.1 Omschrijving en situering

Vanaf midden 19e eeuw tot ongeveer 1970 werd in de regio Kempen zink en lood geraffineerd door verhitting van erts en kolen, gewonnen uit de regio. (OVAM, 2003-2011a) Bij deze processen kwamen zware metalen vrij zoals zink, cadmium, koper, lood, en arseen. Deze zware metalen kwamen rechtstreeks in de onmiddellijke omgeving van de lokale bevolking terecht. (Glas et al., 2008) De zware metalen bevinden zich in de bovenste laag van de bodem tot ongeveer 30 tot 40 cm onder de grond. (Witters et al., 2009)

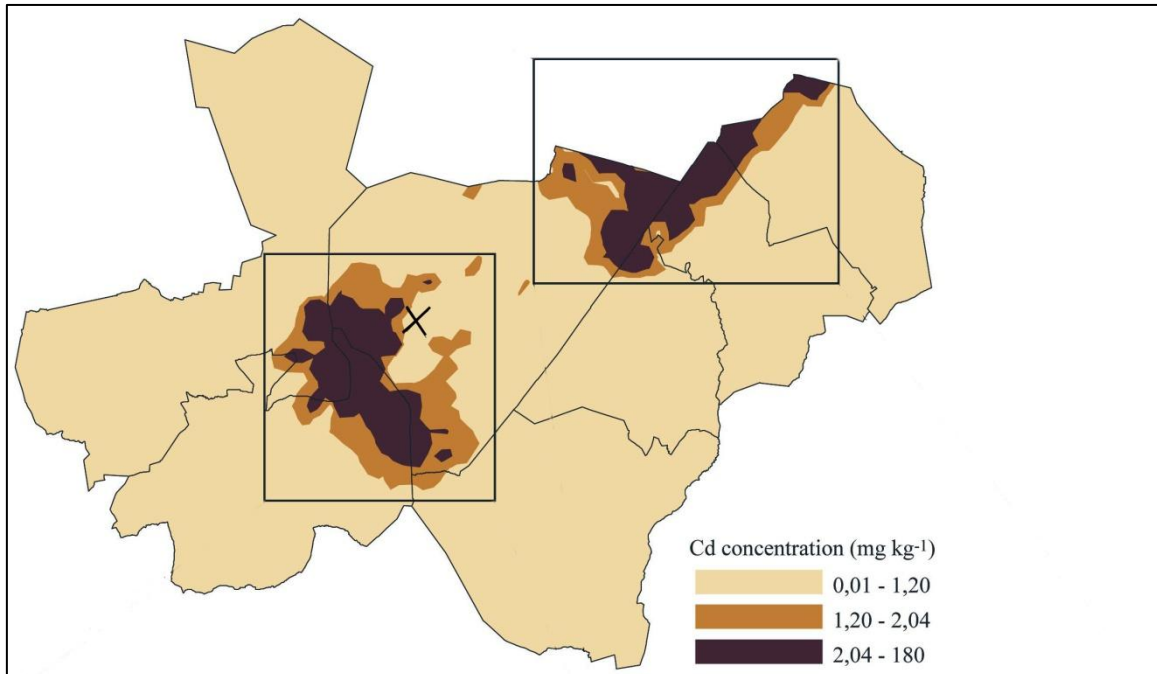
De zware metalen zijn voornamelijk afkomstig door de uitstoot van stof uit fabrieksschouwen en verspreiding door de lucht. (MIRA-T, 2006) Andere vormen van verspreiding zijn het storten van vast afval of gebruik van meststoffen. (MIRA, 2010) Daarnaast leverde de zinkfabrieken cadmiumrijke zinkassen die gebruikt werden voor de aanleg van pleintjes, wegen en opritten in de omgeving. (Medisch Milieukundigen, 2006) Via doorsijpeling komen de zware metalen terecht in het grondwater en via afspoeling verontreinigen ze het oppervlaktewater. (MIRA, 2010)

In de Belgische Kempen zijn veel landbouwers aanwezig. De verontreinigde bodem vormt een groot risico voor deze landbouwers. De zware metalen komen namelijk via de landbouw in onze voedselketen terecht. Landbouwgewassen kunnen bijvoorbeeld de zware metalen rechtstreeks opnemen uit de bodem, maar ook vee kan gevoederd worden met vervuilde voedergewassen, geteeld op een verontreinigde bodem.

Rond 1973 werd de zinkfabriek in Lommel gesloten en de overige zinkfabrieken schakelden over op een meer milieuvriendelijke productieproces via elektrolyse. Een verdere verspreiding van zware metalen werd hiermee een halt toegeroepen. Toch was de bodemverontreiniging in de regio reeds een feit door de aanhoudende vervuiling van de non-ferro industrie in voorgaande jaren. (Glas et al., 2008) De vervuiling concentreert zich rond de zinkfabrieken maar normoverschrijdingen worden ook teruggevonden in de

gemeenten Hamont-Achel, Neerpelt, Hechtel-Eksel en Mol zoals wordt aangegeven in figuur 1.

Figuur 1 : Cd concentratie in de Belgische Kempen



Bron: Schreurs *et al.* (2011)

2.1.1 Risico's

In de Kempen wordt voornamelijk voedermaïs verbouwd en een aantal tuinbouwgewassen zoals wortelen en schorseneren. De verhoogde gehalten aan zware metalen in de bodem en de vlotte opname van cadmium in planten kan leiden tot gewassen die de Europese productnorm overschrijden. (Glas *et al.*, 2008) De vervuilde gronden vormen dus een groot economisch en maatschappelijk risico voor de landbouw in de Kempen.

2.1.1.1 Economische risico's

Wanneer de gewassen de productnorm overschrijden, en dus een te hoge concentratie aan zware metalen bevatten, is dit nadelig voor de landbouwer. De gewassen verliezen hun waarde en kunnen niet meer verkocht worden. Op enkele plaatsen met verhoogde gehalten zware metalen in de bodem vertonen gewassen cadmiumgehalten die de Europese gewasnorm overschrijden. In gemeenten waar deze kans op

normoverschrijding bestaat sluit de groenteverwerkende sector geen contracten meer af met landbouwers. (Glas et al., 2008)

Maar niet enkel gewassen bevatten hoge concentraties aan zware metalen. Naast de opname van zware metalen in gewassen, werd cadmium ook in hoge concentraties terug gevonden in de nieren en levers van runderen. Dit is het gevolg van vervuilde voedergewassen die als voeding dienen voor runderen. Hierbij reageerde België met een verplichting om de nieren van de runderen te verwijderen en te vernietigen. (Glas et al., 2008)

2.1.1.2 Maatschappelijke risico's

Zware metalen vormen een gezondheidsrisico voor de mens. Bij overmatige opname in het lichaam kan cadmium schade aan de nieren en het skelet veroorzaken, en de fertiliteit verminderen. Bij inademing bestaat het risico van acute longaantasting. (MIRA, 2010) Verschillende organisaties classificeren cadmium zelfs als een kankerverwekkende stof voor de mens en onderzoek toont aan dat werkers die blootgesteld worden aan cadmium een hoger risico hebben op longkanker. (Nawrot et al., 2006) Eén van de belangrijkste bronnen van cadmiumaccumulatie in het menselijk lichaam is door opname via voeding.

De accumulatie van zware metalen in de bodem kan daarnaast leiden tot minder microbiële activiteit in de bodem, lagere biodiversiteit en vruchtbaarheid van de bodem, een lagere biomassaproductie, en kan zelfs de gezondheid van mens en dier beschadigen via de voedselketen. (Lievens et al., 2008a) Volgens Henderickx (2006) en Berten et al. (2000) is de Lommelse Sahara het resultaat van de vervuiling door de al lang verdwenen zinkproductie in Lommel en Overpelt.

2.1.2 *Fytoremediatie*

Door de uitgestrektheid van het getroffen gebied is het onmogelijk om de bodem te zuiveren via conventionele saneringstechnieken zoals uitgraven en storten of bodemwassen. Bovendien zijn dergelijke technieken schadelijk voor de biologische activiteiten in de bodem en regio, en tevens zeer duur. De kost kan oplopen van 50 tot wel 260 EUR per ton aarde. (Witters et al., 2009)

Fytoremediatie is een verzameling van technieken die gebruik maakt van planten voor het zuiveren van verontreinigingen in bodem en water. (Adams et al., 2000) Fytoremediatie wordt door Peer et al. (2005) omschreven als een verzameling van technologieën die gebruik maken van planten voor het verminderen, verwijderen, degraderen of immobiliseren van schadelijke stoffen, waaronder zware metalen, met als doel het herstellen/saneren van de bodem.

Meer specifiek betreft het in dit onderzoek de techniek fyto-extractie, een onderdeel van fyto-remediatie, dat door Peer et al. (2005) omschreven wordt als het verwijderen van schadelijke stoffen uit de bodem door de wortel van de plant, met aansluitende accumulatie van de zware metalen in de oogstbare plantenorganen. Nadat de plant klaar is om geoogst te worden kunnen de zware metalen eenvoudig verwijderd worden via het oogstproces. (Adams et al., 2000) Fyto-extractie wordt voornamelijk gebruikt voor het behandelen van bodem, sedimenten of slib. De techniek is meer bepaald van toepassing op zware metalen zoals chroom, cadmium, nikkel en zink die een hoge fyto-extractie coëfficiënt kennen. (Adams et al., 2000)

Algemeen bestaat fyto-extractie uit volgende processen: (Vangronsveld et al., 2009)

- Teelt van de gewassen op vervuilde grond
- Verwijdering van de oogstbare en met zware metalen vervuilde plantdelen
- Verwerking van de geoogste gewassen met het oog op het eindgebruik van de gewassen (compostering, verdichting, thermische verwerking)

De voornaamste voordelen van fyto-extractie zijn een lage kostprijs en een lage energie-input die voornamelijk door de zon wordt geleverd. Daarnaast ontstaat er ook weinig schade aan natuur en omgeving waardoor er een algemene aanvaardbaarheid bij het publiek bestaat. (Vangronsveld et al., 2009) Een grote beperking echter is de saneringsperiode die nodig is om de bodem te zuiveren tot acceptabele normwaarden. (Lievens et al., 2008a) De saneringsperiode kan wel 40 tot 200 jaren duren vooraleer de bodem volledig gezuiverd is. (Witters et al., 2009) De saneringsperiode kan verkort worden door ieder jaar de bladeren te verwijderen. De bladeren bevatten namelijk hoge concentraties aan cadmium en andere zware metalen. (Ruttens et al., 2008) De bladeren van wilg accumuleren immers een hogere concentratie zware metalen dan de takken. De concentratie cadmium bedraagt gemiddeld 55 µg/g voor bladeren en 27 µg/g voor de takken. (Lievens et al., 2009) Wanneer de bladeren echter worden achtergelaten op de oogstlocatie, komen de zware metalen terug in de bodem terecht. Tijdens het

oogstproces moet dus zowel het hout als de bladeren verwijderd worden. Verder kan ook maar een diepte van ongeveer 50 cm gezuiverd worden, afhankelijk van hoe diep de wortels van de gewassen reiken. Bomen kunnen echter een diepte van één tot enkele meters bereiken. (Vangronsveld et al., 2009)

2.2 Wilg als biomassa

2.2.1 *Wilg voor fytoremediatie*

Een ideale plant voor fytoremediatie moet voldoen aan enkele criteria. De volgende criteria werden opgesteld door Vangronsveld et al. (2009):

- Een tolerantie tegen hoge concentraties van geaccumuleerde zware metalen
- Een snelle groei van biomassa dat doeltreffend zware metalen accumuleert
- Accumulatie van zware metalen in de bovengrondse plantorganen
- Eenvoudig te oogsten

Bij de keuze van een geschikte teelt voor fytoremediatie spreken Wieshammer et al. (2007) over hyperaccumulatoren. Dit zijn planten die in staat zijn om grote hoeveelheden zware metalen op te nemen in de biomassa zonder dat symptomen van fytotoxiciteit zich voordoen. Deze planten worden echter gekenmerkt door trage groei en een lage biomassaproductie waardoor de sanering zeer traag verloopt en het saneringsproject jaren kan duren. (Cherian & Oliveira, 2005; Lievens et al., 2008a)

Het gebruik van bomen wordt voorgesteld als een duurzaam alternatief. Bomen hebben namelijk een uitgebreid wortelsysteem met hoge wateropname, snelle groei en een hoge biomassaproductie. (Wieshammer et al., 2007; Cherian & Oliveira, 2005) In het bijzonder wordt kortetoomloophout of meer specifiek wilg voorgesteld als teelt voor fytoremediatie. Wilg kent een hoge biomassaproductie en een hoge opname van voedingstoffen, maar ook zware metalen. Bovendien kan wilg meerdere malen geoogst worden tegen een gemiddelde houtopbrengst van 10-15 tds/ha/j. (Pulford & Watson, 2003) In een studie van Vangronsveld et al. (2009), betreffende fytoremediatie in de Kempen, wordt de houtopbrengst van wilg bij fytoremediatie gelijkgesteld aan 8 tds/ha/j.

Enkele boomsoorten komen in aanmerking om ingezet te worden voor fytoremediatie. *salix* spp, een specifieke wilgensoort, wordt bijvoorbeeld gekenmerkt door een hoge jaarlijkse biomassaproductie en een hoog tolerantieniveau tegen zware metalen. De plant

kan ingezet worden voor zowel het stabiliseren als het verwijderen van verontreinigingen in de vervuilde bodems. (Meers et al., 2007) Sommige salix-klonen zijn in staat om hoge concentraties Cd te accumuleren. Toch variëren de concentraties sterk van kloon tot kloon met waarden van 5 tot 70 mg/kg, in vergelijking met een 100 mg/kg opname bij hyperaccumulatoren. (Vangronsveld et al., 2009)

2.2.2 Wilg als energiegewas

Uit voorgaande paragraaf blijkt dat korteomloophout, of meer specifiek wilg, een uitstekende kandidaat is als teelt voor fytoremediatie. Daarnaast is korteomloophout door een hoge jaarlijkse biomassaproductie uitermate geschikt als energiegewas. Deze energiegewassen worden vervolgens aangewend voor de productie van groene energie op CO₂-neutrale basis. Door het gebruik van wilg is het dus mogelijk om simultaan een antwoord te bieden op het probleem van de bodemvervuiling als een economisch en duurzaam alternatief te vinden voor de landbouwers. In deze paragraaf wordt kort ingegaan op het gebruik van korteomloophout als energiegewas.

De teelt van korteomloophout wordt in het Bosdecreet, art.14bis1 (ingevoegd bij decreet van 19 mei 2006 houdende diverse bepalingen inzake leefmilieu en energie) gedefinieerd als :

"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."

Dit decreet heeft ertoe bijgedragen dat de aanleg van korteomloophout in agrarische gebieden niet langer als bos beschouwd wordt terwijl de aanleg van korteomloophout in groene bestemmingen en in zones met natuurbeschermingsstatuut wel nog onder het bosdecreet vallen. (OVAM, 2010) Dit wil zeggen dat korteomloophout, geplant op agrarisch grondgebied, niet onder de voorschriften van het bosdecreet valt en dus veel makkelijker gerooid kan worden. Het bosdecreet beschermt namelijk het bosareaal en legt beperkende maatregelen op bij de verbouwing en exploitatie van houtige energieteelten. (Meiresonne, 2006)

Het gebruik van hout voor de opwekking van energie vermindert de uitstoot van broeikasgassen en het kan veelzijdig gebruikt worden in de omzetting naar elektriciteit, warmte, biobrandstoffen of andere intermediaire energiedragers zoals pellets of biochar.

Bovendien is het een energiebron die de mogelijkheid biedt om opgeslagen te worden. Dit laat toe dat energie on-demand geproduceerd kan worden. (Rentizelas et al., 2009)

De jaarlijkse biomassaproductie per hectare per jaar is afhankelijk van verschillende factoren. De bodem in de Kempen is gekenmerkt als een zandgrond met een lage zuurgraad en hoge concentratie aan zware metalen. Hierdoor blijft de houtopbrengst beperkt tot 8 tds/ha/j (Vangronsveld et al., 2009) Volgens Ruttens et al. (2008) is het enkel realistisch korteomloophout aan te planten op bodems met voldoende hoge zuurgraad. Wanneer dit niet het geval is dient het veld eerst gekalkt te worden alvorens de stammen worden geplant. De pH van de bodem is namelijk een belangrijke parameter in de mobiliteit van zware metalen in de bodem. (Glas et al., 2008)

Verder levert de teelt van korteomloophout nog een aantal bijkomende milieuvoordelen. Het aanplanten van korteomloophout heeft ondermeer een bodemverbeterend en beschermend effect. De wortels beschermen de bodem tegen water- en winderosie. Ook nemen snelgroeïende bomen veel nutriënten op zoals stikstof en fosfor, waardoor vermeden wordt dat deze nutriënten het grondwater verontreinigen. Bovendien zorgt de aanplanting van korteomloophout voor beschutting voor diverse diersoorten zoals fazanten, reeën en andere dieren wat ten goede komt voor zowel biodiversiteit als de lokale jacht. (De Somviele et al., 2009; Ceulemans et al., 2001)

Toch kent korteomloophout ook enkele beperkingen. Voornamelijk in Vlaanderen wordt het gebruik van korteomloophout afgeremd door knelpunten zoals de hoge productiekosten, beperkte beschikbare ruimte, en het versnipperde karakter van het Vlaamse landbouwareaal. Toch kent deze houtsoort veel potentieel in de energiesector wanneer de productiekosten gedrukt kunnen worden, en de markt voor energieteelten in Vlaanderen evolueert tot een volwaardige markt. (De Somviele et al., 2009)

2.3 Jaarlijkse productie van biomassa

Voor de inputgegevens van deze masterproef baseren we ons op eerder uitgevoerd onderzoek van Schreurs *et al.* (2011) naar fytoremediatie in de Kempen. In dit onderzoek werden de concentraties cadmium geïdentificeerd in de Kempen. Zoals uit figuur 1 blijkt, strekt de verontreiniging zich uit tot de gemeenten Hamont-Achel, Neerpelt, Overpelt, Hechtel-Eksel, Lommel, Mol en Balen. De verontreiniging concentreert zich op 2 locaties waar de bodem verhoogde Cd-concentratie bevat die de

toegelaten norm van 1,2 mg/kg overtreffen. De richtwaarden voor de bodemkwaliteit worden gegeven door het Vlaams Reglement rond Bodemsanering. (Vlarebo, 2007)

In het totaal zijn er in het betreffende gebied 2041 ha grond met een Cd-concentratie boven de 1,2 mg/kg. (Schreurs et al., 2011) Potentieel zijn er dus 2041 ha grond die in aanmerking komen voor fyto remediatie met wilg. Toch kan echter niet op al deze gronden fyto remediatie uitgevoerd worden. Landbouwers moeten namelijk bereid zijn om hun vervuilde gronden voor lange tijd toe te wijden aan fyto remediatie. Deze langdurige toewijding aan fyto remediatie heeft tot gevolg dat landbouwers nogal weigerachtig tegenover bodemsanering staan, vooral wanneer geen aantrekkelijke economische perspectieven hier tegenover worden gesteld. De teelt van wilg brengt de landbouwer namelijk een lager inkomen op in vergelijking met de conventionele landbouwactiviteiten, zoals de teelt van voedermaïs. De conventionele landbouw levert de landbouwer een hoger inkomen per hectare, maar de gronden blijven hierbij wel ongezuiverd achter.

Om het potentieel aantal landbouwgronden te bepalen dat in aanmerking komt voor fyto remediatie met wilg, werkt het onderzoek van Schreurs et al. (2011) 2 scenario's uit met een tijdsbeperking voor de maximale tijdsduur van het saneringsproject. De maximale duur van het saneringsproject wordt in het eerste scenario gezet op maximum 21 jaar en in het tweede scenario op maximum 42 jaar. Dit komt overeen met respectievelijk één en twee wilgrotaties van wilganaanplantingen. Wilgen worden namelijk gemiddeld om de 3 jaar geoogst en 7 oogsten zijn mogelijk vooraleer de planten beginnen te degraderen en het groeiproces van de plant verminderd. De tijdsbeperking zorgt ervoor dat enkel de gronden, die na een saneringsproject van 21 of 42 jaar een Cd-concentratie bevatten onder de norm van 1,2 mg/kg, worden opgenomen in de studie.

In de veronderstelling dat in één volledige wilgrotatie (21 jaar) de Cd-concentratie verlaagd kan worden met 0,9 mg/kg, komen er 1 018 ha grond in aanmerking voor bodemsanering en de aanplanting van wilg. (Schreurs et al., 2011) Het betreft gronden met een Cd-concentratie tussen 1,2 mg/kg en 2,1 mg/kg.

In de veronderstelling dat in twee volledige wilgrotatie (42 jaar) de Cd-concentratie verlaagd kan worden met 1,8 mg/kg, komen er 1 783 ha grond in aanmerking voor bodemsanering en de aanplanting van wilg. (Schreurs et al., 2011) Het betreft gronden met een Cd-concentratie tussen 1,2 mg/kg en 3,0 mg/kg.

Omdat een oogstcyclus gemiddeld 3 jaar duurt, is het aan te raden om de aanplanting van de wilgen te spreiden over 3 jaar, zodat niet alle biomassa in één jaar vrijkomt. Wanneer men bijvoorbeeld in jaar nul alle percelen met wilgen beplant en een gemiddelde wilgopbrengst van 8 tds/ha/j aanhoudt, zal in jaar 3 van een 21 jarig saneringsproject een biomassastroom van 24 432 tds vrijkomen. Wanneer we echter de aanplanting van de wilgen spreiden over drie jaren bekomen we jaarlijks een vrijkomende biomassastroom van 8 144 tds/j.

Hoofdstuk 3: Verwerking van biomassa

Alvorens de biomassa gebruikt kan worden als grondstof voor pyrolyse, moet deze eerst de biomassaketten van teelt tot energieproductie doorlopen. De verwerking van de biomassa bestaat uit onderstaande processen, al dan niet in deze volgorde:

- Teelt en oogst van biomassa
- Transport
- Opslag
- Voorbehandeling: drogen, verkleinen, (pyrolyse)

Bovenstaande processen zijn onderling afhankelijk van elkaar en dienen allen op één lijn gebracht te worden zodat een optimale werking van de biomassaketten gegarandeerd kan worden.

3.1 Houtoogst

De keuze van de oogstmethode is afhankelijk van de schaal van de plantage, en de specificaties waaraan het hout moet voldoen voor eindgebruik. Voor de oogst van Korteomloophout worden twee oogstsystemen onderscheiden. (Mitchell et al., 1999; INBO, 2011):

1. Whole stem methode: De stammetjes worden geheel afgesneden en vervoerd naar de rand van het veld waar het hout op natuurlijke wijze kan drogen:
 - a. Transport van stammen is inefficiënt
 - b. Opslag van stammen kent minder risico's
 - c. De stammen dienen naderhand verkleind te worden
2. Cut and chip methode: De stammetjes worden afgesneden en onmiddellijk verkleind. Daartoe wordt een maishakselaar gebruikt, waarop een speciale oogstkop gemonteerd wordt. Deze machines zijn ontworpen zodat er telkens 2 rijen tegelijkertijd geoogst kunnen worden. (Dawson, 2007)
 - a. Transport van houtchips is het meest kostefficiënt
 - b. Opslag van houtchips kent grotere risico's

c. Het verkleinproces is reeds uitgevoerd

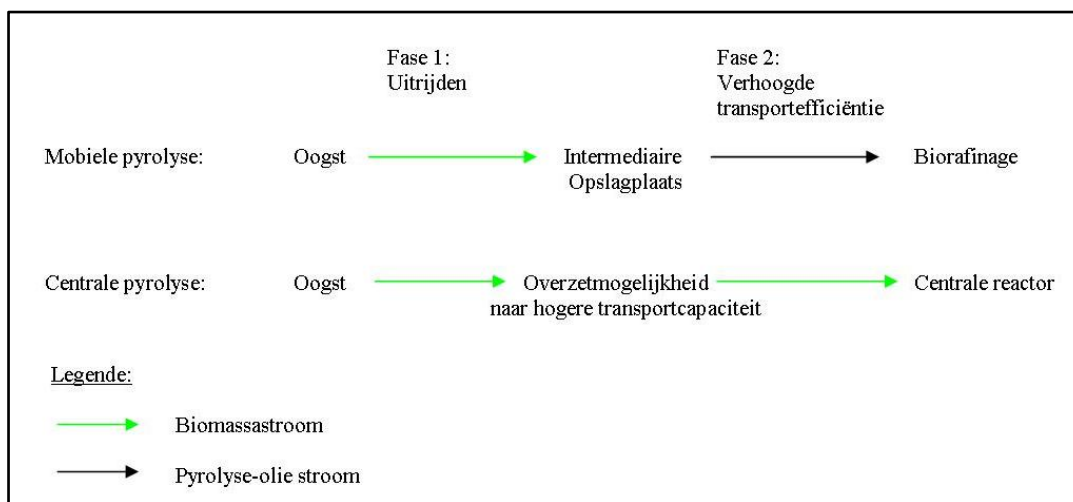
De oogst gebeurt in de winter, binnen een tijds marge van 10 tot 12 weken, wanneer de planten hun bladeren verliezen. In dit onderzoek wordt de cut and chip methode gebruikt voor de oogst van korteomloophout omwille van de hogere efficiëntie waarmee houtchips verwerkt worden. De houtchips hebben een stukgrootte van 5 tot 50 mm. Vers geoogste houtchips bevatten een vochtgehalte van 50 tot 60 procent. (Mitchell et al., 1999) Wanneer de vochtige houtchips opgeslagen worden zonder ventilatie of droging treden verschillende risico's op. Deze risico's worden verder besproken in paragraaf 3.3.1.

3.2 Transport

Bio-energie komt in verschillende vormen voor: onbewerkte biomassa (chips, stammen, balen), intermediaire energiedragers (bio-olie, houtskool), hoge kwaliteit energiedragers (ethanol, methanol, synthetische diesel, waterstof) of als elektriciteit. (Hamelinck et al., 2005) Iedere vorm van bio-energie stelt eisen waaraan de transportmiddelen moeten voldoen om optimaal de grondstof te vervoeren van één locatie naar de volgende.

Om een duidelijke vergelijking mogelijk te maken tussen mobiele en centrale pyrolyse, beperkt het transport zich zoals weergegeven in figuur 2 tot twee bewegingen

Figuur 2 : Vergelijking van de goederenstromen



Het transportprobleem kan dus voorgesteld worden door 2 fasen. De eerste fase wordt voor mobiele en centrale pyrolyse gelijkgesteld aan het uitrijden van de biomassa tot een

intermediaire opslagplaats. Mobiele pyrolyse en centrale pyrolyse verschillen voornamelijk in fase 2. Bij mobiele pyrolyse wordt de biomassa op de intermediaire opslagplaatsen omgezet tot pyrolyse-olie waardoor fase 2 bestaat uit het transporteren van pyrolyse-olie. Bij centrale pyrolyse daarentegen wordt de biomassa op de intermediaire opslagplaatsen overgezet in een transportmiddel met hogere efficiëntie (capaciteit, snelheid). De biomassa kan hier eventueel ook verdicht worden met als doel de energiedichtheid van de biomassa te verhogen en het transport nog efficiënter te kunnen uitvoeren.

3.2.1 Transport van biomassa

Volgens bosbeheerders vormen de transportkosten een groot deel van de totale oogstkosten. Zij stellen dat hout meestal ter plaatse versnipperd wordt tot houtchips om de efficiëntie van het transport te verhogen. Toch hebben deze houtchips nog steeds een relatief lage massadichtheid waardoor volume, eerder dan gewicht, een beperkende factor speelt bij het transport van biomassa. Dit maakt het transportproces van houtchips duur. (Fontein & Kuindersma, 2010)

Het te kiezen transportmiddel is afhankelijk van volgende parameters (Boosten et al., 2009):

- Locatie en beschikbaarheid van het te vervoeren materiaal
- Bestemming en bereikbaarheid
- Transportafstand en -kosten
- Laadcapaciteit
- Transportsnelheid

De verschillende transportmogelijkheden die in dit onderzoek aan bod komen zijn de opties tractor met container en vrachtwagen, en worden hieronder kort toegelicht:

Het transport doormiddel van tractor met containercarrier is voornamelijk aan te raden bij moeilijk bereikbare plaatsen of korte afstanden. Dit transportmiddel wordt gebruikt bij de oogst van korteomloophout. Het gebruik van tractor met containercarrier is interessant tot een werkstraal van ongeveer 15 km vanwege de geringe laadcapaciteit en de lage transportsnelheid. (Boosten et al., 2009; Corten & Kupers, 2009)

Vrachtwagentransport is eerder aangeraden voor lange afstanden van 10 tot 70 km. Vrachtwagens worden gekenmerkt door een hogere transportefficiëntie dankzij een capaciteit van 40 m³ of meer, en een hogere transportsnelheid. Wanneer de transportafstand de 80 km overschrijdt raden Corten & Kupers (2009) een 80 m³ containercombinatie aan.

3.2.2 Transport van Pyrolyse-olie

In het mobiele systeem waarbij de aangemaakte pyrolyse-olie vervoerd wordt naar een energieproducent is een vervoersmiddel voor vloeistoffentransport vereist. Het transport van pyrolyse-olie is gelijkaardig aan het transport van conventionele petroleum per truck. Pootakham & Kumar (2010a) onderscheiden 2 typen tankvoertuigen voor het transporteren van pyrolyse-olie: een tankwagen en een 'super b-train' tankoplegger. Beide verschillen voornamelijk in capaciteit. Een tankwagen heeft een capaciteit van ongeveer 30 m³ terwijl een 'super b-train' tankoplegger een capaciteit van wel 60 m³ kan vervoeren. Hierbij is de afweging belangrijk tussen enerzijds de lagere kostprijs per kilometer voor een grote tankwagen en de hogere mate aan service die men kan aanbieden bij een kleine tankwagen anderzijds.

Het transport van pyrolyse-olie dient echter ook aan bepaalde voorwaarden te voldoen. De pH-waarde of zuurgraad van pyrolyse-olie is namelijk 2,8 en heeft tot gevolg dat de opslagtank van een tankwagen aangetast kan worden. Het transport dient daarom aangepast te worden met corrosiebestendige materialen zoals roestvrij staal, HDPE (high density polyethylene) of PVC. (Pootakham & Kumar, 2010b)

3.3 Opslag

Op bepaalde punten in de biomassaketten moet er in opslag voorzien worden. Opslag kan een meervoud aan functies omvatten die hieronder in meer detail worden besproken. Net als voor het transport wordt ook hier een onderscheid gemaakt tussen zowel de behandeling van biomassa als pyrolyse-olie.

3.3.1 Opslag van biomassa

De opslag van houtsnippers is een belangrijke schakel in de biomassaketten. Een optimale opslag garandeert een beperking van de opslagrisico's, een minimalisering van het aantal transportbewegingen en de vorming van een voorraadbuffer voor het afstellen van vraag en aanbod. Toch wordt in de praktijk voornamelijk de goedkoopste methode het meest toegepast ongeacht de nadelen die deze keuze kan hebben op de efficiëntie van het totale systeem. (Rentizelas et al., 2009)

Opslag kan volgende functies vervullen:

- Opslag als buffer
- Opslag voor de minimalisering van het aantal transportbewegingen
- Beperking van risico's

Biomassa is onderhevig aan een seizoensgebonden karakter. De oogst van deze biomassa beperkt zich gebruikelijk tot jaarlijks 10 tot 12 weken maar de biomassacentrales eisen een volledig jaar rond een continue aanvoer van biomassa. De biomassa dient bijgevolg noodzakelijkerwijs opgeslagen te worden zodat vraag en aanbod op elkaar afgestemd kunnen worden. (Suurs, 2002) Opslag van biomassa vervult hier de functie van buffer.

Door gebruik te maken van meerdere intermediaire opslagplaatsen is het mogelijk om de transportkosten te reduceren. De extra opslagplaatsen kunnen immers dicht bij de biomassabron geplaatst worden. Toch moet opgemerkt worden dat meerdere intermediaire opslagplaatsen ook extra infrastructuurkosten betekenen. Een afweging dient gemaakt te worden over de vraag hoeveel opslagplaatsen gekozen zullen worden zodoende de som van de transport- en opslagkosten te minimaliseren. Een antwoord hierop wordt geboden tijdens de scenarioanalyse in hoofdstuk 8.

Een derde functie die opslag voorziet is het beperken van verschillende risico's. Deze functie is sterk gerelateerd aan de gebruikte opslagmethode. In onderzoek van Badger (2002) worden drie verschillende opslagmethoden onderscheiden:

- Open onbedekte biomassahopen
- Biomassahopen deels bedekt door open loodsen
- Gesloten voorraadbunkers, hoppers of silo's

De goedkoopste opslagmethode is de opslag in open onbedekte biomassahopen, zoals velddrogen of drogen op een betonnen ondergrond. Hierbij wordt de biomassa kosteloos gedroogd van 50% tot 30%. Deze opslagmethode wordt in de praktijk veel toegepast omwille van zijn lage kostprijs. De kostprijs voor deze opslagmethode bedraagt 1,1 €/m³/jaar. (Hamenlinck et al., 2005) Toch zijn er vele nadelen verbonden aan deze opslagmethode (Rentizelas et al., 2009):

- Hoog volumevermindering (verliesrisico)
- Broei- of schimmelsporenvorming door biologische processen (gezondheidsrisico)
- Slechte controle van het vochtgehalte (kwaliteitsrisico)
- Biomassa vervuild met zand en/of andere stoffen.

Toch zijn deze risico's te beheersen wanneer een juiste opslagmethode wordt toegepast. Houtchips dienen bij voorkeur opgeslagen te worden op een betonnen vloer met voldoende ventilatie zoals een gesloten voorraadbunker of –silo, al doende een droog en zandvrij product te bekomen. (De Boer, 2009) Een goede ventilatie beperkt namelijk de kans op broei of schimmelvorming. Deze vorm van drogen is volgens OVAM (2010) de meest kostefficiënte droogmethode. Bovendien is droge biomassa niet onderhevig aan broei of schimmelvorming. (Coenen et al., 2008)

3.3.2 Opslag van pyrolyse-olie

Naar de opslag van pyrolyse-olie is zeer weinig onderzoek verricht. Hierover wordt in de literatuur enkel vermeldt dat de tankers en silo's waarin pyrolyse-olie wordt opgeslagen aangepast moeten worden aan het aantastende karakter van de olie. Pyrolyse-olie heeft namelijk een lage zuurgraad waardoor het bijtend werkt op bepaalde materialen. Om corrosie te voorkomen dienen de opslagtanken en silo's net als bij het transport vervaardigd te worden met roestvrij staal, HDPE (high density polyethylene) of PVC. (Pootakham & Kumar, 2010b)

3.4 Voorbehandeling

Biomassa is een bulkproduct, gekenmerkt door een hoog vochtgehalte en een lage dichtheid. Dit zorgt voor moeilijkheden tijdens het transport, opslag en de omzetting van

de biomassa. Om de efficiëntie in deze processen te verhogen kan de massa- en energiedichtheid van de biomassa verhoogd worden via verschillende voorbehandelingprocessen. Vis (2002) onderscheidt in zijn werk de volgende voorbehandelingprocessen:

- Verkleinen: hakselen, chippen, shredderen of verpoederen
- Drogen: luchtdrogen, centrifugeren en thermisch drogen
- Verdichten: persen, pelleteren, briketteren
- Scheiden: zeven, sorteren, fractioneren

Daarnaast is een voorbehandeling van de biomassa ook nodig om te voldoen aan de criteria, vooropgesteld aan de eisen van de pyrolyse reactor, zodat een grote hoeveelheid pyrolyse-olie van hoge kwaliteit geproduceerd wordt. (Wiersma & Van den Berg, 2004) Een belangrijk gegeven bij fast pyrolyse is de procestemperatuur. De biomassadeeltjes moeten op de optimale temperatuur gebracht worden en de blootstelling aan lagere temperaturen, dat de aanmaak van char bevordert, moet vermeden worden. De warmteoverdracht moet bijgevolg zeer hoog zijn. Een stukgrootte van de biomassadeeltjes kleiner dan 3 millimeter bevordert de warmteoverdracht. (Bridgwater, 2011) Het vochtgehalte van de biomassa is bij voorkeur lager dan 10%.

Een essentiële vraag die gesteld moet worden is op welk moment in de biomassaketen de voorbehandeling uitgevoerd dient te worden. De voorbehandeling zorgt er namelijk voor dat het hout makkelijker en meer efficiënt vervoerd kan worden doordat er minder lucht vervoerd wordt. Een manier om de biomassaketen te optimaliseren is dus door de voorbehandeling naar het begin van de keten te verschuiven. Ook het idee van mobiele pyrolyse is hierop gebaseerd waarbij het pyrolyseproces beschouwd wordt als een voorbehandelingsmethode dat biomassa omzet tot een product met hogere massa- en energiedichtheid en dus zo vroeg mogelijk in de biomassaketen dient uitgevoerd te worden.

Figuur 2 geeft de goederenstroom voor mobiele en centrale pyrolyse weer. Iedere goederenstroom bestaat zoals wordt besproken in paragraaf 3.2 uit 2 transportfasen, waarbij de 2^e fase bestaat uit het transport met verhoogde transportefficiëntie. Wanneer bij mobiele pyrolyse het pyrolyseproces naar het begin van de biomassaketen wordt verschoven, wordt de biomassaketen verkort en kan de pyrolyse-olie in de volgende stappen met een hogere massa- en energiedichtheid efficiënter getransporteerd, opgeslagen en behandeld worden. (Venderbosch & Prins, 2009) Bij centrale pyrolyse kan

de biomassaketen niet verkort worden, maar wordt de transportefficiëntie in fase 2 verhoogd door een hogere transportcapaciteit.

Voor deze masterproef wordt de biomassa verondersteld vrij te zijn van vreemde deeltjes zoals zand, glas of metaal, waardoor geen scheidingsproces vereist is. Ook het verdichten van de biomassa heeft hier weinig nut aangezien de biomassa niet vergetransporteerd dient te worden. In dit hoofdstuk wordt dus enkel het verkleinen en het drogen van de biomassa besproken.

3.4.1 Verkleinen

De stukgrootte van de biomassa wordt beperkt door het type reactor of meer bepaald door de warmteoverdracht van het type reactor. Bij de meeste reactoren is een stukgrootte van minder dan 2 of 5 millimeter vereist. Dit is nodig om secundaire reacties tijdens het pyrolyseproces te beperken. De char die gevormd wordt op het oppervlak van de deeltjes werkt namelijk als een katalysator voor secundaire reacties met de primaire pyrolysedampen waardoor de opbrengst aan pyrolyse-olie verminderd. (Bridgwater et al., 2002)

Voor transport en opslag is de stukgrootte van biomassa een kwestie van efficiëntie. Houtige biomassa kan namelijk in verschillende vormen worden getransporteerd en opgeslagen. De dichtheid van het te vervoeren hout kan zo laag zijn als 64-96 kg/m³ in losse vorm, 250 kg/m³ voor houtchips of tot 650 kg/m³ voor houtpellets. De vorm en dichtheid waarin hout vervoerd wordt, wordt belangrijker naarmate het transport over langere afstanden betreft en waar een zo efficiënt mogelijke vorm gekozen dient te worden om de hoge kosten te drukken. In dit opzicht wordt er altijd getracht zo weinig mogelijk lucht te vervoeren.

In deze gevalstudie wordt de biomassa tijdens de oogst gechipt tot kleine biomassadeeltjes. Het versnipperen van biomassa tijdens de oogst van korteomloophout wordt in de praktijk het meeste toegepast. Zoals reeds vermeld wordt dit gedaan door een aangepaste maïshakselaar om zo de kosten te drukken. Nadien is nog een tweede verkleinproces vereist om de biomassa te verpoederen tot biomassadeeltjes van 2-5 millimeter om te voldoen aan de eisen van de pyrolyse reactor.

3.4.1.1 Drogen

Voor het pyrolyseproces is het nodig dat de voedingstof gedroogd wordt tot het vereiste vochtgehalte. Bridgwater et al. (2002) stelt voor fast pyrolyse een maximum vochtgehalte van 10% voorop met een voorkeur voor 7%. Wanneer de biomassa een te hoog vochtgehalte bevat, is er immers meer energie nodig voor de omzetting van eenzelfde hoeveelheid biomassa naar pyrolyse-olie. Extra energie is vereist voor de verdamping van het aanwezige vocht. Daarnaast komt het vocht terecht in de pyrolyse-olie waardoor de kwaliteit van, en de opbrengst aan pyrolyse-olie vermindert. (Bridgwater et al., 2002; Geurds & Devriendt, 2006)

Het vochtgehalte van verse biomassa kan tot 50% van het totale gewicht uitmaken. Het transport van verse houtsnippers houdt dus in dat de helft van het gewicht onnodig vervoerd wordt. Een zo laag mogelijk vochtgehalte is bijgevolg wenselijk en dit zo vroeg mogelijk in de keten. Toch heeft het vochtgehalte van biomassa geen enkel effect op de hoeveelheid biomassa die vervoerd kan worden per rit. Het gewicht van biomassa speelt namelijk geen beperkende rol aangezien hout een bulkproduct is waarbij vooral het volume het laadvermogen van het transport bepaalt.

Voor het behoud van de kwaliteit van de biomassa in opslag dient de biomassa een vochtgehalte van niet hoger dan 25% te bevatten. Hierdoor gaat de biomassa niet over tot broei. Verdere droging kan zinvol zijn afhankelijk van het gewenste vochtgehalte. (Coenen et al., 2008)

In de literatuur worden twee droogmethoden onderscheiden: de natuurlijke droging die ook wel voordroging of luchtdroging wordt genoemd, en mechanische droging.

Onder natuurlijk drogen wordt een droogproces verstaan waarbij geen input vereist is. De biomassa wordt opgeslagen en wordt natuurlijk gedroogd door lucht en ventilatie. Deze techniek wordt voornamelijk uitgevoerd op de oogstlocatie aan de rand van het veld, maar kan echter ook toegepast worden bij de opslag in bedekte silo's. Volgens Ciudad et al. (2003) is natuurlijk drogen de meest kostefficiënte droogmethode doordat er totaal geen energie vereist is om het hout te drogen. Houtsnippers worden hier meestal opgeslagen op een droge betonnen vloer en in het beste geval in een goed geventileerde ruimte. De temperatuur in het centrale deel van de hoop stijgt door biologische degradatie of broei, en veroorzaakt convectie. De lucht circuleert door de biomassahoop

en zorgt ervoor dat waterdamp naar het koudere oppervlak van de hoop getransporteerd wordt. Aan het oppervlak van de hoop condenseert de waterdamp. In 3 tot 5 maanden wordt het vochtgehalte van de houtsnippers zo gereduceerd tot minder dan 30%. (OVAM, 2010)

Bij het mechanisch drogen van biomassa bestaat de keuze uit verschillende opstellingen die elk op een eigen manier het vocht uit de biomassa extraheren. Er zijn verschillende directe en indirecte droogtechnieken waarbij lucht, rookgas of stoom als droogmedium gebruikt wordt. (Fagernäs et al., 2010) Alvorens de biomassa gebruikt wordt als grondstof voor pyrolyse wordt deze eerst nog mechanisch gedroogd tegen 110°C tot een vochtgehalte van 7-10%. (Stals et al., 2010a)

Hoofdstuk 4: Omzetting van biomassa

4.1 Pyrolyse van hout uit fytoremediatie

Het resultaat van fytoremediatie is een houtopbrengst die vervuild is met zware metalen. De verwerking van deze houtopbrengst dient bijgevolg nauw opgevolgd te worden. Er bestaan enkele processen om de vervuilde biomassa te verwerken waaronder het verbranden, vergassen of pyrolyseren van de biomassa. (Stals et al., 2010b)

Pyrolyse is om 3 redenen geschikt voor de verwerking van vervuilde biomassa uit fytoremediatie.

- Voorkomt dat de zware metalen terug in de omgeving terecht komen
- Produceert een waardevolle pyrolyse-olie, vrij van zware metalen
- Concentreert de zware metalen in het bijproduct char

De relatief lage procestemperatuur bij pyrolyse, in vergelijking met verbranding, voorkomt dat de metalen vluchtig worden en in de pyrolyse-olie terecht komen. (Stals et al., 2010b) In de plaats worden de zware metalen verzameld in de char. Dit vereenvoudigt een latere verwerking van deze zware metalen.

Doordat pyrolyse een energiehoudende vloeistof produceert die fungeert als intermediaire energiedrager en zowel eenvoudig opgeslagen als getransporteerd kan worden, is het mogelijk de energieproductie (bio-olie naar energie) te ontkoppelen van het omzettingsproces (biomassa naar bio-olie). Door deze mogelijkheid tot 'ontkoppeling van het systeem' onderscheidt pyrolyse zich ook van de andere omzettingsmethoden. (Bridgwater et al., 2002) De energieproductie kan dus zowel op een verschillende locatie als tijd van het omzettingsproces uitgevoerd worden.

Pyrolyse is bijgevolg een uitstekende kandidaat om de vervuilde biomassa uit fytoremediatie te verwerken tot pyrolyse-olie, gas en biochar. In deze laatste worden de zware metalen opgeslagen. Deze drie producten worden steeds aangemaakt via het pyrolyseproces, maar de proporties kunnen verschillen naargelang de procesparameters. (Bridgwater, 2011)

Er dient een onderscheid te worden gemaakt tussen trage en snelle pyrolyse, ook wel fast pyrolyse genoemd. Bij trage pyrolyse wordt de biomassa rustig opgewarmd tot temperaturen tussen de 300 en 400°C waardoor hoofdzakelijk biochar wordt aangemaakt. Lage procestemperaturen en lange verblijftijden van de dampen resulteren namelijk in hogere fracties biochar. Fast pyrolyse daarentegen kan gedefinieerd worden als een techniek waarbij biomassa voornamelijk wordt omgezet in een donker bruine olie met een vergelijkbare energiedichtheid als hout. Om de opbrengst aan pyrolyse-olie te maximaliseren is een hoge warmteoverdracht tegen een temperatuur van 500°C en een snelle afkoeling van de gevormde condenseerbare gassen nodig. (Venderbosch & Prins, 2009) Door de hogere temperatuur worden de moleculen van het organisch materiaal gekraakt tot kleinere moleculen die bij afkoeling condenseerbare dampen, gassen en vaste kool vormen. (Siemons, 2005) Fast pyrolyse wordt dus voornamelijk toegepast wanneer men de productie van pyrolyse-olie wil maximaliseren.

Fast pyrolyse wordt vaak beschouwd als een voorbehandelingstechniek voor biomassa. De aangemaakte pyrolyse-olie heeft een massadichtheid van 1 200 kg/m³ in vergelijking met de lage massadichtheid van biomassa van rond de 100 tot 250 kg/m³. Dit vereenvoudigt alle verwerkingsprocessen zoals transport, voorbehandeling en opslag waardoor de kosten gedrukt worden. De energie-inhoud is echter vergelijkbaar met die van biomassa. (Bridgwater, 2009)

Via fast pyrolyse kan in ideale omstandigheden de fractie vloeistof gemaximaliseerd worden tot wel 70% van het inputgewicht. (Faaij, 2006) De typische opbrengsten en energie-inhoud van de pyrolyseproducten worden weergegeven in tabel 1.

Tabel 1 : Typische opbrengsten en energie-inhoud uit fast pyrolyse

	Pyrolyse-olie	biochar	gas
Opbrengst (%wt)	75	13	12
Energie-inhoud (%)	70	25	5

Bron: Bridgwater, 2009

Er is onderzoek verricht door Stals et al. (2010a; 2010b) naar de verwerking van hout uit fyto-remediatie door het gebruik van fast pyrolyse. Hierbij werd het hout demonstratief verwerkt in een kleinschalige quartz tubulaire reactor. De opbrengstresultaten uit dit onderzoek worden weergegeven in tabel 2. De opbrengst aan pyrolyse-olie ligt gevoelig lager dan de typische waarden. Het is echter niet duidelijk uit het onderzoek of de lagere

opbrengst aan pyrolyse-olie het gevolg is van het gebruik van vervuild hout als grondstof of van het gebruik van een kleinschalige quartz tubulaire reactor.

Tabel 2 : Pyrolyse-opbrengsten bij verschillende procestemperaturen

	Temperatuur (°C)		
	350	450	550
Opbrengst pyrolyse-olie (%)	40	52	43
Opbrengst biochar (%)	36	23	12
Opbrengst gas (%)	24	25	45

Bron: Stals, 2010b

Uit hetzelfde onderzoek wordt het effect van de procestemperatuur bevestigd: de opbrengst aan pyrolyse-olie wordt bijvoorbeeld gemaximaliseerd bij een procestemperatuur van 450°C. Een lagere procestemperatuur vermindert de productie van pyrolyse-olie terwijl de aanmaak van char wordt bevorderd. Een hogere temperatuur bevordert de aanmaak van gassen. (Stals et al., 2010b)

Wanneer pyrolyse gebruikt wordt voor de omzetting van met zware metalen vervuild hout in pyrolyse-olie moet er op toegezien worden dat een olie wordt geproduceerd met een verwaarloosbare concentratie aan zware metalen en een aanvaardbaar calorisch vermogen. (Lievens et al., 2008a) De zware metalen worden geacht na het pyrolyseproces voornamelijk terecht te komen in de char en de assen. Het moet vermeden worden dat de zware metalen vrijkomen en zich vermengen met de condenseerbare en vluchtige fractie. De manier waarop de zware metalen zich gedragen tijdens het pyrolyseproces beïnvloedt namelijk de kwaliteit, de valorisatie, alsook de toekomstige toepassingen voor de eindproducten. (Lievens et al., 2008a)

De pyrolyse-olie bevat onder de juiste omstandigheden enkel verwaarloosbare concentraties aan zware metalen. Toch moet er rekening gehouden worden dat wanneer de procestemperatuur hoger dan 450°C is, dit kan leiden tot onaanvaardbare concentraties aan zware metalen in de pyrolyse-olie, ongeacht of een hete gasfilter gebruikt wordt. Cadmium wordt bij een temperatuur van 550°C namelijk vluchtig en de deeltjes kunnen de filter passeren. Een lagere procestemperatuur leidt tot zeer lage concentraties aan zware metalen in de pyrolyse-olie maar zorgt ook voor een lagere opbrengst pyrolyse-olie in het voordeel van de opbrengst biochar. (Stals et al., 2010a)

4.2 Reactoren

Gedurende de laatste 25 jaar heeft men in het veld van pyrolyse getracht verschillende reactoren te ontwerpen die voldoen aan de eisen van warmteoverdracht, maar ook tegemoetkomen aan de problemen van stukgrootte en vochtgehalte van de biomassa. De reactoren kunnen zowel verschillen in techniek als in mate van transporteerbaarheid.

Momenteel bestaan ondermeer de volgende pyrolysereactoren die voornamelijk verschillen in de methode van warmteoverdracht. (Bridgwater, 2011):

- Stationair wervelbed (Bubbling Fluidized bed)
- Circulerend wervelbed (Transported bed)
- Ablatieve pyrolyse met centrifugerende vortex
- Vacuümpyrolyse
- Schroefreactor
- Roterende kegel
- Actieve cycloon
- Radiatieve-convectieve stroom
- Keramische bal met onderstroom
- Microwave pyrolyse

Het stationaire en circulerend wervelbed worden in de praktijk het meest gebruikt. Beide reactoren hebben een lange geschiedenis in de toepassing van pyrolyse en zijn commercieel beschikbaar. De overige reactoren bestaan momenteel nog in de ontwikkeling- en demonstratiefase. Zij verschillen grotendeels in de mogelijkheid tot schaalvergroting, vermogen tot het verwerken van biomassa met grotere stukgrootte, en pyrolyse-olie opbrengst en kwaliteit.

Welk type pyrolysereactor gekozen wordt, is in deze masterproef van minder belang. De mate van mobiliteit van de reactor echter en het effect hiervan op de rendabiliteit van het investeringsproject zijn parameters die we in deze masterproef trachten te onderzoeken. Er kunnen 3 opstellingen onderscheiden worden voor de pyrolysereactoren:

- Centrale reactor
- Modulaire reactor
- Mobiele reactor

4.2.1 Centrale reactor

De meest conventionele vorm van pyrolyse is momenteel een centrale reactor. De biomassa wordt geleverd aan de centrale reactor waar de biomassa wanneer nodig gebruiksklaar wordt gemaakt en omgezet wordt in pyrolyse-olie. De pyrolyse-olie kan vervolgens al dan niet rechtstreeks omgezet worden in elektriciteit en warmte door de integratie van de energieproducerende processen.

4.2.2 Modulaire reactor

De modulaire en mobiele pyrolyse reactor zijn ontworpen met het oog op het onderzoeken naar efficiëntere vormen van pyrolyse door de mogelijkheid om de verwerkingskosten van biomassa te reduceren.

De modulaire reactor is een tussenvorm van een centrale reactor en een mobiele reactor. Hij combineert de grootschaligheid van een centrale reactor met het mobiele karakter van de mobiele reactor. Zulke grote en mobiele reactoren zijn vooral nuttig waar zich grote hoeveelheden biomassa op één locatie bevinden. De modulaire reactor dient bijgevolg minder keren per jaar verplaatst te worden.

Advanced BioRefinery Inc (ABRI) is gecontracteerd door de overheid van Ontario om een modulaire reactor te bouwen. Deze modulaire reactor is een mechanisme, bestaande uit 6 grote modules van elke 5 tot 6 meter lang, die binnen een week tijd makkelijk vervoerd en opgesteld kan worden, en 50 tds per dag kan verwerken. De biomassa wordt omgezet in 60% pyrolyse-olie en 40% biochar en gas. De char en gas worden aangewend voor de productie van warmte voor het pyrolyseproces en het drogen van de biomassa. (enerG Magazine, 2007)

4.2.3 Mobiele reactor

Momenteel zijn er verschillende ondernemingen en universiteiten die een mobiele pyrolyse reactor in onderzoek, ontwikkeling en/of gebruik hebben, namelijk:

- Universiteit van Purdue
- Universiteit van Auburn
- A&M universiteit in Texas (Palma et al., 2011)
- Het Amerikaans bedrijf Re:char
- Het Australisch bedrijf Bigchar
- Samenwerking tussen de universiteiten van Montana, Idaho, Rocky Mountain Research Station en Renewable Oil International LLC
- Samenwerking tussen onderneming Agri-therm en de universiteit van Ontario

De mobiele pyrolysereactoren van Re:char en Bigchar werden ontwikkeld met het oog op de productie van een zo groot mogelijk fractie koolstofrijke biochar. Verschillende reststromen uit landbouw en bosbouw worden omgezet tot biochar, dat kan dienen als bodemverbeteraar. Re:char is in dit opzicht zeer actief in Kenia om de vruchtbaarheid van de arme grond te bevorderen. De mobiele reactor kan 1 ton per uur verwerken. (aramburu, 2011)

Sorenson heeft onderzoek verricht, in naam van de universiteit van Montana en in samenwerking met Badger en Renewable Oil international (ROI), naar de toepasbaarheid van pyrolyse in het zuidwesten van Oregon. In dit onderzoek wordt het potentieel van een 50 tds per dag mobiele pyrolyse eenheid vergeleken met een 200 tds per dag centrale reactor voor het verwerken van houtafval uit de bossen van Oregon. De opbrengst aan pyrolyse-olie wordt voor beide systemen gelijkgesteld aan 57%. Uit het onderzoek wordt geconcludeerd dat de arbeidskosten bij centrale pyrolyse door zijn schaalvoordelen lager liggen, terwijl de grondstofkosten hoger zijn tengevolge van een hogere transportkost. De investeringskost bedraagt bij centrale pyrolyse aanzienlijk meer door de aanschaf van gronden, opslagplaats, bedrijfsruimte. (Sorenson, 2010)

Deze uitsparing in investeringskosten wordt ook bevestigd uit onderzoek van Badger & Fransham (2006) waarbij het potentieel van een mobiel pyrolysesysteem wordt besproken. Hierbij wordt geconcludeerd dat de investeringskost van een biomassa verwerkingsysteem gelijkaardig is aan de investeringskost van een bio-olie verwerkingsysteem maar dat er bij een bio-olie verwerkingsysteem gespaard kan worden op ruimte waardoor de grondkosten aanzienlijk lager liggen. De opslagkosten voor biomassa bijvoorbeeld bedragen veel meer in vergelijking met die van pyrolyse-olie doordat deze laatste veel efficiënter opgeslagen kan worden. Tenslotte raden Badger & Fransham (2006) aan om het omzetten van biomassa tot pyrolyse-olie zo kort mogelijk

bij de oogstlocatie uit te voeren om zo de oogst-, transport- en verwerkingskosten, te reduceren.

Het Canadese Agri-therm, in samenwerking met de universiteit van Ontario, heeft een mobiele pyrolyse reactor ontwikkeld met een capaciteit van 10 tds per dag. (Agri-therm, 2010) De reactor kan een verscheidenheid aan biomassatypes verwerken en is ontwikkeld voor het verwerken van agrarische reststromen op boerderijen. (Bradley, 2006) De geproduceerde gassen worden aangewend om het proces op temperatuur te houden. (Briens et al., 2009) De reactor van Agri-therm is één van de weinige reactoren die momenteel commercieel aangeboden worden.

Advanced Biorefinery Inc. (ABRI), gevestigd in Ottawa, heeft een mobiele pyrolyse reactor gebouwd en getest. De reactor wordt geacht bosafval te verwerken tot pyrolyse-olie. Daarnaast wordt een modulaire pyrolyse reactor met een capaciteit van 50 ton droge stof per dag gebouwd voor het verwerken van bos- en landbouwfal. (Bradley, 2006)

4.3 Eindproducten

Het pyrolyseproces maakt drie hoofdproducten aan: pyrolyse-olie, biochar en gas. Daarnaast ontstaan er ook enkele bijproducten zoals assen en emissies. (Siemons, 2005)

4.3.1 *Pyrolyse-olie*

Pyrolyse-olie is een donkerbruine vloeistof, afkomstig uit plantaardig/organisch materiaal door de omzetting van biomassa. Het is niet gelijkaardig aan plantaardige olie of aardolie omdat het ook vocht bevat. De olie heeft een dichtheid van 1,2 kg/liter en een stookwaarde van 16-19 MJ/kg, zoals weergegeven in tabel 2. (Bridgwater, 2011; Venderbosch & Prins, 2009). Daarnaast is pyrolyse-olie inert en niet giftig waardoor de olie bij morsen weinig risico inhoudt voor de natuur in vergelijking met fossiele brandstoffen. (Bradley, 2006) Toch bestaat pyrolyse-olie voor 38 procent uit zuurstof en bezit het een lage pH-waarde van 2,5 waardoor het bepaalde materialen aantast. (Bridgwater, 2011) De lage zuurgraad van pyrolyse-olie zorgt voor corrosie van opslagtanken en pijpleidingen. De olie dient bijgevolg vervoerd en opgeslagen te worden in roestvrije of uit plastic vervaardigde opslagcontainers. (Brown & Holmgren, sd)

Tabel 2: Typische kenmerken van pyrolyse-olie uit hout

Parameter	Typische waarde
Dichtheid (kg/m ³)	1 200
Vochtgehalte (%)	25
Zuurgraad (pH)	2,5
Verbrandingswaarde (HHV)(MJ/kg)	17
Vaste stoffen (biochar)(%)	0,1

bron : Bridgwater, 2011

Het vochtgehalte van pyrolyse-olie bedraagt ongeveer 15–35 %wt. Dit hoog vochtgehalte resulteert in een lage verbrandingswaarde van 19 MJ/kg voor pyrolyse-olie in vergelijking met 42-44 MJ/kg voor conventionele oliebrandstoffen. Toch bevordert het vochtgehalte tevens de stabiliteit van de olie en vermindert het de viscositeit waardoor de olie makkelijker getransporteerd of gepompt kan worden. (Venderbosch & Prins, 2009)

De char kan niet volledig gescheiden worden tijdens het pyrolyseproces. De pyrolyse-olie bevat bijgevolg een kleine fractie char. Dit is echter nadelig om verschillende redenen. De fractie char in de pyrolyse-olie versnelt namelijk het verouderingsproces van de olie. Maar ook de filter en andere delen van de reactor kunnen geblokkeerd geraken door de char. (Bridgwater, 2011)

Wanneer de geproduceerde pyrolyse-olie geproduceerd wordt uit met zware metalen vervuilde biomassa, kan de olie een kleine fractie char bevatten. Toch blijft de olie zo goed als vrij van zware metalen wanneer de procestemperatuur 450°C of lager bedraagt, zoals weergegeven in tabel 3. Enkel een verwaarloosbare fractie zware metalen is aanwezig in de olie. Het merendeel van de zware metalen wordt verzameld in de char en de assen. (Lievens et al., 2008a) We veronderstellen dan ook dat deze kleine verwaarloosbare fractie zware metalen in de pyrolyse-olie de kwaliteit en de economische waarde van de olie niet beïnvloeden.

De kwalitatieve samenstelling van de pyrolyse-olie is voornamelijk afhankelijk van de biochemische samenstelling van de biomassa (de cellulose, hemi-cellulose en lignine-inhoud), het as- en vochtgehalte, en de stukgrootte van de biomassa. (Lievens et al., 2008b)

Tabel 3: Kenmerken pyrolyse-olie bij biomassa uit fyto-remediatie

	Temperatuur (°C)		
	350	450	550
Opbrengst pyrolyse-olie (%)	40	52	43
Vochtgehalte (%)	48	39	51
HHV (pyrolyse-olie) (MJ/kg)	13,4	15,6	14,7
Cd concentratie (mg/kg)	0,39	0,90	16

Bron: (Stals et al., 2010b)

Hoe hoger het vochtgehalte van pyrolyse-olie, hoe lager de stookwaarde. Dit komt doordat brandstoffen met een hoger vochtgehalte per definitie een lager gehalte aan brandbaar materiaal hebben. Ook wordt extra energie verbruikt voor het verdampen van het water. Opdat een brandstof ontvlamd zou kunnen worden, dient het een vochtgehalte van niet meer dan 55% te hebben. (European Commission, 2005) De hoeveelheid as is belangrijk omdat het de gedragingen van biomassa bij hoge temperaturen beïnvloedt. Hoeveelheden gesmolten as kunnen voor problemen zorgen tijdens het verbrandingsproces.

De waarde van pyrolyse-olie wordt bepaald door de vele toepassingen waarvoor de olie gebruikt kan worden. Hieronder bespreken we enkele van deze toepassingen.

a) Productie van energie

Pyrolyse-olie kan direct verbrand worden in boilers en gasturbines voor de productie van warmte en elektriciteit. (Bradley, 2006) De olie kan hierbij als substituut instaan voor zowel aardgas als lichte en zware olie in industriële toepassingen. (Tree Energy B.V., 2009)

Voor de productie van warmte kan pyrolyse-olie instaan ter vervanging van aardgas, zware stookolie, en steenkool wanneer bijvoorbeeld pyrolyse-olie wordt toegevoegd bij de co-verbranding in energiecentrales. Wanneer toegepast in pulpfabriek kalkovens kan pyrolyse-olie zowel aardgas als stookolie vervangen. Tenslotte kan pyrolyse-olie ook industriële diesel vervangen in stationaire motoren of turbines. (Bradley, 2006) In Nederland zijn tests, uitgevoerd rond het bijstoken van pyrolyse-olie in een gasgestookte elektriciteitscentrale, succesvol gebleken. (Tree Energy B.V., 2009):

Verder is pyrolyse-olie ook getest op het opwekken van elektriciteit in dieselmotoren en gasturbines. Momenteel zijn er gasturbines die aangepast zijn om te werken op pyrolyse-

olie. De aanpassingen voor dieselmotoren voor het opwekken van elektriciteit is nog in de ontwikkelingsfase. (Tree Energy B.V., 2009):

b) omzetten tot andere energiedragers

Pyrolyse-olie kan verwerkt worden tot vele andere energiedragers. Siemons (2005) geeft diverse transitiepaden weer waarin pyrolyse-olie in de toekomst een rol kan spelen. In Nederland bijvoorbeeld tracht men momenteel in een transitieproject pyrolyse-olie op te waarderen. Hierbij wordt een techniek gebruikt die de pyrolyse-olie moet omvormen tot een groen gas. Dit groen gas dient als vervanging in te staan van aardgas in de distributie in het aardgasnet.

Via het opwerken van pyrolyse-olie, co-raffinage of het omzetten in syngas gevolgd door synthese kunnen transportbrandstoffen uit pyrolyse-olie worden geproduceerd. Toch vraagt directe opwerking nog een aantal jaren onderzoek. Syntheseprocessen zoals Fischer-Tropsch bestaan al, waarbij syngas uit vergassing van biomassa of pyrolyse-olie wordt gebruikt om een diesel van zeer hoge kwaliteit te produceren. Deze diesel kan gebruikt worden als brandstof zonder dat daar aanpassingen aan motoren voor nodig zijn. (Tree Energy B.V., 2009):

c) bron van chemische elementen.

Pyrolyse-olie is ook rijk aan allerlei chemische bestanddelen. De waardevolle chemische producten kunnen uit pyrolyse-olie bekomen worden, zoals voedseladditieven, conserveringsmiddelen, en kleur-, geur- of smaakstoffen. Deze toepassing is tevens in de ontwikkelingsfase. (Tree Energy B.V., 2009; Badger & Fransham, 2006)

Om pyrolyse-olie echter nog meer aantrekkelijk te maken voor de markt moeten nog enkele taken uitgevoerd worden: trachten corrosie van de reactor te voorkomen, stabiliteit van de olie verbeteren, verhogen van de stookwaarde.

4.3.2 Biochar

Uit de pyrolyse van met zware metalen vervuilde biomassa ontstaat een biochar die metalen verzamelt in de vorm van een metaal concentraat dat mogelijk commercieel verwerkt kan worden. (Lievens et al., 2008a; 2009)

Een snelle en doeltreffende scheiding van de char met de pyrolysedampen is noodzakelijk om secundaire reacties te beperken. Een cycloon staat meestal in voor de scheiding maar een volledige scheiding is echter nooit mogelijk. Kleine chardeeltjes komen terecht in de pyrolyse-olie waardoor de veroudering van de olie versnelt en de stabiliteit verminderd. (Bridgwater, 2011)

Het doel bij pyrolyse van hout uit fyto-remediatie is de concentratie van zware metalen in de char te maximaliseren. Dit wordt bereikt bij een lage procestemperatuur van 350°C tot 450°C. Bij een hoge procestemperatuur van 550°C worden de cadmiumdeeltjes vluchtig waardoor zij zich mengen met de condenseerbare gassen en de concentratie van zware metalen in de char aanzienlijk verlaagd wordt. (Stals et al., 2010b)

Wanneer fast pyrolyse wordt toegepast op niet-vervuilde biomassa ontstaat echter een zuivere char die vele praktische toepassingen kent. Char is namelijk gelijkaardig aan houtskool en ontstaat uit de restanten van biomassa die niet volledig gepyrolyseerd werden tijdens het pyrolyseproces. Char bestaat uit 65 tot 76% koolstof, 5 tot 12% assen en 2% vocht. Char is net als biomassa een bulkproduct en heeft een dichtheid van 250 tot 3 000 kg/m³, afhankelijk of de char al dan niet verdicht werd. De energiedichtheid van char bedraagt 28 tot 30 GJ/ton. (Bradley, 2006)

Biochar biedt de mogelijkheid om de voedingstoffen, verwijderd uit de biomassa, terug aan te brengen in de bodem. Zowel het opnieuw aanbrengen van voedingstoffen in de bodem als het vastleggen van koolstof in de bodem kan mogelijk meer waarde hebben dan eender welk alternatief. (Coleman et al., 2010) Net als biomassa is biochar een bulkproduct met een lage dichtheid en de transportkost zou de marktwaaarde voor biochar kunnen overschrijden waardoor het voordeliger is om de biochar ter plekke achter te laten. (Coleman et al., 2010)

Verder kan char gebruikt worden in toepassingen waarvoor moderne houtskool wordt gebruikt, zoals lucht- en waterfiltratie, tuinbouw, bioremediatie, medische of andere doeleinden. (Coleman et al., 2010) Ten slotte kan char omgezet worden in actieve carbon, zwarte carbon of gepelletiseerde brandstof. (Venderbosch & Prins, 2009)

Er dient opgemerkt te worden dat alle bovenstaande doeleinden voor char enkel van toepassing zijn wanneer het zuivere char betreft. Wanneer de char echter vervuild is met zware metalen dient deze gestort te worden.

4.3.3 Syngas

Het gasvormige bijproduct, voornamelijk een mengeling van CO en CO₂, kan ook gebruikt worden voor energieproductie in een motor. (Venderbosch & Prins, 2009) In de literatuur wordt pyrolysegas voornamelijk vermeldt als energiebron voor het pyrolyseproces. De reactor dient initieel opgewarmd te worden door een externe energiedrager. Van zodra het pyrolyseproces producten aanmaakt kan het aangemaakte gas aangewend worden om het pyrolyseproces op temperatuur te houden. Wanneer voldoende gas wordt aangemaakt is het zelfs mogelijk om overtollig gas te gebruiken voor het drogen van de biomassa. Dit creëert een systeem waarbij alle producten gebruikt of verkocht kunnen worden.

DEEL II

ECONOMISCHE ASPECTEN

Hoofdstuk 5: Methodologie

Nu de technische aspecten gekend zijn, kunnen we dieper ingaan op de bespreking van de economische aspecten. De rendabiliteit van mobiele pyrolyse wordt immers doormiddel van economische maatstaven vergeleken met centrale pyrolyse. Om een vergelijking van de pyrolysesystemen te vereenvoudigen wordt eerst een logistiek model ontwikkeld. Dit logistiek model moet de belangrijke opslaglocaties en goederenstromen visueel verduidelijken. Ten slotte wordt dit hoofdstuk afgesloten met een bespreking van de economische maatstaven waaraan beide pyrolysesystemen getoetst worden.

5.1 Logistiek model

De optimale opstelling voor een pyrolysesysteem zou een pyrolyse reactor zijn, gelegen in een regio met hoge biomassaconcentratie. Dit is echter niet altijd het geval, zodat de biomassa vaak over een bepaalde afstand getransporteerd moet worden. Hierdoor ontstaat een logistiek (transport & opslag) probleem. Biomassa is immers een bulkproduct met als gevolg dat de logistieke kosten snel oplopen en er gezocht moet worden naar alternatieve en efficiënte benaderingen zoals mobiele pyrolyse.

In deze paragraaf wordt een logistiek model voor pyrolysesystemen ontwikkeld, dat vervolgens omgevormd wordt tot een model voor de gevalstudie in de Kempen. Dit model moet de opstelling van reactoren, regio's en intermediaire opslagplaatsen verduidelijken, alsook de verschillende goederenstromen in kaart brengen. Bovendien wordt een vergelijking tussen een mobiel en centraal pyrolysesysteem vereenvoudigd. Dit logistiek model vormt het uitgangspunt voor ieder pyrolysesysteem. Daarom is het belangrijk dat het model flexibel en eenvoudig van structuur is. Vanuit dit model kunnen vervolgens verschillende scenario's met diverse logistieke opstellingen uitgewerkt worden.

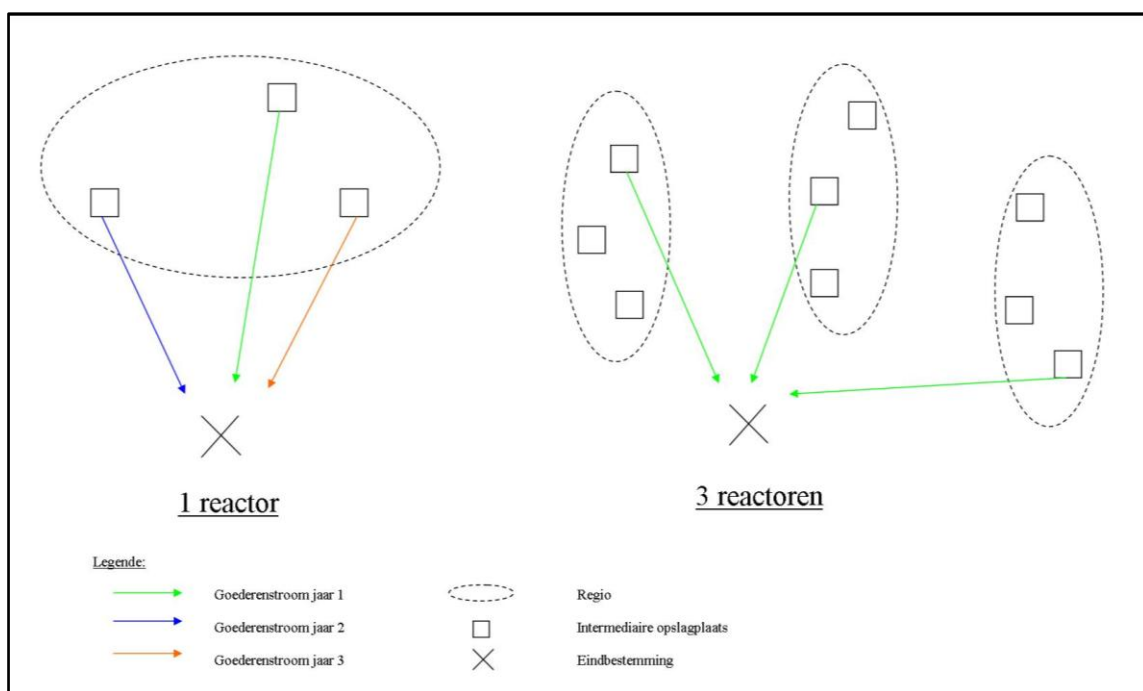
Het logistiek model wordt door slechts 2 parameters bepaald:

- Het aantal reactoren
- Het aantal intermediaire opslagplaatsen per regio

Het aantal reactoren dat ingezet wordt is afhankelijk van de omgeving, dat bestaat uit het aanvoergebied van de biomassa. In een situatie waar de biomassa sterk geconcentreerd is binnen één regio kan één reactor, al dan niet transporteerbaar, vaak aangewezen zijn. Wanneer echter de biomassa zich in clusters bevindt, waar de biomassa sterk geconcentreerd is binnen één regio maar de afstand tussen de regio's groot is, kunnen meerdere kleine reactoren aangewezen zijn. Tot slot is er nog de situatie waar de afstand tussen de regio's groot is en de biomassa binnen iedere regio sterk verspreid is. In dit geval stijgen zowel de transport-, opslag- en opstartkosten, en is pyrolyse minder aangewezen zodat het vrijkomende hout beter gebruikt kan worden voor alternatieve doeleinden.

In het logistiek model zal iedere reactor één en slechts één regio bedienen. Hierdoor wordt het aantal regio's gelijkgesteld aan het aantal reactoren. Wanneer meerdere regio's worden opgenomen in het model wordt verondersteld dat deze regio's relatief homogeen zijn in omvang, en in de hoeveelheid biomassa die vrijkomt. De opstelling van een pyrolysesysteem met één en drie reactoren is in volgende figuur afgebeeld.

Figuur 3 : Basismodel voor een één- en drie-reactor opstelling



Binnen iedere regio moet de aanplanting zo gebeuren dat de houtoogst per jaar voldoende gespreid is. Bij een oogstcyclus van 3 jaar moet bijgevolg ieder jaar 1/3 van

de regio aangeplant worden zodat jaarlijks eenzelfde hoeveelheid biomassa zal vrijkomen en de reactor jaarlijks 1/3 van de regio kan bedienen. Na 3 jaar heeft de reactor dan een volledige regio bediend en kan de cyclus opnieuw van start gaan. Om deze reden heeft iedere regio minstens 3 intermediaire opslagplaatsen nodig waarvan het aanvoergebied van iedere opslagplaats zich beperkt tot 1/3 van de regio.

Er kan echter ook gekozen worden om het aantal opslagplaatsen te verhogen. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om het erf van de landbouwers als opslagplaats te beschouwen wat het aantal opslagplaatsen doet stijgen. Hierdoor moet de reactor meerdere malen per jaar verplaatst worden met hogere transport- en opstartkosten tot gevolg. Dit zal ook invloed hebben op de opslagkosten. Deze stijgen door het verliezen van schaalvoordelen.

Opslag is een belangrijk element in het logistiek model. Samen met het aantal reactoren bepaalt de opstelling van de opslag hoe de jaarlijkse goederenstromen geregeld worden. Samengevat zal een intermediaire opslagplaats volgende wijzigingen inhouden tegenover de opslag op het erf van de landbouwer:

- biomassa afkomstig uit een groter aanvoergebied
- daling in opslagkosten door schaalvoordelen
- stijging van transportkost (uitrijden van biomassa)
- lagere laadkosten voor olietransport
- lagere opstartkosten door minder verplaatsingen van de mobiele reactor

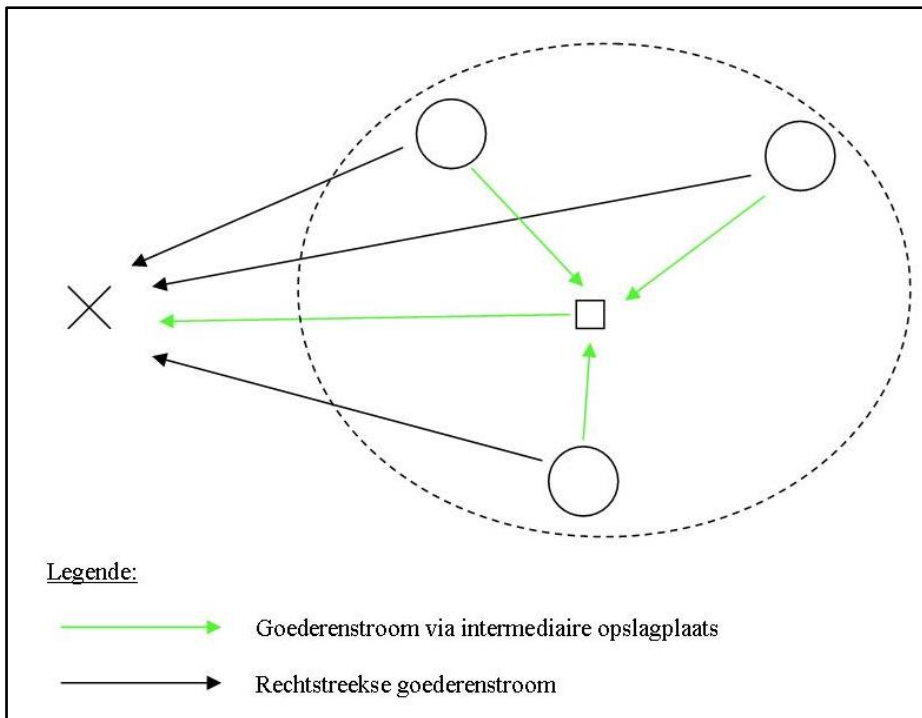
Het gebruik van een intermediaire opslagplaats garandeert grotere hoeveelheden biomassa per opslagplaats doordat de biomassa afkomstig is van een groter aanvoergebied in vergelijking met bijvoorbeeld het erf van slechts één landbouwer. Hierdoor ontstaan schaalvoordelen in de opslag met een lagere opslagkost tot gevolg.

De transportafstand voor het uitrijden van de biomassa stijgt doordat de landbouvvelden verder gelegen zijn van een intermediaire opslagplaats in vergelijking met het erf van de landbouwers. Toch zal deze stijging in een regio met zeer geconcentreerde biomassa geen grote impact kennen.

De kost voor olietransport wordt verondersteld te dalen. De grotere schaal van een intermediaire opslagplaats zorgt er immers voor dat de kans op het vervoeren van een volle tank vergroot wordt waardoor de laadkosten per rit gereduceerd worden. Een tankwagen dient namelijk slechts maar één opslagplaats per rit te bezoeken voor een volle tank pyrolyse-olie te kunnen vervoeren.

De gemiddelde transportafstand voor pyrolyse-olie wordt verondersteld niet tot nauwelijks te wijzigen. Uit figuur 4 is namelijk te zien dat de gemiddelde afstand voor rechtstreekse goederenstromen gelijkaardig is aan de afstand vanuit de intermediaire opslagplaats. Dit klopt wanneer de intermediaire opslagplaats centraal van de verschillende landbouwers gelegen is.

Figuur 4 : Vergelijking van goederenstromen



De transportafstand voor de reactor zelf kent een sterkere wijziging. De reactor moet namelijk niet van landbouwer tot landbouwer verplaatst worden maar kan gedurende een jaar geplaatst worden op een intermediaire opslagplaats. Dit heeft tevens zijn effect op de opstartkosten die zich bij iedere verplaatsing voordoen. Iedere mobiele reactor moet immers initieel op procestemperatuur worden gebracht alvorens het pyrolyseproces van start kan gaan. Iedere verplaatsing houdt bijgevolg in dat dit opstartproces steeds opnieuw uitgevoerd moet worden. Grotere opslagplaatsen betekenen minder verplaatsingen met lagere transport- en opstartkosten voor de reactor tot gevolg.

De afstand die een reactor moet afleggen kan oplopen wanneer het aantal opslagplaatsen stijgt. Wanneer de reactor bijvoorbeeld verplaatst wordt van landbouwer tot landbouwer kan deze al snel 10 tot 20 verplaatsingen per jaar bezoeken. Om deze transportafstand te schatten kan gebruik gemaakt worden van de 'one-to-many shipping'

benadering. De verplaatsingen van de reactor volgen namelijk een 'traveling salesman problem' (TSP) waarbij de reactor binnen een service regio enkele punten moet doorlopen. Een optimale TSP tour kan geschat worden waarbij de transportafstand benaderd wordt door volgende formule, opgesteld door Beardwoor et al. (1959) en verbeterd door Daganzo (1999):

$$D \approx \xi(n) \times \sqrt{An}$$

Hierbij is:

- D = de optimale TSP afstand
- n = het aantal punten dat bezocht moet worden
- A = oppervlakte van de service regio
- $\xi(n)$ = een constante, afhankelijk van n, waarbij :
 $\xi(n) = 0,57$ voor $n > 6$ en
 $\xi(n) = 0,73$ voor $n = 2$

De opstelling van het logistiek model wordt verkregen door 2 eenvoudige vergelijkingen, namelijk:

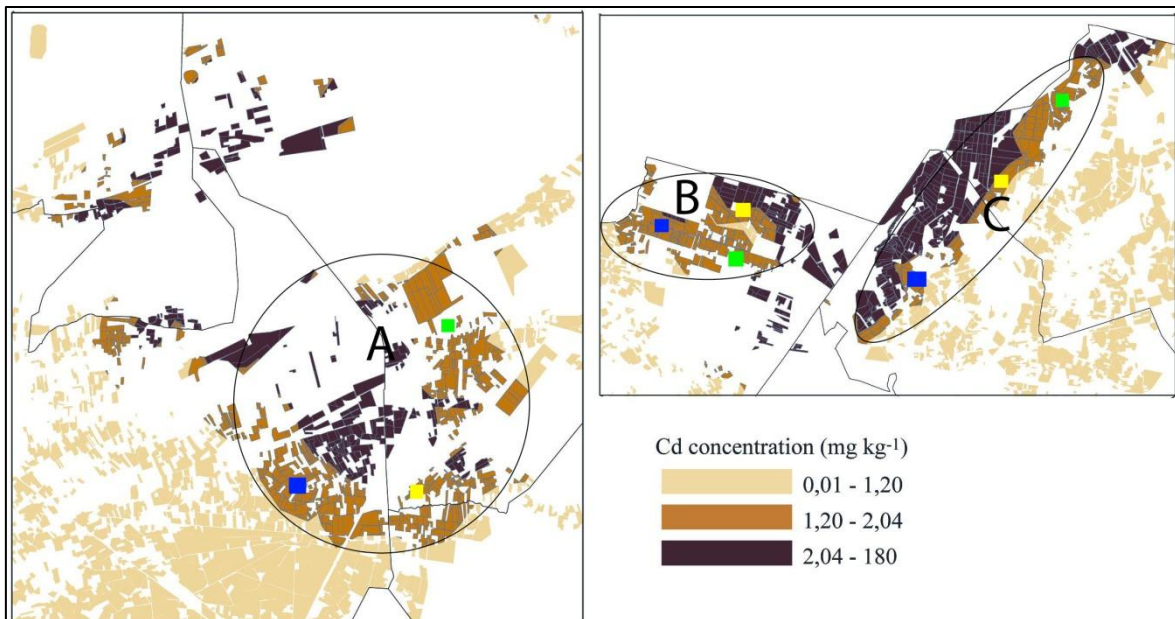
- Het aantal reactoren = het aantal regio's
- Het aantal intermediaire opslagplaatsen per regio = drie keer het aantal reactorverplaatsingen per jaar

Hierbij wordt het aantal reactoren bepaald door de eigenschappen van het aanvoergebied en de concentratie van de biomassa. Het aantal opslagplaatsen kan vrij bepaald worden waarbij een afweging gemaakt moet worden tussen de kostenwijzigingen in de volgende kosten: transport-, opslag-, en opstartkosten.

5.2 gevalstudie

Nu we een logistiek model hebben geformuleerd kunnen we dit toepassen op de gevalstudie in de Kempen. Het aanvoergebied van de biomassa strekt zich uit over 3 regio's, weergegeven als regio A, B en C op figuur 5. Er wordt verondersteld dat iedere regio eenzelfde hoeveelheid biomassa produceert zodat iedere regio gelijkaardig behandeld kan worden en elk een mobiele reactor toegewezen krijgt.

Figuur 5 : Aanvoergebieden per intermediaire opslagplaats en per regio



Bron: Schreurs *et al.* (2011)

Voor zowel mobiele als centrale pyrolyse ontwikkelen we een basismodel dat op het einde van de masterproef vergeleken kan worden met verschillende scenario's. Het basismodel voor mobiele pyrolyse bestaat uit 3 regio's. Dit houdt in dat er 3 reactoren worden ingezet die zich elk jaarlijks eenmaal verplaatsen. In hoofdstuk 6 worden de economische aspecten van een dergelijke opstelling uitgewerkt. In de scenarioanalyse wordt vervolgens nog afgeweken van dit basismodel om te onderzoeken of mobiele pyrolyse niet voordeliger uitgevoerd kan worden onder een andere logistieke opstelling. De biomassa in deze gevalstudie is immers redelijk geconcentreerd binnen het aanvoergebeid. Er kan dus evenzeer gekozen worden om te werken met één reactor. Toch heeft de keuze van het werken met 3 reactoren het voordeel dat dit model eenvoudig uitbreidbaar is naar meerdere scenario's.

In hoofdstuk 7 worden de economische aspecten van centrale pyrolyse onderzocht en vergeleken met mobiele pyrolyse. Centrale pyrolyse heeft een logistiek model met 1 reactor die nooit verplaatst wordt. Hierdoor wordt het aanvoergebiet beperkt tot 1 regio en 0 intermediaire opslagplaatsen. Dit klopt aangezien de intermediaire opslagplaatsen bij centrale pyrolyse enkel instaan als overzetlocatie waar de biomassa mogelijk overgezet kan worden naar een transportmodus met hogere capaciteit en efficiëntie.

5.3 Beoordeling van investeringen

Een investering kan omschreven worden als de aanschaf van een kapitaalgoed met een levensduur van meer dan 1 jaar zoals bedrijfsgebouwen, machines, wagens of computers. Laveren et al. (2004) voegen hieraan toe dat de aangekochte middelen (uitgaande kasstromen) aangewend worden met het oog op de verwerving van toekomstige inkomsten (inkomende kasstromen) gespreid over een aantal jaren. Een investeringsproject kan namelijk voorgesteld worden als een verzameling verwachte kasstromen die de basis vormen voor een economische evaluatie van het investeringsproject. (Mercken, 2004)

Het beoordelen van meerdere investeringsprojecten dient te gebeuren via het gebruik van verschillende evaluatiemethoden of economische maatstaven. In deze studie zullen we de investeringen beoordelen aan de hand de netto contante waarde methode. De resultaten van deze methode vormt de basis voor een vergelijkend kader tussen de investeringsprojecten. De evaluatiemethode dient echter wel aan bepaalde basisprincipes te voldoen die hieronder kort worden toegelicht. Laveren et al. (2004) stellen de volgende basisprincipes op bij de bepaling van de kasstromen.

1. In de investeringsanalyse mogen enkel fysieke geldstromen worden opgenomen.
2. Enkel differentiële kasstromen moeten bij de bepaling van de relevante kasstromen worden opgenomen.
3. Inflatie moet op een consistente wijze worden behandeld.
4. De kasstromen moeten na aftrek van de belastingen worden bepaald.
5. Kasuitgaven voor intrestbetalingen worden normalerwijze niet bij de bepaling van de relevante kasstromen opgenomen.

In de evaluatiemethoden wordt rekening gehouden met de tijdswaarde van het geld. Het is bijgevolg logisch dat enkel fysieke geldstromen (inkomsten en uitgaven) worden opgenomen in de investeringsanalyse. Kasstromen worden dus enkel in de analyse opgenomen wanneer zij daadwerkelijk ontvangen of betaald worden en niet op het ogenblik van de boekhoudkundige registratie. Wanneer er verder in dit werk toch van kosten of opbrengsten wordt gesproken wordt er verondersteld dat er geen uitstel van betaling van toepassing is. Het gebruik van enkel fysieke geldstromen laat toe alle kasstromen, verspreid over verschillende perioden, te disconteren naar een huidige

waarde zodat ze beter vergeleken kunnen worden. Een euro nu is immers meer waard dan een euro in de toekomst doordat een euro nu de opportuniteit bezit om belegd te worden.

Onder differentiële kasstromen worden bijkomende kasstromen verstaan die ontstaan ten gevolge van de aanvaarding van een project en die zich niet zouden voordoen wanneer het project zou zijn verworpen. Principe 2 heeft geen toepassing in deze masterproef omdat principe 2 al bestaande activiteiten veronderstelt terwijl het in deze masterproef een onafhankelijk project betreft.

Wanneer men inflatie in beschouwing wil nemen tijdens de berekeningen is het belangrijk consistent te blijven. De kapitaalkost en de kasstromen dienen ofwel allen uitgedrukt te worden in nominale termen, ofwel in reële termen. Bij een verwachte constante inflatie leidt dit tot eenzelfde resultaat voor beide berekeningen. (Mercken, 2004)

Principe 4 komt voort uit het feit dat de belastingen vanuit het standpunt van de onderneming uitgaven vormen, veroorzaakt door het project, en bijgevolg dienen opgenomen te worden in de berekeningen.

Tenslotte worden de interestlasten niet opgenomen als kasuitgaven omdat deze tijdens de verdiscontering van de kasstromen al in rekening worden genomen.

5.4 Kasstromen

Kasstromen zijn het resultaat van een werkende onderneming. Een werkende onderneming kent namelijk veel uitgaande kasstromen die leiden tot hogere inkomende kasstromen. Er kunnen 3 soorten kasstromen onderscheiden worden die hier vervolgens besproken worden.

5.4.1 de initiële investeringskost

Bij het berekenen van de initiële investeringskost dient men niet enkel rekening te houden met de uitgaven voor het verwerven van vaste activa die in de balans worden opgenomen maar ook met de uitgaven die niet worden geactiveerd, maar die op het moment dat zij zich voordoen toch invloed uitoefenen op de resultatenrekening. Onder deze bijkomende uitgaven vinden we kasstromen zoals installatiekosten, invoerrechten, taksen, vervoerskosten, erelonen (Laveren et al., 2004)

De initiële investeringskost wordt samengesteld door de totale investeringskost te verminderen met de investeringsaftrek.

5.4.2 Kasstromen voortvloeiend uit het investeringsproject

De toekomstige kasstromen van een investeringsproject worden verkregen door jaarlijks de inkomsten te verminderen met de uitgaven voortvloeiend uit het project. (Laveren, 2004)

De kasstromen worden in de gevalstudie als volgt samengesteld:

$$\text{Kasopbrengsten } O_t = O_{vp} + O_s \quad (1)$$

Hierbij is:

- O_{vp} = opbrengsten uit de verkoop van geproduceerde pyrolyse-olie
- O_s = subsidies en steunmaatregelen

$$\text{Kaskosten } Q_t = \text{jaarlijkse werkingskosten} = Q_p + Q_v + Q_l + Q_a + Q_e + Q_h + Q_o \quad (2)$$

Hierbij is:

- Q_p = kostprijs van kortomloophout
- Q_v = transportkosten
- Q_l = personeelskosten
- Q_a = afvoer van assen
- Q_e = energiekosten
- Q_h = herstelling- en onderhoudskosten
- Q_o = overheadkosten

Gegevens verkregen in USD worden eerst omgezet naar USD-waarden voor 2010 en vervolgens naar EUR via de wisselkoers van 31 december 2010 waarbij 1 EUR = 1.3362 USD. Voor gegevens uitgedrukt in GBP wordt de wisselkoers van 31 december 2010 van 1 EUR = 0,85807 GBP gebruikt.

5.5 Netto contante waarde

Voor het bepalen van de netto contante waarde (NCW) van een investeringsproject berekent men de huidige waarde van de kasstromen van het project door die kasstromen te verdisconteren tegen een gekende kapitaalkost (r). Deze kapitaalkost wordt ook wel het vereist rendement genoemd. De netto contante waarde van een project is de som van de geactualiseerde kasstromen over de levensduur van het investeringsproject. Een investeringproject is rendabel wanneer de NCW positief is. Een project met een positieve NCW wordt aldus aanvaard terwijl een project met een negatieve NCW wordt verworpen. (Mercken, 2004) Doordat de netto kasstromen contant zijn over de levensduur van het project wordt de netto contante waarde van het project berekend met volgende formule:

$$NCW = \sum_{t=1}^n (a_{n-r} * K_t) - I_0 \quad (3)$$

Hierbij is:

- K_t = netto kasstroom in jaar $t = O_t - Q_t$
- a_{n-r} = actualisatiefactor
- I_0 = initieel investeringsbedrag in jaar 0
- n = economische levensduur van het project
- r = kapitaalkost na belastingen

$$\text{En } a_{n-r} = \frac{1-(1+r)^{-n}}{r} \quad (4)$$

De vennootschapsbelasting is een winstbelasting op het boekhoudkundige resultaat van de onderneming en vormen dus een uitgaven in periode t . De belastingen, en in het bijzonder de vennootschapsbelastingen, oefenen bijgevolg een zeer grote invloed uit op het resultaat van de investeringscalculatie. De belastingen kunnen de NCW-berekening namelijk op 2 manieren beïnvloeden. Enerzijds is er het belastingschild van de interesten. Hierbij wordt iedere euro betaalde interest gezien als 1 euro extra kost waardoor er 1 euro minder winst gemaakt wordt en de belastingen bijgevolg dalen met b euro. Anderzijds beïnvloeden de belastingen de NCW berekeningen door het belastingschild van de afschrijvingen. Ook hier betreft het een kostenpost, namelijk de afschrijvingen, die leidt tot mindere winst en daardoor minder belastingen en minder uitgaande kasstromen. Het verschil tussen beide belastingschilden vindt men in de

verwerking. Bij het belastingschild van de interesten wordt de invloed van de belastingen geïntegreerd in de kapitaalkost via volgende formule:

$$\text{Kapitaalkost na belastingen } r = (1 - b) \times r^* \quad (5)$$

Hierbij is:

- b = belastingsvoet
- r^* = kapitaalkost voor belastingen

Bij het belastingschild van de afschrijvingen echter wordt het belastingseffect in rekening gebracht via de kasstromen. De kasstromen voor en na belastingen voor periode t worden weergegeven door:

$$\text{De kasstromen voor belastingen voor periode } t = O_t - Q_t \quad (6)$$

$$\text{kasstromen na belastingen voor periode } t = O_t - Q_t - B_t \quad (7)$$

Hierbij is:

- $B_t = \text{winstbelasting} = b \times (O_t - C_t) \quad (8)$

- $C_t = \text{volledige kosten (kaskosten + niet-kaskosten)} = Q_t + A_t \quad (9)$

We kunnen dus stellen dat de winstbelastingen een dubbel effect uitoefenen op de NCW. Door de belastingen in rekening te brengen wordt formule (3) omgevormd tot volgende formule:

$$\text{NCW} = \sum_{t=1}^n a_{n-r} * [(1-b)*K_t + b(I_0/n)] - I_0 \quad (10)$$

We passen formule (10) toe voor de berekening van de NCW van de projecten.

Hoofdstuk 6: Mobiele pyrolyse

6.1 Productie en reactor veronderstellingen

6.1.1 *Capaciteit*

De bezettingsgraad van de pyrolyse reactor is een belangrijke parameter. Deze bepaalt immers hoeveel biomassa er per jaar verwerkt kan worden en dus hoeveel pyrolyse-olie en biochar geproduceerd wordt. Sorenson (2010) hanteert voor zowel mobiele pyrolyse als voor centrale pyrolyse ongeveer gelijkaardige bezettingsgraden van respectievelijk 87,5% en 90%. Men kan dus stellen dat de bezettingsgraad niet sterk verschilt tussen beide systemen. De lagere bezettingsgraad voor mobiele pyrolyse kan verklaard worden doordat de reactor verplaatst dient te worden. Het aantal verplaatsingen in onze gevalstudie wordt beperkt tot slechts eenmaal per jaar waardoor er nauwelijks een verschil bestaat in de bezettingsgraad. Palma et al. (2011) rekenen op 290 tot 326 dagen productie voor een mobiele reactor wat overeen komt met een bezettingsgraad van 80-90%. Bridgwater et al. (2002) stellen de bezettingsgraad voor een centrale reactor gelijk aan 80%. Ook in dit onderzoek wordt de bezettingsgraad van beide systemen gelijkgesteld aan 80%. De mobiele reactoren worden verondersteld 24 uur per dag te werken. (Agri-therm, 2010) Verder wordt verwacht dat een reactor 365 dagen per jaar functioneel is waardoor de bezetting van de reactor gelijk is aan afgerond 7 000 h/jaar¹.

Onder de vooropgestelde productieassumpties kan een reactor met een capaciteit van 10 tds per dag rond de 2 920 tds² per jaar verwerken. Wanneer zoals in paragraaf 2.3 werd aangegeven jaarlijks 8 144 tds hout vrijkomt, dienen er drie mobiele reactoren ingezet te worden die samen 8 760 tds per jaar kunnen verwerken. De capaciteit van de reactoren wordt bij deze jaarlijkse houtopbrengst echter niet ten volle benut. Om dit probleem op te lossen wordt er verondersteld om 77 hectare landbouwgrond extra aan te planten waardoor er jaarlijks 616 tds meer hout vrijkomt en de jaarlijkse houtopbrengst gelijk wordt gesteld aan de jaarlijkse verwerkingscapaciteit van de 3 reactoren. Dit is een relatief kleine stijging van 7,5% tegenover de schattingen van Schreurs et al. (2011) en

¹ 7 008 h/jaar = 365 dagen x 24 h/dag x 80%

² 2920 tds = 365 dagen x 80% x 10 tds/dag

² 2920 tds = 365 dagen x 80% x 10 tds/dag

maakt het mogelijk om de capaciteit van de pyrolysereactoren bij een bezettingsgraad van 80% volledig te benutten. Er wordt in de Kempen dus 1 095 hectare landbouwgrond aangeplant met kortoomloophout dat tegen een houtopbrengst van 8 tds/ha jaarlijks 8 760 tds opbrengt.

6.1.2 Omzettingsfractie

Verscheidene literatuurbronnen, betreffende mobiele pyrolyse, hanteren opbrengsten aan pyrolyse-olie die variëren van 40 tot 60%, gebaseerd op verschillende soorten biomassa als grondstof. (Agri-Therm, 2010; Palma et al., 2011) Enkel Sorenson (2010) gebruikt in zijn onderzoek hout als grondstof voor een mobiele reactor. Hij onderzoekt in zijn werk zowel een mobiele als centrale 'moving bed' reactor, en gebruikt voor beide reactoren opbrengsten aan pyrolyse-olie van 57%, 27% biochar, 15% syngas en neemt 1% teerproductie in rekening.

In onderzoek van Stals et al. (2010a) wordt echter met zware metalen vervuild hout verwerkt via flash pyrolyse in een tubulaire quartzreactor. De pyrolyse van met zware metalen vervuild hout brengt in deze studie van Stals slechts 42-52% pyrolyse-olie op en 23-31% char, afhankelijk van de procestemperatuur en de samenstelling van de grondstof. Het is niet duidelijk in hoeverre deze lage opbrengsten het resultaat zijn van de vervuilde biomassa of het type reactor.

Toch worden de pyrolyse-opbrengsten in de literatuur betreffende fast pyrolyse hoger geschat dan de hierboven vermelde studies aangaande mobiele pyrolyse of pyrolyse van hout uit fyto-remediatie. Zo stelt Bridgwater (2011) dat pyrolyse tot wel 75 wt.% aan olie kan opleveren. Volgens Trippe et al. (2010) bedraagt de opbrengst aan pyrolyse-olie 50 tot 70%. Ook Venderbosch & Prins (2009) geven bij de verwerking van droog hout een opbrengst aan pyrolyse-olie van 60 tot 70 wt.%.

In deze analyse wordt een opbrengst aan pyrolyse-olie van 55% verondersteld, een charopbrengst van 25%, en wordt er 20% gas gevormd tijdens het pyrolyseproces. Met deze laatste gegevens als input voor ons model, zal één mobiele reactor 1 606 ton³ pyrolyse-olie en 730 ton⁴ char per jaar produceren. Bij drie mobiele reactoren loopt dit

³ 1 606 ton = 2920 tds/jaar x 55%

⁴ 730 ton = 2920 tds x 25%

op tot een jaarlijkse pyrolyse-olie productie van 4 818 ton en 2 190 ton char. De geproduceerde gassen worden aangewend voor de productie van proceswarmte.

Tabel 3 : Jaarlijkse in- en output

	Mobiele pyrolyse
Jaarlijks vrijkomende biomassa (Tds/j)	8 760
Jaarlijks geproduceerde pyrolyse-olie (ton)	4 818
Jaarlijks geproduceerde char (ton)	2 190

6.2 De initiële investering

6.2.1 *De totale investeringskosten*

De totale investeringskost is de som van alle eenmalige kosten die de investering in jaar 0 met zich meebrengt. De eenmalige kosten bestaan uit de kosten verbonden aan de aankoop van de mobiele reactoren, vermeerderd met de kosten voor opslaginfrastructuur voor zowel biomassa als pyrolyse-olie. Opslagkosten worden in de literatuur vaak omschreven als een operationele kost maar vormen voor de berekening van de NCW een eenmalige uitgave in infrastructuur zoals loodsen, silo's, vloeistofcontainers, en andere opslagvormen.

6.2.1.1 Investeringskost van een mobiele pyrolyse reactor

Tot op heden zijn er voornamelijk mobiele pyrolyse reactoren ter demonstratie en slechts weinig reactoren die commercieel aangeboden worden. Sorenson (2010) schat een investeringskost van een mobiele reactor met een capaciteit van 50 tds per dag op 3 459 000 USD (2 588 684 EUR). Deze kost is echter niet gebaseerd op een bestaande mobiele reactor maar op schattingen verkregen door pyrolyse-expert en onderzoeker Phillip C. Badger. In onderzoek van Palma et al. (2011) wordt de investeringskost van een mobiele pyrolysesysteem van 40 tds per dag geschat op 2 169 516 USD (1 623 646 EUR). Hierin zit tevens de kosten voor opslag van biomassa en pyrolyse-olie vervat. Enkel het Canadese 'Agri-therm', plant het ontwikkelen van een tweede generatie precommerciële mobiele pyrolyse reactor. De mobiele reactoren hebben een capaciteit van 10 tds per dag

en worden verwacht tegen een prijs van 1 500 000 USD (1 122 586 EUR) op de markt te komen.

De investeringskost van mobiele pyrolysereactoren uit verschillende wetenschappelijke teksten worden in tabel 4 met elkaar vergeleken. Uit deze tabel blijkt dat de investeringskost per ton droge stof lager ligt voor een reactor met hogere capaciteit. Een grotere reactor ondervindt dus schaalvoordelen.

Tabel 4 : Ovezicht van de investeringskost van mobiele pyrolysereactoren

Bron	Capaciteit (tds/d)	Investeringskost (USD)	Investeringskost (EUR) ⁽¹⁾	EUR/tds
Agri-therm (2011)	10	1 500 000	1 122 586	112 259
Palma et al. (2011)	40	2 169 516	1 623 646	40 591
Sorenson (2010)	50	3 459 000	2 588 684	51 774

(1) wisselkoers 31 december 2010: 1,3362 USD/EUR

Tabel 5 vervolgens stelt de investeringskost van een mobiele reactor van 10 tds/d voor. Deze waarden worden verkregen door de 'rule of six-tenths' methode toe te passen op de oorspronkelijke waarden. De 'rule of six-tenths' methode kan een benaderende kostprijs voorspellen wanneer de kost van een gelijkaardig object van verschillende grootte of capaciteit gekend is. Deze methode kent zijn oorsprong uit een in december 1947 chemisch ingenieursmagazine verschenen artikel van Roger Williams met de titel 'Six-tenths Factor Aids in Approximating Costs'. (Randall & Whitesides, 2007) De formule ziet er als volgt uit:

$$C_b = C_a(S_b/S_a)^{0,6}$$

Hierbij is C_b de investeringskost van object b met capaciteit S_b en C_a de investeringskost van een gelijkaardig object a met capaciteit S_a .

Randall & Whitesides (2007) stellen dat de exponent (N) in bovenstaande formule veranderlijk is voor individuele componenten van de uitrusting waarbij N kan variëren van 0,3 tot 1. Toch zal deze macht gemiddeld 0,6 bedragen voor de uitrusting als geheel. Volgens Bain et al. (2007) ligt de exponent voor reactoren eerder dicht bij 0,7, baserende op onderzoek van Valle-Riesta (1983).

Tabel 5 : Gemiddelde investeringskost voor een 10 tds/d reactor

Bron	Capaciteit (tds/d)	Investeringskost (EUR)	Investeringskost 10tds/d reactor (EUR)
Agri-therm (2011)	10	1 122 586	1 122 586 ⁵
Palma et al. (2011)	40	1 623 646	615 247 ⁶
Sorenson (2010)	50	2 588 684	839 074 ⁷

De investeringskost voor een 10 tds/d reactor bedraagt minimum 615 247 EUR en maximum 1 122 586 EUR met een gemiddelde investeringskost van 858 969 EUR. Wanneer 3 reactoren nodig zijn geeft dit een investeringskost van 2 576 907 EUR.

6.2.1.2 Opslagkosten

6.2.1.2.1 Opslagkosten voor biomassa

Om de opslagrisico's van verse houtchips te beperken, is het noodzakelijk dat deze houtchips opgeslagen worden in een goed geventileerde ruimte. In de praktijk worden hiervoor voornamelijk loodsen gebruikt. De optrekking van een loods vormt voor de onderneming een eenmalige investeringskost.

Bij een jaarlijkse houtproductie van 8 760 tds dient een opslagcapaciteit van 35 040 m³ ⁸ te worden voorzien. Hierin kan echter bespaard worden doordat de biomassa die omgezet wordt tijdens de oogstperiode rechtstreeks verwerkt wordt. Deze biomassa wordt namelijk na de oogst onmiddellijk verwerkt tot pyrolyse-olie, waardoor ze niet of voor zeer korte tijd opgeslagen moet worden. Per dag wordt door de drie reactoren 24 tds biomassa omgezet in pyrolyse-olie. Voor een oogstperiode van 3 maanden komt dit overeen met 2 190 tds⁹. Dit is 25% van de totale oogst. Er moet bijgevolg jaarlijks opslag worden voorzien voor een hoeveelheid biomassa van 6 570 tds of 26 280 m³ houtchips.

⁵ 1 122 586 EUR = 1 122 586 EUR (10/10)^{0,7}

⁶ 615 247 EUR = 1 623 646 EUR (10/40)^{0,7}

⁷ 839 074 EUR = 2 588 684 EUR (10/50)^{0,7}

⁸ Dichtheid van houtchips wordt geschat op 250 kg/m³ (SEWF, 2011)

⁹ 2 190 tds = 8 tds/dag x 3 reactoren x 365 dagen x 3/12 maand

Aangezien de opslagcapaciteit niet zoals de mobiele reactor jaarlijks vervoerd kan worden naar de volgende locatie, moet deze voorzien worden voor iedere intermediaire opslagplaats. De benodigde opslagcapaciteit moet bijgevolg vermenigvuldigd worden met het aantal intermediaire opslagplaatsen per regio. Hierbij moet opgemerkt worden dat iedere opslagplaats maar 1 op de 3 jaar wordt gebruikt. De overige 2 jaar blijft de opslagplaats ongebruikt tot de volgende oogstcyclus. Om deze reden wordt slechts 1/3 van de totale investeringskost opgenomen in de berekeningen.

Voor de bepaling van de opslagkost is contact opgenomen met een Limburgse architect Pol Peters. De berekeningen worden weergegeven in bijlage 1 waarvan de resultaten terug te vinden zijn in onderstaande tabel. Een onderhoudskost van 3% wordt momenteel niet in rekening gebracht omdat deze berekend wordt als een totale onderhoudskost van het pyrolysesysteem, namelijk 3% van de totale investeringskost.

Tabel 6: Opslagkost voor 3 scenario's

	Kostprijs (EUR)	Kostprijs (EUR/m ³) ⁽¹⁾	Kostprijs (EUR/m ³ /j) ⁽²⁾
1 hal	1 254 000	47,72	1,36
3 hallen	1 447 800	55	1,57
9 hallen	1 675 800	63,77	1,82

(2) Gebaseerd op een capaciteit van 26 280m³

(3) Gebaseerd op een levensduur van 35 jaar (bijlage 1)

Onderzoek van Suurs (2002) echter rekent op de gegevens in tabel 6. Ook hier wordt geen rekening gehouden met de onderhoudskosten van 3% om een vergelijking tussen de verschillende waarden te vereenvoudigen.

Tabel 7 : Kenmerken voor de opslagmethode bunker en silo

	Bunker	Silo
Volume (m ³)	25 000	5 000
Investeringskost (EUR)	1 900 000	331 000
Kostprijs (EUR/m ³)	76	66,2
Kostprijs (EUR/m ³ /j) ⁽¹⁾	3,04	2,65

(1) Gebaseerd op een levensduur van 25 jaar (Suurs, 2002)

Verder is de voorraadkost volgens Sintzoff & Martin (2001) afhankelijk van de gekozen opslagmethode. Zij stellen voor een periode van 6 maanden een opslagkost van 0,1

EUR/tds voor natuurlijke opslag onder beschutting, 6,5 EUR/tds (1,625 EUR/m³) voor geventileerde opslag in silo en 30 EUR/tds wanneer de biomassa wordt gedroogd en geventileerd tijdens opslag in silo. Ook Springer et al. (sd) rekenen met een opslagkost van 5,5 EUR/tds per half jaar voor bedekte opslag. Hamelinck et al. (2005) geven een opslagkost van 87 EUR/m³/j voor opslag in een bunker. We moeten opmerken dat de verschillende bronnen zeer uiteenlopende cijfers aangeven. Om deze reden wordt er verder gewerkt met de gegevens van Pol Peters in tabel 5 die gebruik maakt van een richtprijs van 190 EUR/m² voor een loods.

De opslag van biomassa vormt, baserende op de gegevens van Pol Peters, een investeringskost van 1 005 480 EUR¹⁰.

6.2.1.2.2 *Opslagkosten voor pyrolyse-olie*

Bij het mobiele systeem wordt de biomassa omgezet tot pyrolyse-olie op de intermediaire opslagplaatsen. De olie wordt opgeslagen tot een tankwagen de olie kan ophalen en vervoeren tot de eindbestemming. Wanneer jaarlijks 4 015 000 liter pyrolyse-olie aangemaakt wordt, betekent dit dat er dagelijks 11 000 liter pyrolyse-olie geproduceerd wordt. Een tankwagen met een capaciteit van 30 m³, het equivalent van 30.000 liter pyrolyse-olie, transporteert bijgevolg om de 2,72 dagen¹¹ een volle lading olie naar een biocentrale. Toch moet opgemerkt worden dat deze dagelijkse hoeveelheid pyrolyse-olie verspreid is over 3 regio's aangezien we werken met 3 reactoren. De vraag stelt zich nu of de tankwagen beter één of meerdere opslagplaatsen per rit bezoekt. Eén opslagplaats per rit heeft het voordeel dat er zich maar eenmaal laadkosten per rit voordoen en dat de transportkosten beperkt blijven. Maar dit heeft ook tot gevolg dat iedere opslagplaats voorzien moet zijn met een minimale opslagcapaciteit van 30 m³, equivalent aan de capaciteit van een tankwagen, waardoor de opslagkosten sterk stijgen. Een afweging moet gemaakt worden tussen de voor- en nadelen van beide gevallen. Deze afweging wordt weergegeven in tabel 8. De gegevens voor de berekening van de laad- en transportkost zijn terug te vinden in paragraaf 3.2.2.

¹⁰ 1 005 480 EUR = 78 840m³ x 1,82 EUR/m³/jaar x (21/3) jaar

¹¹ 2,72 dagen = 30 m³ / 11 m³/dag

Tabel 8 : Afweging tussen één of meerdere opslagplaatsen per rit

	1 opslagplaats per rit	meerdere opslagplaatsen per rit
Vereiste opslagcapaciteit per opslagplaats (m ³)	33	11
opslagkost EUR	59 400 ¹²	19 800
laadkost (EUR)	2 859 ¹³	8 576
Transportkost (EUR)	4 591 ¹⁴	(38 474)
Totaal (EUR)	66 850	66 850

We zien dat het bedienen van meerdere opslagplaatsen per rit voornamelijk de opslagkosten vermindert terwijl de laadkosten in mindere mate stijgen. De transportkosten mogen bijgevolg met 38 474 EUR stijgen om eenzelfde kost te bekomen voor beide situaties. Deze transportkost is gelijk aan het vervoeren van pyrolyse-olie tot een afstand van 68 km¹⁵. We kunnen dus stellen dat het bedienen van meerdere opslagplaatsen per rit voordeliger uitvalt totdat de afstand per rit de 68 km overschrijdt. Er moet echter ook opgemerkt worden dat meerdere opslagplaatsen per rit bedienen enkel mogelijk is wanneer meerdere reactoren worden ingezet.

De zuurgraad van pyrolyse-olie zorgt er, zoals eerder vermeld in paragraaf 3.2.2, voor dat de olie opgeslagen moet worden in een roestvrije of uit plastic vervaardigde opslagcontainer. Een kostefficiënte opslagvorm voor vloeistoffen is de IBC-container. Dit is een gestandaardiseerde en gepalletiseerde opslagtank van 1 000 liter die eenvoudig getransporteerd kan worden. De prijs voor IBC containers bedraagt in de catalogus van Lenaerts Blommaert (2011) ongeveer 152 EUR voor nieuwe, en 54 EUR voor gereinigde IBC-containers. Een prijs van 259 EUR per IBC-container wordt gegeven door Kruizinga (2011). In de catalogus van Pplusgroup (2011) bedraagt de prijs voor andere vormen van vloeistofopslag 0,7762-1,0599 EUR/l. Dit in vergelijking met bovenvermelde prijs van ongeveer 0,2 EUR/l voor IBC-containers. De opslagkost voor pyrolyse-olie in het mobiele systeem wordt als volgt bepaald:

¹² 59 400 EUR = 9 x 33 x 200EUR

¹³ 2 859EUR = 20min x 134 x 64EUR/ 60min

¹⁴ 4 591EUR = 8,1km x 2 x 1,41 x 134 x 30m³ x 0.05EUR/m³/km

¹⁵ 68km = 38 474EUR / (2 x 1,41 x 134 x 30m³ x 0.05EUR/m³/km)

$$\text{Opslagkost}_{\text{pyr-olie}} = S_b \times S_o/S_b \times P \quad (11)$$

- S_b = het aantal intermediaire opslagplaatsen
- S_o/S_b = het aantal vloeistofcontainers per opslagplaats
- P = Prijs van een vloeistofcontainer

$$\text{Opslagkost}_{\text{pyr-olie}} = 9 \times 11 \times 200 \text{ EUR} = 19\,800 \text{ EUR}$$

De totale investeringskost kan vervolgens berekend worden door de investeringskost van een mobiele pyrolyse reactor en de kosten voor opslag op te tellen. De totale investeringskost van het mobiele systeem bedraagt 3 602 187 EUR.

Tabel 9 : Samenstelling van de totale investeringskost

	Mobiele pyrolyse
Investeringskost van pyrolyseproces (EUR)	2 576 907
Opslagkosten biomassa (EUR)	1 005 480
Opslagkosten pyrolyse-olie (EUR)	19 800
Totale investeringskost (EUR)	3 602 187

6.2.2 De verhoogde investeringsaftrek

Eén van de stimulansen die de overheid hanteert om investeringen te promoten is de investeringsaftrek. Deze laat een onderneming toe in het investeringsjaar een bepaald percentage van de investering af te trekken van de belastbare winst. (Mercken, 2004) Enkel investeringen die aan de wettelijke voorwaarden voldoen geven recht op een investeringsaftrek die gelijk is aan een bepaald percentage van de aanschaffing- of beleggingswaarde van die investeringen. Voor vennootschappen die investeren in milieuvriendelijk onderzoek en ontwikkeling geldt een investeringsaftrekpercentage (c) van 13.5%. (FOD financiën, 2010; Vlaio, 2011)

De investering in een mobiel pyrolysesysteem bestaat enkel uit de uitrustingskosten en de opslag van biomassa en pyrolyse-olie. De investeringsaftrek is hier van toepassing op alle investeringscomponenten en wordt daarom berekend op de totale investeringskost.

De grootte van de investeringsaftrek kan eenvoudig berekend worden met volgende formule:

$$\begin{aligned}\text{Investeringsaftrek} &= I_0 \times b \times c \\ &= 3\,602\,187 \text{ EUR} \times 0.33 \times 0.135 \\ &= 160\,477 \text{ EUR}\end{aligned}\tag{12}$$

Hierbij is I_0 de totale investeringskost in jaar 0, b het belastingtarief van 33% en c het investeringsaftrekpercentage. Via formule 12 bekomen we een investeringsaftrek van 160 477 EUR voor het mobiele systeem.

6.2.3 De initiële investering

De kosten verbonden aan de investering van een mobiel pyrolysesysteem worden gevormd door de totale investeringskosten te verminderen met de verhoogde investeringsaftrek.

Tabel 10 : Berekening van de initiële investeringskost

	Mobiele pyrolyse
Totale investeringskost (EUR)	3 602 187
Investeringsaftrek (EUR)	160 477
Initiële investeringskost (EUR)	3 441 710

6.3 De jaarlijkse kasstroom

6.3.1 De jaarlijkse werkingskosten

Naast de totale investeringskost in jaar 0, zullen er zich jaarlijks werkingskosten voordoen. Deze zijn het resultaat van de operationele activiteiten van het investeringsproject. De jaarlijkse werkingskosten omvatten de kostprijs voor biomassa, transportkosten, energiekosten, personeelskosten, kosten verbonden aan de afvoer van assen en char, kosten voor herstellingen en onderhoud, en overheadkosten. Iedere kostenpost wordt vervolgens apart besproken.

6.3.1.1 Kostprijs voor biomassa

In deze paragraaf wordt de kostprijs voor de aankoop van grondstoffen bepaald. Het betreft hier de aankoop van houtchips afkomstig uit de energieteelt, namelijk kortecomloophout. De kostprijs bestaat uit alle kosten die toegerekend worden aan de landbouwer voor de productie van kortecomloophout vermeerderd met een winstmarge voor de landbouwer. Onder de productiekosten van de landbouwer vallen bijvoorbeeld alle productiekosten zoals beplanting, bemesting, arbeid; maar tevens de kosten voor het uitrijden van de energieteelt tot een intermediaire opslagplaats. De productiekost bepaalt de minimumprijs die de landbouwer kan verkrijgen terwijl de marktwaarde van de grondstof de maximumprijs bepaalt.

6.3.1.1.1 *Productiekost van hout*

De productie- en oogstkosten van hout zijn een van de voornaamste kosten in de biomassaketen en kunnen sterk variëren. Dat blijkt ook uit onderstaande tabel waarin de productiekosten voor kortecomloophout uit verschillende bronnen zijn opgenomen.

Tabel 11 : Productiekost van wilg

Bron	productiekost (EUR/tds)
INBO (2007)	35
Wiersma & Van den Berg (2004)	36 - 109
Sintzoff & Martin (2001)	126
Dawson (2007)	47,6

Uit enkele bronnen is het niet helemaal duidelijk in hoeverre deze bedragen kosten voor transport, voorbehandeling of subsidies in rekening brengen. In de waarden die Wiersma & Van den Berg (2004) hanteren zijn bijvoorbeeld Europese subsidies voor braakliggend land inbegrepen. De bedragen van Dawson (2007) hebben betrekking op de oogst, droging, en het management van het veld.

In het Verenigd Koninkrijk is onderzoek gedaan door Paulson (2005) rond het gebruik van verbeterde oogstmachines. De productiekosten (oogst + verkleinen) varieerden van 9–23 EUR/tds voor houtsnippers van stukgrootte van 57–75 mm tot 13,6–25,7 EUR/tds voor houtstof met een stukgrootte van 3–6 mm. Deze kosten zijn aanzienlijk lager dan deze uit andere geraadpleegde bronnen

De gegevens van INBO (2007) en Witters et al. (2009) zijn gedetailleerd beschreven en betreffen de productie van korteomloophout in België. De gegevens uit het onderzoek van Witters et al. (2009), betreffende het gebruik van wilg voor fyto-remediatie, hebben een gelijkaardige kostenstructuur als de gegevens van INBO (2007), maar de waarden verschillen. De biomassa-productie op met zware metalen vervuilde gronden ligt namelijk lager en de houtopbrengst per hectare is ook lager waardoor de productiekost stijgt tot 66,5 EUR/tds. De samenstelling van de productiekost van respectievelijk 35 EUR/tds en 66,5 EUR/tds wordt weergegeven in tabel 9.

Tabel 12 : Berekening van de productiekost van houtchips uit wilg in België

	INBO (2007)	Witters (2009)
Terreinvoorbereiding (EUR)	133	382
• Sproeien (EUR)	28	240
• Ploegen (EUR)	55	67
• Eggen (EUR)	50	75
Plantgoed (EUR)	1 200	1 800
Planten (EUR)	400	450
Totale aanlegkost (EUR)	1 733	2 632
Loonwerk (transport, opslag & drogen) (EUR)	800	800
Sproeien (EUR)	/	240
Totale oogstkost (EUR)	800	1 040
Oogsten (EUR)	/	800
Ontstronken (EUR)	1 500	1 500
Kost aan einde van levenscyclus (EUR)	1 500	2 300
Totale productiekost (EUR)	8 833	11 172
Jaarlijkse productiekost (EUR/j) ⁽¹⁾	420,6	532
productiekost (EUR/tds)⁽²⁾⁽³⁾	35,1	66,5

(1) Gebaseerd op een levensduur van 21 jaar

(2) Inbo (2007) rekent met een houtopbrengst van 12 tds/ha/j

(3) Voor Witters et al. (2009) gebruiken we een houtopbrengst van 8 tds/ha/j, gebaseerd op het werk van Vangronsveld (2009), die tevens betrokken was bij het onderzoek van Witters.

De kosten voor de aanleg en het einde van de levenscyclus dienen slechts eenmalig uitgevoerd te worden. De oogstkosten komen om de 3 jaar voor, en dit tot wel 7 keer. Na 7 oogstperioden (21 jaar) begint de kwaliteit van de planten te verminderen. De kosten worden dus geaccumuleerd over een periode van 21 jaar en vervolgens omgerekend naar een kostprijs per jaar.

Ook uit het onderzoek van Zeller et al. (2009) worden gelijkaardige gegevens als INBO verkregen. Met een aanlegkost van 2 420,95 EUR, oogstkost van 769,76 EUR en kost voor ontstronken van 1 400 EUR bekomen zij een totale productiekost van 7 669,75 EUR/ha. De berekeningen zijn gebaseerd op 5 wilgrotaties binnen een tijdspanne van 20 jaar en een houtopbrengst van 40 tds/ha, equivalent aan 10 tds/ha/j. Deze houtopbrengst resulteert in een productiekost van 38,35 EUR/tds¹⁶

6.3.1.1.2 Marktprijs voor kortekomloophout

Aangezien de productiekosten van hout sterk variëren zal ook de verkoopprijs van hout een sterke variatie kennen. Dit wordt bevestigd door Bridgwater et al. (2002). Volgens Bridgwater kunnen de grondstofprijzen voor kortekomloophout en boshout variëren van 10 tot 160 EUR/tds met een gemiddelde van 70 EUR/tds en verschillen de prijzen sterk over diverse landen. In tabel 13 kunnen de verkoopprijzen van KOH uit verschillende bronnen geraadpleegd worden.

Tabel 13 : Marktprijs voor wilg

Bron	Marktprijs KOH (EUR/tds)
Wiersma & Van den Berg (2004)	75
Bridgwater et al. (2002)	70
OVAM (2010)	92 - 100
INBO (2007)	48,5
Dawson (2007)	60-100

¹⁶ 9,59 EUR/tds = 7 669,75 EUR/ha /20j / 10tds/ha

Witters et al. (2009) hanteren een verkoopprijs voor kortoomloophout van 15 EUR/tds¹⁷ terwijl de overige inkomsten van de landbouwer bestaan uit subsidies. Deze subsidies laten toe om de biomassa te verkopen tegen een veel lagere prijs. De subsidies bedragen 450 EUR vaste subsidie per hectare en een energiepemie van 45 EUR per jaar. Toch wordt in deze masterproef geen rekening gehouden met eventuele subsidies die een landbouwer kan ontvangen en wordt er gewerkt met de productiekost van 62 EUR/tds.

Om de kostprijs van het kortoomloophout te bepalen, wordt de productiekost vermeerderd met de kost voor drogen en verkleinen. De geoogste houtchips hebben namelijk een stukgrootte van 10-70 mm en een vochtgehalte van rond de 25-50% en dienen bijgevolg nog verkleind en gedroogd te worden. Het pyrolyseproces vereist namelijk, zoals eerder vermeld, een stukgrootte van 2-5 mm en een vochtgehalte van 10% of lager. De kostprijs voor zowel het verkleinen als het drogen van de biomassa wordt weergegeven in volgende tabel.

Tabel 14 : Kostprijs van verkleinen en drogen van biomassa

Bron	Kostprijs verkleinen (EUR/tds)	Kostprijs drogen (EUR/tds)
Sims (2003)		4,66
Wiersma & Van den Berg (2004)		5 - 15
Dawson (2007)		9,3 - 14
Renovius NV	6 - 12	1 - 5
Suurs (2002)	2 - 13	
Bauen et al. (2010)	1,82	

Bij een geschatte kost voor drogen van 7 EUR/tds en een kost voor verkleinen van 7 EUR/tds bedraagt de kostprijs voor kortoomloophout 76 EUR/tds.

Aan deze kostprijs wordt echter een grondstof gekocht die na verwerking een restfractie, vervuild met zware metalen, overhoudt. De restfractie char moet zoals vermeld in paragraaf 6.3.1.5 gestort worden op een Categorie II stortlocatie tegen een kostprijs van 264 990 EUR, hetzij 30,25 EUR/tds biomassa. Deze extra kost kan geheel of gedeeltelijk verrekend worden in de kostprijs voor KOH die wij als producent van pyrolyse-olie bereid zijn te betalen. In dit onderzoek wordt verondersteld dat de kost voor het storten van de

¹⁷ 15 EUR/tds = 120 EUR/ha / 8tds/ha

char en assen volledig afgewend wordt op de landbouwers in de vorm van een verlaagde kostprijs voor vervuild korteomloophout. De totale grondstofkost bedraagt bijgevolg 400 770 EUR¹⁸.

6.3.1.2 Transportkosten

Het transport van biomassa wordt opgedeeld in 2 fasen. De eerste fase bestaat uit het uitrijden van de biomassa van het veld tot een intermediaire opslagplaats. De kost die hiermee gepaard gaat maakt deel uit van de oogstkosten en worden dus opgenomen in de berekening van de productiekost van de biomassa.

De tweede fase betreft het transport van de intermediaire opslagplaats naar een centraal gelegen bioraffinaderij. Voor het mobiele systeem wordt in deze tweede fase pyrolyseolie vervoerd, terwijl in het centrale systeem de biomassa overgezet wordt naar een efficiënter transportmiddel. Het centrale systeem wordt in hoofdstuk 7 verder toegelicht. Hier wordt vervolgens de transportkost berekend voor beide fasen van het mobiele systeem.

6.3.1.2.1 *Fase 1: Uitrijden van biomassa*

Tijdens de oogst van korteomloophout wordt het hout rechtstreeks gechipt en in een tractor met trailer geladen. De houtchips worden op korte afstand vervoerd naar een intermediaire opslagplaats.

Doordat bij het uitrijden van biomassa relatief weinig afstand wordt afgelegd en vooral zware landbouwvoertuigen gebruikt worden, wordt er niet gerekend met een transportkost per kilometer of per uur, maar met een gemiddelde kost per ton droge stof voor het uitrijden van biomassa. De kosten voor het uitrijden van biomassa worden voornamelijk vermeld als onderdeel van de oogstkosten van hout.

Boosten et al. (2009) gebruiken voor het uitrijden van de biomassa een transportkost van 10,39 EUR/tds. Sintzoff & Martin (2001) stellen een gemiddelde transportkost voor

¹⁸ 400 770 EUR = 8 760 tds x (76 EUR/tds - 30,25 EUR/tds)

korte afstanden van 4,2 EUR/tds voor. Calu (2006) geeft een tractor en trailer kost van 4 GBP/tds¹⁹ (4,66 EUR/tds) Wiersma & Van den Berg (2004) hanteren een transportkost van rond de 4,1 EUR/km tot afstanden van 50 km. Een transportkost van 4,5 EUR/tds wordt gebruikt voor de berekeningen.

De transportkosten die ontstaan om de biomassa tot een intermediaire opslagplaats te vervoeren worden bijgevolg berekend door de transportkost (EUR/tds) te vermenigvuldigen met het aantal ton vrijkomende biomassa:

$$\begin{aligned} \text{Transportkost}_{\text{fase1}} &= \text{Transportkost (EUR/tds)} \times \text{vrijkomende biomassa (tds)} & (13) \\ &= 4,5 \text{ EUR/tds} \times 8\,760 \text{ tds/j} = 39\,420 \text{ EUR/j} \end{aligned}$$

De kost van deze eerste transportfase is eigen aan het oogstproces en kan gezien worden als een onderdeel van de productiekosten van biomassa. Dit is zeker te rechtvaardigen wanneer de afstand voor het uitrijden zich beperkt tot 2 kilometer of minder. De transportkosten voor fase 1 zijn bijgevolg reeds in rekening gebracht bij de oogstkosten. Voor beide systemen geldt eenzelfde transportkost voor het uitrijden tot een intermediaire opslagplaats. De transportkost van beide systemen verschilt pas in de tweede transportfase waar verschillende materialen vervoerd dienen te worden: pyrolyse-olie en biomassa.

6.3.1.2.2 *Fase 2: Transport van pyrolyse-olie*

Doordat pyrolyse-olie voornamelijk rechtstreeks of na enige opslag aangewend wordt voor de omzetting in elektriciteit en/of warmte, is er weinig literatuur beschikbaar over het transport van pyrolyse-olie. Informatie betreffende de transportkosten van de pyrolyse-olie blijkt dan ook moeilijker te raadplegen. Enkel Pootakham & Kumar (2010a) hebben hier specifiek onderzoek naar verricht waarin het transport van pyrolyse-olie via tankwagens en pijpleiding met elkaar vergeleken wordt. Bridgwater et al. (2002) geven enkel een schattingsformule voor deze kosten. Zij baseren zich op gegevens verkregen via het Britse Linkman Tankers en Shell, en stelt transportkosten voor pyrolyse-olie gelijk aan 0,039–0,043 EUR/ton/km. Volgens Linkman zijn de vaste kosten verbonden aan vloeistoffenvervoer verwaarloosbaar doordat zij enkel bestaan uit het pompen van de

¹⁹ 4 GBP/tds = 56 GBP/ha / 14 tds/ha

vloeistof. Toch blijkt dat de vaste kosten een significant gedeelte van de totale kosten van het vloeistoftransport innemen wanneer slechts kleine afstanden worden afgelegd. Hoewel Bridgwater et al. (2002) een variabele transportkost van gemiddeld 0,041 EUR/ton/km hanteren, wordt de regressieformule voor de berekening van de transportkosten van pyrolyse-olie als volgt geformuleerd:

$$\text{Transportkost}_{\text{pyr-olie}}(\text{EUR/ton}) = 0,40 \text{ EUR/ton/km} \times L \quad (14)$$

Hierbij staat L voor de afstand in kilometer.

Pootakham & Kumar (2010a) onderscheiden een vaste kost en een variabele kost, die afhankelijk is van de transportafstand. De gegevens voor zowel een tankwagen als een tankoplegger met hogere capaciteit worden weergegeven in tabel 15. De vaste kosten bestaan uit het laden en lossen van de pyrolyse-olie. De variabele kosten omhelzen het dieselvebruik, arbeid, en het onderhoud.

Tabel 15 : Vergelijking tussen een tankwagen en tankoplegger

	Tankwagen	tankoplegger
Capaciteit (m ³)	30	60
Laad- of lostijd (min)	50	100
set-up tijd (min)	20	20
Laadkost (EUR/min)	1,06	1,16
Variabele kosten (VC) (EUR/km)	1,5	2,4

Bron: Pootakham & Kumar (2010a) – wisselkoers 31 december 2010: 1 EUR=1,3362USD

De vaste transportkosten bestaan zoals eerder vermeld uit de laad- en loskosten. We veronderstellen per rit één laadbeurt en één losbeurt. Wanneer bij iedere lading een set-up tijd van 20 minuten vereist is, bedragen de totale laad- en lostijd per rit 120 min en 220 min voor respectievelijk een tankwagen en een tankoplegger. In paragraaf 6.1.2 werd berekend dat er jaarlijks 4 015 000 liter aangemaakt wordt. Een tankwagen met een capaciteit van 30 m³ legt dus jaarlijks 134 ritten af. Een tankwagen gebruikt hiervoor ieder jaar 16 080 minuten voor het laden en het lossen van de tanker. Met een ladingskost van 1,0667 EUR/min bedragen de vaste kosten voor een tankwagen jaarlijks 17 152 EUR.

De variabele transportkost wordt berekend op basis van het aantal afgelegde kilometers en de capaciteit van het transportmiddel. Suurs (2002) hanteert een variabele kostprijs

van 1,24 EUR/km voor een 25 ton chemische tanker, gelijkaardig aan de bovenstaande gegevens van Pootakham & Kumar (2010a).

Om de vergelijking tussen mobiele en centrale pyrolyse mogelijk te maken wordt de locatie van de bioraffinaderij in het mobiele systeem gelijkgesteld aan de locatie van de centrale reactor in het centraal systeem. Hiervoor is gekozen voor het industrieterrein 'Kristalpark' gelegen te Lommel. De locatie van het industrieterrein 'Kristalpark' wordt weergegeven door een kruisje op figuur 1 (pagina 9). De gemiddelde transportafstand van de intermediaire opslagplaats tot de bioraffinaderij wordt in bijlage 2 geschat op 8,1 kilometer.

De gemiddelde transportafstand wordt bepaald door de geschatte afstanden tussen de intermediaire opslagplaatsen en de centraal gelegen energieproducent op te tellen en vervolgens te delen door het aantal opslagplaatsen. De metingen werden uitgevoerd via de liniaalfunctie in een online routeplanner. Deze tool laat toe vogelvlucht metingen (lineaire afstand) uit te voeren door 2 locaties op te geven. Om een meer realistisch beeld te krijgen van de transportafstand, wordt deze vermenigvuldigd met een tortuosity factor, om de onderschatting van de vogelvluchtafstand te corrigeren. De lineaire vogelvluchtafstanden worden omgevormd tot straatblokafstanden door de voorgaande te vermenigvuldigen met factor $\sqrt{2}$ oftewel 1,41. Dit wordt kort uitgelegd in volgend voorbeeld:

De regel van Pythagoras stelt $a^2 + b^2 = c^2$ waarbij c de schuine zijde van een rechthoekige driehoek voorstelt, en dus ook de vogelvluchtafstand. De 2 overige zijden, $a + b$, betreffen de rechthoekzijden en stellen de straatblokafstand voor. Wanneer a en b niet te veel verschillen van elkaar (stel $a=b$), kan de regel van Pythagoras omgevormd worden tot volgende formule:

$$c = \sqrt{2a^2} \text{ oftewel:}$$

$$\sqrt{2} \times c = 2a = a + b$$

Voor $a = b$ geldt dus een vermenigvuldigingsfactor van $\sqrt{2} = 1,41$

Voor $a = 2b$ geldt een vermenigvuldigingsfactor $3/\sqrt{5} = 1,34$

Voor $a = 4b$ geldt een vermenigvuldigingsfactor $5/\sqrt{17} = 1,21$

We zien dat hoe meer a en b van elkaar verschillen, hoe meer de lineaire vogelvluchtafstand zal overeenkomen met de straatblokafstand. Intuïtief is dit logisch. Wanneer we in ons model veronderstellen dat de genomen straatblokken gelijkaardige afstanden kennen ($a=b$) kunnen we er vanuit gaan dat de straatblokafstand gelijkaardig is aan de vogelvluchtafstand vermenigvuldigd met factor $\sqrt{2}$.)

De gemiddelde transportafstand wordt verder nog met factor 2 vermenigvuldigd om de kosten van zowel de heen als terugreis in rekening te brengen. De totale variabele transportkost wordt dus bepaald door het gebruik van volgende formule:

$$\text{Totale variabele transportkost} = R \times L \times T \times 2 \times VC \quad (15)$$

Hierbij is:

- R = aantal ritten
- L = gemiddelde afstand (km)
- T = tortuosity factor = 1,41
- VC = variabele transportkost (EUR/m³/km)
- R x L x T x 2 = Af te leggen afstand (km)

Tabel 16 : Transportkost bij het gebruik van tankwagen en -oplegger

	Tankwagen	Oplegger
Te vervoeren pyrolyse-olie (m ³)	4 015	4 015
Capaciteit (m ³)	30	60
Vereist # ritten	134	67
Gemiddelde transportafstand (km)	8,1	8,1
Af te leggen afstand (km)	3 061	1 530
Laad- & ontladingstijden (min)	16 080	14 740
Vaste transportkost (EUR)	17 152	17 197
Variabele transportkost (EUR)	4 591	3 673
Totale Transportkost (EUR)	21 743	20 870

Met de formule van Bridgwater et al. (2002) bekomen we een transportkost voor pyrolyse-olie van 44 064 EUR²⁰ voor zowel een capaciteit van 30 m³ als 60 m³. Volgens recenter onderzoek van Pootakham & Kumar (2010a) echter, dat ook meer inzicht geeft in de structuur van de transportkost, kent mobiele pyrolyse een kostprijs voor vloeistofvervoer van 21 743 EUR of 20 870 EUR, afhankelijk van welke transportcapaciteit gekozen wordt. Het valt op dat de kosten tussen een tankwagen en een oplegger niet veel verschillen op korte afstanden. Het verschil in kosten is meer uitgesproken bij het transport over lange afstanden.

In deze masterproef waarin er sprake is van een zeer korte transportafstand, wordt ervoor gekozen een tankwagen met een capaciteit van 30 m³ te gebruiken voor het transport van pyrolyse-olie.

6.3.1.3 Energiekosten

Doorheen de biomassaketen wordt constant energie verbruikt bij de uitvoering van diverse processen. Zowel tijdens het omzettingsproces als de productie, droging en het transport van biomassa, wordt energie verbruikt in de vorm van elektriciteit en warmte. De verbruikte energie tijdens de productie, droging, en transport van biomassa is reeds verrekend in de kostprijs van biomassa. In deze paragraaf wordt enkel de energiekost berekend die tijdens het pyrolyseproces ontstaat. Hieronder valt de warmte die nodig is om de reactor op te warmen, alsook het elektriciteit- en waterverbruik.

De warmte voor het proces kan geleverd worden door de verbranding van het aangemaakte pyrolysegas in een externe brander. Wanneer de char niet vervuld is met zware metalen zou deze alsook gebruikt kunnen worden voor de energievoorziening van het pyrolyseproces. Door de bijproducten van het systeem te gebruiken als brandstoffen bespaart men namelijk op energiekosten. Zoals eerder vermeld is de char vervuld met zware metalen en is het in deze gevalstudie echter niet mogelijk om de char aan te wenden voor warmteproductie en worden enkel de gassen gebruikt. Toch dient eerst bepaald te worden of het aangemaakte gas voldoende is om het pyrolyseproces te voorzien van warmte.

²⁰ 44 079 EUR = 0,40 EUR/ton/km x 30m³ x 1,2 ton/m³ x 3 060km

Bridgwater (2009; 2011) stelt dat char en gassen ongeveer respectievelijk 25 en 5% van de totale energie-inhoud van de inputgrondstof bevatten. Het pyrolyseproces vereist echter rond de 15% van de totale energie-inhoud van de grondstof om deze om te zetten in de pyrolyseproducten. Volgens deze gegevens kan gas dus slechts 33,33% van de nodige warmte leveren. Toch voorziet Sorenson (2010) in zijn studie 75% van de nodige warmte door verbranding van gassen, en dit voor zowel een centrale als mobiele reactor. De overige warmte wordt geleverd door de verbranding van aangekocht propaangas. De 50 tds per dag mobiele reactor vereist in zijn studie 3,22 MMBtu/h aan thermische energie en 25,78 MMBtu/h voor de 200 tds per dag centrale reactor. Omgerekend is dit 0,816 MJ/kg²¹ en 3,264 MJ/kg²² voor respectievelijk mobiele en centrale pyrolyse. Een verklaring voor het grote verschil in energieverbruik in de studie van Sorenson kan deels gevonden worden in enerzijds het grote verschil in schaal, en een hogere bezettingsgraad anderzijds. Hij voegt eraan toe dat het pyrolysegas tot wel 75-125% van de thermische energie kan voorzien voor de droging en omzetting van biomassa.

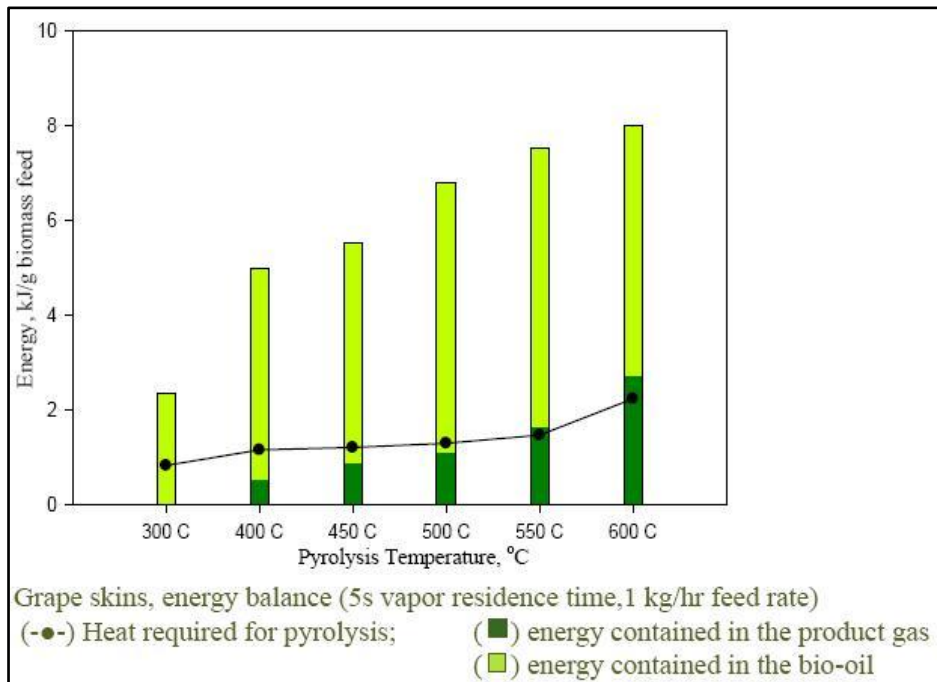
Venderbosch & Prins (2009) stellen dat het pyrolyseproces rond de 1,5 MJ/kg vereist om aan de warmtevoorziening te voldoen. Bridgwater (2011) stelt dat 15% van de inputgrondstof nodig is. Dit komt overeen met 2,7 MJ/kg²³ bij een energiedichtheid van 18 MJ/kg voor droog hout. Figuur 6 geeft weer hoeveel energie vereist is voor pyrolyse onder verschillende temperaturen, alsook de olie- en gasopbrengst bij een grondstof van druivenschillen. Wel moet opgemerkt worden dat hout echter een hogere olie- en gasopbrengst kent dan druivenschillen waardoor de gasopbrengst mogelijk voldoet aan de vereiste energiehoeveelheid. (Agri-therm, 2009)

²¹ 0,816 MJ/kg = 3,22 MMBtu/h * 1,055MJ/MMBtu * 12h / 50tds

²² 3,264 MJ/kg = 25,78 MMBtu/h * 1,055MJ/MMBtu/h * 24h / 200tds

²³ 2,7 MJ/kg = 18 MJ/kg * 0.15

Figuur 6 : Energieverbruik bij verschillende temperaturen



In dit onderzoek wordt een energieverbruik van 2 MJ/kg gehanteerd om te voorzien in proceswarmte. Dit komt overeen met 11% van de inputgrondstof. Voor de omzetting van jaarlijks 8760 tds houtchips heeft een reactor 17 520 GJ nodig. Een omzettingsfractie voor gas van 20% zorgt voor een jaarlijkse productie van 1 752 ton gas. De stookwaarde van gas bedraagt volgens Vanreppelen et al. (2011) 16-17 MJ/kg. Het aanwenden van het pyrolysegas voor proceswarmte kan bijgevolg 28 032 GJ²⁴ opleveren. Dit voldoet aan de vereiste energiehoeveelheid van 17 520 GJ. Het overige gas kan gebruikt worden voor het drogen van de biomassa tot de vooropgestelde vochtgehalten. Op deze wijze kan er bespaard worden op energiekosten.

Jaarlijks wordt de reactor eenmaal verplaatst. Hierdoor moet de reactor ook heropgestart worden door de verbranding van propaan in een externe brander. Het verplaatsen en de opstart van de reactor vormen de jaarlijkse opstartkosten van de mobiele reactor. Uit een studie van Agri-therm (2009) blijkt dat na 51 minuten de reactor op een temperatuur van 500°C werkt en de grondstof in pyrolyse-olie omgezet kan worden. Vanaf het moment dat pyrolyseproducten worden aangemaakt, wordt het propaanverbruik afgebouwd en worden de pyrolysegassen aangewend voor warmtevoorziening. De reactor moet nu op een temperatuur van 450-500°C behouden

²⁴ 28 032 GJ = 8760 tds x 0,20% x 16 MJ/kg x 1000

worden. Het is niet zeker hoeveel propaangas vereist is om de reactor op procestemperatuur te krijgen en hoe groot de kost exact is die hieraan verbonden is. Palma et al. (2011) rekenen op een opstartkost van 2 000 USD (1496,78 EUR) om een reactor op geschikte procestemperatuur te krijgen. Vanaf dan produceert de reactor voldoende gassen om de biomassa te drogen en om te zetten in olie. In dit logistiek model waarin 3 reactoren jaarlijks verplaatst worden, zal de jaarlijkse opstartkosten 4 500 EUR bedragen.

De reactor heeft naast warmte ook elektriciteit nodig. Deze kan aangekocht worden op het net of aangemaakt worden door een gedeelte geproduceerde pyrolyse-olie te gebruiken voor de productie van warmte en elektriciteit. In het onderzoek van Sorenson (2010) wordt de mobiele reactor voorzien van elektriciteit door het verbranden van pyrolyse-olie in een flex brandstof generator die geïntegreerd zit in het pyrolysesysteem. Dit laat de mobiele eenheden toe om te werken zonder aangesloten te zijn op het net. Toch kent deze flex brandstof generator slechts een omzettingsefficiëntie van 30%. Voets et al. (2011) rekenen voor de omzetting van pyrolyse-olie op een elektrische efficiëntie van 43,5% voor een interne verbrandingsmotor met een capaciteit van 126 TJ per jaar. Het gebruik van een geïntegreerde verbrandingsmotor brengt een extra investeringskost met zich mee. Het lijkt ons dan ook aangeraden om de behoefte aan elektriciteit te voorzien via het net.

De kostprijs voor grote elektriciteitsafnemers in Europa bedraagt 0,075 EUR/kWh. (Bridgwater et al., 2002) Coenen et al. (2008) geven elektriciteitsprijzen voor zowel piek als daluren, respectievelijk 0,093 en 0,052 EUR/kWh. De daluren lopen in de meeste gemeenten van 22h tot 7h. Aangezien de systemen 24 uur per dag werken, wordt een gemiddelde elektriciteitsprijs van 0,0777 EUR/kWh²⁵ gekozen.

Het elektriciteitsverbruik van een fast pyrolyse reactor wordt gelijkgesteld aan 40 kWh/tds. (Bridgwater et al., 2002) Sorenson (2010) stelt dat een mobiele eenheid 0,75 MMBtu (219,8 kWh²⁶) aan elektrische energie vereist per uur. Voor de mobiele reactor in het onderzoek van Sorenson (2010) komt dit overeen met een elektriciteitsverbruik van 52,75 kWh/tds²⁷. In dit onderzoek wordt een elektriciteitsverbruik van 45 kWh/tds gehanteerd zodat de pyrolyse van 8 760 tds houtchips een hoeveelheid elektriciteit van

²⁵ 0,0777 EUR/kWh = 15h x 0,093 EUR/kWh + 9h x 0,052 EUR/kWh / 24h

²⁶ 219,8 kWh = 0,75MMBtu x 1 000 000 / 3412kWh/Btu

²⁷ 52,75 kWh/tds = 219,8kWh/h x 12h / 50tds

394 200 kWh (1 419 GJ) vereist. Tegen een elektriciteitsprijs van 0,0777 EUR/kWh heeft het mobiele systeem een elektriciteitskost van ongeveer 30 629 EUR.

Naast warmte en elektriciteit heeft een pyrolyse reactor tevens koelwater nodig. Een pyrolyse reactor verbruikt volgens Bridgwater et al. (2002) gemiddeld 18,5 m³ koelwater per ton droge stof grondstof tegen een kost van 1,50 EUR/m³. Omgerekend heeft de verwerking van 8 760 tds biomassa in een pyrolyse reactor 162 060 m³ koelwater nodig tegen een totale waterkost 243 090 EUR.

Tabel 17 : Berekening van energieverbruik

	Mobiele pyrolyse
Hoeveelheid biomassa (tds)	8 760
Vereist hoeveelheid koelwater (m ³)	162 060
Koelwaterkost (EUR)	243 090
Vereiste hoeveelheid elektriciteit (kWh)	394 200
Kostprijs elektriciteit (EUR/kWh)	0,0777
Elektriciteitskosten (EUR)	30 629
Totale Energiekost (EUR)	273 719
Vereiste energie voor warmte (GJ) (2GJ/tds)	17 520
Prijs aardgas (EUR/GJ)	8,65
Uitgespaarde energiekost (EUR)	151 548

6.3.1.4 Personeelskosten

Voor een kleinschalige mobiele reactor is volgens Agri-therm 1 werknemer per shift voldoende. Agri-therm heeft tevens laten weten dat de mobiele reactor geschikt is om 24 uren per dag operatief te zijn en dit zeven dagen per week. De mobiele reactor is bijgevolg het zelfde aantal uren per jaar operationeel als de centrale reactor, gezien voor beide systemen een bezettingsgraad van 80% werd vooropgesteld. Voor zowel het mobiele als het centrale systeem wordt daardoor eenzelfde werksysteem ingevoerd. Er wordt namelijk gewerkt met 3 shiften per dag van elk 8 uur. Een mobiele reactor stelt één werknemer tewerk per shift.

Een mobiele reactor die maar één werknemer per shift vereist stelt 5 voltijdse equivalenten tewerk bij een werkweek van 33,6 uren. Doordat drie mobiele reactoren worden ingezet wordt het aantal werknemers met factor 3 vermenigvuldigd. Het totaal aantal werknemers voor het mobiele systeem is bijgevolg gelijk aan 15 in vergelijking met 9 voor het centrale systeem.

De jaarlijkse personeelskosten worden samengesteld door de brutolonen van de werknemers. De brutolonen geven weer wat een werkgever in het totaal betaalt voor zijn werknemer en bevatten naast het nettoloon ook de RSZ-bijdrage en de bedrijfsvoorheffingen.

De gemiddelde brutolonen in 2004 bedroegen volgens Vanderbiesen (2006) per werknemer in een voltijds equivalente job 34 300 EUR voor het Vlaams gewest. De jaarlijks gemiddelde groeivoet bedroeg 2,7% waardoor een brutoloon van 41 332 EUR voor jaargang 2011 wordt berekend. Als we echter naar brutolonen per sector kijken, zien we dat de elektriciteit, gas, en watersector de hoogste brutolonen moeten uitbetalen. In 2004 bedroegen de brutolonen hier 54 900 EUR. (Vanderbiesen, 2006) Met de eerder gehanteerde groeivoet van 2,7% komt dit overeen met een jaarlijks brutoloon van 66 155 EUR in 2011.

Sorenson (2010) stelt dat het pyrolyseproces zowel hoog als laag geschoolde arbeidskrachten vereist en daardoor ook een grote variatie kent in de lonen. In dit werk wordt een jaarlijks brutoloon per werknemer van 50 000 EUR gekozen, gebaseerd op het gemiddelde Vlaamse brutoloon en de gemiddelde brutolonen in de energie- en nutsvoorzieningssector. Voor het mobiele systeem dient men 15 werknemers te werk te stellen met een jaarlijkse personeelskost van 750 000 EUR tot gevolg.

6.3.1.5 Afvoer van de assen en char

Tijdens het pyrolyseproces komen de zware metalen die zich in het hout bevinden terecht in de char en de assen. De char, samen met de assen, dient gestort te worden op een stortplaats van categorie II voor niet-gevaarlijk bedrijfsafval. Het gewogen gemiddelde storttarief voor het storten op categorie 2-stortplaatsen bedroeg in 2009 121 EUR/ton. Dit is inclusief een milieuheffing. Het storttarief exclusief milieuheffingen en

gemeentelijke opcentiemen bedraagt 41 EUR/ton. (OVAM, 2011) Volgens Siemons (2005) bedraagt de kost voor de afvoer van de assen 73 EUR/ton. Volgens Caputo et al. (2005) bedragen de verwerkingskosten van assen 86 EUR/ton.

Wanneer er jaarlijks 2 190 ton char wordt aangemaakt, zullen de afvoerkosten voor assen/char bij een verwerkingskost van 121 EUR/ton jaarlijks 264 990 EUR bedragen. Zoals in paragraaf 6.3.1.1 wordt vermeld, wordt deze kost volledig afgewend op de landbouwers voor het zuiveren van hun landbouwgronden. De afvoer van char is namelijk overbodig wanneer de grondstof niet vervuild is met zware metalen. De char kan in dat geval zelfs verkocht worden en extra inkomende kasstromen genereren. Tijdens de scenarioanalyse wordt een scenario uitgewerkt waarbij de invloed van het gebruik van zuivere biomassa op de NCW onderzocht wordt.

6.3.1.6 Herstellingen en onderhoudskosten

Gegevens betreffende de herstelling- en onderhoudskosten zijn niet beschikbaar voor een mobiele pyrolyse reactor. We veronderstellen dat deze kosten gelijkaardig zijn aan de herstelling- en onderhoudskosten van een centrale reactor.

De herstelling- en onderhoudskosten zijn jaarlijkse vaste kosten, voorgesteld als een percentage van de investeringskost. Volgens Bridgwater et al. (2002) worden de onderhoudskosten geschat op 2,5% van de totale investeringskosten. Brammer et al. (2005) hanteren een jaarlijkse onderhoudskost van 4% van de totale investeringskost. Caputo et al. (2005) bevestigen beide waarden met een onderhoudskost van 3%, een schatting die ook in deze studie gebruikt wordt. Hierdoor bedragen de herstelling- en onderhoudskosten voor het mobiele systeem 108 066 EUR.

6.3.1.7 Overheadkosten

Naast de kosten die direct ontstaan bij het uitvoeren van de operationele activiteiten, ontstaan ook enkele indirecte of overheadkosten. Hieronder vallen bijvoorbeeld verzekeringen, communicatiekosten en andere kosten niet gerelateerd aan de operationele processen.

De overheadkosten worden volgens Bridgwater et al. (2002) geschat op 2% van de totale investeringskosten. Brammer (2006) hanteert in zijn berekeningen een overheadkost van 4%. Volgens Caputo et al. (2005) worden de overheadkosten veel lager geschat op 1% van de totale investeringskost. Wanneer we de schatting van Bridgwater et al. (2002) hanteren in onze studie komen we uit op een overheadkost van 72 044 EUR

De totale jaarlijkse kaskosten en een overzicht van de componenten worden weergegeven in volgende tabel.

Tabel 18 : Overzicht van jaarlijkse kaskosten

	Mobiele pyrolyse	Percentage (%)
Kostprijs voor biomassa (EUR)	400 770	20,7
Transportkosten (EUR)	21 743	1,1
Arbeidskosten (EUR)	750 000	38,7
Afvoer van assen/char (EUR)	264 990	13,7
Energiekosten (EUR)	273 719	14,1
Opstartkosten (EUR)	4 500	0,2
Herstelling- en onderhoudskosten (EUR)	108 066	6
Overheadkosten (EUR)	72 044	4,5
Jaarlijkse kaskosten (EUR)	1 935 374	100

Uit bovenstaande tabel blijkt dat de totale operationele kosten voor 39% bestaan uit personeelskosten en 21% uit de aankoopprijs voor biomassa. De transportkosten echter zijn zeer laag. Dit kan enerzijds verklaard worden doordat het aanvoergebied in de Kempen klein is waardoor de transportafstanden zeer beperkt blijven. Anderzijds werd al 39 420 EUR voor het uitrijden van de biomassa opgenomen in de kostprijs voor biomassa.

6.3.2 Kasopbrengsten

De producten die ontstaan bij de pyrolyse van biomassa zijn pyrolyse-olie, char en gassen. De gassen worden aangewend als brandstof voor de reactor en worden dus rechtstreeks verbruikt. De pyrolyse-olie kan tijdelijk opgeslagen worden en vervolgens

verkocht worden tegen een marktprijs. De char is in deze gevalstudie vervuild met zware metalen en verliest hierdoor zijn economische waarde waardoor de char, samen met de assen, gestort dient te worden.

In de scenarioanalyse wordt onderzocht hoeveel de inkomsten stijgen in een scenario waarin de biomassa niet vervuild is met zware metalen en de geproduceerde char verkocht kan worden tegen de marktwaarde.

6.3.2.1 Opbrengsten uit de verkoop van geproduceerde pyrolyse-olie

Momenteel is er geen markt voor pyrolyse-olie aanwezig in België waardoor de prijszetting voor deze olie sterk kan variëren. Het is aangewezen om de prijs van aardgas als referentie te gebruiken. Een prijsbeleid, waarbij een arbitraire vermindering van 10% wordt toegepast op de prijs van aardgas, wordt gehanteerd om tot een prijs voor pyrolyse-olie te komen. Ook Sorenson (2010) houdt in zijn prijsbeleid rekening met een prijsvermindering van 10%. De korting moet dienen als stimulans om over te schakelen op pyrolyse-olie. Ook wordt deze lagere prijs aangehouden zodat klanten extra kunnen investeren in de aanpassingen van de uitrusting zoals de vervanging van verbranders of het aanschaffen van roestvrije opslagcontainers die beter bestand zijn tegen corrosie. Toch zal er in de toekomst, wanneer een marktsegment gevormd is, getracht worden de prijs van pyrolyse-olie op te waarderen dankzij het duurzame karakter van pyrolyse-olie. (Sorenson, 2010) Ook moet opgemerkt worden dat energieprijzen door de voorspelde uitputting van fossiele brandstoffen een sterk stijgende trend kennen en er daardoor een hogere prijs voor groene energie gevraagd kan worden.

De formule voor de prijs van pyrolyse-olie ziet er als volgt uit:

$$P_p = P_a * 90\% \quad (16)$$

Waarbij P_p de prijs voor pyrolyse-olie voorstelt en P_a de prijs voor aardgas. De prijs voor aardgas bedraagt volgens de Creg (2010) 31,15 EUR/MWh. Omgerekend komt dit overeen met een prijs van 8,65 EUR/GJ voor aardgas. 1 kWh is immers ongeveer 3,6 MJ.

Gebaseerd op een aardgasprijs van 8,65 EUR/GJ en de 10% prijsvermindering bekomen we een energieprijz voor pyrolyse-olie van 7,785 EUR/GJ. Bradley (2006) geeft een prijsinterval van 5,5–11,5 EUR/GJ met een gemiddelde verkoopprijs van 8,4 EUR/GJ voor

zware brandstoffen en aardgas, en vermeldt dat de prijs voor pyrolyse-olie in juni 2005 4,8 tot 7,8 EUR/GJ bedroeg. Verykios (2004) geeft een prijsinterval van 4,5 tot 7,1 EUR/GJ voor pyrolyse-olie wanneer we de gegeven waarden van 6-9 USD/GJ omrekenen naar euro's. Voets & Bloemen (2009) hanteren in hun studie een prijs voor pyrolyse-olie gelijk aan 9 EUR/GJ. Brammer et al. (2005) stellen dat 8,88 EUR/GJ een redelijke prijs voor pyrolyse-olie is. Op basis van voorgaande gegevens kunnen we stellen dat een prijs voor pyrolyse-olie van 7,5 EUR/GJ aannemelijk is.

Als jaarlijks 4 015 000 liter pyrolyse-olie wordt geproduceerd met de mobiele reactoren, wat overeen stemt met 75 161 GJ bij een energiedichtheid van 18,72 MJ/l²⁸ (Stals et al., 2010b), levert de verkoop van de pyrolyse-olie met een energieprijis van 7,5 EUR/GJ een inkomstenstroom van 563 706 EUR op.

6.3.2.2 Opbrengsten aan subsidies

Hoewel de productie van pyrolyse-olie niet rechtstreeks in aanmerking komt voor groenestroomcertificaten (GSC), is het toch mogelijk om een deel van deze subsidies op te eisen. De afnemer van pyrolyse-olie zal namelijk duurzame energie opwekken waardoor deze in aanmerking komt voor GSC. Door het gebruik van een gericht prijsbeleid is het dus mogelijk om een deel van de subsidies op te eisen voor de productie van de pyrolyse-olie. Het is niet meer dan rechtvaardig dat de subsidies verdeeld worden over de verschillende schakels in de biomassaketen. Een GSC is het bewijs dat 1 000 kWh elektriciteit in Vlaanderen opgewekt is uit een hernieuwbare energiebron. (VREG, 2011a) De minimumprijs per certificaat bedraagt 90 EUR/MWh voor een installatie in dienst vanaf 01/01/2010. (VREG, 2011b)

Jaarlijks wordt 4 015 000 liter pyrolyse-olie aangemaakt. Met een verbrandingsmotor met een efficiëntie van 43,5% kan hiermee 32 695 GJ²⁹ energie opgewekt worden. (Voets & Bloemen, 2011) Bij een omzettingratio van 0,2778 MWh/GJ correspondeert dit met een energieoutput van 9 083 MWh. De GSC kunnen de biomassaketen dus minimum 817 470 EUR opbrengen. Met de veronderstelling dat we via een gericht prijsbeleid de helft van de GSC kunnen innen, brengt dit jaarlijks 408 735 EUR op. Omgerekend komt

²⁸ 18,72 MJ/l = 15,6 MJ/kg x 1,2kg/l

²⁹ 32 695 GJ = 4 015 000 l x 0,01872 GJ/l x 0,435

dit overeen met een prijsstijging van 5,44 EUR/GJ³⁰ voor pyrolyse-olie die hierdoor stijgt van 7,5 EUR/GJ tot ongeveer 13 EUR/GJ. De totale opbrengsten worden samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 19 : Samenstelling totale opbrengsten

	Mobiele pyrolyse
Opbrengst uit verkoop pyrolyse-olie (EUR)	563 706
Opbrengst uit subsidies(EUR)	408 735
Totale opbrengst (EUR)	972 441

6.4 Netto contante waarde

Nu de totale initiële investeringskost en de jaarlijkse inkomende en uitgaande kasstromen bekend zijn is het mogelijk de netto contante waarde van het investeringsproject te berekenen. Alvorens de NCW wordt berekend moeten eerst enkele veronderstellingen gemaakt worden. Zoals reeds vermeld wordt in deze studie een vennootschapsbelasting (b) van 33% gebruikt.

De jaarlijkse afschrijvingen worden berekend aan de hand van de lineaire afschrijvingsmethode, door de totale investeringskost te delen door de levensduur van de activa. Uit studies van Hwang (2002/2003), betreffende de economische en fysische levensduur van diverse activa, wordt aangetoond dat verwarmingsinstallaties en elektrische installaties een fysieke levensduur kennen van 20,28 jaar en een economische levensduur van 14,31. Vrachtwagens en aanverwanten krijgen in de studie een fysieke levensduur van 24,49 jaar en een economische levensduur van 19,60 toegewezen. De mobiele reactor wordt gezien als een combinatie van de 2 vermelde activa en kan bijgevolg de duur van het investeringsproject fysiek overleven. De mobiele reactor wordt afgeschreven op de termijn van het investeringsproject, namelijk 21 jaar.

De kapitaalkost voor belastingen (r^*) is 10%. De kapitaalkost na belastingen (r) wordt berekend door formule 5 in paragraaf 5.5 en bedraagt 6,7%. De belastingen worden bepaald aan de hand van de jaarlijkse netto kasstroom. Deze wordt verkregen door de inkomende kasstromen te verminderen met de uitgaande kasstromen.

³⁰ 5,44 EUR/GJ = 408 735 EUR / 75 160,8 GJ

Tabel 20 : Berekening van de totale netto kasstroom na belastingen

	mobiele reactor
Kasopbrengsten (O_t) (EUR)	972 441
Kaskosten (Q_t)(EUR)	1 895 831
Netto kasopbrengsten voor belastingen ($O_t - Q_t$)(EUR)	-923 391
Netto kasopbrengsten na belastingen $(1-b) \times (O_t - Q_t)$ (EUR)	-923 391
Belastingschild afschrijvingen $b \times (I/n)$ (EUR)	56 606
Totale netto kasstroom na belastingen $(1-b) \times (O_t - Q_t) + b(I/n)$ (EUR)	-866 785

De netto kasopbrengsten voor belastingen zijn negatief waardoor een belastingstarief van 0% wordt toegepast. Verlies kan namelijk niet belast worden. Hierdoor zijn de netto kasstromen na belastingen gelijk aan de netto kasstromen voor belastingen.

De netto contante waarde wordt vervolgens berekend aan de hand van formule 10 opgesteld in paragraaf 5.5:

$$NCW = \sum_{t=1}^n (a_{n-r} * [(1-b) * K_t + b(I_0/n)]) - I_0$$

$$\text{Met } a_{n-r} = (1 - (1+r)^{-n}) / r$$

Via bovenstaande formules wordt een NCW van -13 064 562 EUR verkregen. Het investeringsproject kent een negatieve netto contante waarde en wordt economisch gezien niet aanvaard.

Hoofdstuk 7: Centrale pyrolyse

7.1 Productie en reactor veronderstellingen

De bezettingsgraad van een centrale reactor wordt verondersteld niet veel te verschillen met die van een mobiele reactor. Volgens Bridgwater et al. (2002) wordt de bezettingsgraad voor een centrale reactor gelijkgesteld aan 80% terwijl Brammer et al. (2005) in hun werk een bezettingsgraad van 90% hanteren. De centrale reactor wordt in deze masterproef net als de mobiele reactoren 24 uren per dag ingezet, en dit gedurende een volwaardig jaar van 365 dagen en tegen een bezettingsgraad van 80%. Hierdoor wordt de centrale reactor ongeveer 7000 h/jaar bezet.

Om een vergelijking met het mobiele pyrolysesysteem mogelijk te maken wordt voor de centrale reactor een capaciteit van 30 tds per dag gekozen, het equivalent van 3 mobiele reactoren met een capaciteit van 10 tds per dag. De hoeveelheid biomassa die jaarlijks verwerkt wordt is hierdoor voor beide pyrolysesystemen gelijk zodat eenvoudig onderzocht kan worden welk pyrolysesysteem het meest geschikt is voor de verwerking van biomassa uit fyto-remediatie in de Kempen. Jaarlijks wordt 8 760 tds hout verwerkt.

Sorenson (2010) stelt in zijn onderzoek de pyrolyse-opbrengsten van centrale pyrolyse gelijk aan die van mobiele pyrolyse. Voor de centrale reactor wordt daarom gekozen voor de zelfde pyrolyseopbrengsten als het mobiele systeem met 55% pyrolyse-olie en 25% char. Het gas (20%) wordt zoals in het mobiele systeem aangewend als brandstof voor het reactieproces. De reactor zet jaarlijks 8 760 tds hout om tot 4 015 000 liter (4 818 ton) pyrolyse-olie en 2 190 ton char.

Tabel 21 : Jaarlijkse in- en output

	Centrale pyrolyse
Jaarlijks vrijkomende biomassa (Tds/j)	8 760
Jaarlijks geproduceerde pyrolyse-olie (l)	4 818
Jaarlijks geproduceerde char (ton)	2 190

7.2 De initiële investering

7.2.1 *De totale investeringskosten*

Om een inzicht te krijgen in de kostenstructuur van de investeringskost hebben Bridgwater et al. (2002) een overzicht opgesteld van de gebruikelijke structuur van de investeringskost. Hierin wordt een onderscheid gemaakt tussen de directe kosten die samen met de kosten voor ontwerp, engineering, toezicht en overhead de geïnstalleerde kosten vormen. De totale investeringskost wordt verkregen wanneer bij de geïnstalleerde kosten nog diverse kosten worden toegevoegd zoals hieronder is te zien:

Pyrolysesysteem	
+ opbouw	
+ pijpleidingen	
+ instrumenten	
+ elektrische werken	
+ civiele werken	
+ structuren & gebouwen	
+ isolaties	
= directe kosten (DK)	
+ ontwerp, engineering & toezicht	(10-20 % van DK)
+ overhead	(5-20% van DK)
= geïnstalleerde kosten (IK)	($\approx$ 125% van DK)
+ inbedrijfstelling	(1-10% van IK)
+ onvoorziene kosten	(0-50% van IK)
+ lonen van aannemers	(5-15% van IK)
+ interesten tijdens commissie	(7-15% van IK)
= investeringskost van het pyrolyseproces (TPC)	($\approx$ 135% van IK & 169% van DK)

De investeringskost van een centrale pyrolyse systeem kan geschat worden via een regressieformule, opgesteld door Bridgwater (2011). De formule is al meerdere malen aangepast aan meer recente gegevens. Tabel 22 geeft de verschillende formules weer die doorheen de jaren gebruikt werden.

Tabel 22 : Investeringskost van een centraal pyrolysesysteem

Bron	Formule	Investeringskost (EUR)
Bridgwater (2002) ⁽¹⁾	$TPC_{2002} = 40,8 \times (Q_{h,dry} \times 1000)^{0,6194}$	3 379 763
Bridgwater (2009)	$TPC_{2009} = 6,03 \times (Q_{h,dry})^{0,67}$	7 002 402
Bridgwater (2011)	$TPC_{2011} = 6,98 \times (Q_{h,dry})^{0,67}$	8 105 599

(1) Exclusief opslagkost pyrolyse-olie

Hierbij is TPC de investeringskost van het pyrolysesysteem, van voorbehandelde en droge biomassa tot pyrolyse-olie in opslagtank. (Bridgwater, 2009) Q stelt de verwerkingsratio van de reactor in ton droge stof per uur (tds/h) voor. Een capaciteit van 30 tds per dag is equivalent met een doorstroming van 1,25 tds/h bij een werkdag van 24 uren. De totale investeringskost omvat het ontwerp, de uitrusting, de constructie, en de inbedrijfstelling en wordt hierboven samengevat. De grondkost is niet opgenomen in de regressiefuncties van Bridgwater bij de berekening van de investeringskost. (Bridgwater, 2011b)

De schattingen van de kapitaalkost kennen een groot verschil. Via mailcorrespondentie (bijlage 4) meldt Bridgwater (2011b) dat dit het gevolg is van inflatie en nieuwe regelgeving betreffende gezondheid en veiligheid. Bovendien is de investeringskost van nieuwe technologieën onzeker en kan deze sterk variëren op korte termijn. (Bridgwater, 2009).

7.2.1.1 Opslagkosten

De totale opslagkosten bestaan net als voor mobiele pyrolyse uit de opslag van biomassa en pyrolyse-olie. De opslagkosten voor centrale pyrolyse zijn reeds opgenomen in de formule van de investeringskost, gegeven door bridgwater (2011). Deze formule omhelst een investeringskost van een pyrolysesysteem van droge grondstof tot vloeibare pyrolyse-olie in opslagtank. Om een beter inzicht te krijgen in de omvang van deze kosten worden deze echter kort besproken.

7.2.1.1.1 Opslag van biomassa

Aangezien mobiele en centrale pyrolyse eenzelfde hoeveelheid biomassa per jaar verwerken, lijkt het aannemelijk dat beide systemen eenzelfde opslagcapaciteit nodig hebben. Dit is echter niet het geval doordat mobiele pyrolyse ieder jaar een andere opslaglocatie vereist. Dit houdt in de opslagkost vermenigvuldigd moet worden met het aantal intermediaire opslagplaatsen. Dit is echter niet het geval voor centrale pyrolyse waar één opslaglocatie jaarlijks instaat voor de opslag van 26 280 m³ vrijkomende biomassa. Met een opslagkost van 1,36 EUR/m³/j uit tabel 6 van paragraaf 6.2.1.2 wordt de opslagkost voor biomassa gelijkgesteld aan 752 400 EUR op 21 jaar.

7.2.1.1.2 Opslag van pyrolyse-olie

Een centrale reactor waar jaarlijks 4 015 000 liter pyrolyse-olie wordt geproduceerd en bijgevolg dagelijks 11 000 liter, heeft nood aan een passende opslagmethode. Hiervoor dient een silo aangekocht te worden. Deze opslagtank zorgt ervoor dat het bedrijf een buffer pyrolyse-olie kan aanleggen voor het geval er zich een eventueel ongeplande stillegging van de centrale voordoet.

De opslagkosten behelzen silo's/tanken voor de opslag van pyrolyse-olie en pompen die instaan voor de transfer van de olie van reactor tot opslagtank. Deze kosten zijn reeds opgenomen in de berekeningen maar om een zicht te krijgen op de omvang van deze opslagkosten wordt gebruik gemaakt van de formule van Bridgwater et al. (2002),

$$TPC_{Storage} = 119 \cdot 10^3 \cdot (Q_{h,conv})^{0.4045}$$

Hierbij stelt $TPC_{Storage}$ de totale opslagkosten van het systeem voor en $Q_{h,conv}$ ($=0.52 \times Q_{dry}$) de outputstroom van pyrolyse-olie (ton/u). Met een conversiepercentage van 55% komt dit overeen met een outputstroom van 550 kilogram pyrolyse-olie per ton biomassa en bedraagt $Q_{h,conv}$ 0,1833 ton/h³¹.

$$\text{Totale opslagkost} = 119 \times 10^3 \times (0.55 \times Q_{dry})^{0.4045} = 59\,913,97 \text{ EUR}$$

De opslagkost van pyrolyse-olie bedraagt 59 914 EUR. Door inflatie in rekening te brengen zal de opslagkost voor pyrolyse-olie echter hoger uitvallen.

³¹ 0,183 = 10 tds/d * 0,8% * 0,55% /24h

7.2.2 Totale investeringskost

De totale investeringskost wordt gevormd door de meeste recente formule uit tabel 22 en bedraagt 8 105 599 EUR voor een 30 tds per dag reactor. Deze omvat zowel de kost voor het pyrolysesysteem als de opslag van biomassa en pyrolyse-olie. Kosten verbonden aan de aankoop van gronden worden niet opgenomen.

7.2.3 De verhoogde investeringsaftrek

Voor de berekening van de verhoogde investeringsaftrek wordt formule 12 uit paragraaf 6.2.2 omgevormd zodat deze van toepassing is op een centraal pyrolysesysteem. Een parameter wordt aan formule 12 toegevoegd omdat slechts een fractie van de totale investeringskost van centrale pyrolyse in aanmerking komt voor de verhoogde investeringsaftrek. Een centrale reactor heeft namelijk bijkomende kosten die zich niet voordoen bij mobiele pyrolyse zoals gebouwen, gronden, commissies, lonen van aannemers en andere installatiekosten. Uit gegevens van Ceunen (2008), betreffende verbranding en vergassing blijkt dat 55 tot 60% van de investeringscomponenten in aanmerking komen voor de verhoogde investeringsaftrek.

Hier wordt verondersteld dat 59% van de totale investeringskost in aanmerking komt voor de verhoogde investeringsaftrek, baserend op de kostenstructuur in paragraaf 7.2.1. De verhoogde investeringsaftrek wordt enkel toegepast op de directe kosten die eigen zijn aan het pyrolyseproces en bestaan uit de activa die instaan voor de werking van het pyrolyseproces. De directe kosten omvatten 59% ³² van de totale investeringskost. Hierdoor verandert formule 11 naar:

$$\text{Investeringsaftrek} = I \times f \times b \times c \quad (17)$$

I = totale investeringsbedrag

f = fractie van de totale investeringskost dat in aanmerking komt voor verhoogde investeringsaftrek (59%)

b = het belastingstarief (33%)

c = het investeringsaftrekpercentage (13,5%)

³² 59% = 100%/169%

Voor een totale investeringskost van 8 105 599 kunnen we rekenen op een verhoogde investeringsaftrek van 213 052 EUR.

7.2.4 De initiële investering

Wanneer we de totale investeringskost verminderen met de verhoogde investeringsaftrek bekomen we de initiële investeringskost.

Tabel 23 : Berekening van de initiële investeringskost

	Centrale pyrolyse
Totale investeringskost (EUR)	8 105 599
Investeringsaftrek (EUR)	213 052
Initiële investeringskost (EUR)	7 892 547

7.3 De jaarlijkse kasstroom

7.3.1 De jaarlijkse werkingskosten

7.3.1.1 Kostprijs voor biomassa

Aangezien er jaarlijks een even grote hoeveelheid biomassa verwerkt wordt in beide systemen is de kostprijs voor biomassa dezelfde als in het mobiele systeem. De kostprijs bedraagt 400 770 EUR en omhelst het oogsten, uitrijden (transport: fase 1), drogen en verkleinen, alsook de recuperatie van de kost voor het storten van assen en char. Merk op dat enkel de transportkost voor fase 1 wordt opgenomen in de kostprijs van korteomloophout. De transportkost in fase 2 wordt afzonderlijk behandeld ter vergelijking van de pyrolysesystemen.

7.3.1.2 Fase 2: transport van biomassa tot centrale reactor

Voor de berekeningen van de transportkosten in fase 2 worden andere berekeningen gehanteerd dan voor de transportkosten in fase 1. De transportkosten in fase 1 betreffen het vervoer over zeer korte afstanden waardoor de transportkosten als een vaste kost beschouwd kunnen worden. Fase 1 omvat namelijk het uitrijden van het hout van het veld tot een intermediaire opslagplaats.

Fase 2 betreft het transport van biomassa van de intermediaire opslagplaats tot de centrale reactor. Deze centrale reactor kent een vaste locatie die zowel ver als kort bij het aanvoergebied gelegen kan zijn. Om deze reden wordt een formule gekozen, die de transportkost bepaalt afhankelijk van een variabele kost per uur. Dit laat toe om de transportafstand tot de centrale reactor te wijzigen en de invloed hiervan op de rendabiliteit te onderzoeken. De formule voor het berekenen van de transportkosten in fase 2 ziet er als volgt uit:

$$\text{Transportkost} = n \times 2 \times T \times L \times C_t \quad (18)$$

- n = het aantal vereiste ritten
- T = tortuosity factor = 1,41
- L = gemiddelde transportafstand
- C_t = transportkost per km

Hierbij wordt het aantal vereiste ritten berekend door de hoeveelheid jaarlijks vrijkomende biomassa te delen door de capaciteit van de vrachtwagens. Wanneer jaarlijks 35 040 m³³³ biomassa vrijkomt en deze vervoerd wordt in vrachtwagens met een capaciteit van 45 m³, moeten er 779 ritten gepland worden.

De gemiddelde afstand wordt net zoals in paragraaf 6.3.1.2 geschat op 8,1 kilometer. Enkel de centraal gelegen bioraffinaderij die pyrolyse-olie verwerkt wordt vervangen door een centrale pyrolyse reactor. De centrale reactor is dus net als de bioraffinaderij gelegen op Kristalpark III te Lommel.

De kostprijs van het transport werd opgevraagd bij verschillende Vlaamse en Nederlandse transportbedrijven, waarbij enkele een antwoord hebben gegeven. Zowel Hector Van Moer & Zonen BVBA als De Jong Gameren B.V. hebben via

³³ 35 040 m³ = 8 760 tds / 0,250 tds/m³

mailcorrespondentie (bijlage 5) laten weten een gemiddelde kostprijs van 70 EUR per uur aan te rekenen voor hun diensten. Deze kost werd aangerekend voor transport met een laadvermogen van zowel 45 m³ als 90 m³. De gekozen transportcapaciteit heeft aldus geen effect op de transportkost per uur. Bij een gemiddelde snelheid van 40 km/u komt dit neer op een gemiddelde transportkost van 1,75 EUR/km³⁴. In een sector, onderhevig aan veel concurrentie, kunnen we stellen dat er geen grote verschillen in de kostprijs worden verwacht.

Toch willen we de accuraatheid van deze bronnen echter staven met wetenschappelijke literatuur, omdat de variabele transportkost uit bovenvermelde bronnen afkomstig is van 2 kleinschalige transportbedrijven in België. In onderzoek van Bauen et al. (2010) wordt een variabele transportkost van 0,17 GBP/tds/km (=0,20 EUR/tds/km) gehanteerd in de UK. Met een dichtheid voor houtchips van 0,25 tds/m³, en een capaciteit van een vrachtwagen van 45m³, bekomen we een gemiddelde transportkost van 2,25 EUR/km³⁵. Met de zelfde berekening kan een transportkost van 12,3 EUR/tds voor 50 kilometer in onderzoek van Suurs (2002) omgevormd worden tot 2,77 EUR/km³⁶ bij een laadvermogen van 45 m³. Een gemiddelde transportkost van ongeveer 2,25 EUR/km wordt verder gebruikt in de berekeningen. De transportkost wordt vervolgens berekend met onderstaande formule:

$$\begin{aligned}\text{Transportkost} &= N \times 2 \times T \times L \times C_t \\ &= 779 \text{ ritten} \times 2 \times 1,41 \times 8,1\text{km} \times 2,25 \text{ EUR/km} \\ &= 40\,036 \text{ EUR}\end{aligned}$$

7.3.1.2.1 *Laadkost van biomassa*

Wanneer de biomassa over grote afstanden vervoerd moet worden, wordt de biomassa op de intermediaire opslagplaats overgezet in een vrachtwagen met een betere efficiëntie: hogere laadcapaciteit en snelheid. Sorenson (2010) hanteert een overzettingkost van 2.50 USD/tds (1,87 EUR/tds). Volgens Suurs (2002) bedraagt de laadkost 1,2 tot 2,1 EUR/ton afhankelijk van het vochtgehalte en dichtheid van de

³⁴ 1,75 EUR/km = 70 EUR/h / 40 km/h

³⁵ 2,25 EUR/km = 0,20 EUR/tds/km x 0,25 tds/m³ x 45 m³

³⁶ 2,77 EUR/km = 12,3/50 EUR/tds/km x 0,25 tds/m³ x 45 m³

biomassa. Ook in onderzoek van Bauen et al. (2010) wordt een vaste laadkost van 1,81 GBP/tds (2,1 EUR/tds) gehanteerd. Wanneer jaarlijks 8 760 tds biomassa overgeladen moet worden, bedraagt de laadkost bij een laadkost van 2 EUR/tds jaarlijks 17 520 EUR. Wanneer we de laadkost willen weergeven in functie van het aantal ritten zoals hieronder het geval is, zien we dat ook hier de transportkost rond de 70 EUR/h bedraagt.

Laadkost = Aantal ritten x laadtijd per rit x transportkost

$$= 779 \text{ ritten} \times (20 \text{ min} / 60 \text{ min}) \times 67,5 \text{ EUR/h}$$

$$= 17\,520 \text{ EUR}$$

7.3.1.2.2 *Totale transportkost*

De totale transportkost om de biomassa te vervoeren van een intermediaire opslagplaats tot de centrale reactor wordt verkregen wanneer de transportkost en de laadkost worden opgeteld. De totale transportkost bedraagt 57 556 EUR³⁷.

De transportkost voor het vervoeren van pyrolyse-olie werd berekend in paragraaf 6.3.1.2 en bedraagt 21 743 EUR. Door het toepassen van mobiele pyrolyse kan er jaarlijks 35 813 EUR bespaard worden op de transportkost van een intermediaire opslagplaats tot een centraal gelegen energieproducent/reactor. Dit is niet verwonderlijk wanneer we bekijken hoeveel energie er per rit vervoerd kan worden voor beide transportmiddelen. Een tankwagen van 30 m³ kan ongeveer 540 GJ³⁸ pyrolyse-olie per rit vervoeren, terwijl een vrachtwagen van 45 m³ slechts 202,5 GJ³⁹ biomassa kan verplaatsen per rit.

7.3.1.3 Energiekosten

Ook bij centrale pyrolyse bestaat het energieverbruik uit de behoefte aan warmte, elektriciteit en koelingwater, al dan niet op dezelfde wijze verkregen als tijdens mobiele pyrolyse.

³⁷ 57 556 EUR = 40 036 EUR + 17 520 EUR

³⁸ 540 GJ = 30 m³ x 1000 l/m³ x 18 MJ/l

³⁹ 202,5 GJ = 45 m³ x 0,250 tds/m³ x 18 GJ/tds

De behoefte aan warmte wordt net als bij mobiele pyrolyse voorzien door de verbranding van pyrolysegassen en wordt er ook hier een energiekost bespaard van 151 548 EUR. Ook het koelingwaterverbruik blijft onveranderd tegenover het mobiele systeem aangezien eenzelfde hoeveelheid kortoomloophout wordt verwerkt. Dit heeft een kost van 243 090 EUR tot gevolg.

Zoals aangegeven in paragraaf 6.3.1.3 bedraagt het elektriciteitsverbruik 45 kWh/tds en dit tegen een elektriciteitskost van 0,0777 EUR/kWh. De pyrolyse van 8760 tds kortoomloophout vereist bijgevolg 30 629,34 EUR.

Tabel 24 : Berekening van energieverbruik

	Centrale pyrolyse
Hoeveelheid biomassa (tds)	8 760
Vereist aantal koelwater (m ³)	162 060
Koelwaterkost (EUR)	243 090
Vereiste hoeveelheid elektriciteit (kWh)	394 200
Kostprijs elektriciteit (EUR/kWh) ⁴⁰	0,0777
Elektriciteitskosten (EUR)	30 629
Totale energiekost (EUR)	273 719
Vereiste energie voor warmte (GJ) (2GJ/tds)	17 520
Prijs aardgas (EUR/GJ)	8,65
Uitgespaarde energiekost (EUR)	151 548

7.3.1.4 Personeelskosten

In paragraaf 7.1 hebben we vooropgesteld dat de centrale reactor 24 uren per dag operatief is. Het is daardoor aan te raden dat we werken met een werkdag bestaande uit 3 shiften. Hoeveel werknemers per shift nodig zijn kan berekend worden dankzij een formule van Bridgwater et al. (2002). Deze formule maakt de berekening van het aantal gewenste werknemers per shift, afhankelijk van de capaciteit van de reactor. De formule ziet er als volgt uit:

$$\text{Gewenst aantal werknemers} = 1.04(Q_{h,\text{pret,dry}})^{0.475}$$

⁴⁰ Zie [paragraaf 6.3.1.3](#) voor de prijsbepaling van de elektriciteit

Deze formule stelt dat een reactor met een capaciteit van 30 tds per dag (1,25 tds/h) twee werknemers tewerk moet stellen per shift, oftewel 6 werknemers per dag van 3 shiften. Dit komt overeen met een tewerkstelling van 10 voltijdse equivalenten bij een werkweek van 33,6 uren. Dezelfde personeelskost van 50 000 EUR per werknemer wordt gebruikt waardoor de totale jaarlijkse personeelskost 500 000 EUR bedraagt bij een tewerkstelling van 10 werknemers.

7.3.1.5 Afvoer van de assen/char

De aangemaakte char en assen dienen ook in het centrale systeem afgevoerd te worden. De hoeveelheid geproduceerde char blijft onveranderd in vergelijking met het mobiele systeem. Ook de verwerkingskost van de assen/char van 121 EUR/ton in paragraaf 6.3.1.5 blijft ongewijzigd. De afvoerkost voor assen/char is bijgevolg gelijk voor beide systemen en bedraagt 264 990 EUR.

7.3.1.6 Herstellingen en onderhoudskosten

De herstelling- en onderhoudskosten worden zoals in paragraaf 6.3.1.6 geschat op 3% van de totale investeringskost. Dit komt overeen met een kost voor herstelling en onderhoud van 243 168 EUR.

7.3.1.7 Overheadkosten

De overheadkosten zijn net als de herstelling- en onderhoudskosten afhankelijk van de investeringskost en bedragen 2% van de totale investeringskost. Hierdoor bedragen de overheadkosten 162 112 EUR.

7.3.2 *Kasopbrengsten*

Centrale pyrolyse maakt dezelfde producten aan als het mobiele pyrolyse. Ook de productopbrengsten blijven ongewijzigd door de keuze van eenzelfde omzettingsfractie pyrolyse-olie.

7.3.2.1 Opbrengsten uit de verkoop van geproduceerde pyrolyse-olie

De centrale reactor maakt jaarlijks 4 015 000 liter pyrolyse-olie aan. Dit stemt overeen met een energiewaarde van 75 161 GJ. Wanneer de prijs voor pyrolyse-olie in paragraaf 6.3.2.1 van 7,5 EUR/GJ gehanteerd wordt kan een opbrengst van 563 706 EUR bekomen worden uit de verkoop van pyrolyse-olie. Daarnaast wordt ook hier de subsidies die de afnemers van pyrolyse-olie kunnen verdienen door de productie van duurzame energie uit pyrolyse-olie gedeeltelijk geïnd, waardoor jaarlijks 408 735 EUR extra opbrengsten ontstaan.

Een overzicht van de operationele kosten en opbrengsten, alsook de investeringskost, voor mobiele en centrale pyrolyse wordt in onderstaande tabel samengevat en vergeleken.

Tabel 25 : Samenstelling en vergelijking van de jaarlijkse netto kasstroom

	Mobiel systeem	Centraal systeem
Initiële investeringskost (EUR)	3 441 710	7 892 547
Kostprijs voor biomassa (EUR)	400 770	400 770
Transportkosten (fase 2)(EUR)	21 743	57 556
Arbeidskosten (EUR)	750 000	500 000
afvoer van assen/char (EUR)	264 990	264 990
Energiekosten (EUR)	273 719	273 719
Opstartkosten (EUR)	4 500	1 500
Herstelling- en onderhoudskosten (EUR)	108 066	243 168
Overheadkosten (EUR)	72 044	162 112
Jaarlijkse kaskosten (EUR)	1 895 832	1 903 816
Opbrengsten uit de verkoop pyrolyse-olie (EUR)	563 706	563 706
Opbrengsten uit de verkoop char (EUR)	0	0
Opbrengsten uit subsidies (EUR)	408 735	408 735
Jaarlijkse kasopbrengsten (EUR)	972 441	972 441
<u>Jaarlijkse netto kasstroom (EUR)</u>	<u>-923 391</u>	<u>-931 375</u>

Een vergelijking van beide systemen geeft voornamelijk een groot verschil weer in de investeringskost. Centrale pyrolyse vereist namelijk een grotere kost door infrastructuur,

gebouwen, het ontwerp en de opbouw van deze gebouwen, elektriciteit en pijpleidingen, uitrusting, commissie- en notariskosten voor grondtoewijzing, en eventuele onvoorzien kosten. De herstelling- en onderhoudskosten, en de overheadkosten zijn direct afhankelijk van de investeringskost waardoor deze rechtstreeks stijgen bij een hogere investeringskost.

Het grootste verschil in de operationele kosten is te merken bij de personeelskosten waar centrale pyrolyse een groot schaalvoordeel kent. Centrale pyrolyse zet namelijk 10 werknemers per week in terwijl mobiele pyrolyse 15 werknemers per week vereist om 3 kleine mobiele reactoren te bedienen. Mobiele pyrolyse is echter wel voordeliger op het vlak van transportkosten. De transportkosten in fase 2 worden zelfs meer dan gehalveerd. Toch nemen de transportkosten echter geen substantieel deel in van de totale operationele kosten aangezien de transportafstanden in het kleine aanvoergebied beperkt blijven. De transportkosten nemen slechts 3% van de totale jaarlijkse operationele kosten in. Doordat de 3 reactoren jaarlijks eenmaal verplaatst dienen te worden bedraagt de opstartkost voor mobiele pyrolyse 4 500 EUR. Voor centrale pyrolyse wordt jaarlijks een opstartkost van 1 500 EUR aangerekend.

De overige operationele kosten en opbrengsten zijn afhankelijk van de hoeveelheid biomassa die jaarlijks verwerkt wordt. Beide systemen verwerken jaarlijks eenzelfde hoeveelheid biomassa waardoor deze kosten en opbrengsten onveranderd blijven voor de beide pyrolysesystemen. Enkel een wijziging in de jaarlijkse hoeveelheid biomassa betekent een verandering in deze parameters.

In tabel 25 is te merken dat de jaarlijkse netto kasstroom tussen beide pyrolysesystemen weinig verschilt. Toch wordt opgemerkt dat dit verschil bij mobiele pyrolyse voornamelijk tot uiting komt door hogere personeelskosten en opstartkosten terwijl centrale pyrolyse eerder hogere transportkosten kent, alsook hogere overhead-, herstelling- en onderhoudskosten ten gevolge van een hogere investeringskost. Algemeen kan gesteld worden dat de initiële investeringskost een bepalende factor vormt bij de vergelijking van de kasstromen.

7.4 De netto contante waarde

De initiële investeringskost en de jaarlijkse inkomende en uitgaande kasstromen zijn berekend waardoor het mogelijk is om de netto contante waarde van het investeringsproject te bepalen. De veronderstellingen die opgesteld werden voor het mobiele systeem zijn nog steeds geldig, uitgezonderd de levensduur. De belastingsvoet (b) bedraagt 33%, de kapitaalkost voor belastingen wordt gelijkgesteld aan 10% en de levensduur van het investeringsproject wordt geschat op 21 jaar.

De belastingen worden bepaald aan de hand van de jaarlijkse netto kasstroom. Deze wordt verkregen door de jaarlijkse inkomende kasstromen te verminderen met de jaarlijkse uitgaande kasstromen.

Tabel 26 : Berekening van de totale netto kasopbrengsten na belastingen

	Centrale pyrolyse
Kasopbrengsten (O_t) (EUR)	972 441
Kaskosten (Q_t)(EUR)	1 903 816
Netto kasopbrengsten voor belastingen ($O_t - Q_t$)(EUR)	-931 375
Netto kasopbrengsten na belastingen $(1-b) \times (O_t - Q_t)$ (EUR)	-931 375
Belastingschild afschrijvingen $b \times (I/n)$ (EUR)	127 374
Totale netto kasopbrengsten na belastingen $(1-b) \times (O_t - Q_t) + b(I/n)$ (EUR)	-804 001

De netto kasopbrengsten voor belastingen zijn ook hier negatief waardoor een belastingstarief van 0% wordt toegepast. Hierdoor hebben de netto kasstromen na belastingen dezelfde waarde als de netto kasstromen voor belastingen. De netto contante waarde wordt vervolgens berekend aan de hand van formule 10 opgesteld in paragraaf 5.5:

$$NCW = \sum_{t=1}^n (a_{n-r} * [(1-b) * K_t + b(I_0/n)]) - I_0$$

Via bovenstaande formule wordt een NCW van -16 818 384 EUR verkregen. Het investeringsproject kent een negatieve netto contante waarde en wordt economisch gezien niet aanvaard. Voor een project van 21 jaar is er een verschil in NCW van 3 753 822 EUR tussen mobiele en centrale pyrolyse.

Tabel 27 : Berekening en vergelijking van de netto contante waarde

	Mobiele pyrolyse	Centrale pyrolyse
Initiële investeringskost (EUR)	3 441 710	7 892 547
Netto kasopbrengsten voor belastingen (EUR)	-923 391	-931 375
Netto kasopbrengsten na belastingen (EUR)	-923 391	-931 375
Belastingschild afschrijvingen (EUR)	56 606	127 374
Totale netto kasopbrengsten na belastingen (EUR)	-866 785	-804 001
NCW (EUR)	-13 064 562	-16 818 384

Het zuiveren van de Kempen doormiddel van pyrolyse geeft voor beide pyrolysesystemen een negatieve NCW. Wanneer echter een keuze gemaakt dient te worden is mobiele pyrolyse de meest aangewezen optie. Mobiele pyrolyse kent immers een hogere NCW. Dit is voornamelijk het gevolg van de lagere investeringskost in vergelijking met centrale pyrolyse. Centrale pyrolyse kent een hogere netto kasopbrengst per jaar maar dit weegt niet op tegen de veel hogere investeringskost voor centrale pyrolyse.

In het volgende hoofdstuk onderzoeken we de mogelijkheid om mobiele pyrolyse meer rendabel uit te voeren door een wijziging van de logistieke opstelling toe te passen. Hiertoe worden in hoofdstuk 8 enkele scenario's uitgewerkt.

Hoofdstuk 8: Scenarioanalyse

In de voorgaande hoofdstukken zijn de technische en economische factoren van mobiele en centrale pyrolyse besproken en wetenschappelijk onderbouwd. Op basis van deze informatie is vervolgens een basismodel ontwikkeld dat door beperkte aanpassingen omgevormd kan worden tot diverse scenario's die in zeer variërende situaties van toepassing zijn. In deze scenarioanalyse worden dan ook diverse scenario's uitgewerkt met als doel een optimaal model te vinden voor mobiele pyrolyse. De verschillende scenario's worden onderling vergeleken om te onderzoeken welke opstelling voor het mobiele systeem het meest rendabel is. De resultaten van de verschillende scenario's worden op het einde van dit hoofdstuk samengevat in tabel 31 en 32.

8.1 Scenario 1: Eén mobiele pyrolyse reactor

Deze scenarioanalyse gaat van start met het onderzoeken of één mobiele reactor niet economischer ingezet kan worden in vergelijking met 3 mobiele reactoren. Meerdere reactoren zijn voornamelijk te verkiezen wanneer de biomassa geconcentreerd is in bepaalde clusters zodat iedere reactor een cluster kan bedienen. In het geval van de Kempen waar het aanvoergebied klein is en de biomassa een niet zo verspreid karakter kent, kan het aangeraden zijn om te werken met één mobiele reactor met een hogere capaciteit. Een hogere capaciteit kan immers schaalvoordelen vertonen.

Zoals weergegeven op figuur 3 in paragraaf 5.1 heeft het gebruik van één mobiele reactor tot gevolg dat slechts 3 intermediaire opslagplaatsen nodig zijn. In het basismodel, dat werkt met 3 mobiele reactoren, waren minstens 9 opslagplaatsen vereist om de spreiding van de oogst over 3 jaar op te vangen. De Kempen bestaan in dit scenario uit 1 regio met 3 intermediaire opslagplaatsen, geplaatst in het centrum van de drie aanvoergebieden (A, B en C) zoals weergegeven op figuur 5 in paragraaf 5.2. Op deze manier kan de teelt van kortoomloophout nog steeds gespreid worden over 3 jaar zodat jaarlijks één regio geoogst wordt en het hout van deze regio verwerkt wordt. De veranderingen die in dit scenario voorkomen zijn voornamelijk van logistieke aard, of zijn het gevolg van schaalvoordelen door het gebruik van een grotere reactor.

Allereerst wordt een wijziging in de investeringskost verondersteld ten gevolge van een hogere verwerkingscapaciteit van de mobiele reactor. In dit scenario wordt één reactor met een capaciteit van 30 tds/d gebruikt, het equivalent van 3 kleine 10 tds/d reactoren. Ook hier wordt door het toepassen van de 'rule of six-tenths' methode een gemiddelde investeringskost gevonden voor een 30 tds/d mobiele reactor. De berekeningen worden weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 28 : Vergelijking investeringskost van mobiele reactoren

Bron	Capaciteit (tds/d)	Investeringskost (EUR)	EUR/tds	Investeringskost (EUR)(30 tds/d)
Agri-therm (2011)	10	1 122 586	112 259	2 422 169 ⁴¹
Palma (2011)	40	1 623 646	40 591	1 327 499 ⁴²
Sorenson (2010)	50	2 588 684	51 774	1 810 443 ⁴³

Uit tabel 28 wordt afgeleid dat de investeringskost van een 30 tds/d mobiele pyrolyse reactor zich begeeft tussen 1 327 499 EUR en 2 422 169 EUR met een gemiddelde van 1 853 371 EUR. Ter vergelijking, de investeringskost van 3 mobiele reactoren met samen eenzelfde capaciteit bedroeg 2 576 907 EUR.

Het gebruik van een grotere reactor vereist tegelijk een groter aantal werknemers per shift. Sorenson (2010) rekent voor een 50 tds/d reactor op 3 werknemers per shift terwijl Agri-therm voor een 10 tds/d reactor 1 werknemer per shift aanraadt. We kunnen dus aannemen dat een reactor die 30 tds biomassa per dag verwerkt 2 werknemers per shift vereist. Toch dalen de personeelskosten doordat slechts 1 reactor wordt ingezet, in vergelijking met 3 in het basismodel. De 30 tds/d reactor stelt 10 voltijdse equivalenten tewerk bij een werkweek van 33,6 uren. Dit zijn 5 werknemers minder dan wanneer 3 mobiele reactoren van 10 tds/d ingezet worden.

Een andere grote verandering is de wijziging van het aantal opslagplaatsen. Eén mobiele reactor betekent dat er slechts 3 intermediaire opslagplaatsen vereist zijn om zo de spreiding van de oogst over drie jaar op te vangen. Een wijziging in het aantal

⁴¹ 2 422 169EUR= 1 122 586 EUR x (30/10)^{0,7}

⁴² 1 327 499EUR= 1 623 646 EUR x (30/40)^{0,7}

⁴³ 1 810 443EUR= 2 588 684 EUR x (30/50)^{0,7}

opslagplaatsen is een cruciale factor in de biomassaketen aangezien deze zowel de opslagkosten, de transportkosten, als de opstartkosten beïnvloedt. Meerdere opslagplaatsen betekenen immers:

- Hogere opslagkosten door het verliezen van schaalvoordelen in opslag
- Kortere transportafstanden voor het uitrijden van de biomassa
- hogere opstartkosten door een stijging van het aantal verplaatsingen van een mobiele reactor

De 3 opslagplaatsen moeten elk instaan voor de opslag van een jaarlijks vrijkomende hoeveelheid biomassa van 26 280 m³. Jaarlijks wordt namelijk 35 040 m³ houtchips geoogst, waarvan al 25% verwerkt wordt tot pyrolyse-olie tijdens de oogstperiode. De 3 opslagplaatsen staan bijgevolg samen in voor een totale opslagcapaciteit van 78 840 m³. De gemiddelde kostprijs voor 3 opslagloodsen wordt gegeven in bijlage 1 en bedraagt 1,574 EUR/m³/j zodat de investeringskost voor opslag 868 680 EUR⁴⁴ bedraagt.

Door een wijziging in het aantal intermediaire opslagplaatsen veranderen tevens de transport- en opstartkosten. De transportkosten voor het uitrijden van de biomassa stijgen doordat de transportafstand stijgt naarmate er minder opslagplaatsen zijn. Hierdoor dient de biomassa een grotere afstand af te leggen tot de dichtstbijzijnde opslagplaats. In het basismodel werd voor het uitrijden van de biomassa een variabele kost per ton droge stof gehanteerd waarbij de transportafstand maximaal 2 km bedraagt. Door het aantal opslagplaatsen te beperken, stijgt de gemiddelde transportafstand voor het uitrijden van de biomassa. De transportafstand wordt verondersteld te verdubbelen tot ongeveer 4 à 5 km. Een verdubbeling van de transportafstand heeft tevens een verdubbeling van de transportkost tot gevolg. Hierdoor stijgen de transportkosten voor het uitrijden van biomassa tot 9 EUR/tds. Dit bedrag bevindt zich nog steeds binnen de range van 4,2-10,39 EUR/tds die werd gevonden in wetenschappelijke literatuur. De transportkost voor het uitrijden van biomassa bedraagt bijgevolg 78 840 EUR. Hiervan werd reeds de helft in rekening gebracht in de kostprijs van de biomassa voor het uitrijden van de biomassa tot 2 km. Het resterende bedrag wordt opgeteld bij de transportkosten van fase 2.

De opstartkosten echter zullen dalen doordat er jaarlijks minder mobiele reactoren verplaatst moeten worden en op procestemperatuur gebracht moet worden. Waar in het

⁴⁴ 868 680 EUR = 78 840 m³ x 1,574 EUR/m³/jaar x 21/3jaar

basismodel 3 mobiele reactoren zich jaarlijks verplaatsten, wordt nu slechts één reactor per jaar verplaatst. De opstartkost bedraagt slechts 1 500 EUR.

Verder veronderstellen we dat de afstand voor olietransport ongewijzigd blijft waardoor de transportkost voor fase 2 niet wijzigt tegenover het basismodel. De veronderstelling dat de afstand voor olietransport grotendeels ongewijzigd blijft wordt kort weergegeven op figuur 4 in paragraaf 5.1. De afstand van de intermediaire opslagplaats tot een eindbestemming is gelijkaardig aan de gemiddelde afstand van de kleinere opslagplaatsen tot dezelfde bestemming. Dit komt doordat de intermediaire opslagplaats zich centraal bevindt tegenover deze kleinere opslagplaatsen.

8.2 Scenario 2: Opslag van biomassa bij de landbouwer

In scenario 2 wordt de rendabiliteit van het systeem onderzocht wanneer de pyrolyse reactor zich verplaatst van landbouwer tot landbouwer. Hierbij werken we verder op scenario 1 omdat dit scenario meer rendabel blijkt te zijn dan het basismodel, besproken in hoofdstuk 6. Door de reactor van landbouwer tot landbouwer te verplaatsen stijgt het aantal opslagplaatsen aanzienlijk waardoor het volledige logistiek model wijzigt.

We veronderstellen dat iedere landbouwer een erf heeft van 36,5 ha landbouwgrond. Onder deze veronderstelling zijn er 30 landbouwers⁴⁵ die deelnemen aan het saneringsproject en elk hun erf verhuren als intermediaire opslagplaats. De huurprijs van een opslaglocatie wordt verondersteld gelijkaardig te zijn aan de kostprijs van een opslaglocatie. Zoals aangegeven in bijlage 1 bedraagt de kostprijs van opslag 1,32 à 1,8 EUR/m³ afhankelijk van het aantal opslaglocaties. Voor een scenario waarbij de totale jaarlijkse opslagcapaciteit wordt verdeeld over 30 verschillende locaties, wordt een huurprijs van 2 EUR/m³ voor de opslag van biomassa verondersteld. Hierdoor bedraagt de opslagkost van biomassa 1 103 760 EUR, een stijging van 235 080 EUR in vergelijking met scenario 1.

⁴⁵ 30 landbouwers = 1095ha / 36 ha/landbouwer

Het spreiden van de oogst over 3 jaar heeft tot gevolg dat jaarlijks 10 landbouwers worden bediend door de mobiele reactor. De reactor wordt dus jaarlijks 10 keer verplaatst en opgestart met een totale opstartkost van 15 000 EUR tot gevolg.

Net als voor scenario 1 wordt ook hier verondersteld dat de transportafstand voor het olietransport ongewijzigd blijft. Een tankwagen zal namelijk ritten moeten afleggen met zowel langere als kortere afstanden in vergelijking met scenario 1. De gemiddelde transportafstand zal bijgevolg niet tot nauwelijks wijzigen.

De opslagkost voor pyrolyse-olie zal in dit scenario sterk stijgen. Er kan namelijk niet zoals in paragraaf 6.2.1.2.2 bespaard worden op opslagcapaciteit. De reden hiervoor is dat maar één reactor wordt ingezet, met als gevolg dat maar één landbouwer gelijktijdig bediend kan worden. Een tankwagen zal dus slechts één landbouwer per rit bezoeken om een volle tank te vervoeren. Hierdoor dient iedere landbouwer een opslagcapaciteit te voorzien, equivalent aan de opslag van een volle tankwagen. Ook hier wordt dagelijks 11 000 liter pyrolyse-olie geproduceerd. Dit betekent dat een tankwagen om de 3 dagen olie bij de landbouwer kan komen ophalen. De landbouwer dient voor 3 dagen opslag te voorzien, namelijk 33 m³. Aangezien er in totaal 30 opslagplaatsen bediend worden zal de opslagkost voor pyrolyse-olie oplopen tot 198 000 EUR⁴⁶

De kostprijs voor het uitrijden van biomassa verandert terug naar het niveau van het basismodel waarbij het uitrijden van biomassa de 2 km niet overschrijdt. In het basismodel werken we met een tarief voor uitrijden van 4,5 EUR/tds, dat ook hier toegepast wordt.

8.3 Scenario 3: 42-jarig saneringsproject

In scenario 3 wordt onderzocht of het niet voordeliger is om een 42-jarig saneringsproject te verkiezen boven een 21-jarig saneringsproject. In het 21-jarige basismodel werd korteomloophout geplant op 1 095 ha grond, waarvan 1 018 ha vervuilde grond en 77 ha om de reactor op volle capaciteit te kunnen laten werken. In dit scenario echter wordt, zoals in paragraaf 2.3 vermeld, 1 783 ha korteomloophout

⁴⁶ 198 000 EUR = 33 x 30 opslagpl x 200 EUR

aangeplant. Dit betreffen gronden waarbij de vervuilingsgraad aan cadmium tussen 1,2 en 2,88 mg/kg ligt. Na een sanering van 21 jaar blijft nog 702 ha grond vervuild achter waardoor echter nog een 2^e saneringsperiode vereist is.

In de eerste saneringsperiode wordt 1 783 ha grond met kortoomloophout aangeplant. Jaarlijks komt er dus 14 264 tds hout vrij, of 39 tds per dag. Om 39 tds per dag te kunnen verwerken is bij een bezettingsgraad van 80% een reactor nodig met een verwerkingscapaciteit van 48,75 tds per dag. We veronderstellen een 50 tds/d reactor die onder een bezettingsgraad van 80% dagelijks 40 tds kan verwerken. Om de reactor een jaar lang op volle capaciteit te laten werken moet er bijgevolg 1 825 ha aangeplant worden.

In de tweede saneringsperiode wordt slechts 702 ha grond aangeplant. Hierdoor komt er jaarlijks 5 616 tds hout vrij, of 15,39 tds per dag. Dit vereist echter een 20 tds/d reactor die onder een bezettingsgraad van 80% dagelijks 16 tds kan verwerken. Hiervoor moet bijgevolg 730 ha grond aangeplant worden.

Net als voor scenario 1 maken we gebruik van de 'rule of six-tenths' om de investeringskost van een mobiele reactor met zowel een capaciteit van 50 tds/d als 20 tds/d te bepalen. De resultaten worden weergegeven in tabel 29.

Tabel 29 : Investeringskost van mobiele reactoren (50 en 20 tds/d)

Bron	Capaciteit (tds/d)	Investeringskost (EUR)	EUR/tds	Investeringskost (EUR) (50tds/d)	Investeringskost (EUR) (20tds/d)
Agri-therm (2011)	10	1 122 586	112 259	3 463 369	1 823 647
Palma et al. (2011)	40	1 623 646	40 591	1 898 141	999 471
Sorenson (2010)	50	2 588 684	51 774	2 588 684	1 363 079

We kunnen dus stellen dat de investeringskost van een 50 tds/d mobiele pyrolyse reactor zich begeeft tussen 1 898 141 EUR en 3 463 369 EUR met een gemiddelde van 2 650 065 EUR. Voor de 20 tds/d reactor vinden we een gemiddelde investeringskost van 1 395 399 EUR, die in jaar 21, het begin van de tweede saneringsperiode, voor een extra uitgaande kasstroom zorgt.

Net als in scenario 1 vereist het gebruik van een grotere reactor meerdere werknemers per shift. Sorenson (2010) rekent voor een 50 tds/d reactor op 3 werknemers per shift. De mobiele reactor stelt dus 15 voltijdse equivalenten tewerk bij een werkweek van 33,6 uren tegen een jaarlijkse personeelskost van 750 000 EUR. De 20 tds/d reactor wordt net als de 30 tds/d reactor verondersteld 2 werknemer per shift tewerk te stellen wat overeenkomt met 10 voltijdse equivalenten bij een werkweek van 33,6 uren. Hierdoor bedraagt de personeelskost 500 000 EUR.

Zoals eerder aangegeven komt in de eerste saneringsperiode meer biomassa vrij in vergelijking met het basismodel terwijl in de tweede saneringsperiode minder vrijkomt. Dit heeft direct effect op de vereiste opslagcapaciteit voor zowel biomassa als pyrolyse-olie. De opslagkosten voor biomassa stijgen tot 1 447 800 EUR voor de eerste saneringsperiode en dalen vervolgens naar 579 120 EUR in de tweede periode.

In de eerste saneringsperiode wordt jaarlijks 6 691 667 liter pyrolyse-olie aangemaakt. Dit betekent dat de mobiele reactor dagelijks 18 333 liter pyrolyse-olie produceert zodat een tankwagen van 30 m³ om de 1,6 dagen een volle tank kan vervoeren. Wanneer er wordt voorzien voor de opslag van 2 dagen, betekent dit dat een opslagcapaciteit van 37 000 liter vereist is. Via formule 11 in paragraaf 6.2.1.2.2 berekenen we dat de kostprijs voor de opslag van pyrolyse-olie 22 200 EUR bedraagt.

De tweede saneringsperiode produceert jaarlijks 2 676 667 liter, of 7 333 liter per dag. Een tankwagen van 30 m³ moet dus slechts om de 5 dagen een volle tank ophalen en transporteren. Een opslagcapaciteit van 37 000 liter moet minstens voorzien worden. Hierdoor bedraagt de opslagkost voor pyrolyse-olie in de tweede saneringsperiode 22 200 EUR.

De gewijzigde hoeveelheid vrijkomende biomassa heeft daarnaast ook gevolgen voor bijna alle opgenomen kosten die direct beïnvloed worden door de hoeveelheid te verwerken biomassa. Hieronder verstaan we de directe kosten zoals de grondstof-, transport-, opslag-, energie-, en afvoerkosten. Het resultaat van een hogere biomassahoeveelheid op deze kosten wordt in onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 30 : Directe kosten voor eerste en tweede saneringsperiode

	Eerste saneringsperiode	Tweede saneringsperiode
Vrijkomende biomassa (tds)	14 600	5 840
Kostprijs voor biomassa (EUR)	667 950	267 180
Transportkosten (fase 2)(EUR)	102 047	40 884
afvoer van assen/char (EUR)	441 650	176 660
Energiekosten (EUR)	456 198	182 480

Omdat het 42 jarig saneringsproject uit 2 perioden bestaat met verschillende jaarlijkse kasstromen wordt de formule voor de berekening van de NCW aangepast. De formule die voor dit scenario gehanteerd wordt, ziet er als volgt uit:

$$NCW = \sum_{t=1}^n (a_{21-r} * K_{t1}) - I_{01} + A_{21-r} [\sum_{t=1}^n (a_{21-r} * K_{t2}) - I_{02}] \quad (20)$$

Hierbij is:

$$A_{21-r} = \frac{1}{(1+r)^{21}}$$

Net als voorgaande scenario's wordt de NCW van de eerste saneringsperiode berekend met behulp van formule 10. De NCW van de tweede saneringsperiode wordt hierbij opgeteld. Voor de tweede saneringsperiode worden de kasstromen eerst verdisconteerd naar jaar 21 (zie vierkante haken). De factor A_{21-r} zorgt er vervolgens voor dat deze waarde wordt omgezet naar de actuele waarde in jaar 0.

8.4 Scenario 4: Het gebruik van een zuivere grondstof

Ten slotte wordt het scenario onderzocht waarbij de grondstof voor pyrolyse niet afkomstig is uit fyto-remediatie. De geproduceerde biochar bevat geen zware metalen en kan verkocht worden tegen een marktwaarde. Voor de uitwerking van scenario 4 baseren we ons op scenario 1 omdat dit het meest rendabele scenario uit de analyse blijkt te zijn.

Zoals vermeld in paragraaf 4.3.2 bestaat de mogelijkheid om voor de geproduceerde char een afzetmarkt te vinden. De biochar dient hierbij aan verschillende eisen te voldoen om verkocht te kunnen worden. De char mag bijvoorbeeld geen zware metalen bevatten die bij gebruik van de char terug in de omgeving terecht komen. De char kan bijgevolg aangewend worden voor de productie van elektriciteit of warmte of ingezet worden als bodemverbeteraar.

Voor biochar bestaat in Vlaanderen momenteel geen markt. Dit wil niet zeggen dat biochar in Vlaanderen niet verkocht kan worden. Biochar is volgens Coleman et al. (2010) namelijk gelijkaardig aan houtskool, met vergelijkbare eigenschappen, en kan als substituuut voor houtskool verkocht worden. Daarnaast bestaat er een markt voor biochar in Nederland waar biochar omgevormd en verkocht wordt als voedingstof voor de tuinbouw of als barbecuekolen/briketten. (Coleman et al., 2010) Barbecuekolen en briketten worden tegen een prijs van 1,4 - 1,8 EUR/kg verkocht. (Siemons, 2005) Ten slotte kan char beschouwd worden als een voorloper in de productie van geactiveerde carbon. (Azargohar & Dalai, 2006) Geactiveerde carbon wordt voornamelijk gebruikt voor lucht-, water- en gaszuivering, chemische of farmaceutische verwerkingsprocessen, rubberproductie, of vuurvaste materialen. Men verwacht dat de geactiveerde carbon verkocht kan worden tegen een kostprijs van 1 tot 4,5 EUR/kg. (Vanreppelen et al., 2011)

Energy Research Centre of the Netherlands (ECN, 2006) stelt dat de prijzen voor kolen zeer stabiel zijn, zelfs ondanks een toename in de vraag, en stijgingen van alternatieve brandstoffen. In hun onderzoek wordt een prijs van 2,05 EUR/GJ voor kolen aangenomen. Dit komt ongeveer overeen met 0,06 EUR/kg⁴⁷. Biochar kan volgens Bradley (2006) verkocht worden tegen een prijs van 1,5 EUR/GJ. Farag (2002) geeft een prijs van 20-25 USD/ton voor biochar wat overeenstemt met 0,015 – 0,019 EUR/kg⁴⁸. Het onderzoek van Palma et al. (2011) bevestigt dit met een verkoopprijs voor char van 24 USD/ton. Uit onderzoek van Galinato et al. (2010) aan de Universiteit van Washington werd een economische waarde voor biochar van 114,05 USD/ton (0,085 EUR/kg) bekomen. Wanneer een prijs voor biochar van 0,045 EUR/kg wordt gehanteerd kan de verkoop van biochar jaarlijks 98 550⁴⁹ EUR opleveren.

⁴⁷ 0,06 EUR/kg = 2,05 EUR/GJ * 29,5 MJ/kg

⁴⁸ wisselkoers 31 december 2010: 1 EUR = 1,3362 USD

⁴⁹ 98 550 EUR = 2 190 000 kg x 0,045 EUR/kg

De char en assen dienen in dit scenario niet meer gestort te worden waardoor de kost van het storten van deze restproducten wegvallen. De compensatie die de landbouwer werd aangerekend voor het verkopen van vervuild hout valt echter ook weg, waardoor deze veranderingen geen invloed hebben op de netto kasopbrengsten. Het verschil met andere scenario's is echter wel dat hier de char verkocht kan worden tegen de marktprijs van char. Dit levert een extra jaarlijkse kasopbrengst op van 98 550 EUR.

De verschillende scenario's worden samengevat en vergeleken in onderstaande tabellen.

Tabel 31 : Totale investeringskost over verschillende scenario's

			Basismodel		Scenario 1	scenario 2	Scenario 3		Scenario 4
			21 jarig Saneringsproject		1 mobiele reactor	Verwerking bij landbouwer	42 jarig saneringsproject		Zuivere biomassa
			mobiel systeem	centraal systeem			1e sanering	2e sanering	
Model	(1)	Aantal reactoren	3	1	1	1	1	1	1
	(2)	aantal verplaatsingen per reactor per jaar	1	0	1	10	1	1	1
	(3)	aantal regio's	3	1	1	1	1	1	1
	(4)	aantal intermediaire opslagplaatsen per regio	3	1	3	30	3	3	3
	(5)	Investeringskost van pyrolyseproces (EUR)	2 576 907	8 105 599	1 853 371	1 853 371	2 650 065	1 395 399	1 853 371
Opslag	(6)	Vereiste opslagcapaciteit (m³)	78 840	26 280	78 840	78 840	131 400	52 560	78 840
	(7)	Opslagkosten biomassa (EUR)	1 005 480	Incl.	868 680	1 103 760	1 447 800	579 120	868 680
	(8)	aantal opslagtanken (1000m³) per int opsl vereist	11	/	33	33	37	37	33
	(9)	Opslagkosten pyrolyse-olie (EUR)	19 800	Incl.	19 800	198 000	22 200	22 200	19 800
	(10)	Totale investeringskost (EUR)	3 602 187	8 105 599	2 741 851	3 155 131	4 120 065	1 996 719	2 741 851
	(11)	Investeringsaftrek (EUR)	160 477	213 051	122 149	140 561	183 549	52 483	122 149
	(12)	Initiële investeringskost (EUR)	3 441 710	7 892 547	2 619 702	3 014 570	3 936 516	1 944 236	2 619 702

(6) = jaarlijkse vrijkomende biomassa x 0,75 x (4)/ (2)

(8) = aantal dagen nodig voor het produceren van één tank (30 m³) x de dagelijks productie pyrolyse-olie / aantal reactors
= afronden (30 000l /dagelijkse productie olie) x dagelijkse productie olie/ aantal reactoren

(9) = (8) x (3) x (4) x 200 EUR

Tabel 32 : Kosten en opbrengsten over verschillende scenario's

	Basismodel		Scenario 1	scenario 2	Scenario 3		Scenario 4
	21 jarig Saneringsproject			Verwerking	42 jarig saneringsproject		
	Mobiel systeem	Centraal systeem	1 mobiele reactor	bij landbouwer	1e sanering	2e sanering	Zuivere biomassa
Initiële investeringskost (EUR)	3 441 710	7 892 457	2 619 702	3 014 570	3 936 516	1 944 236	2 619 702
Kostprijs voor biomassa (EUR)	400 770	400 770	400 770	400 770	667 950	267 18	665 760
Transportkosten (fase 2)(EUR)	21 743	57 556	61 163	21 743	102 047	40 884	61 163
Arbeidskosten (EUR)	750 000	500 000	500 000	500 000	750 000	250 000	500 000
afvoer van assen/char (EUR)	264 990	264 990	264 990	264 990	441 650	176 660	0
Energiekosten (EUR)	267 558	273 719	273 719	273 719	456 199	182 480	273 719
Opstartkosten (EUR)	4 500	1 500	1 500	15 000	1 500	1 500	1 500
Herstelling- en onderhoudskosten (EUR)	108 066	243 168	82 256	94 654	123 602	59 902	82 256
Overheadkosten (EUR)	72 044	162 112	54 837	63 103	82 401	39 934	54 837
Jaarlijkse kaskosten (EUR)	1 895 832	1 903 816	1 639 235	1 633 979	2 625 349	1 018 539	1 639 235
Opbrengsten uit de verkoop pyrolyse-olie (EUR)	563 706	563 706	563 706	563 706	939 510	375 804	563 706
Opbrengsten uit de verkoop char (EUR)	0	0	0	0	0	0	98 550
Opbrengsten uit subsidies (EUR)	408 735	408 735	408 735	408 735	681 199	272 475	408 735
Jaarlijkse kasopbrengsten (EUR)	972 441	972 441	972 441	972 441	1 620 720	648 279	1 070 991
Jaarlijkse netto kasstroom (EUR)	-923 391	-931 375	-666 794	-661 538	-1 004 629	-370 260	-568 244
NCW	-13 064 562	-16 818 384	-9 543 966	-9 808 384	-14 370 909	-5 706 440	-8 449 886
					-15 832 791		

Hoofdstuk 9: Sensitiviteitsanalyse

De berekeningen van de NCW zijn gebaseerd op veronderstellingen en schattingen uit de literatuur. Deze veronderstellingen en schattingen worden zo goed mogelijk benaderd maar kunnen afwijken van de werkelijkheid. Dit zorgt ervoor dat de berekeningen bij het bepalen van de NCW altijd een gedeelte onzekerheid bevatten. Door het toepassen van de sensitiviteitsanalyse wordt getracht een antwoord te bieden op deze onzekerheid.

Een sensitiviteitsanalyse is namelijk een systematische techniek, gebruikt voor het onderzoeken in welke mate schattingen en in het bijzonder op risico's gebaseerde beslissingen, afhankelijk zijn van de variabiliteit en onzekerheid in parameters. (EPA, 2001) Hiertoe wordt in bepaalde mate afgeweken van de vooropgestelde veronderstellingen om vervolgens de invloed op het resultaat te bepalen. Hierbij kunnen verschillende benaderingen zoals de enkelvoudige (one-way) en meervoudige (multiway) sensitiviteitsanalyse toegepast worden. Iedere benadering heeft zijn eigen doelstellingen en verschillen in de opname van het aantal parameters in de analyse. De enkelvoudige sensitiviteitsanalyse verandert slechts één parameter terwijl de meervoudige sensitiviteitsanalyse meerdere parameters simultaan wijzigt. (Taylor et al., 2009)

De sensitiviteitsanalyse wordt uitgewerkt met behulp van Crystal Ball, een Microsoft Excel add-in. Dit programma laat toe om zowel een enkelvoudige als meervoudige sensitiviteitsanalyse uit te voeren.

9.1 enkelvoudige sensitiviteitsanalyse

De meest eenvoudige sensitiviteitsanalyse is de enkelvoudige sensitiviteitsanalyse waarin slechts één parameter in het model wordt gewijzigd om vervolgens het effect van deze verandering op het resultaat te onderzoeken. Omdat maar slechts één parameter per keer gewijzigd wordt, is het gebruikelijk om deze methode te herhalen voor verschillende parameters of op verschillende tijdstippen. (Taylor et al., 2009) Dit laat toe om te onderzoeken welke parameters het meeste invloed uitoefenen op het eindresultaat.

Hiertoe worden de verschillende inputgegevens waarden toegekend die 20% hoger en lager liggen dan de oorspronkelijke waarde. De bijbehorende netto contante waarden

worden vervolgens berekend en in een tabel weergegeven. Dit doen we zowel voor scenario 1 (de meest rendabele opstelling voor mobiele pyrolyse) als centrale pyrolyse. De 10 meest gevoelige variabelen worden weergegeven in tabel 37 en 38 in bijlage 6 en zijn geordend volgens dalende invloed op de rendabiliteit. Parameters met een hoge range zijn het meest gevoelig en dragen het meeste bij tot het eindresultaat. In tabel 33 en 34 worden alvast de 3 meest gevoelige paramaters weergegeven.

Tabel 33 : Enkelvoudig sensitiviteitsanalyse mobiele pyrolyse (1 reactor)

Variabele	NCW (EUR)			Input	
	Downside	Upside	Range	Downside	Upside
Kostprijs KOH (EUR/Tds)	-8 013 022	-10 969 468	2 956 447	60,8	91,2
Prijs pyrolyse-olie (EUR/GJ)	-10 742 872	-8 239 618	2 503 255	6	9
Gemiddeld netto jaarloon (EUR)	-8 381 068	-10 601 422	2 220 355	40 000	60 000

Tabel 34 : Enkelvoudig sensitiviteitsanalyse centrale pyrolyse

Variabele	NCW (EUR)			Input	
	Downside	Upside	Range	Downside	Upside
Investeringskost (EUR)	-18 466 145	-14 075 025	4 391 120	9 726 718	6 484 479
Kostprijs KOH (EUR/Tds)	-14 792 362	-17 748 808	2 956 447	60,8	91,2
Prijs pyrolyse-olie (EUR/GJ)	-17 522 212	-15 018 958	2 503 255	6	9

De gevoeligheid van iedere parameter wordt weergegeven door de range, het verschil tussen het voor- en nadelige scenario. Een hogere range betekent dat de veranderende parameter een grotere invloed uitoefent op het eindresultaat.

Voor zowel mobiele als centrale pyrolyse zien we dat de kostprijs voor korteomloophout en de prijs voor pyrolyse-olie een grote invloed uitoefenen op de rendabiliteit. Bovendien heeft de hoge investeringskost van centrale pyrolyse tot gevolg dat deze parameter uiterst gevoelig is, terwijl deze parameter bij mobiele pyrolyse slechts op de 6^e plaats staat. Voor mobiele pyrolyse is door de lage investeringskost immers eerder de lonen een bepalende factor. Dit is niet verwonderlijk wanneer men weet dat de kostprijs voor korteomloophout en de personeelskosten samen ongeveer 55% van de totale operationele kosten uitmaken. Wanneer meerdere reactoren gebruikt worden kan dit door de sterke stijging in personeelskosten zelfs oplopen tot bijna 60%.

De mate waarin de prijs voor pyrolyse-olie een invloed heeft op het eindresultaat is te verklaren doordat de opbrengsten uit de verkoop van pyrolyse-olie het merendeel (59%) van de totale operationele opbrengsten uitmaken voor een bedrag van 563 706 EUR.

Uit tabel 34 kunnen we afleiden dat de rendabiliteit van centrale pyrolyse voornamelijk bepaald wordt door de investeringskost van het pyrolysesysteem. De investeringskost is voor centrale pyrolyse meer uitgesproken in vergelijking met mobiele pyrolyse. Bovendien heeft een hoge investeringskost tot gevolg dat tevens de herstelling- en onderhoudskosten, en overheadkosten een grotere invloed hebben op het eindresultaat. De hoge investeringskost oefent dus zowel direct als indirect invloed uit op de rendabiliteit van de investering.

Ten slotte valt op dat de transportkosten niet opgenomen worden in de top 10 van meest belangrijke parameters. In een klein aanvoergebied als de Kempen waar de transportafstanden beperkt blijven, hebben de transportkosten weinig invloed op het resultaat.

9.2 Meervoudige sensitiviteitsanalyse

De sensitiviteitsanalyse kent echter ook een meer complexe benadering waarbij de relatie tussen twee of meerdere parameters en hun effect op het resultaat onderzocht worden. De complexiteit komt meestal voort uit het feit dat meerdere bronnen van variabiliteit en onzekerheid, al dan niet onderling afhankelijk, simultaan het eindresultaat beïnvloeden. (EPA, 2001) Deze bronnen van variabiliteit en onzekerheid worden opgevangen door enerzijds een duidelijke verantwoording van de inputgegevens en een wetenschappelijke interpretatie van het eindresultaat anderzijds. In dit opzicht wordt hier een conventioneel scenarioanalyse uitgevoerd waarbij onzekere parameters een triangulaire verdeling worden toegewezen met tot doel een pessimistisch, meest waarschijnlijk, en optimistisch scenario te verkrijgen. Hieruit wordt bepaald hoe groot de onzekerheid van het eindresultaat werkelijk is en welke parameters hiervoor het meest verantwoordelijk zijn.

De meervoudige sensitiviteitsanalyse wordt uitgevoerd door gebruik te maken van een Monte Carlo simulatie. Een Monte Carlo simulatie vervangt onzekere inputgegevens zoals gemiddelde puntschattingen met een range van waarden die de parameters beter representeren. In feite wordt een kansverdeling toegewezen aan één of meerdere

parameters in de spreadsheet en worden de resultaten van verschillende wat-als-scenario's berekend en opgeslagen. De analyse van deze scenario's, niet te verwarren met de scenario's opgesteld tijdens de scenarioanalyse in hoofdstuk 8, geeft een reeks van de mogelijke outputresultaten weer, de kans op voorkomen (kansverdeling) en de inputgegevens met de meeste invloed op het eindresultaat. (Goldman, 2002)

De variabelen die opgenomen worden in de meervoudige sensitiviteitsanalyse zijn de variabelen waarvoor tijdens de literatuurstudie geen eenduidige waarde werd gevonden, maar eerder een range van waarden. We kunnen dus niet met zekerheid zeggen welke de exacte waarde is voor deze variabelen. In hoofdstuk 6 en 7 werd voor deze variabelen een zo getrouw mogelijke schatting gemaakt op basis van de gevonden gegevens. Om toch een antwoord te bieden op deze onzekerheid wordt voor deze variabelen hier een minimum, maximum en gemiddelde waarde gevonden waardoor de variabelen een triangulaire verdeling toegedeeld krijgen. Dit heeft tot gevolg dat de variabelen beter gerepresenteerd worden en eventuele foutieve schattingen gecorrigeerd worden. De veranderlijke variabelen die opgenomen worden in de meervoudige sensitiviteitsanalyse worden in onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 35 : Veranderlijke variabelen

	MIN	Gemiddeld	MAX	Gevalstudie
Investeringskost 30 tds/d reactor (EUR)	1 327 499	1 853 371	2 422 469	1 853 371
Investeringskost 50 tds/d reactor (EUR)	1 898 141	2 650 065	3 463 369	2 650 065
Investeringskost 20 tds/d reactor (EUR)	999 471	1 395 399	1 823 647	1 395 399
Investeringskost 10 tds/d reactor (EUR)	615 247	858 969	1 122 586	858 969
Opslagkosten 1 loods (EUR/m ³ /j)	1,36	1,36	1,50	1,36
Opslagkosten 3 loods (EUR/m ³ /j)	1,57	1,57	1,72	1,57
Opslagkosten 9 loods (EUR/m ³ /j)	1,82	1,82	2	1,82
Kostprijs KOH (EUR/tds)	48,5	76	100	76
Productiekost KOH (EUR/tds)	35	61,7	126	
Drogen (EUR/tds)	1	7,7	15	
Verkleinen (EUR/tds)	2	7	13	
Herstellingen & Onderhoud (%)	2,5	3	4	3
Overheadkosten (%)	1	2,3	4	2
Prijs pyrolyse-olie (EUR/GJ)	4,5	7,1	9	7,5
Prijs biochar (EUR/kg)	0,015	0,045	0,085	0,045

Eerst wordt de investeringskost van de verschillende mobiele reactoren opgenomen in de analyse. Agri-therm (2010), Sorenson (2010), en Palma et al. (2011) gaven elk zeer uiteenlopende waarden voor een mobiele reactor. Deze waarden werden omgezet in een gemiddelde investeringskost per reactor, afhankelijk van de capaciteit. Een minimum, maximum en gemiddelde waarde is terug te vinden in tabel 35.

Zoals bleek uit de enkelvoudige sensitiviteitsanalyse is de kostprijs voor korteomloophout een belangrijke parameter die bepalende is voor de rendabiliteit van pyrolyse. Ook de grote onzekerheid van deze kostprijs is een reden waarom deze variabelen in de analyse opgenomen moet worden. De kostprijs voor korteomloophout varieert in de literatuur namelijk van 38 tot 154 EUR. Toch wordt hier echter als maximum een waarde van 100 EUR aangenomen zoals aangegeven door OVAM (2010). Deze waarde is namelijk afkomstig uit onderzoek naar demonstratievelden van korteomloophout in België. Voor de minimumprijs wordt een marktprijs voor droge houtsnippers van 48,5 EUR gehanteerd, afkomstig uit INBO (2007). Doordat de kostprijs van KOH een grote onzekerheid en een grote bijdrage tot het eindresultaat kent, zal deze parameter voor een groot deel verantwoordelijk zijn voor de uiteindelijke onzekerheid.

Ook worden de opslagkosten voor mobiele pyrolyse opgenomen in de analyse omdat deze parameter een grote onzekerheid vormt voor de analyse in zijn geheel. Het is niet steeds duidelijk welke opslagmethode, opslagmiddel, of opslagperiode gehanteerd worden in de literatuur. Daarnaast worden ook zeer uiteenlopende eenheden gebruikt voor deze parameter waardoor de vergelijking niet eenvoudig is. Na berekeningen worden in de literatuur waarden van 2,65 tot 3,25 EUR/m³/j terug gevonden. Om voorvermelde redenen werd er voor gekozen extra informatie op te vragen voor de optrekking van loodslen. Hierbij varieert de kost van 1,36 tot 2 EUR/m³/j, afhankelijk van het aantal loodslen. Deze kost is aanzienlijk lager dan de gegevens verkregen in wetenschappelijke literatuur. Om een eventuele onderschatting van de opslagkosten te vermijden laten we de opslagkost in deze analyse met 10% stijgen. Dit zal rechtstreeks een negatief effect hebben op de NCW.

Hoewel de transportkost een belangrijke factor is bij het vergelijken van mobiele pyrolyse tegenover centrale pyrolyse wordt deze echter niet opgenomen in de analyse. Het kleine aanvoergebied heeft tot gevolg dat transport zeer goedkoop uitgevoerd kan worden. Voor het transporteren van biomassa zijn verscheidene transportkosten gevonden die enige overeenstemming vertonen waardoor we kunnen aannemen dat deze parameter

weinig onzekerheid kent. Bij de schatting van het transport van pyrolyse-olie echter baseren we ons enkel op één bron. Hierover is namelijk weinig literatuur beschikbaar zodat deze parameter enige onzekerheid inhoudt. Toch wordt hier niet verder op ingegaan omwille van de beperkte bijdrage van olietransport tot de rendabiliteit.

Daarnaast worden ook de herstelling- en onderhoudskosten en de overheadkosten opgenomen. Voor herstelling & onderhoudskosten worden waarden gevonden van 2,5 tot 4 % van de totale investeringskost. De overheadkosten variëren volgens de literatuur van 1 tot 4%.

Ten slotte worden de operationele opbrengsten opgenomen in de analyse. Het is zeer onzeker hoe de prijzen voor pyrolyse-olie en biochar in de toekomst zullen evolueren. Pyrolyse-olie wordt geschat een waarde te hebben van 4,5 tot 9 EUR/GJ. Biochar kent een grotere variatie in de prijs maar komt immers ook in verscheidene vormen met verschillende energiedichtheden voor. We trachten ons te focussen op biochar als direct product van pyrolyse, zonder omzetting of opwaardering van het product. Hiervoor worden prijzen gevonden van 0,015 tot 0,085 EUR/kg, met een gemiddelde van 0,045 EUR/kg.

De overige parameters die niet in de analyse worden opgenomen zijn parameters waarvan met zekerheid kan gezegd worden dat ze een juiste waarde representeren of parameters waarvoor niet voldoende gegevens beschikbaar zijn om een accurate waardeverdeling toe te kennen.

De simulatie voor ieder scenario wordt uitgevoerd met 5000 iteraties. Het resultaat is weergegeven in onderstaande tabel en wordt doormiddel van figuren visueel voorgesteld in bijlage 7. Deze figuren geven naast de kansverdeling voor de NCW en een samenvatting van de statistieken ook een overzicht van de parameters met de grootste invloed op de NCW.

Tabel 36 : NCW op basis van veranderlijke variabelen

	NCW	NCW (veranderlijke variabelen)			
	Constante variabelen	MIN	Gemiddelde	MAX	Standaard afwijking
Basismodel Mobiel	-13 064 562	-18 747 504	-13 763 461	-9 117 952	1 393 962
Basismodel Centraal	-16 270 584	-22 234 935	-17 208 242	-12 910 106	1 437 497
Scenario 1	-9 543 966	-14 306 310	-10 239 034	-6 122 073	1 331 844

Scenario 2	-9 808 384	-14 638 256	-10 452 787	-6 425 373	1 345 747
Scenario 3	-15 832 791	-25 132 985	-17 000 541	-8 443 821	2 409 528
Scenario 4	-8 449 886	-13 432 275	-9 044 333	-4 823 646	1 377 704

Het eerste wat opvalt, is dat de gemiddelde NCW op basis van veranderlijke variabelen steeds lager ligt dan de NCW op basis van constante variabelen. Dit is voornamelijk het gevolg van een scheefheid in de kansverdeling van de parameters. Deze asymmetrie is duidelijk merkbaar bij de opslagkost maar komt ook voor bij de veel van de andere veranderlijke variabelen. Door de parameters een kansverdeling toe te wijzen is het mogelijk om ook deze hoge waarden in rekening te brengen, met een lagere NCW tot gevolg.

De standaard afwijking is voor de meeste scenario's vergelijkbaar. De hogere standaard afwijking voor scenario 3 wordt toegeschreven aan het langdurige karakter van het project waarbij inkomsten/uitgaven in de toekomst een grotere onzekerheid vertegenwoordigen. De licht hogere standaard afwijking voor centrale pyrolyse kan verklaard worden door de hogere invloed van herstelling- en onderhoudskosten, en overheadkosten voor centrale pyrolyse.

Uit bijlage 7 wordt geconcludeerd dat de kostprijs van KOH in alle scenario's de grootste bron van onzekerheid vertegenwoordigd. Dit heeft enerzijds te maken met de grote bijdrage van deze kost tot de jaarlijkse kasstroom. Anderzijds is dit ook de parameter, opgenomen in de analyse, met de grootste variatie in waarde.

Hoofdstuk 10: Conclusies en aanbevelingen

We zijn deze masterproef begonnen met het bespreken van het probleem van bodemverontreiniging in de Kempen en het aanbieden van een mogelijke oplossing. De toepassing van fytoremediatie in combinatie met pyrolyse als verwerkingsproces van het met zware metalen vervuilde hout werd naar voren gebracht als een potentiële techniek voor bodemsanering.

10.1 Conclusies

Na een bespreking van de technische aspecten werd vanaf hoofdstuk 5 de economische aspecten dieper toegelicht. Zowel voor mobiele als centrale pyrolyse werd een logistiek model opgesteld en een basismodel uitgewerkt. Hiervoor werden alle kosten en opbrengsten geïdentificeerd en een waarde toegekend doormiddel van schattingen, gebaseerd op verkregen en gevonden informatie. Op basis van deze waarden kon vervolgens de NCW voor ieder pyrolysesysteem berekend worden. Een overzicht van de verschillende NCW's is te raadplegen in tabel 36. Uit het basismodel blijkt dat zowel mobiele als centrale pyrolyse een negatieve NCW kennen voor pyrolyse in de Kempen. De NCW van mobiele pyrolyse is echter minder negatief terwijl deze toch een lagere jaarlijkse netto kasopbrengst heeft. De reden hiervoor is de lage investeringskost van mobiele pyrolyse in vergelijking met centrale pyrolyse door het wegvallen van diverse kosten zoals infrastructuur, gebouwen, het ontwerp en de opbouw van gebouwen, elektriciteits- en pijpleidingen, uitrusting, commissie en notariskosten voor grondtoewijzing, en eventuele onvoorzien kosten. Bovendien stijgen de herstellingen & onderhoudskosten, en de overheadkost direct mee bij een stijging in de investeringskost. De hogere investeringskost van centrale pyrolyse wordt dus zowel direct als indirect aangerekend.

Wanneer de logistieke aspecten worden vergeleken, kan geconcludeerd worden dat er bespaard wordt op transportkosten door het gebruik van mobiele pyrolyse. De transportkosten worden gehalveerd, maar onmiddellijk moet opgemerkt worden dat deze kostbesparing weinig invloed heeft op de rendabiliteit van het pyrolysesysteem. De kosten voor het transport nemen namelijk maar 3% van de totale operationele kosten in. De reden hiervoor is voornamelijk het kleine aanvoergebied in de Kempen. De biomassa

en de pyrolyse-olie moeten slechts vervoerd worden over zeer korte afstanden waardoor de laad- en loskosten de variabele transportkosten overschrijden.

De opslagkost voor biomassa bedraagt 752 400 EUR voor centrale pyrolyse en varieert tussen 868 680 EUR en 1 103 760 EUR voor mobiele pyrolyse, afhankelijk van het aantal opslagplaatsen opgenomen in het logistiek model van het pyrolysesysteem. Het verschil in bedrag is volledig toe te schrijven aan schaalvoordelen van één grote opslagplaats in vergelijking met meerdere kleine opslagplaatsen.

Misschien een van de meest uitgesproken verschillen in de operationele kosten van mobiele en centrale pyrolyse zijn de personeelskosten. Mobiele pyrolyse is namelijk zeer arbeidsintensief wanneer meerdere reactoren worden ingezet. Mobiele pyrolyse stelt in het basismodel 15 werknemers te werk in vergelijking met 10 voor centrale pyrolyse. De arbeidsintensiviteit van mobiele pyrolyse kan echter wel opgevangen worden door te werken met één mobiele reactor met een grotere verwerkingscapaciteit. Hierdoor wordt het aantal vereiste werknemers terug gebracht naar het aantal werknemers voor centrale pyrolyse.

In hoofdstuk 8 werden vervolgens enkele scenario's uitgewerkt om wijzigingen of afwijkingen in het basismodel te onderzoeken. Hierin werd vastgesteld dat het werken met 1 mobiele reactor in de Kempen voordeliger is dan het inzetten van 3 mobiele reactoren. Het gebruik van slechts één reactor heeft namelijk tot gevolg dat mobiele pyrolyse een minder arbeidsintensief proces wordt waarbij de personeelskost daalt naar het niveau van centrale pyrolyse. Verder resulteert het gebruik van één mobiele reactor in een lagere investeringskost per ton droge stof ten gevolge van schaalvoordelen.

Daarnaast heeft het inzetten van één reactor ook gevolgen voor de logistieke opstelling van het mobiel pyrolysesysteem zoals vermeld in paragraaf 5.1. De opslag-, en opstartkosten dalen terwijl de transportkosten stijgen. Dus hoewel de transportkosten stijgen wordt op bijna al andere kosten bespaard. We kunnen bijgevolg besluiten dat het mogelijk is om mobiele pyrolyse in de Kempen voordeliger uit te voeren door het gebruik van één mobiele reactor. Scenario 1 blijkt uiteindelijk ook het meest voordelige pyrolysesysteem voor de gevalstudie in de Kempen te zijn, gevolgd door scenario 2.

In scenario 2 werd het aantal opslagplaatsen gewijzigd van 3 naar 30 opslagplaatsen. Hierdoor stegen de opslag- en opstartkosten aanzienlijk. De transportkost daalde terug naar het niveau van het basismodel. Na een afweging tussen bovenstaande

kostenwijzigingen resulteerde dit in een vergelijkbare NCW tegenover scenario 1. Toch blijft scenario 1 de meest voordelige opstelling in de Kempen.

Alle voorgaande scenario's betreffen een saneringsperiode van 21 jaar. Uit onderzoek van Schreurs et al. (2011) blijkt echter dat sommige gebieden in de Kempen enkel gezuiverd kunnen worden tot de normwaarde wanneer de sanering gespreid wordt over 2 saneringsperioden met een totale duur van 42 jaar. Doordat in beide saneringsperiode een verschillend aantal hectare aangeplant werd met korteomloophout, wijzigde ook de hoeveelheid vrijkomende biomassa per saneringsperiode. De verschillende schaal in vrijkomende biomassa had een directe impact op bijna alle kosten. Het gevolg hiervan is een veel lagere NCW over een langere investeringsduur. 2 factoren die deze investering minder aantrekkelijk maken voor zowel investeerders als landbouwers.

In scenario 4 werd ten slotte een situatie uitgewerkt waarbij het hout, afkomstig uit de Kempen, niet vervuild is. De geproduceerde char diende bijgevolg niet gestort te worden en kon verkocht worden zodat een extra bron aan opbrengsten ontstond. De prijs voor char was echter niet voldoende hoog om een grote invloed uit te oefenen op de rendabiliteit van het saneringsproject. De NCW kende slechts een stijging van ongeveer 1 200 000 EUR tegenover scenario 1 en bedroeg -9 044 333 EUR.

Deze masterproef werd beëindigd met een sensitiviteitsanalyse. De bepalende parameters werden hierbij geïdentificeerd en het effect van onzekere parameters op het eindresultaat werd onderzocht. De rendabiliteit van mobiele pyrolyse wordt voornamelijk bepaald door de kostprijs van KOH, prijs van pyrolyse-olie en het gemiddelde netto jaarloon. Voor centrale pyrolyse is de investeringskost van het pyrolysesysteem eerder een bepalende factor, gevolgd door de kostprijs van korteomloophout en de prijs van pyrolyse-olie. Ook de onzekerheid van het eindresultaat is grotendeels toe te wijzen aan de kostprijs van KOH en de prijs van pyrolyse-olie.

Algemeen kan worden gesteld dat de bodemsanering in de Kempen niet rendabel uitgevoerd kan worden aangezien de NCW's van alle scenario's negatief zijn. Uit tabel 36 blijkt dat scenario 1, dat gebruik maakt van één mobiele reactor, het meest aangewezen is voor de gevalstudie. Scenario 1 heeft immers de hoogste NCW.

10.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

De kostprijs voor KOH werd in deze masterproef gelijkgesteld aan 76 EUR. Deze kostprijs omvat de productiekosten zoals kosten voor aanleg, sproeien, opslag, arbeid, transport, oogst en ontstronken alsook de kosten voor drogen en verkleinen van de KOH. Verder zijn al deze componenten ook afhankelijk van andere externe factoren en beslissingen. De oogstkost bijvoorbeeld is sterk afhankelijk van de gekozen oogstmethode en houtopbrengst. Het is bijgevolg duidelijk dat niet al deze componenten exact geschat kunnen worden en dat de kostprijs voor KOH altijd een bepaalde mate aan onzekerheid zal bevatten. Informatie die het dichtst aansluit met het onderzoek in deze masterproef zijn de gegevens uit de studie van Witters et al. (2009) die een kostprijs voor KOH hanteren van 66,5 EUR/tds. Deze kostprijs geldt immers voor de productie van KOH op met zware metalen vervuilde bodems in de Kempen.

De opslagkost in deze masterproef betreft de kost voor de constructie van één of meerdere loodsen en is gebaseerd op één enkele bron. Deze wordt echter wel vergeleken met de opslagkost die de wetenschappelijke literatuur hanteert. Zoals eerder vermeldt zijn de gegevens uit de wetenschappelijke literatuur betreffende deze parameter niet eenvoudig te vergelijken aangezien er geen eenduidige opslagmethode, opslagmiddel, of opslagperiode wordt gebruikt. Verder onderzoek naar de waarde van de opslagkost is vereist om de onzekerheid in deze parameter te beperken.

Verder bestaat er ook veel onzekerheid rond de investeringskost van een mobiele reactor. De gehanteerde bronnen vermelden zeer uiteenlopende waarden voor een mobiele reactor, ongeacht de capaciteit. Bovendien zijn enkel de gegevens van Agri-therm (2010) gebaseerd op een commercieel beschikbare mobiele reactor. Sorenson (2010) en Palma et al. (2011) baseren zich op verkregen kostschattingen waardoor ook deze gegevens enige onzekerheid inhouden. Een vergelijking tussen een mobiele en een centrale pyrolyse reactor met dezelfde capaciteit geeft aan dat er een groot verschil bestaat tussen de investeringskost van beide reactoren. Dit verschil bedraagt 5 363 748 EUR⁵⁰. Het is niet zeker welke factoren verantwoordelijk zijn voor dit verschil. Ook hier is verder onderzoek vereist naar de werkelijke structuur en samenstelling van de investeringskost.

⁵⁰ 5 363 748 EUR = 8 105 599 EUR – 2 741 851 EUR

Hoofdstuk 11: Bijlagen

Bijlage 1: Kostprijsberekening voor loods en (3 scenario's)

De onderstaande berekeningen zijn gebaseerd op de gegevens van architect Pol Peters en volgende veronderstellingen:

- Stapel houtchips bereikt hoogte van 5m
- Afschuifhoek van de stapel (houtchips) is 45°
- Wanden van de loods ontbreken voor voldoende ventilatie. Lage wand is mogelijk voor verlies aan houtchips te beperken.
- De richtinggevende kostprijs van een hal is ongeveer 190 EUR/m²
- De levensduur van een loods is 30 tot 40 jaar.

De stapel houtchips worden voorgesteld door een prisma met als doorsnede een trapezium met basis 20 m en kleine basis 10 m. De doorsnede is dus 75 m² ⁵¹. Wanneer 26 280 m³ houtchips opgeslagen moeten worden vereist dit een diepte van de loods van 350,4 m, naar boven afgerond 360 m. De oppervlakte van de loods is bijgevolg 7 200 m².

Wanneer de stapel houtchips echter wordt voorgesteld als een prisma met doorsnede een trapezium met basis 30 m en kleine basis 20 m, bekomen we een doorsnede van 125 m² ⁵². Hierdoor is een diepte van de loods van 210,24 m vereist, naar boven afgerond 220 m. De oppervlakte van de loods is bijgevolg 6 600 m².

De kostprijs van een loods is: 190 EUR/m² x 7 200 m² = 1 368 000 EUR

$$\times 6\,600\text{ m}^2 = 1\,254\,000\text{ EUR}$$

Als de lange hal van 360 m verdeeld wordt over 3 hallen verkrijgen we een diepte van 127 m⁵³ per hal, een oppervlakte van 2 540 m² en kostprijs van 482 600 EUR per hal. De totale kostprijs bedraagt 1 447 800 EUR.

⁵¹ 75 m² = (10m + 20m) x 5m / 2

⁵² 125 m² = (20m+30m) x 5m / 2

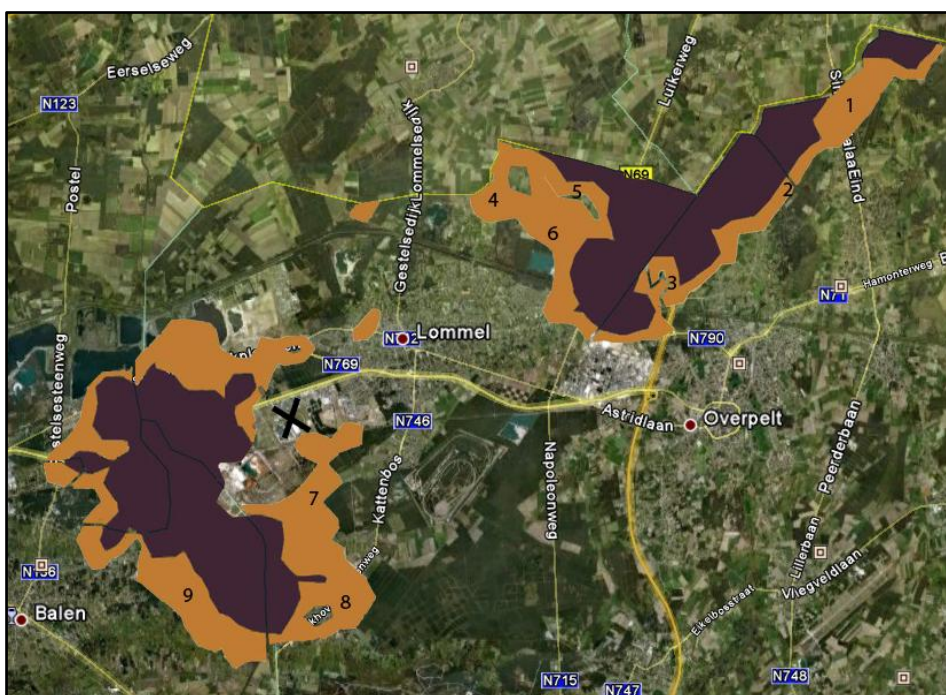
⁵³ 127m = 350,4m/3 + 10m

Als de lange hal van 360m verdeeld wordt over 9 hallen zoals in het basismodel verkrijgen we een diepte van 49m^{54} per hal, een oppervlakte van 980m^2 en een kostprijs van 186 200 EUR per hal. De totale kostprijs bedraagt 1 675 800 EUR.

	Kostprijs (EUR)	Kostprijs (EUR/m ³)	Kostprijs (EUR/m ³ /j)
1 hal	1 254 000	47,72	1,36
3 hallen	1 447 800	55	1,57
9 hallen	1 675 800	63,77	1,82

Bijlage 2: Bepalen van de gemiddelde transportafstand

Figuur 7 : Aanvoergebied in Google Earth



Bovenstaande figuur geeft de vervuilde gronden weer in google earth. De getallen representeren de intermediaire opslagplaatsen en de centrale eindgebruiker wordt

⁵⁴ $49\text{m} = 350,4\text{m}/9 + 10\text{m}$

weergegeven door een kruis. De transportafstand tussen de centraal gelegen eindgebruiker en de intermediaire opslagplaats bedraagt voor:

- Opslagplaats 1: 15,5 km
- Opslagplaats 2: 13,1 km
- Opslagplaats 3: 9,7 km
- Opslagplaats 4: 6,9 km
- Opslagplaats 5: 8,8 km
- Opslagplaats 6: 7,7 km
- Opslagplaats 7: 1,9 km
- Opslagplaats 8: 4,6 km
- Opslagplaats 9: 4,9 km

De gemiddelde transportafstand wordt bijgevolg gelijkgesteld aan 8,12 km⁵⁵.

De grootste afstand tussen 2 opslagplaatsen binnen eenzelfde regio is deze tussen opslagplaats 8 en 9 die geschat wordt op 4 km. De afstand van een oogstlocatie tot een intermediaire opslagplaats kan bijgevolg de 2 km niet overschrijden.

Bijlage 3: Correspondentie met Jennifer MacDonald, COO Agri-Therm Inc.

Van: jennifer.macdonald@agri-therm.com

Aan: dimitri.geuens@student.uhasselt.be

Datum: 25 oktober 2010 17:36

Dear Dimitri Geuens,

Thank-you for your email regarding Agri-Therm's mobile pyrolysis technology. Agri-Therm is currently building our second generation, pre-commercial mobile pyrolysis technology and I can offer you the following design parameters for our commercialized units.

List Price = \$1.5 Million US

Capacity: 10 tonnes per day biomass (~20% moisture) yielding 5500 kg/day BioOil, and 3000 kg/day BioChar. The BioGas is recycled and used to fuel the reaction.

I hope this information is helpful.

⁵⁵ $15,1 + 13,1 + 9,7 + 6,9 + 8,8 + 7,7 + 1,9 + 4,6 + 4,9 / 9 = 8,12$

Best regards,
Jennifer MacDonald, MEng, PEng.
COO, Agri-Therm Inc.

Datum: 18 november 2010 16:42

Dear Mr. Geuens,
The Agri-Therm unit is capable of handling a variety of BioMass inputs. The best BioOil is obtained when the BioMass has around 25% moisture, or less. The pricing I provided includes set-up.

Best regards,
Jennifer MacDonald, M.E.Sc., P.Eng
COO, Agri-Therm Inc.

Datum: 29 maart 2011 17:33

Hello Dimitri,
Please find answers to your questions in the email below.
Best regards,
Jennifer MacDonald, PEng, MEng,
COO Agri-Therm Inc.
Jennifer.MacDonald@agri-therm.com

On 2011-03-18, at 6:45 AM, Dimitri Geuens wrote:

Dear J. MacDonald,

In the process of my thesis there are still some crucial issues, regarding Agri-Therm's mobile reactor, where I'd like to request some additional information.

You mentioned in an earlier mail the mobile reactor has a capacity to convert 10ton (dry) biomass a day. Is this on a 24hour day base or on a 12hour workday base? Particularly, can the reactor convert 10 ton biomass in 12 or 24 hours? **10 ton processed in 24 hrs. System is intended to run 24 hr/day, 7 days per week.**

The mobile reactor uses its biogas as a fuel for the reaction. but before biogas is produced by the reactor I assume you use propane gas as a substitute fuel for the reaction. How much propane gas is needed to initiate the heating process before biogas is formed? **Yes, we use propane to get the reaction to steady state. We have not quantified the amount of propane yet, as the system is still experimental.**

Bijlage 4: Correspondentie met Tony Bridgwater, Aston University

van: a.v.bridgwater@aston.ac.uk

aan: dimitri.geuens@student.uhasselt.be

datum: 12 september 2011 11:52

Dimitri

You need to consider inflation between 2002 and 2011 as well as legislation to deal with health and safety issues which is why costs have increased. Land is not included.

I hope this answers your questions

Tony Bridgwater

Bijlage 5: Correspondentie met Gerrit van Ooijen, De Jong Gameraen B.V.

Van: dejong@hojo.nl

Aan: dimitri.geuens@student.uhasselt.be

15 maart 2011 11:51

Hallo Dimitri,

€ 70 / uur.

Min 12 uur per dag betaald.

Met vriendelijke groeten,

Mit freundlichen Grüßen,

Best regards,

Gerrit van Ooijen
Middelkampseweg 3a
5311 pc Gameren, Nederland
www.hojo.nl

Correspondentie met Veronique Van Dosselaer, Hector Van Moer & Zonen BVBA

Van: Veronique@vanmoerh.be
Aan: dimitri.geuens@student.uhasselt.be
15 maart 2011 11:51

Geachte,

Onze houtsnippers worden afgevoerd met een walkingfloor.
Hierin kunnen 90 m³ houtsnippers met een gewicht van $\pm$ 20 ton.
De prijs per uur bedraagt 70 € excl. BTW.

Hopelijk bent u hiermee verder geholpen.
Als u nog bijkomende inlichtingen wenst, kan u dit zonder probleem per mail doen.

Met vriendelijke groeten,

Veronique Van Dosselaer
HECTOR VAN MOER & ZONEN BVBA
Nieuwlandstraat 14
9120 Melsele
info@vanmoerh.be

Bijlage 6: Enkelvoudige sensitiviteitsanalyse

Tabel 37 : Enkelvoudig sensitiviteitsanalyse mobiele pyrolyse (1 reactor)

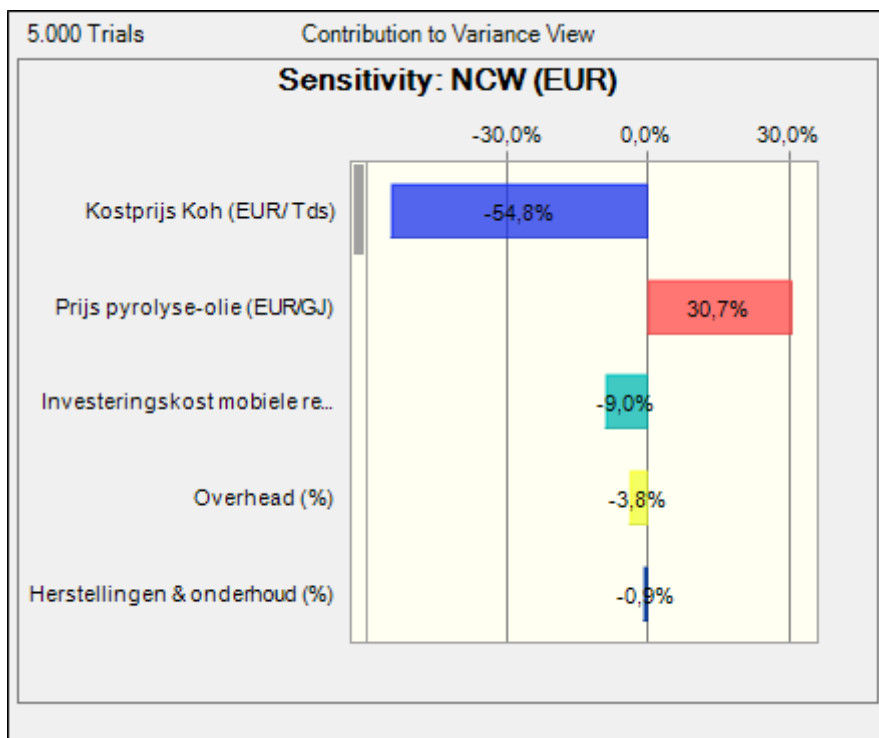
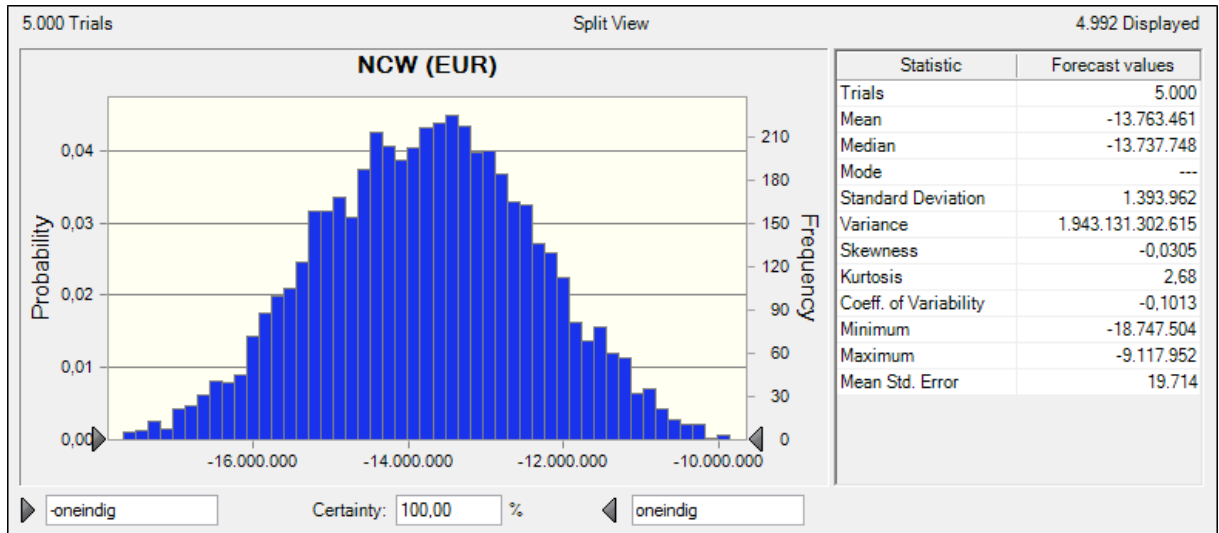
Variable	NCW (EUR)			Input		
	Downside	Upside	Range	Downside	Upside	Base Case
Kostprijs KOH (EUR/Tds)	-8 013 022	-10 969 468	2 956 447	60,8	91,2	76
Prijs pyrolyse-olie (EUR/GJ)	-10 742 872	-8 239 618	2 503 255	6	9	7,5
gemiddeld netto jaarloon (EUR)	-8 381 068	-10 601 422	2 220 355	40 000	60000	50000
verwerkingskost char/assen (EUR/ton)	-8 902 873	-10 079 617	1 176 744	96,8	145,2	121
Koelingwaterkost (EUR/m ³)	-8 951 499	-10 030 991	1 079 492	1,2	1,8	1,5
Kapitaalkost mobiele reactor (EUR)	-9 006 538	-9 975 952	969 414	1 451 129	2 176 694	1 813 912
Opslagkosten (EUR/m ³ /j)	-9 723 371	-9 259 119	464 251	1,89	1,26	1,57
Herstellingen & onderhoud (%)	-9 311 237	-9 671 253	360 016	0,024	0,036	0,03
Overhead (%)	-9 611 250	-9 371 240	240 011	0,024	0,016	0,02
Transportkost tot biomassawerf (EUR/Tds)	-9 403 719	-9 578 771	175 053	3,6	5,4	4,5

Tabel 38 : Enkelvoudig sensitiviteitsanalyse centrale pyrolyse

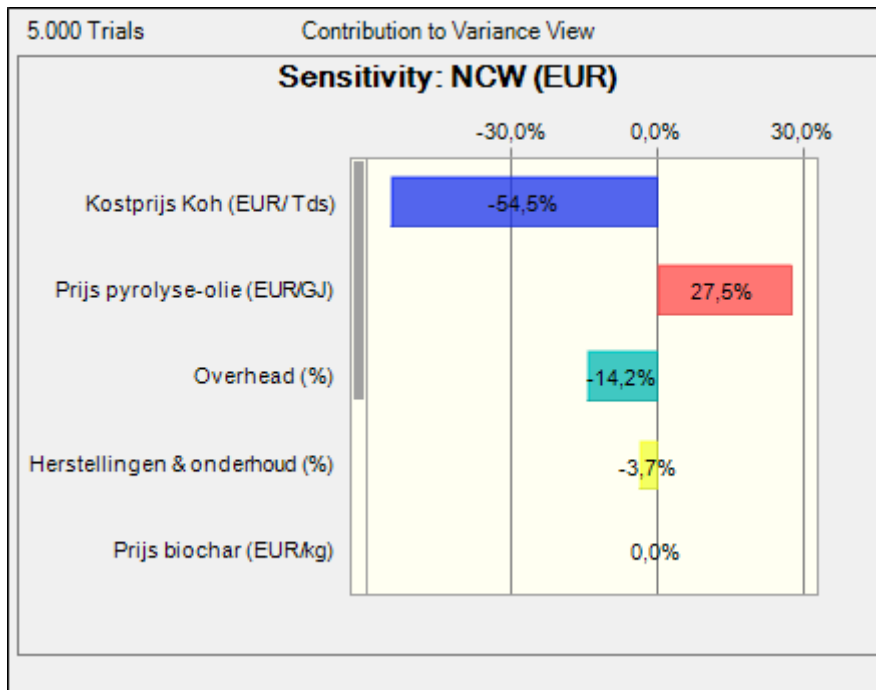
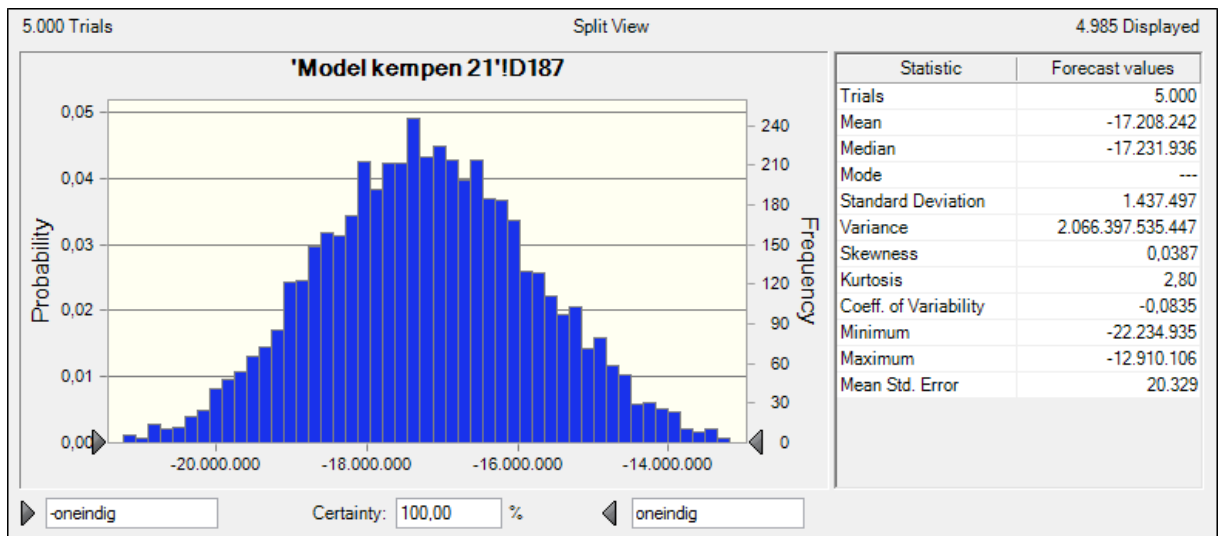
Variable	NCW (EUR)			Input		
	Downside	Upside	Range	Downside	Upside	Base Case
Investeringskost centrale reactor (EUR)	-18 466 145	-14 075 025	4 391 120	9 726 718	6 484 479	8 105 599
Kostprijs KOH (EUR/Tds)	-14 792 362	-17 748 808	2 956 447	60,8	91,2	76
Prijs pyrolyse-olie (EUR/GJ)	-17 522 212	-15 018 958	2 503 255	6	9	7,5
gemiddeld netto jaarloon (EUR)	-15 271 425	-17 269 745	1 998 319	40 000	60 000	50 000
GSC (EUR/MWh)	-17 178 122	-15 363 048	1 815 073	72	108	90
verwerkingskost char/assen (EUR/ton)	-15 682 213	-16 858 957	1 176 744	96,8	145,2	121
Herstellingen & onderhoud (%)	-15 730 666	-16 810 504	1 079 838	0,024	0,036	0,03
Koelingwaterkost (EUR/m ³)	-15 730 839	-16 810 331	1 079 492	1,2	1,8	1,5
Overhead (%)	-16 630 531	-15 910 639	719 892	0,024	0,016	0,02
Transportprijs (EUR/km)	-16 181 690	-16 359 480	177 790	1,8	2,7	2,25
Prijs elektriciteit (EUR/kWh)	-16 202 577	-16 338 593	136 016	0,06216	0,09324	0,0777

Bijlage 7: Meervoudige sensitiviteitsanalyse

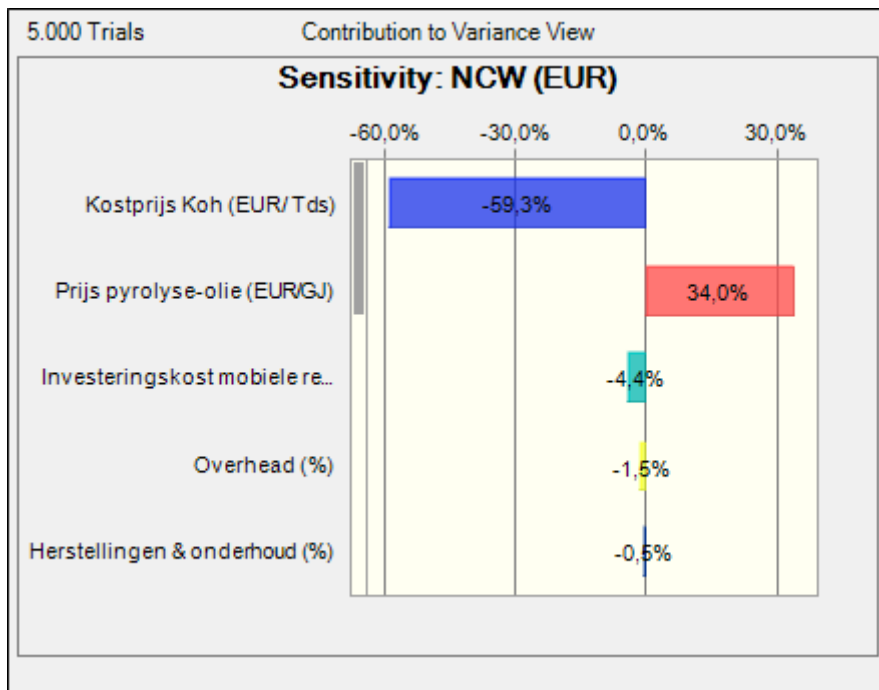
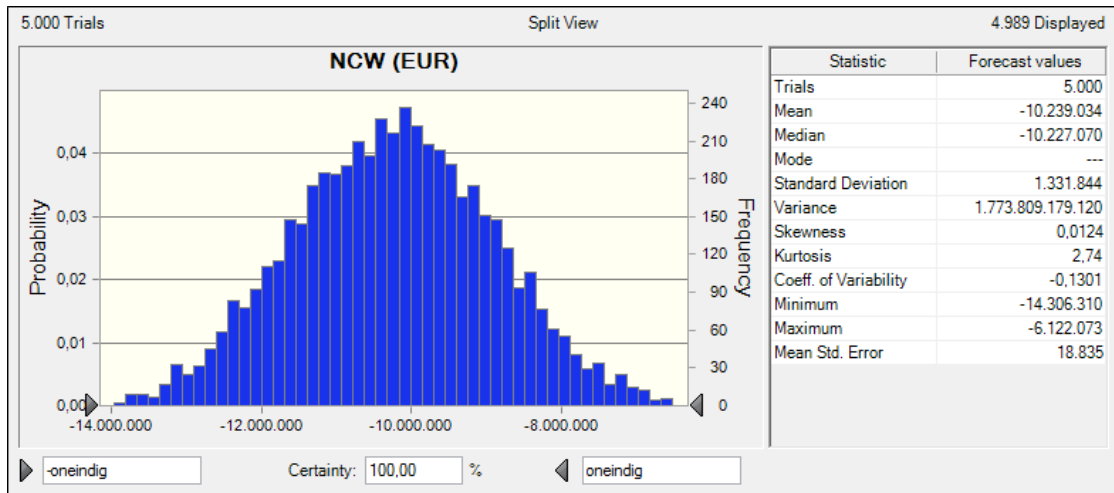
Figuur 8 : Sensitiviteitsanalyse basismodel mobiele pyrolyse



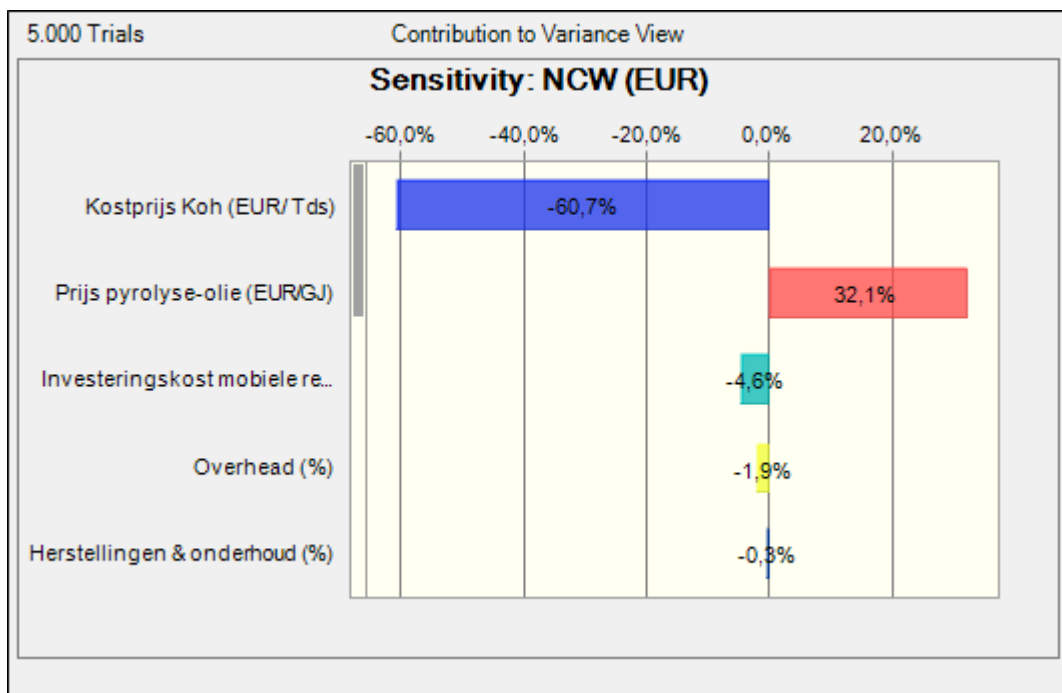
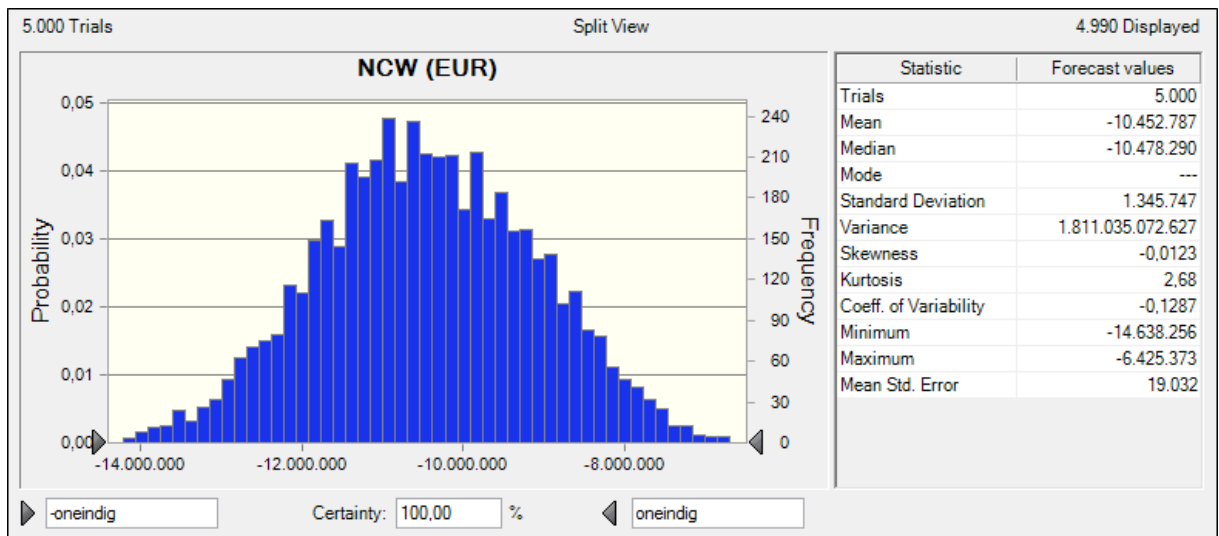
Figuur 9 : Sensitiviteitsanalyse basismodel centrale pyrolyse



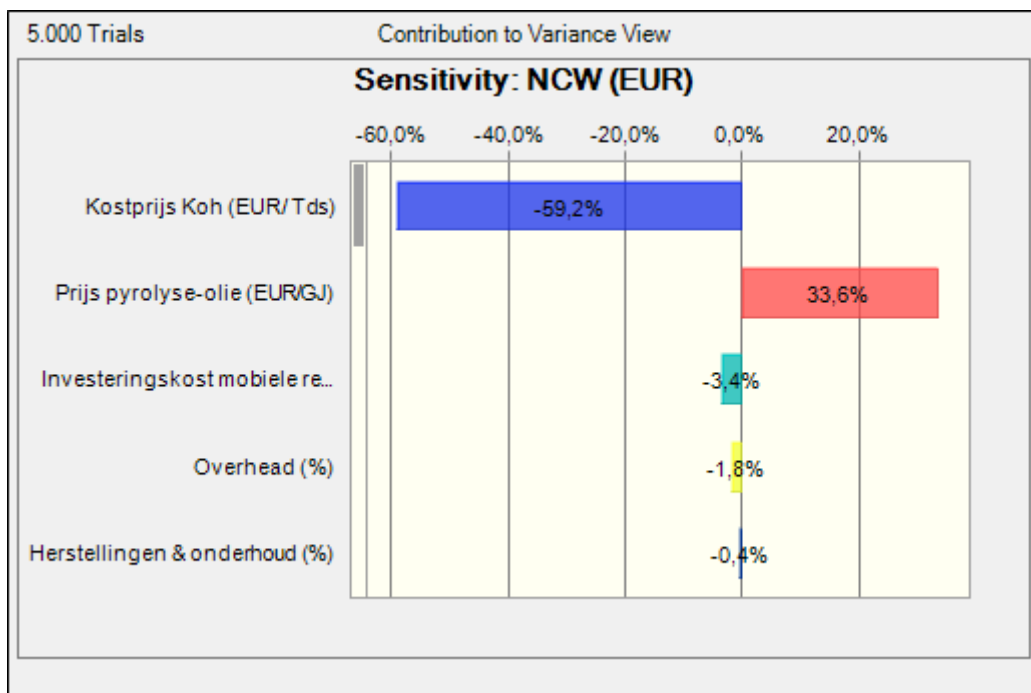
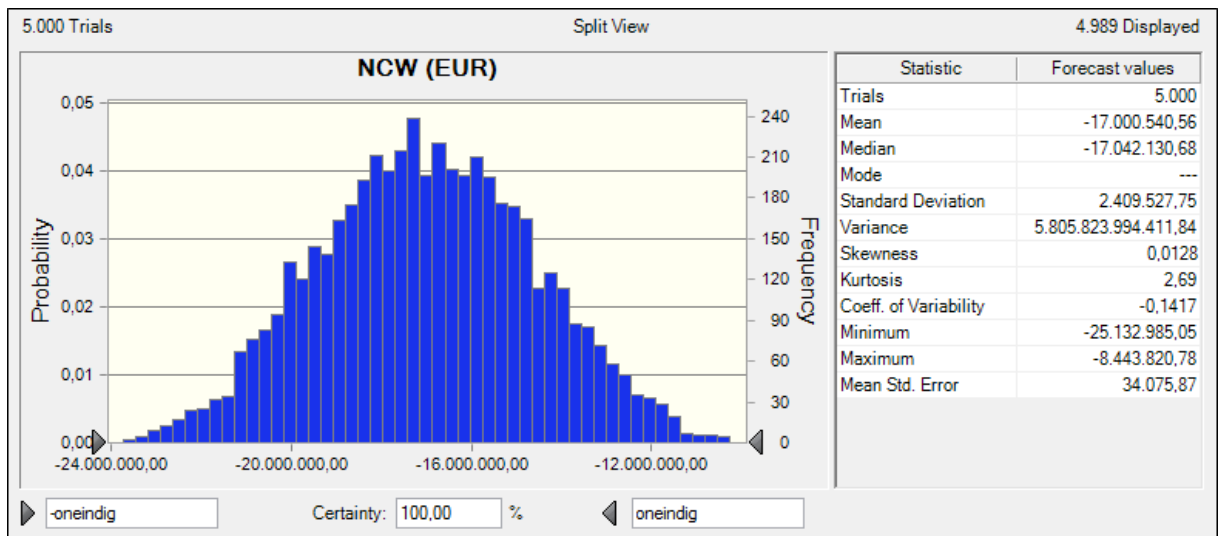
Figuur 10 : Sensitiviteitsanalyse scenario 1 : 1 mobiele reactor



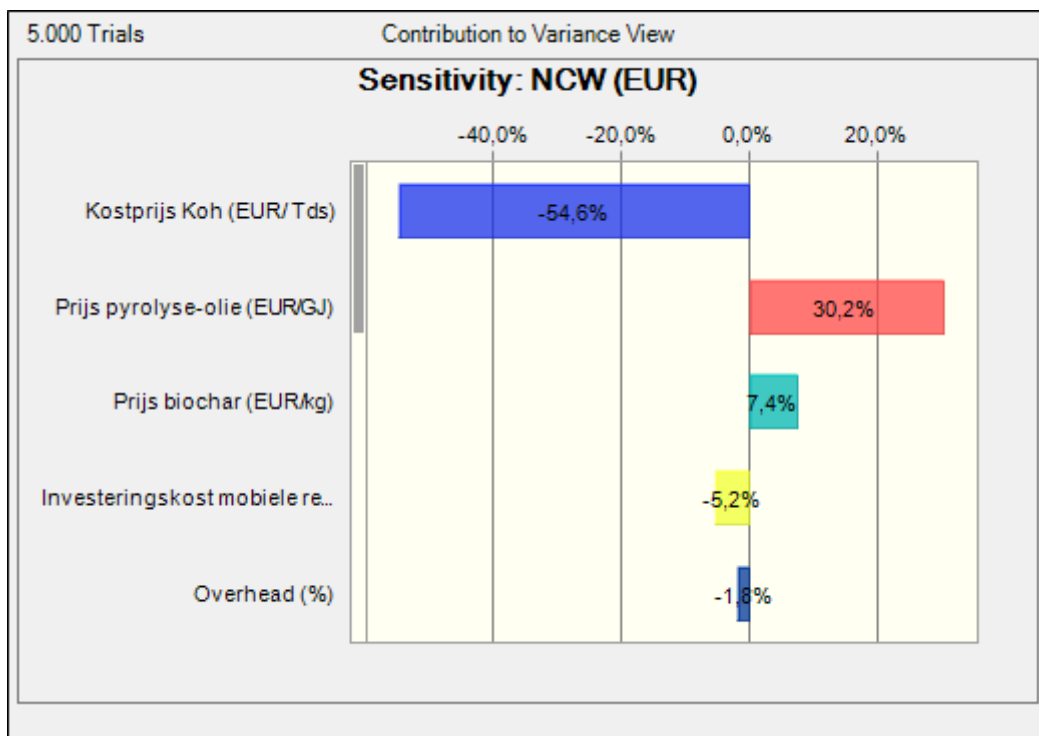
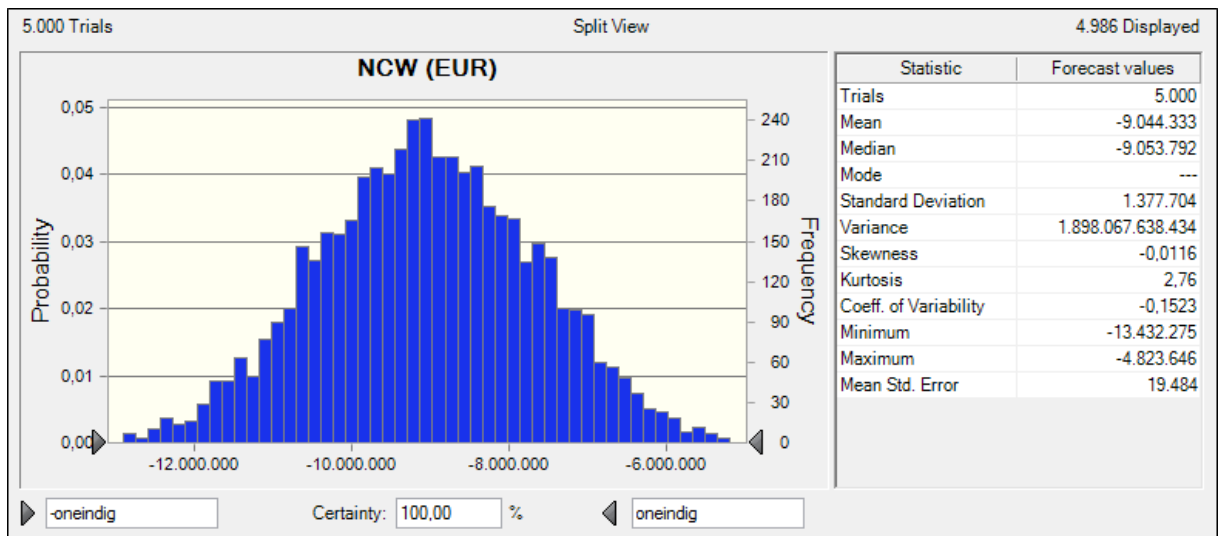
Figuur 11 : Sensitiviteitsanalyse scenario 2 : Landbouwer tot landbouwer



Figuur 12 : Sensitiviteitsanalyse scenario 3: 42 jarig saneringsproject



Figuur 13 : Sensitiviteitsanalyse scenario 4: Zuivere biomassa



Literatuurlijst

Adams, N., Carroll, D., Madalinski, K., Rock, S., Wilson, T., & Pivetz, B. (2000, February). *Introduction to Phytoremediation*. Opgeroepen op Juli 20, 2011, van <http://clu.in.org/download/remed/introphyto.pdf>

Agri-therm. (2010, Oktober 25). e-mail correspondentie. *Requesting information - Mobile Pyrolysis* .

Agri-therm. (2011, maart 29). e-mail correspondentie. *Requesting information - Mobile Pyrolysis* .

Agri-therm; Briens, Cedric; Berruti, Franco; Ferrante, Lorenzo;. (2009). *A Mobile Pyrolyzer for the Conversion of Biomass into Bio-Oil*. Opgeroepen op november 23, 2010, van http://media.godashboard.com//gti/TCBiomass2009_Pyrolysis_CBriens.pdf

aramburu, j. (2011, februari 1). *Call for re:char Summer Interns (Kenya and Austin)*. Opgeroepen op mei 29, 2011, van <http://www.re-char.com/2011/02/01/call-for-rechar-summer-interns-kenya-and-austin/>

Azargohar, R., & Dalai, K. (2006). Biochar As a Precursor of Activated Carbon. *Applied Biochemistry and Biotechnology* , 762-773.

Badger, P. C. (2002). *PROCESSING COST ANALYSIS FOR BIOMASS FEEDSTOCKS*. Opgeroepen op februari 15, 2011, van http://www.mtholyoke.edu/courses/tmillett/course/geog_304B/ornltm-2002199.pdf

Badger, P. C., & Fransham, P. (2006). Use of mobile fast pyrolysis plants to densify biomass and reduce biomass handling costs - A preliminary assessment. *Biomass and Bioenergy* 30 , 321–325.

Bain, R. (2007, december). *World Biofuels Assessment*. Opgeroepen op februari 27, 2011, van Worldwide Biomass Potential: Technology Characterizations: <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42467.pdf>

Bauen, A., Dunnett, A., Richter, G., Dailey, A., Aylott, M., Casella, E., et al. (2010). Modelling supply and demand of bioenergy from short rotation coppice and Miscanthus in the UK. *Bioresource Technology* 101 , 8132–8143.

Beardwood, J., Halton, H., & Hammersley, J. (1959). The shortest path through many points. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* , 299-327.

Berten, R., Hermans, P., & Paelinckx, D. (2000). *Biologische Waarderingskaart*. Opgeroepen op oktober 4, 2011, van <http://www.inbo.be/files/bibliotheek/15/168115.pdf>

Boosten, M., Oldenburger, J., Oorschot, J., Boertjes, M., & van den Briel, J. (2009, januari). *De logistieke keten van houtige biomassa uit bos, natuur en landschap in Nederland: Stand van zaken, knelpunten en kansen*. Opgehaald van

http://www.snipperhout.nl/mediapool/65/650969/data/090303_Eindrapport_-_Biomassa_praktisch_bekeken.pdf

Bradley, D. (2006, December 15). *European Market Study for BioOil (Pyrolysis Oil)*. Opgeroepen op November 12, 2010, van

http://www.canbio.ca/documents/publications/European_BioOil_Market_Study_Dec_15_pdf.pdf

Brammer, J. G., Lauer, M., & Bridgwater, A. V. (2006). Opportunities for biomass-derived “bio-oil” in European heat and power markets. *Energy Policy* 34 , 2871–2880.

Brem, G., & Bramer, E. A. (sd). *PyRos: a new flash pyrolysis technology for the production of bio-oil from biomass residues*. Opgehaald van

http://www.tno.nl/downloads/Full_Paper_Biomass_Conference_Singapore_G%20Brem_PyRos.pdf.

Bridgwater. (2011b, September 12). e-mail correspondentie. *Information request - Capital cost pyrolysis* .

Bridgwater, A. (2011a). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *biomass and bioenergy* , 1-27.

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, AV; COPE Ltd. (2009). *LIFE CYCLE AND TECHNO-ECONOMIC ASSESSMENT OF THE NORTHEAST BIOMASS TO LIQUIDS PROJECT*. Opgeroepen op Juli 15, 2011, van

http://www.nnfcc.co.uk/tools/life-cycle-and-techno-economic-assessment-of-the-north-east-btl-project-report-nnfcc-08-016/at_download/file

Briens, C., Berruti, F., & Ferrante, L. (2009). *A Mobile Pyrolyzer for the Conversion of Biomass into Bio-Oil*. Opgeroepen op November 20, 2010, van http://www.agri-therm.com/TCBiomass2009_Pyrolysis_CBriens.pdf

Brown, R. C., & Holmgren, J. (sd). *Fast Pyrolysis and Bio-Oil Upgrading*. Opgeroepen op Februari 14, 2011, van <http://www.ascension-publishing.com/BIZ/HD50.pdf>

Calu. (2006, november). *Economics of Miscanthus and SRC production* . Opgeroepen op maart 3, 2011, van <http://www.calu.bangor.ac.uk/Technical%20leaflets/010102Biomass%20Economics2.pdf>

Caputo, A. C., Palumbo, M., Pelagagge, P. M., & Scacchia, F. (2005). Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables. *Biomass and Bioenergy* 28 , 35–51.

Ceulemans, R., De Ruyck, J., De Spiegeleer, E., Draeck, M., Laureysens, I., & Van den Branden, S. (2001). *Biomassa*. Opgehaald van http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/brochure_biomassa.pdf

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

Cherian, S., & Oliveira, M. M. (2005). *Transgenic Plants in Phytoremediation: Recent Advances and New Possibilities*. Lisboa, Portugal: Universidade Lisboa, Campo Grande.

Cidad, V. G., Mathijs, E., Nevens, F., & Reheul, D. (2003, februari). *Energiegewassen in de Vlaamse landbouwsector*. Opgehaald van http://www.ilvo.vlaanderen.be/Portals/9/Documents/Pub_stedula/stedula1.pdf

Coenen, J., Schlatmann, S., Koolwijk, E., de Visser, I., & Goudswaard, P. (2008). *HANDLEIDING BIOMASSA WKK*. Opgehaald van http://www.energiek2020.nu/uploads/media/Handleiding_12903.pdf

Coleman, M., Page-Dumroese, D., Archuleta, J., Badger, P., Chung, W., Venn, T., et al. (2010). *Can portable pyrolysis units make biomass utilization affordable while using bio-char to enhance soil productivity and sequester carbon?*

Corten, I., & Kupers, G. (2009). *Aandachtspunten in de biomassaketten*. Opgehaald van <http://www.zilverbergadvies.nl/images/090210-aandachtspunten%20in%20de%20keten%20definitief%202.pdf>

Creg. (2010, januari 7). *componenten van de elektriciteits- en aardgasprijzen*. Opgehaald van www.creg.info/pdf/Studies/F934NL.pdf

Daganzo, C. (1999). *Logistics Systems Analysis*. Berlin: Springer, 3rd Edition.

Dawson, M. (2007, januari). *Short Rotation Coppice Willow - Best Practices Guidelines*. Opgeroepen op januari 29, 2011, van <http://www.ruralgeneration.com/BEST%20PRACTICE%20GUIDE.pdf>

De Boer, B. (2009). *Winst uit eigen woud: Hout oogsten, bewaren en stoken*. Opgehaald van <http://edepot.wur.nl/16056>

De Somviele, B., Meiresonne, L., & Verdonckt, P. (2009). *VAN WILG TOT WARMTE - potenties van korteomloophout in Vlaanderen*. Opgehaald van www.vbv.be/Van_Wilg_Warmte.pdf

ECN, Van Tilburg, X., Pfeiffer, E., Cleijne, J., Stienstra, G., & Lensink, S. (2006, september). *Technisch-economische parameters van duurzame elektriciteitsopties in 2008*. Opgeroepen op mei 17, 2011, van <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2006/e06025.pdf>

enerG Magazine. (2007, Maart/April). *From bark to bio-oil 5*. Opgeroepen op Januari 26, 2011, van http://www.altenerg.com/back_issues/index.php-content_id=43.htm

- EPA. (2001, december). Opgeroepen op december 12, 2011, van <http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/rags3adt/pdf/appendixa.pdf>
- European Comission. (2005). *BIOMASS: Green energy for europe*. Opgeroepen op November 23, 2010, van http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/biomass_en.pdf
- Faaij, A. (2006). Modern biomass conversion technologies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* , 343–375.
- Fagnäs, L., Brammer, J., Wilén, C., Lauer, M., & Verhoeff, F. (2010). Drying of biomass for second generation synfuel production. *Biomass and bioenergy* 34 , 1267-1277.
- Farag, I. H. (2002, augustus 31). *Technical, Environmental and Economic Feasibility of Bio-Oil in New Hampshire's North Country*. Opgeroepen op mei 12, 2011, van <http://www.unh.edu/p2/biooil/bounhif.pdf>
- FOD Financiën. (2010). *Administratie van de ondernemings- en inkomensfiscaliteit. Inkomstenbelastingen. Bericht in verband met de investeringsaftrek*. Opgeroepen op Juli 15, 2011, van <http://www.servicesspatrimoniaux.be/interfaoifnl/Investeringsaftrek/Bericht-aj2011.pdf>
- Fontein, R. J., & Kuindersma, W. (2010). *Maatschappelijke weerstand: Een issue voor terreinbeheerders in de keuze om houtige biomassa te oogsten*. Opgehaald van <http://edepot.wur.nl/159690>
- Galinato, S. P., Yoder, J. K., & Granatstein, D. (2010). *The Economic Value of Biochar in Crop Production and Carbon Sequestration*.
- Geurds, M., & Devriendt, N. (2006). *Bio-energie: Omzetten van vaste biomassa in hernieuwbare warmte en elektriciteit*. Opgehaald van http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/brochure_bioenergie.pdf
- Glas, P., Van Dyck, E., & Bloem, M. (2008). *Scenario's voor beheer en sanering van de grensoverschrijdende bodemverontreiniging in de Kempen*.
- Goldman, L. I. (2002). *CRYSTAL BALL PROFESSIONAL INTRODUCTORY TUTORIAL*. Opgeroepen op December 5, 2011, van <http://www.informs-sim.org/wsc02papers/210.pdf>
- Hamelinck, C. N., Suurs, R. A., & Faaij, A. P. (2005). International bioenergy transport costs and energy balance. *Biomass and Bioenergy* 29 , 114–134.
- Henderickx, S. (2006, januari 31). *Cadmiumgevaar Noord-Limburg is gemeten, maar wat nu?* Opgeroepen op oktober 4, 2011, van <http://www.archivesolidaire.org/scripts/article.phtml?lang=2&obid=29860>
- Hwang, J. C. (2002/2003). Forms and rates of economic and physical depreciation by type of assets in Canadian industries. *Journal of Economic and Social Measurement* 28 , 89–108.

INBO. (2011). *Technische aspecten korteomloophout: Aanleg, beheer en exploitatie*. Opgehaald van http://www.inbo.be/content/page.asp?pid=DUU_Bos_energiehout_technischeaspecten

INBO. (2007, juli 10). *Van snoeihout tot warmte: een gesloten cyclus*. Opgeroepen op maart 12, 2011, van <http://www.inbo.be/docupload/3648.pdf>

kruizinga. (2011). *IBC Container, Vloeistofcontainer typenr 035-kp-un Nieuw*. Opgeroepen op Juli 15, 2011, van <http://www.kruizinga.nl/ibc+container/035-kp-un/vloeistofcontainer/nieuw/#meerinfo>

Laveren, E., Engelen, P.-J., Limère, A., & Vandemaele, S. (2004). *Handboek financieel beheer*. Antwerpen - Oxford: Intersentia.

Lenaerts Blommaert. (sd). *Lenaerts Blommaert @ Download catalogoog Verkoop*. Opgeroepen op augustus 12, 2011, van http://www.lenaertsblommaert.be/asp/nl/verkoop/download.asp?dn=catalogoog_verkoop_mei_2011&fn=v27_mei_2011.pdf

Lievens, C., Carleer, R., Cornelissen, T., & Yperman, J. (2009). Fast pyrolysis of heavy metal contaminated willow: Influence of the plant part. *Fuel* 88 , 1417–1425.

Lievens, C., Yperman, J., Cornelissen, T., & Carleer, R. (2008b). Study of the potential valorisation of heavy metal contaminated biomass via phytoremediation by fast pyrolysis: Part II: Characterisation of the liquid and gaseous fraction as a function of the temperature. *Fuel* 87 , 1906–1916.

Lievens, C., Yperman, J., Vangronsveld, J., & Carleer, R. (2008a). Study of the potential valorisation of heavy metal contaminated biomass via phytoremediation by fast pyrolysis: Part I. Influence of temperature, biomass species and solid heat carrier on the behaviour of heavy metals. *Fuel* 87 , 1894–1905.

Medische Milieukundigen. (2006). *Cadmium*. Opgeroepen op Juli 15, 2011, van <http://www.mmk.be/afbeeldingen/File/FicheCadmium.pdf>

Meers, E., Vandecasteele, B., Ruttens, A., Vangronsveld, J., & Tack, F. (2007). Potential of five willow species (*Salix* spp.) for phytoextraction of heavy metals. *Environmental and Experimental Botany* 60 , 57–68.

Meiresonne, L. (2006). *Kansen en mogelijkheden en de toekomst voor populierenteelt in Vlaanderen. Korte-omloophout voor energieproductie - Plaats in het vlaams bosbeleid*. Opgehaald van www.inbo.be/files/bibliotheek/30/169630.pdf

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

MIRA. (2010, december). *Verspreiding van zware metalen*. Opgeroepen op juli 1, 2011, van www.milieurapport.be: http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/02_THEMAS/02_03/AG_ZWARE_METALEN.PDF

MIRA-T; Ceenaeme, Johan; Dedeker, Dirk; De Naeyer, Filip; Dries, Victor; Gommeren, Els; Van den Bulk, Sofie; Van Dyck, Eddy;. (2006). *Bodem: Schaalvergroting in de aanpak van bodemverontreiniging*. Opgeroepen op Juli 15, 2011, van http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/02_THEMAS/02_15/SYNTHESSEKST_MIRAT2006-08DEF.PDF

Mitchell, C., Stevens, E., & Watters, M. (1999). Short-rotation forestry - operations, productivity and costs based on experience gained in the UK. *Forest Ecology and Management* , 123-136.

Mueller, B., & Goswami, D. (2001, April). *Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance Document*. Opgeroepen op juli 1, 2011, van <http://www.itrcweb.org/Documents/PHYTO-2.pdf>

Nawrot, T., Plusquin, M., Hogervorst, J., Roels, H. A., Celis, H., Thijs, L., et al. (2006). Environmental exposure to cadmium and risk of cancer: a prospective population-based study. *The Lancet oncology* , 119-126.

OVAM. (2003-2011a). *BeNeKempen*. Opgeroepen op juli 1, 2011, van [ovam.be: http://www.ovam.be/jahia/Jahia/pid/2140](http://www.ovam.be/jahia/Jahia/pid/2140)

OVAM. (2010, april). *Inventarisatie Biomassa 2007-2008 (deel 2009) met potentieel 2020*. Opgeroepen op februari 02, 2011, van <http://www.ovam.be/jahia/Jahia/pid/176?actionReq=actionPubDetail&fileItem=2337>

OVAM. (2011). *Tarieven en capaciteiten voor storten en verbranden - Actualisatie tot 2009, evolutie en*. Danny Wille, OVAM, Stationsstraat 110, 2800 Mechelen.

Palma, M., Richardson, J., Roberson, B., Ribera, L., Outlaw, J., & Munster, C. (2011). *Economic Feasibility of a Mobile Fast Pyrolysis System for Sustainable Bio-crude Oil Production*. Opgeroepen op Juli 1, 2011, van https://www.ifama.org/events/conferences/2011/cmsdocs/2011SymposiumDocs/261_Symposium%20Paper.pdf

Paulson, Mark; Coppice resources Ltd. (2005). *HARVESTER DEVELOPMENT FOR NEW HIGH YIELDING SRC CROPS AND MARKETS*. Opgeroepen op Juli 11, 2011, van <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.berr.gov.uk/files/file18124.pdf>

Peer, W. A., Baxter, I. R., Richards, E. L., Freeman, J. L., & Murphy, A. S. (2005). *Phytoremediation and hyperaccumulator plants*. Opgeroepen op juli 1, 2011, van <http://www.hort.purdue.edu/hort/research/murphy/pdfs/metals11.pdf>

Pootakham, T., & Kumar, A. (2010b). A comparison of pipeline versus truck transport of bio-oil. *Bioresource Technology* 101 , 414-421.

Pootakham, T., & Kumar, A. (2010a). Bio-oil transport by pipeline: A techno-economic assessment. *Bioresource Technology* 101 , 7137-7143.

Pplusgroup. (sd). *Groep A: Vloeistofopslag*. Opgeroepen op Augustus 15, 2011, van http://www.pplusgroup.com/install/P+%20catalogus%20NL%202009_2010%20Groep%20A%20Vloeistofopslag.pdf

Pulford, I. D., & Watson, C. (2003). Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees - a review. *Environment International* 29 , 529– 540.

Randall, W., & Whitesides, P. (sd). *Process Equipment Cost Estimating by Ratio and Proportion*. Opgeroepen op november 8, 2011, van <http://www.pdhonline.org/courses/g127/g127content.pdf>

Renovius N.V. (2008). *Biomassa: Veel over gesproken maar nog niet alles over gezegd*. Opgeroepen op februari 3, 2011, van http://www.inverde.be/content/pdf/energie_uit_biomassa/4-Renovius-Biomassa.pdf

Rentizelas, A. A., Tolis, A. J., & Tatsiopoulou, I. P. (2009). Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 , 887– 894.

Ruttens, A., Vangronsveld, J., Meiresonne, L., Van Slycken, S., Meers, E., & Tack, F. (2008). *Sustainable use of metal contaminated agricultural soils: Cultivation of energy crops as an alternative for classical agriculture*. Stationsstraat 110, 2800 Mechelen: Henny De Baets, OVAM.

Schreurs, E., Voets, T., & Thewys, T. (2011). GIS-based assessment of the biomass potential from phytoremediation of contaminated agricultural land in the Campine region in Belgium. *Biomass and bioenergy* 35 , 4469-4480.

SEWF. (2011). *1. Woodchips*. Opgeroepen op maart 3, 2011, van http://www.sewf.co.uk/links/SEWF_Chip_Spec.pdf

Siemons, R. V. (2005, januari 15). *Pyrolyse in Groningen: Onderzoek naar de haalbaarheid van een transitiecoalitie*. Opgehaald van <http://www.cleanfuels.nl/Projects%20&%20publications/Eindrapport%20Pyrolyse%20in%20Groningen%20p.pdf>

Sims, R. E. (2003). <http://www.shortrotationcrops.org/PDFs/2003Mtg/18-SimsTransportEconomics.pdf>. Opgeroepen op maart 9, 2011, van Transport economics for short rotation coppice: <http://www.shortrotationcrops.org/PDFs/2003Mtg/18-SimsTransportEconomics.pdf>

Sintzoff, I., & Martin, J. (2001, September). *Woodsustain: Contributions of wood energy to sustainable development in Belgium*. Opgehaald van www.belspo.be/belspo/home/publ/pub_ostc/CG2131/rCG25s_en.pdf

Sorenson, C. B. (2010). *A comparative financial analysis of fast pyrolysis plants in Southwest Oregon*. Kansas State University.

Springer, E. L. (sd). *Should Whole-Tree Chips for Fuel Be Dried Before Storage?* Opgeroepen op oktober 12, 2011, van <http://ecpisystems.com/wcms/downloads/ChipDry-fplrn241.pdf>

Stals, M., Carleer, R., Reggers, G., Schreurs, S., & Yperman, J. (2010a). Flash pyrolysis of heavy metal contaminated hardwoods from phytoremediation: Characterisation of biomass, pyrolysis oil and char/ash fraction. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 89 , 22–29.

Stals, M., Thijssen, E., Vangronsveld, J., Carleer, R., Schreurs, S., & Yperman, J. (2010b). 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* 87 , 1–7.

Suurs, R. (2002, Januari). *Long distance bioenergy logistics: An assessment of costs and energy consumption for various biomass energy transport chains*. Opgeroepen op Februari 05, 2011, van <http://nws.chem.uu.nl/publica/Publicaties2002/e2002-01.pdf>

Taylor, M. (2009, april). *What is Sensitivity Analysis?* Opgeroepen op december 10, 2011, van http://www.medicine.ox.ac.uk/bandolier/painres/download/whatis/What_is_sens_analy.pdf

Ten Bolscher, G. H. (2007). Biomassa: Afval of energiebron? *Energy Magazine* , 20-23.

Tree Energy B.V. (2009). *Toepassingen pyrolyse-olie*. Opgeroepen op februari 18, 2011, van http://www.treepower.nl/index_projecten.html

Trippe, F., Fröhling, M., Schultmann, F., Stahl, R., & Henrich, E. (2010). *Techno-Economic Analysis of Fast Pyrolysis as a Process Step Within Biomass-to-Liquid Fuel Production*. Springer Science.

Valle-Riestra, J. (1983). *Project Evaluation in the Chemical Process Industries*. McGraw-Hill.

Vanderbiesen, W. (2006, December). *De Ionen in Vlaanderen*. Opgehaald van www.steunpuntwse.be/download/nl/1281884/pdf

Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adraensen, K., Ruttens, A., et al. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environ Sci Pollut Res* , 765–794.

Vanreppelen, K., Kuppens, T., Thewys, T., Carleer, R., Yperman, J., & Schreurs, S. (2011). Activated carbon from co-pyrolysis of particle board and melamine (urea) formaldehyde resin: A techno-economic evaluation. *Chemical Engineering Journal* 172 , 835– 846.

Venderbosch, R., & Prins, W. (2009, oktober 21). *Fast pyrolysis technology development*.

Verykios, E. (2004, november 16). *Efficient and clean production of electricity from biomass via pyrolysis oil and hydrogen utilizing fuel cells*. Opgeroepen op april 24, 2011, van http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/04_bioelectricity_en.pdf

Vis, M. (2002). *Beschikbaarheid van reststromen uit de voedings- en genotmiddelenindustrie voor energieproductie*. Opgeroepen op februari 12, 2011, van <http://gasunie.eldoc.ub.rug.nl/FILES/root/2002/2969041/2969041.pdf>

VLAO. (2011, februari). *Subsidieleidraad voor het bedrijfsleven: U werkt energie- en milieubewust*. Opgehaald van http://www.vlao.be/images_sub/pdf/subsidies/Subsidieleidraad%20Milieu%20en%20energie.pdf

Vlarebo. (2007, December 14). *Besluit van de Vlaamse Regering houdende vaststelling van het Vlaams reglement betreffende de bodemsanering en de bodembescherming*. Opgeroepen op Juli 1, 2011, van <http://www.ovam.be/jahia/Jahia/cache/offonce/pid/176?actionReq=actionPubDetail&fileItem=2409>

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

Voets, T., Kuppens, T., Cornelissen, T., & Thewys, T. (2011). Economics of electricity and heat production by gasification or flash pyrolysis of short rotation coppice in Flanders (Belgium). *Biomass and bioenergy* 35 , 1912-1924.

VREG. (2011a). *Energiemarkt - Wie doet wat? - Het systeem van groenestroomcertificaten (GSC)*. Opgeroepen op 2011, van www.vreg.be: http://fcs.vreg.be/nl/03_algemeen/02_energiemarkt/02_wiedoetwat/07_groenestroom.asp

Vreg, Vlaamse regulator van de elektriciteits- en gasmarkt. (2011b). *Minimumsteun*. Opgeroepen op Oktober 25, 2011, van <http://www.vreg.be/minimumsteun>

Wiersma, G., & van den berg, W. J. (2004, november 16). *Biomassaketens. Energetisch en economisch vergeleken*. Opgehaald van www.knnadvies.nl/user_files/downloads/rapporten/Eindrapport.pdf

Wieshammer, G., Unterbrunner, R., Garcia, T. B., Zivkovic, M. F., Puschenreiter, M., & Wenzel, W. W. (2007). Phytoextraction of Cd and Zn from agricultural soils by *Salix* ssp. and intercropping of *Salix caprea* and *Arabidopsis halleri*. *Plant Soil* , 255–264.

Witters, N., Van Slycken, S., Ruttens, A., Adriaensen, K., Meers, E., Meiresonne, L., et al. (2009). Short-Rotation Coppice of Willow for Phytoremediation of a Metal-Contaminated Agricultural Area: A Sustainability Assessment. *Bioenerg. Res.* , 144–152.

Zeller, H., Häring, A., & Utke, N. (2009). *Investing in Short Rotation Coppice – Alternative Energy Crop or an Albatross around the Neck?* Opgeroepen op februari 16, 2011, van http://www.ifmaonline.org/pdf/congress/09_Zeller_etal.pdf

Auteursrechtelijke overeenkomst

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

Rendabiliteit van mobiele pyrolyse ("verhitting zonder zuurstof") voor de productie van bio-olie

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen: handelsingenieur-operationeel management en logistiek**

Jaar: **2012**

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,

Geuens, Dimitri

Datum: **23/01/2012**