

2011
2012

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur: technologie-, innovatie- en
milieumanagement*

Masterproef

*Economische haalbaarheid van de productie van actieve
kool uit biomassa*

Promotor :
Prof. dr. Theo THEWYS

Copromotor :
De heer Tom KUPPENS

Michiel Gilles

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste
economische wetenschappen: handelsingenieur, afstudeerrichting technologie-, innovatie-
en milieumanagement*

2011
2012

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur: technologie-, innovatie- en
milieumanagement*

Masterproef

*Economische haalbaarheid van de productie van actieve
kool uit biomassa*

Promotor :
Prof. dr. Theo THEWYS

Copromotor :
De heer Tom KUPPENS

Michiel Gilles

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste
economische wetenschappen: handelsingenieur, afstudeerrichting technologie-, innovatie-
en milieumanagement*

Voorwoord

De masterproef die nu voor u ligt vormt het sluitstuk van mijn academische opleiding tot Handelsingenieur. De keuze voor deze studierichting komt voort uit mijn zeer brede interesseveld, waar men met het totaalpakket dat Handelsingenieur is, op inspeelt. Binnen de algemene opleiding tot Handelsingenieur heb ik gekozen voor een major in Technologie-, innovatie- en milieumanagement en een optie in accounting en financiering.

Deze masterproef gaat over een investering die bijdraagt tot een duurzaam leefmilieu. De keuze hiervoor was tweeledig. Enerzijds sprak dit onderzoek me door zijn praktische aard zeer sterk aan. De resultaten en conclusies zijn dan ook tastbaarder dan bij siommige andere onderwerpen. Anderszijds past deze thesis perfect binnen de afstudeerrichtingen die ik binnen de opleiding Handelsingenieur heb gekozen. Een case omtrent duurzaamheid waar een investeringsanalyse voor uitgevoerd wordt om zo de financiering van zulk een investering in te schatten. Ik ben zeer tevreden dat ik dit onderzoek heb kunnen voeren en daartoe zou ik graag Professor Theo Thewys willen bedanken om mij de mogelijkheid te geven om dit onderwerp te behandelen. Een masterproef is echter een werk van lange adem en dat doe je niet allemaal alleen. Ik wens daarom nog enkele mensen te bedanken omdat zonder hen deze masterproef niet tot stand zou zijn gekomen.

Allereerst wens ik mijn co-promotor, Tom Kuppens, uitdrukkelijk te bedanken voor zijn begeleiding doorheen het onderzoeksproces. Ik kon bij hem steeds terecht voor vragen en opmerkingen of zelfs voor interessante discussies om dit eindresultaat te bekomen.

Verder wens ik binnen de UHasselt nog professor Jan Yperman en professor Robert Carleer te bedanken voor hun kijk op de technische kant van het onderzoek. Zo kon ik mezelf ervan vergewissen, of wat ik begrepen had uit literatuuronderzoek, correct was. Ze boden ook nieuwe inzichten om het onderzoek op te richten.

Verder wens ik nog mijn ouders te bedanken dat ze me de kans geboden hebben om universitaire studies aan te vatten en mij onvoorwaardelijk te steunen gedurende mijn vijfjarige opleiding.

Ten slotte wens ik nog een woordje van dank te richten tot mijn collega-studenten voor de toffe jaren, de gezellige babbels, de onvergetelijke momenten samen en voor de steun op momenten dat je die het meeste nodig hebt.

Michiel Gilles

Mei 2012

Samenvatting

In deze masterproef zal nagegaan worden hoe hoog pyrolysechar gewaardeerd kan worden om zo een pyrolyseproces ter verwerking van biomassa uit wilg als fyto-remediatiegewas, zo rendabel mogelijk te maken. Het onderzoek begint met een voorstelling van het praktijkprobleem om de lezer bekend te maken met de problematiek rond bodemvervuiling met zware metalen in de Limburgse Kempen en sanering van deze bodems door middel van fyto-remediatie. Vervolgens wordt dan de verwerking van deze biomassa in een pyrolyseproces behandeld om de lezer een inzicht te geven in de oorsprong van de pyrolysechar, die het onderwerp uitmaakt van deze masterproef. Als laatste inleidende hoofdstukken volgt er nog een bespreking van het gedrag van zware metalen in deze pyrolysechar, gezien het specifieke karakter van biomassa uit zulke fyto-remediatieteelten. Als laatste inleidende deel worden al de verwerkingstechnieken opgelijst die mogelijk een rendabelere oplossing kunnen bieden dan het (dure) storten van de pyrolysechar aan 115 euro per ton.

Uiteindelijk worden drie methodes aangenomen als mogelijke oplossingen. Deze zijn de aanwending van char als hernieuwbare brandstof voor co-verbranding in industriële installaties, activatie van pyrolysechar tot actieve kool en gebruik als bodemverbeteraar. Deze laatste wordt na enig onderzoek overboord gegooid aangezien deze verwerking voor Vlaanderen niet echt interessant is en de vervuiling met zware metalen een zeer grote hinderpaal blijkt.

We focussen ons dus in het onderzoek eerst op de aanwending van de pyrolysechar als alternatieve brandstof in installaties die vergund zijn voor licht gecontamineerde afvalstoffen en nadien uitgebreid op de upgradings naar actieve kool. Ook wordt voor de beide alternatieven de ecologische impact kort behandeld omdat we eveneens de maatschappelijke kost niet uit het oog willen verliezen. Voor het gebruik als brandstof nemen we ook niet enkel pyrolysechar als grondstof maar bekijken we ook af het beter is om de biomassa als brandstof te gebruiken in plaats van eerst energie te verliezen bij de pyrolyse. Er wordt getracht een zo hoog mogelijke waarde te verkrijgen per ton char of biomassa. Dit kan eveneens een negatieve waarde zijn. Alles hoger dan een kost van 115 euro per ton char is in principe al een verbetering. Gezien de beperkte details die beschikbaar zijn omtrent de specifieke chemische eigenschappen van de pyrolysechar, en in het bijzonder de aanwezigheid van de zware metalen, is het moeilijk voor de bedrijven om zich aan schattingen te wagen.

Na de relatief korte bespreking van gebruik van char als brandstof volgt een technische en economische analyse van een upgrade naar actieve kool. Dit lijkt een zeer hoopvolle onderneming gezien de stijgende vraag naar deze stof en de hoge verkoopprijs ervan. Er

blijken twee soorten activatie te bestaan, afhankelijk van het gebruikte productieproces. Er is fysische of thermische activatie enerzijds en chemische activatie anderzijds. De verschillen tussen beide alternatieven worden besproken en vervolgens de analyse opgesplitst zodat beide apart kunnen besproken worden. Fysische activatie vertrekt immers van char, terwijl we voor chemische activatie, de biomassa als grondstof nemen.

Als eerste methode behandelen we dan de fysische activatie om te kijken of deze op zich rendabel is. Hiertoe dienen de kosten voor een installatie als voor de operationele kosten geschat te worden. Er moet natuurlijk eveneens een schatting gemaakt worden van de verwachte inkomsten. Op basis van deze informatie stellen we dan een Netto Contante Waarde model op om de investering te evalueren. Het zwaartepunt van de informatieverzameling ligt bij een installatie om de rookgassen te zuiveren van zware metalen omdat deze bij de hoge temperatuur van een thermisch activatieproces zullen vervliegen uit de char. Gezien het nieuwe karakter van activatie met gecontamineerde grondstoffen is dit het belangrijkste onderdeel van de berekening om een realistisch model te creëren.

Het tweede model wordt dan uiteraard gewijd aan chemische activatie. Hierbij dient vertrokken te worden van biomassa in plaats van pyrolysechar. De methode is relatief nieuw ten opzichte van fysische activatie en hierdoor is er voor chemische activatie nog geen gedetailleerde kosteninformatie beschikbaar. De kosten worden daarom op een indirecte manier geschat als een verhouding van de kostprijs van fysisch geactiveerde kool. De verwachte verkoopprijs van de chemisch geactiveerde kool is hoog tot zeer hoog. Dit zorgt ervoor dat dit eveneens een zeer beloftevolle verwerkingstechniek is.

Omdat fysische activatie rendabel lijkt te zijn gaan we een stap verder. Voor chemische activatie wordt immers vertrokken van biomassa. Als we beide alternatieven met elkaar willen vergelijken is het noodzakelijk om van eenzelfde grondstof te vertrekken. Er wordt bijgevolg een kost berekend voor het pyrolyseproces enerzijds en anderzijds voor de toepassing van pyrolyseolie, het andere eindproduct uit pyrolyse dan de pyrolysechar. De economische analyse van pyrolyse wordt vrij analoog uitgevoerd aan de activatiestap aangezien beide gebruikmaken van eenzelfde type reactor. Voor de waardering van de bio-olie zoeken we onze toevlucht in een toepassing in een warmtekrachtkoppelinginstallatie. Op die manier kan op de meest efficiënte wijze, simultaan warmte en elektriciteit geproduceerd worden.

Vervolgens stellen we een economisch model op met de combinatie van de drie componenten: pyrolyse, WKK en fysische activatie, om een totaalbeeld te scheppen en een goede vergelijkingsgrond te creëren met de chemische activatie methode. wanneer we

vertrekken van biomassa, beide methodes rendabel zouden zijn. Door onzekerheden, vooral in verkoopprijzen, is de te verkiezen methode afhankelijk van de marktomstandigheden.

Ten slotte wordt op beide modellen nog een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd om te bekijken hoe gevoelig de gevonden resultaten zijn aan variaties in bepaalde sleutelvariabelen en bekijken we enkele mogelijke marktsituaties in een scenarioanalyse. Zo kunnen we bijvoorbeeld bepalen hoeveel landbouwers moeten instappen in het project om voldoende biomassa te bekomen om het totaalproces rendabel te maken. Een andere kijk kan bijvoorbeeld zijn welke verkoopprijs van chemisch geactiveerde kool de trade-off-prijs is tussen de keuze voor chemische activatie of fysische activatie.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	I
Samenvatting	III
Lijst van Tabellen	XI
Lijst van Figuren	XIII
1 Probleemstelling.....	- 1 -
1.1 Praktijkprobleem.....	- 1 -
1.2 Centrale onderzoeksvraag:.....	- 2 -
1.3 Deelvragen:	- 3 -
2 Pyrolysechar	- 5 -
2.1 Fytoremediatieteelten	- 5 -
2.2 Gewaskeuze	- 6 -
2.2.1 Zware metalen.....	- 6 -
2.2.2 Oogstregime.....	- 7 -
2.3 Definitie.....	- 7 -
2.4 Waarom pyrolyse?	- 8 -
2.5 Eigenschappen charfractie.....	- 8 -
2.6 Waarheen met de vervuilde char?	- 10 -
3 Aanwending van pyrolysechar	- 11 -
3.1 Wat is actieve kool	- 11 -
3.1.1 Activatiemethodes.....	- 11 -
3.2 Char als actieve kool	- 13 -
3.2.1 Kwaliteitskenmerken	- 13 -
3.2.2 Vergelijking thermische en chemische activatie.....	- 14 -
3.3 Gedrag van zware metalen in de reactor	- 15 -
3.4 Char als brandstof.....	- 17 -
3.5 Vergelijking van beide opties	- 17 -
3.5.1 Ecologisch standpunt	- 17 -
3.5.2 Economisch standpunt	- 18 -
3.6 Stabilisatie van zware metalen	- 18 -
4 Investeringsmodel	- 21 -
4.1 Tijdswaarde van het geld	- 21 -
4.2 Netto Contante Waarde model	- 22 -
4.2.1 Internal Rate of Return	- 24 -
5 Char verkopen als brandstof	- 25 -
5.1 Mogelijkheden	- 25 -
5.2 Technische specificaties	- 26 -
5.3 Potentiële waardering	- 27 -
6 Investeringsmodel voor fysische activatie.....	- 29 -

6.1	Investeringskosten.....	- 29 -
6.1.1	Investeringskosten reactor	- 29 -
6.1.2	Diverse investeringskosten.....	- 30 -
6.1.3	Investering rookgasreiniging	- 32 -
6.2	Werkingskosten	- 37 -
6.2.1	Personeelskosten	- 37 -
6.2.2	Vaste operationele kosten	- 38 -
6.2.3	Werkingskosten rookgasreiniging	- 38 -
6.2.4	Energiekosten.....	- 39 -
6.2.5	Koelwater.....	- 41 -
6.2.6	Kosten voor de verwerking van uitgefilterde vliegassen.....	- 41 -
6.2.7	Diverse kosten.....	- 42 -
6.3	Opbrengsten	- 43 -
6.4	Analyse van het investeringsmodel voor fysische activatie	- 48 -
6.4.1	Kasstromentabel	- 48 -
7	Warmtekrachtkoppeling (WKK)	- 53 -
7.1	Wat is warmtekrachtkoppeling	- 53 -
7.1.1	Energie.....	- 54 -
7.1.2	Traditionele energie-opwekking.....	- 54 -
7.1.3	Definitie WKK	- 55 -
7.2	Pyrolyseolie en WKK.....	- 55 -
7.3	Geschikte installatie formuleren	- 55 -
7.3.1	Van totale energie-inhoud naar elektrisch vermogen	- 56 -
7.3.2	Energie-inhoud van de bio-olie.....	- 56 -
7.3.3	Berekening van het elektrisch vermogen	- 58 -
7.4	Economische analyse.....	- 60 -
7.4.1	Investeringskosten	- 60 -
7.4.2	Werkingskosten	- 62 -
7.4.3	Jaarlijkse inkomende kasstromen	- 64 -
7.4.4	Netto Contante Waarde-berekening	- 70 -
8	Economische analyse chemische activatie.....	- 75 -
8.1	Chemische activatie van biomassa	- 75 -
8.1.1	Eigenschappen.....	- 75 -
8.1.2	Verschillen met fysische activatie	- 75 -
8.2	Toegepaste werkwijze	- 77 -
8.2.1	Moeilijke praktische benadering	- 77 -
8.2.2	Verhouding kostprijs fysische activatie vs. chemische activatie	- 78 -
8.2.3	Kostprijs fysisch geactiveerde kool	- 79 -
8.3	Berekening.....	- 79 -

8.3.1	Kostprijs pyrolysechar	- 79 -
8.3.2	Kostprijs fysisch geactiveerde kool	- 86 -
8.3.3	Kostprijs chemisch geactiveerde kool.....	- 87 -
8.3.4	Opbrengst chemisch geactiveerde kool	- 89 -
8.4	Netto Contante Waarde	- 90 -
9	Economische analyses.....	- 93 -
9.1	Vergelijking Netto Contante Waardes	- 93 -
9.2	Intern rendement.....	- 95 -
9.3	Sensitiviteitsanalyse.....	- 95 -
9.4	Scenarioanalyse.....	- 101 -
9.4.1	Hoeveel landbouwers moeten in het project stappen?.....	- 102 -
9.4.2	Welke prijs kunnen we aan de landbouwers geven per ton wilgenhout indien iedereen instapt in het project?.....	- 102 -
9.4.3	Welke verkoopprijs van chemische actieve kool zorgt voor een break-even met fysische activatie/WKK?	- 103 -
9.5	Aanbevelingen	- 103 -
9.5.1	Economisch	- 103 -
9.5.2	Ecologisch	- 104 -
9.5.3	Aanbevelingen voor verder onderzoek	- 104 -
10	Referentielijst	- 107 -
11	Bijlagen	- 113 -
11.1	Bijlage 1	- 113 -
11.2	Bijlage 2	- 115 -
11.3	Bijlage 3	- 116 -
11.4	Bijlage 4	- 117 -
11.5	Bijlage 5	- 119 -
11.6	Bijlage 6	- 121 -

Lijst van Tabellen

Tabel 1: Concentratie zware metalen in biomassa	- 9 -
Tabel 2: Concentratie zware metalen in pyrolysechar bij scenario 2	- 9 -
Tabel 3: Concentraties zware metalen in ongefilterd rookgas	- 16 -
Tabel 4: Investeringskosten activatie-installatie	- 32 -
Tabel 5: Concentraties zware metalen in char	- 34 -
Tabel 6: Berekening investeringskosten scrubberinstallatie	- 36 -
Tabel 7: Samenvatting investeringskosten fysische activatie	- 37 -
Tabel 8: Kostenpercentages uit literatuur voor vaste operationele kosten	- 38 -
Tabel 9: Vaste operationele kosten fysische activatie	- 39 -
Tabel 10: Berekening energiekosten fysische activatie	- 40 -
Tabel 11: Kosten koelwater fysische activatie	- 41 -
Tabel 12: Verwerkingskosten scrubberresidu	- 41 -
Tabel 13: Kostenberekening stikstofgas voor fysische activatie	- 42 -
Tabel 14: Overzicht operationele kosten fysische activatie	- 43 -
Tabel 15: Kasstromentabel fysische activatie	- 50 -
Tabel 16: Berekening NCW fysische activatie	- 51 -
Tabel 17: Berekening energetische waarde van pyrolyseolie	- 57 -
Tabel 18: Regressieresultaten elektrisch rendement in functie van het olierendement van pyrolyse	- 59 -
Tabel 19: Berekening elektrisch vermogen	- 60 -
Tabel 20: Investeringskosten WKK	- 62 -
Tabel 21: Operationele kosten WKK	- 64 -
Tabel 22: Inkomsten uit verkoop geproduceerde elektriciteit	- 65 -
Tabel 23: Jaarlijkse opbrengsten uit GSC	- 67 -
Tabel 24: Thermische energieproductie	- 67 -
Tabel 25: Jaarlijkse opbrengsten uit verkoop geproduceerde warmte	- 68 -
Tabel 26: Degressietabel aantal ontvangen WKC per jaar	- 70 -
Tabel 27: Berekening NCW van fysische activatie gecombineerd met WKK	- 71 -
Tabel 28: Verhoudingen fysische vs. chemische activatie	- 78 -
Tabel 29: Investeringskosten pyrolyse	- 80 -
Tabel 30: Voorbehandelingskosten pyrolyse	- 81 -
Tabel 31: Personeelskosten pyrolyse	- 82 -
Tabel 32: Typische percentages vaste operationele kosten	- 82 -
Tabel 33: Vaste operationele kosten pyrolyse	- 83 -
Tabel 34: Kosten koelwater pyrolyse	- 83 -
Tabel 35: Energiekosten pyrolyse	- 83 -
Tabel 36: Stikstofkosten pyrolyse	- 84 -

Tabel 37: Operationele kosten pyrolyse	- 84 -
Tabel 38: Berekening kostprijs pyrolysechar	- 85 -
Tabel 39: Investeringskosten activatie	- 86 -
Tabel 40: Operationele kosten activatie	- 87 -
Tabel 41: kostprijs per ton fysisch geactiveerde kool	- 87 -
Tabel 42: productiekost per ton chemische activatie	- 87 -
Tabel 43: Verhouding investeringskosten vs. operationele kosten	- 88 -
Tabel 44: Jaarlijkse productiekost chemisch geactiveerde kool	- 89 -
Tabel 45: Opsplitsing investeringskosten en operationele kosten voor chemische activatie-	89
-	
Tabel 46: Berekening NCW chemische activatie	- 91 -
Tabel 47: Berekening NCW chemische activatie met grondstofkosten	- 93 -
Tabel 48: Berekening NCW fysische activatie en WKK met inbegrip van grondstofkost pyrolysechar	- 94 -
Tabel 49: Oplijsting variabelen en ranges voor Monte Carlo Analyse	- 97 -

Lijst van Figuren

Figuur 1: Vergelijking samenstelling gemiddelde biomassa tegenover wilg	- 45 -
Figuur 2: Verband tussen samenstelling biomassa en poriestructuur	- 45 -
Figuur 3: Verhouding componenten investeringskost fysische activatie	- 48 -
Figuur 4: Verhouding van de operationele kosten van fysische activatie.....	- 49 -
Figuur 5: Optimale temperatuur pyrolyse voor maximalisatie rendabiliteit.....	- 73 -
Figuur 6: Verdeling uit Monte Carlo-analyse van NCW fysische activatie met WKK	- 98 -
Figuur 7: Bijdrage van diverse variabelen aan de variabiliteit van de Monte Carlo-analyse-	99
-	
Figuur 8: Verdeling uit Monte Carlo-analyse van NCW chemisch geactiveerde kool.....	- 100 -
Figuur 9: Bijdrage van diverse variabelen aan de variabiliteit van de Monte Carlo Analyse van chemischgeactiveerde kool.....	- 101 -

1 Probleemstelling

1.1 Praktijkprobleem

Historische vervuiling door zware metalen van de metaalverwerkende industrie in de Limburgse kempen heeft ervoor gezorgd dat vele hectaren landbouwgrond van in totaal 400 landbouwers ongeschikt zijn geworden voor het telen van voedsel voor de mens. Ook zijn deze vervuilde bodems een zware belasting voor de omwonenden. De zware metalen die in de bovenste grondlaag zitten, kunnen namelijk gemakkelijk de lucht in worden gestuurd door de wind, waardoor deze toxische partikels van zware metalen tot diep in de longen kunnen doordringen bij inademing.

De betreffende landbouwpercelen worden nu onder andere gebruikt voor veeteelt en teelten van veevoeder, wat zeker en vast ook niet de meest optimale oplossing is. Via de voedselketen komen er zo toch fracties van de vervuiling door zware metalen in het menselijk lichaam terecht. Met de huidige veeteelt, teelten van veevoeder en energieteelten zou het ook nog honderden jaren kunnen duren vooraleer de grond zuiver genoeg is om weer dienst te doen als bodem voor voedselteelten. Men is daarom een studie gestart om na te gaan of men met behulp van fyto-remediatie, de bodem snel terug geschikt kan maken voor voedselteelten. Fyto-remediatie is een techniek waarbij planten gebruikt worden die de eigenschap hebben om metalen uit de bodem te kunnen halen en nadien op te slaan in hun weefsels. Wilg is zowat het meest beloftevolle gewas om de opname van cadmium en zink te maximaliseren (Tlustos et al., 2007). Op die manier kan de Noord-Limburgse grond na een aantal jaren fyto-remediatieteelten terug gebruikt worden als grond voor voedselteelten wanneer de Vlaamse normcijfers behaald zijn.

Erg praktisch is deze saneringsmethode voorlopig echter niet. De gecontamineerde landbouwgronden zullen gedurende een heel aantal jaren gebruikt moeten worden voor remediatieteelten voordat deze terug geschikt zijn voor de teelt van reguliere gewassen (Koopmans, Römkens, Song, Temminghoff en Japenga, 2007). De landbouwers verliezen dus het inkomen dat ze nu hebben uit de vee- en veevoederteelten of alternatieve energieteelten. Men heeft daarop verwerkingsmethodes geanalyseerd naar economische haalbaarheid om in een overbruggingsinkomen voor de landbouwer te voorzien. Het korte omloophout lijkt een geschikte kandidaat om tot een maximale opbrengst te leiden. Dit is niet enkel een veelbelovende opbrengstbron maar kan in dat geval eveneens zorgen voor duurzame energieproductie. De verwerking kan gebeuren door middel van drie methodes: verbranding, vergassing en pyrolyse.

Pyrolyse, en meer specifiek, flash-pyrolyse komt hieruit naar voor als een beloftevolle verwerkingstechniek omdat deze techniek resulteert in drie verschillende fracties. Bio-olie, pyrolyse-gas en char (Ioannidou en Zabaniotou, 2007). Het gas wordt verondersteld de benodigde energie te kunnen leveren om het pyrolyseproces op gang te houden. Deze fractie valt voor de waardering dus in principe weg (Bridgwater 2011). De olie kan eveneens aangewend worden als energieproduct en heeft in die vorm dus al een bepaalde positieve waarde. De char is de vaste fractie die overblijft na het pyrolyseren of carboniseren van biomassa (paraskeva, Kalderis & Diamadopoulos, 2008). Deze pyrolysechar bevat de zware metalen en dus moeten we die fractie voorlopig nog als afvalproduct bestempelen door het gebrek aan potentiële toepassingen. Als gevolg hiervan moet men betalen voor de verwerking van de char. Omdat het totale pyrolyseproces voorlopig nog niet rendabel is, is het belangrijk dat we alle drie de eindproducten van de pyrolyse zo hoog mogelijk kunnen waarderen. Enkel zo kunnen we het proces rendabel maken en de landbouwers een zo hoog mogelijke prijs aanbieden voor hun wilgenhout. Als dit lukt, kan een maximaal aantal landbouwers overtuigd worden in te stappen in het fyto-remediatieproject.

1.2 Centrale onderzoeksvraag:

Men beschouwt voorlopig twee verschillende toepassingen waarvoor deze vervuilde char kan aangewend worden. Ten eerste zou men de char kunnen aanwenden als biochar. In dit geval gebruikt men de char als bodemverbeteraar. Een veelbelovende tweede mogelijkheid bestaat erin de char te activeren om die dan te kunnen verkopen als actieve kool met nuttige eigenschappen. Pyrolyse van materialen met een hoog gehalte aan lignine en cellulose levert namelijk char met hoge puurheid, een goede hardheid en bulkdensiteit om te dienen als grondstof voor hoog kwalitatieve actieve kool. Ook kan men voor deze chars vrij gemakkelijk actieve kool maken met een waaier aan poriegroottes door verschillende productietechnieken (Okutucu, Duman, Ucar, Yasa & Yanik, 2011). Volgens paraskeva et al. (2008) is dit dan ook een veelbelovende manier om waarde te geven aan biomassa door de hoge verkoopwaarde en de toenemende vraag naar actieve kool wegens strengere wetgeving met betrekking tot toepassingen met aandacht voor het milieu. Schröder, Thomauske, Weber, Hornung & Tumiatti (2007) verwachten dat de vraag door deze strengere milieueisen enkel maar gaat toenemen in de toekomst. Hierdoor is de kans om een hoge waardering te creëren voor de char, het hoogst voor de activatiemethode.

Er bestaat nog een derde manier om deze gecontamineerde char nuttig te gebruiken. De char zou immers kunnen worden aangewend om in zeer energie-intensieve industrieën als de metaal- en cementindustrie als duurzame nevenbrandstof te gebruiken indien de milieuvergunningen van de betreffende bedrijven de hoge concentraties zware metalen in de pyrolysechar toelaten.

Verder is de productie van 'groene' actieve kool uit nevenproducten van landbouw niet enkel goed door zijn goede adsorberende eigenschappen maar ook door het feit dat het op een duurzame manier geproduceerd wordt (paraskeva et al. 2008). Dit houdt in dat er koolstof uit de atmosfeer wordt gevangen en omgezet wordt in een vaste en duurzame structuur. Zo daalt de totale hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer en draagt deze methode bij tot een afzwakking van global warming. Daarom spits ik me voor deze masterproef om te beginnen eerder toe op de activering dan op een alternatieve aanwending.

Mijn centrale onderzoeksvraag luidt bijgevolg: *"Hoe kan de met zware metalen vervuilde char, die eindproduct is van pyrolyse uit fyto-remediatieteelten, economisch gewaardeerd worden?"*

1.3 Deelvragen:

Deze vraag kan uiteraard niet in 1 keer beantwoord worden maar beslaat verschillende aspecten.

Eerst en vooral moet er aan de hand van de verwachte concentratie aan zware metalen nagegaan worden of het noodzakelijk is dat de kool gezuiverd wordt voorafgaand aan de verwerking ervan. Hieruit komen twee nieuwe deelvragen voort.

"Moet gecontamineerde pyrolysechar eerst gezuiverd worden vooralleer deze nuttig kan worden ingezet?"

"Wat is de kost van zuivering van char om de norm te bereiken?"

Vervolgens kan er nagegaan worden welke productiemethodes er voorhanden zijn voor de verwerking van de vervuilde kool tot actieve kool. De beschikbare methodes zullen vervolgens tegen elkaar worden afgewogen in termen van kostprijs, rendement en mogelijke opbrengst. Uiteraard zal hier reeds rekening gehouden worden met de mogelijke invloed van de vervuiling op de verwerkingsmethode.

De volgende 2 deelvragen gaan dan verder op de waarde die we zouden kunnen krijgen uit actieve kool:

"Hoe hoog kunnen we de verkregen actieve kool waarderen?" .

“Welke activeringsmethode is optimaal voor deze char?”

Voor elke optie moet vervolgens een uitgebreide analyse gebeuren om de kosten en opbrengsten zo gedetailleerd mogelijk in kaart te brengen. Dit brengt ons bij een volgende deelvraag.

“Wat zijn de verwachte productiekost en opbrengst van deze methodes?”

Op dit moment kennen we de methode die de vervuilde char voorlopig het hoogste zal waarderen. Doordat de kosten en opbrengsten nu in kaart gebracht zijn, kan een analyse van de netto contante waarde aangewend worden om de economische waarde van de verwerking van pyrolysechar tot actieve kool te bepalen. Deze analyse biedt een antwoord op de zesde deelvraag.

“Wat is de te verwachten winst uit de meest rendabele optie van activering?”

Indien actieve koolproductie rendabel is, kan deze analyse bij in een algemeen model voor pyrolyse gegoten worden. Zodat indien de activering van pyrolysechar economisch rendabel is, een nieuw break-evenpunt kan bepaald worden voor de instapdrempel van het aantal landbouwers dat nodig is voor de rendabiliteit voor de totale pyrolyse. Dit leidt dan tot een laatste deelvraag:

“Wat is de invloed van actieve koolproductie op het aantal landbouwers dat nodig is om pyrolyse van remediatiehout in Noord-limburg rendabel te maken?”.

Doordat de fractie char als output van de flash-pyrolyse redelijk klein is (21%), kan het voorkomen dat de char wel economisch waardevol is, terwijl dit slechts een klein effect heeft op de rendabiliteit van het totale pyrolyse-project voor de Limburgse Kempen. In het geval dat de valorisatie van de char hoger is dan de bio-olie per equivalente massa-eenheid, kan bestudeerd worden of het nuttig is om trage pyrolyse toe te passen die de charvorming stimuleert en zo tot 80% char wordt gevormd samen met 20% gasfractie (Bridgwater, 2011).

“Wat is de eventuele invloed van een andere pyrolyse dan flash pyrolyse op de rendabiliteit van het totale proces?”

2 Pyrolysechar

Door het soepele milieubeleid dat Vlaanderen in het verleden voerde, is de bodem in de nabijheid van zinksmelters historisch vervuild geraakt met enkele zware metalen. Het betreft hier voornamelijk cadmium, zink, lood en koper die in de bovenste grondlaag terechtgekomen zijn door luchtvervuiling met zware metalen. De concentratie aan zware metalen is hierdoor in een bepaald gebied van de Kempen hoger dan de grenswaarde die de Vlaamse milieuwetgeving vooropstelt. Dit is een groot probleem voor de lokale landbouw aangezien veel gewassen voornamelijk het cadmium gemakkelijk opnemen uit de bodem en de betreffende gewassen dan niet meer geschikt zijn voor menselijke consumptie. Hierdoor zijn deze gronden voorlopig enkel geschikt voor het telen van energiegewassen om in een inkomen te voorzien voor de landbouwers (Koopmans et al., 2008).

2.1 Fytoremediatieteelten

Bepaalde gewassen hebben de eigenschap zware metalen heel gemakkelijk op te nemen uit de bodem en deze vast te houden binnenin de plantstructuur. Bovendien zijn sommige van deze gewassen, zoals korte omloophout, niet erg belemmerd in hun ontwikkeling door hoge concentraties aan zware metalen in de bodem. Deze gewassen kunnen dus na verloop van tijd, een met zware metalen vervuilde bodem zuiveren, totdat de lokale milieunormen gehaald worden. Het proces waarbij men zulke gewassen gebruikt om een bodemverontreiniging op te lossen, noemt men fytoremediatie (Schreurs, Voets & Thewys, 2011).

In de Kempen is er door de historische vervuiling, een behoorlijk potentieel voor zulke fytoremediatieteelten met korte omloophout. De zware metalen zouden door dit korte omloophout uit de bodem kunnen opgenomen worden, zodat de concentraties van de zware metalen in de zandbodem afnemen tot binnen de grenswaarden die in de Vlaamse milieuwetgeving staan beschreven. Het korte omloophout accumuleert deze zware metalen zodat deze geconcentreerd worden in de plantstructuur. Zo kunnen deze bodems na fytoremediatie opnieuw bestemd worden voor voedselteelten.

Het volledige besmette gebied is zo'n 700km² groot. Als er dan gekeken wordt naar welke gronden geschikt zijn voor fytoremediatieteelten, dan blijkt ongeveer 2383ha landbouwgrond geschikt om te participeren in een fytoremediatieprogramma (Schreurs et al. 2011).

2.2 Gewaskeuze

Voor de keuze van het beste gewas voor deze specifieke remediatieteelt zijn reeds diverse onderzoeken gebeurd. De belangrijkste keuze was de afweging tussen enerzijds de snelheid van de fytoremediatie en anderzijds de opbrengst aan biomassa omdat dit zorgt voor een overbruggingsinkomen voor de landbouwers. Energiemaïs heeft bijvoorbeeld een hoge opbrengst maar fytoremediatie duurt in dat geval zeer lang. Wilg daarentegen heeft een lagere biomassaopbrengst maar de wilgenbomen nemen de cadmium wel veel sneller op, waardoor de remediatieperiode een stuk korter is dan voor maïs. Men heeft uiteindelijk beslist om voor wilg te gaan omdat men de nadruk wil leggen op de remediatieperiode.

De remediatieperiode bedraagt in dat geval 42 jaar die onderverdeeld wordt in 2 cycli van 21 jaar. In elke cyclus is het dan optimaal als elke 3 jaar de biomassa geoogst wordt. Per hectare worden telkens 15000 stekjes gepland. Dit levert dan jaarlijks ongeveer 10,4 ton biomassa op per hectare landbouwgrond. Dit is uitgedrukt in droge massa omdat het hout gedroogd wordt om voor verwerking geschikt te zijn (Schreurs et al., 2011).

Deze 10,4 ton droge biomassa kan onderverdeeld worden in 2 delen. 8 ton is het hout dat op 3 jaar tijd geaccumuleerd is. De resterende 2,4 ton is de som van de massa bladeren die op 3 jaar tijd geproduceerd worden. Als we dus tellen met 10,4 ton droge massa per hectare gaan we ervan uit dat elk jaar de bladeren geoogst worden. Dit lijkt onrealistisch om te bewerkstelligen gezien de lage hoeveelheid biomassa die op deze manier geoogst wordt. De kosten van de oogst zouden de opbrengst van die 0,8 ton per hectare allicht overschrijden (Schreurs et al., 2011).

2.2.1 Zware metalen

Een analyse van wilgenhout dat men heeft aangeplant op een proefveld in Balen, waar de grond vervuild is met de zware metalen van de zinksmelters, geeft aan in welke mate wilg de zware metalen opneemt uit de bodem.

Voor cadmium kunnen we rekenen op een opname van 20 mg per kilogram droge biomassa voor de stammen, terwijl de bladeren een cadmiumgehalte hadden van ongeveer 50 mg per kilogram (Meers, Vandecasteele, Ruttens, Vangronsveld en Tack., 2007). In een ander onderzoek is er volgend resultaat bekomen voor een gelijkaardig gecultiveerd staal: 24 mg per kilogram voor de stammen en 60 mg per kilogram voor de bladeren (Schreurs et al., 2011).

Vervolgens werd de zinkconcentratie bepaald. De concentratie zink in de stammen was 400 mg per kilogram. Voor de bladeren werd een concentratie gemeten van 2,8 gram per kilogram. De concentratie koper bedraagt dan weer 3,7 mg per kg biomassa voor de stammen en 16 mg voor de bladeren. Ten slotte zijn nog de loodconcentraties van belang. Deze werden gemeten aan 0,89 mg per kilogram voor de stammen en 13,1 mg per kg voor de bladeren (Meers et al. 2007).

2.2.2 Oogstregime

Verder is er de keuze om in elk derde jaar te oogsten vooralleer de bladeren afvallen of net erna. Intuïtief zou men denken dat er beter geoogst kan worden met de bladeren nog aan de bomen om de biomassaopbrengst zo hoog mogelijk te houden. Er is echter een afweging die hier moet gemaakt worden. Bladeren nemen namelijk veel meer cadmium op uit de bodem dan het hout. Voor bladeren bekomt men een opname van 60 mg cadmium per kg biomassa, terwijl dit voor hout slechts 24 mg cadmium per kg biomassa is (Schreurs et al. 2011). Indien we dus de bladeren mee oogsten stijgt de gemiddelde cadmiumconcentratie in de te verwerken biomassa dus significant. Er moet dus nog gekeken worden naar de gevoeligheid van de gebruikte verwerkingsmethode voor de cadmiumconcentratie van de biomassa. Dit punt wordt verderop in de studie behandeld.

Voorlopig gaan we uit van 8,8 ton biomassa per jaar. Dit wil dus zeggen dat er om de 3 jaar geoogst wordt maar wel vooralleer de bladeren van de bomen vallen. Dit om de fyto-remediatie te bespoedigen. Voor de totale regio spreken we dus over 8,8 ton dm/ha * 2383ha landbouwgrond = 20.970,4 ton droge biomassa/jaar. Nu er bepaald was welke biomassa geschikt was en welke hoeveelheid ervan beschikbaar zou zijn startte de zoektocht naar een geschikte verwerkingstechniek.

Om de boeren van een inkomen te verzekeren of om op zijn minst ervoor te zorgen dat de kosten van deze teelten gedekt worden, is het de bedoeling dat deze biomassa zoveel mogelijk gaat opbrengen. Hiervoor zijn een aantal verwerkingstechnieken geschikt. Verbranding, vergassing en pyrolyse zijn de 3 mogelijke methodes om de energie in de biomassa op een nuttige manier om te zetten.

2.3 Definitie

Pyrolyse is de thermische degradatie van biomassa in de afwezigheid van zuurstof. Na deze behandeling ontstaan er uit de biomassa 3 verschillende eindproducten: gas, olie en een vaste fractie kool. Dit principe wordt al lang toegepast voor de productie van houtskool.

Hiervoor gebruikt men trage pyrolyse waarbij de biomassa gedurende lange tijd gepyrolyseerd wordt. De samenstelling van de 3 verkregen fracties is vooral afhankelijk van de pyrolysetemperatuur en de totale reactietijd in de oven. (Bridgwater, Toft & Brammer, 2002)

2.4 Waaron pyrolyse?

Het cadmium dat in de biomassa zit is een vrij vluchtig metaal. Vanaf een temperatuur hoger dan 450°C vervliegt de cadmium dan ook (Ng, Marshall, Rao, Bansode & Losso, 2003). Pyrolyse kan worden uitgevoerd op een relatief lage temperatuur. Dit heeft als gevolg dat bij pyrolyse op 450°C de Cadmium bijna volledig in de charfractie terecht komt zodat zowel gas als olie zo goed als vrij zijn van zware metalen en dus een nuttige toepassing kunnen krijgen (Stals, Thijssen, Vangronsveld, Carleer, Schreurs & Yperman, 2010).

Bij verbranding en vergassing daarentegen loopt de temperatuur hoger op, waardoor het cadmium zou vervluchtigen en er intensieve gasreiniging zou moeten gebeuren. Dit is echter een zeer zware investering die nooit kan terugverdiend worden. De conclusie van de gevoerde studies was bijgevolg dat pyrolyse de minst verlieslatende verwerkingstechniek is. Om deze reden is besloten pyrolyse als uitgangspunt te gebruiken.

Recent gaat er ook steeds meer aandacht naar fast-pyrolyse. Bij deze vorm van pyrolyse is de reactietijd in de oven veel korter bij een matige temperatuur van 500°C, wat resulteert in een maximaal rendement aan olie van 75% (Bridgwater et al., 2002). Het goede aan deze vorm van pyrolyse is dat er een grote nuttige fractie olie is, die vrij is van zware metalen en bijgevolg waarde kan creëren.

De temperatuur van 500°C is echter te hoog om de cadmium in de char te houden. Via uitlaatgassen zou de cadmium immers terug de lucht ingeblazen worden. Stals et al. hebben daarom experimenten gedaan met fast-pyrolyse van wilg op 450°C en bekomen resultaten die wel nuttig zijn voor verder onderzoek. Door de lagere pyrolysetemperatuur is de opbrengst van de vloeistoffractie lager en bedraagt dan zo'n 52%. De charfractie is goed voor 23% en de overige 25% is de gasfractie. Deze waarden zijn steeds uitgedrukt in massapercenten (Stals, Carleer, Reggers, Schreurs & Yperman, 2010).

2.5 Eigenschappen charfractie

Het gas kan dan gebruikt worden om het pyrolyseproces draaiende te houden (Bridgwater 2011) en de olie is zo goed als vrij van zware metalen. Indien de maximaal toelaatbare 450°C-limiet gerespecteerd wordt zit 60% van het cadmium en 62% van het zink in de char.

De rest komt terecht in zand dat een beperkt afvalproduct is na de pyrolysereactie (Stals et al. 2010). We kunnen bij 450°C uitgaan van een 23% aan char na pyrolyse. De charfractie wordt voorlopig bestempeld als afval en heeft dus geen waarde. Integendeel zelfs. Aangezien dit een ongewenst nevenproduct is, moet betaald worden voor de verwerking ervan. De bedoeling van dit onderzoek is de char toch te waarderen en indien dit mogelijk blijkt, zo hoog mogelijk te waarderen. Indien we concrete cijfers erbij halen uit Schreurs et al., (2011) en Stals et al., (2010) kunnen we gaan berekenen in welke mate de char vervuild is. In onderstaande tabel worden reeds de concentratie in de biomassa weergegeven.

Tabel 1: Concentratie zware metalen in biomassa

	Cd	Zn	Pb	Cu
cadmiumopname hout (g/ton)	24	400	0,89	3,7
cadmiumopname bladeren g/ton	60	2800	13,1	16
char-rendement pyrolyse	23%	23%	23%	23%
percentage cadmium in char	60%	62%	60%	60%

We hernemen de gegevens van het tweede oogstscenario om de concentratie aan zware metalen in de biomassa te bepalen onder de geldende assumpties. Er wordt dan elk jaar gemiddeld 8 ton hout en 0,8 ton bladeren geteeld. De gemiddelde concentratie aan cadmium per ton is dus $(8 * 24 \text{ g Cd/ton hout} + 0,8 * 60 \text{ g Cd/ton bladeren}) / 8,8$. We krijgen dan 27,27 g Cd per ton droge biomassa. Van 1 ton biomassa blijft er bij het veronderstelde charrendement van 23%, 230kg pyrolysechar over. Deze char bevat 60% van de beginhoeveelheid cadmium. Er zit dus $27,27 \text{ g} * 0,6 \text{ Cd}$ per 230 kg char. De concentratie hiervan is bijgevolg $(27,27 * 0,6) / 0,23 = 71,15 \text{ g Cd/ton char}$.

Tabel 2: Concentratie zware metalen in pyrolysechar bij scenario 2

scenario 2: hout en 1 jaar bladeren	Cd	Zn	Pb	Cu
biomassaproductie	8,8	8,8	8,8	8,8
metaalconcentratie biomassa (g/ton)	27,27	618,18	2,00	4,82
metaalconcentratie char (g/ton)	71,15	1666,40	5,22	12,57

De concentratie onder assumptie van de twee andere scenario's kan analoog berekend worden. Als we enkel het hout oogsten en de bladeren dus altijd eerst laten afvallen, dan is de concentratie Cd in de char na pyrolyse, 24 g /ton char. Voor het scenario waar elk van de

drie jaren ook de bladeren geoogst worden, krijgen we een gemiddelde cadmiumconcentratie van 32,3 g / ton char.

In de studie van Stals et al., (2009), bekomt men een pyrolysechar met een energie-inhoud van 24 GJ/ton. Bridgewater (2011) daarentegen spreekt van een energie-inhoud van 18,5GJ voor de wilg. Hij vermeldt hierbij ook dat als de charfractie 15% beslaat, deze fractie 25% van de oorspronkelijke energie bevat. $18,5 \text{ GJ} * 0,25$ bevat dus de energie van 150 kg char. De energie-inhoud van de char is bijgevolg $\frac{18,5 \text{ GJ} * 0,25}{0,15} = 30,83 \text{ GJ}$ per ton.

2.6 Waarheen met de vervuilde char?

De grootste probleemfractie na de pyrolyse is dus de char. In deze char zit namelijk nog een groot aandeel van de opgenomen cadmium. Hierdoor kunnen we de char niet zomaar voor eender welke toepassing inzetten. Niemand wil immers een product opkopen met een dergelijke concentratie aan zware metalen. De enige optie lijkt dan nog om deze fractie als afval te laten verwerken. Er moet 115 euro per ton betaald worden om de char te laten verbranden in een verbrandingsinstallatie van OVAM (bron: OVAM). In dit bedrag is de transportkost naar de verbrandingsinstallatie ook nog niet verrekend. De werkelijke kost ligt bijgevolg nog hoger dan 115 euro per ton.

Er blijken echter 3 manieren te bestaan om de char toch een nuttige toepassing te geven. Door gebruik als bodemverbeteraar, door de activering van de char zodat we actieve kool bekomen en verkoop van de char als groene brandstof. Als één van deze opties minder verlieslatend is dan het storten, dan is deze optie uiteraard te verkiezen boven de verwerking in een afvalverbrandingsinstallatie.

Om de vervuilde char als bodemverbeteraar te gebruiken spreekt het voor zich dat deze eerst moet worden gereinigd vooralleer deze opnieuw in de bodem kan worden gestopt, anders is heel het pyrolyse-project een nuloperatie waarbij men de vervuiling gewoon verplaatst. Aangezien deze stof als bodemverbeteraar in België niet echt een bestemming heeft, laten we deze optie voorlopig even rusten.

3 Aanwending van pyrolysechar

Om de char zo hoog mogelijk te waarderen, is het de bedoeling om de char een nuttigere bestemming te geven dan te storten. Voor deze masterproef worden twee opties onder de loep genomen als zijnde economisch interessant om uit te voeren in Vlaanderen.

Enerzijds is er de mogelijkheid om de char te activeren tot actieve kool en deze actieve kool dan te verkopen. Dit lijkt een erg interessante piste gezien de relatief hoge marktprijs van actieve kool en de stabiele en groeiende marktvraag (Ioannidou & Zabaniotou, 2007).

Anderzijds is er nog de optie om de char als brandstof te gebruiken aangezien pyrolysechar een vrij hoge verbrandingswaarde heeft (Bridgwater et al., 2011). Bij beide opties moet uiteraard steeds rekening gehouden worden met de hoge concentratie aan zware metalen. Het economische aspect is belangrijk, maar als dit ten koste gaat van het milieu moet er toch de afweging gemaakt worden of dit maatschappelijk verantwoord is.

3.1 Wat is actieve kool

Actieve kool is een zeer poreuze vorm van koolstof in vaste toestand die geproduceerd wordt uit grondstoffen met een hoog gehalte aan koolstof (Sentorun-Shalaby, Uçak-Astarlioglu, Artok & Sarici, 2006). Door de uitgebreide poriestructuur kan deze stof makkelijk moleculen vangen en vasthouden. Bijgevolg is actieve kool een interessant product om in te zetten om onzuiverheden te filteren uit een stroom water of lucht. Deze eigenschappen dankt de actieve kool vooral aan een zeer grote interne oppervlakte van meer dan 500 m³/gram waardoor er een groot contactoppervlak is tussen de filterende actieve kool en de vervuilde stroom. Ten tweede is ook de aard van de poriestructuur van actieve kool belangrijk omdat zo bepaald wordt welke en hoeveel moleculen kunnen gevangen worden.

3.1.1 Activatiemethodes

Uit verschillende bronnen blijkt dat er 2 mogelijke activatiemethodes bestaan. Dit zijn thermische en chemische activatie. Beide methodes bestaan uit 2 stappen. Carbonisatie en activatie. De carbonisatie is eigenlijk een gewoon pyrolyseproces om char te verkrijgen. Die verkregen char kan dan verder geactiveerd worden tot actieve kool. Bijgevolg hoeft de carbonisatiestap niet meer uitgevoerd te worden met de char van pyrolysehout. Door de charvorming is carbonisatie reeds een feit en kan gefocust worden op de activatie (Ioannidou et al., 2007), (Timur, Cem Kantarli, Onenc, Yanik, 2010) & (Sentorun-Shalaby, Uçak-Astarlioglu, Artok & Sarici, 2006)

3.1.1.1 *Thermische Activatie*

Bij thermische (of fysische) activatie wordt de char bij temperaturen tussen 600 en 1000°C gedurende één à twee uren verhit in een pyrolyse-oven onder een atmosfeer van ofwel stikstof en stoom (Ioannidou et al., 2007), ofwel CO₂ (Lopez, Olazar, Artetxe, Amutio Elordi & Bilbao, 2009) om de char niet te laten ontvlammen. Door de hoge temperatuur die nodig is, is het echter niet mogelijk om deze activatie-methode toe te passen op gecontamineerde char omdat de zware metalen dan zouden vervluchtigen en zo in de lucht zouden uitgestoten worden. Een oplossing voor de vluchtige zware metalen kan een rookgasreiningsinstallatie zijn. De zware metalen zullen bij de temperatuur van 800°C dan wel vervliegen, maar de cadmiumdeeltjes zullen terug gevangen worden in de scrubberinstallatie die de rookgassen van de reactor reinigt.

Een andere methode zou kunnen zijn, dat de zware metalen eerst uit de char worden gehaald door middel van uitwassen met zuren. Dit alternatief zou beduidend lagere investeringskosten kunnen hebben dan een rookgasreiniging. Als de zware metalen op diemanier uit de char kunnen gehaald worden, kan daarna gewone thermische activatie plaatsvinden zonder dat er zware metalen uitgestoten worden. Men kan zich dan evenwel afvragen wat de bruikbaarheid is van een charfractie na talloze behandelingen met zuren (Yperman J., via mondelinge communicatie).

Hiervoor moet de oplosbaarheid van vooral zink en cadmium nog bepaald worden.

3.1.1.2 *Chemische activatie*

Een alternatief is daarom misschien het chemisch activeren. De carbonisatiestap wordt dan vervangen door een voorbehandeling met een zuur en een zout. Als zuur wordt normaal fosforzuur gebruikt en het meest gebruikte zout is zinkchloride. Na behandeling met deze twee stoffen is de benodigde activatietemperatuur lager. Indien we deze productiemethode gebruiken is slechts een activatietemperatuur van 450°C nodig, dezelfde temperatuur als waar we bij de initiële pyrolyse op mikken. Er zou dus volgens de experimenten van Stals et al., (2010) geen vervlieging zijn van Cd. De zware metalen blijven in dit geval wel in de actieve kool zitten. Dit zou geen probleem mogen zijn, aangezien actieve kool net vaak ingezet wordt om zware metalen uit een oplossing te filteren.

3.2 Char als actieve kool

Aangezien char al een tussenstap is bij tweestaps activatie van actieve kool, is het voor de hand liggend deze methode als mogelijke oplossing te zien. Er moet dan immers niet zoveel meer geïnvesteerd worden om actieve kool te verkrijgen dan wanneer men actieve kool wil produceren uit biomassa. Na deze algemene bespreking over wat actieve kool nu eigenlijk is volgt er een ophijsting van de kwaliteitskenmerken van actieve kool. Zo proberen we inzicht te krijgen in wat nu de belangrijkste parameters zijn die de kwaliteit van actieve kool bepalen. Dit gebeurt uiteraard om verder in het onderzoek de potentiële verkoopprijs te maximaliseren en deze eveneens zo accuraat mogelijk te bepalen.

3.2.1 Kwaliteitskenmerken

Om de absorptiekwaliteiten van actieve kool te beoordelen zijn twee parameters van cruciaal belang. Enerzijds is er de interne oppervlakte van de actieve kool, anderzijds is ook de grootte van de gevormde poriën van belang. De potentiële verkoopprijs van actieve kool is bijgevolg afhankelijk van de score van de actieve kool op deze 2 kwaliteitsparameters.

3.2.1.1 *Interne oppervlakte*

De interne oppervlakte van actieve kool is een belangrijke kwaliteitsparameter. Het is de oppervlakte die 1 gram actieve kool heeft als al de poriën zouden worden opengeplooid en platgedrukt. Actieve kool met een superieure interne oppervlakte heeft dus een groter contactoppervlak bij filtering dan actieve kool met een lage interne oppervlakte. Hierdoor werkt deze actieve kool efficiënter als filter aangezien er meer kans is dat de 'vuile deeltjes' gevangen worden in de structuur van de actieve kool (Ioannidou & Zabaniotou, 2007).

Een streefwaarde van de interne oppervlakte zou 800 m²/gram moeten zijn om commercieel interessant te zijn (Schröder, Thomauske, Weber, Hornung & Tumiatti, 2007). Belangrijk in het onderzoek is dus de schatting van de verwachte interne oppervlakte van de actieve kool uit wilgenhout.

3.2.1.2 *Poriegrootte en totaal volume aan poriën*

De absorptiekenmerken worden in belangrijke mate bepaald door de verdeling en grootte van micro-, macro- en mesoporiën in de koolstofstructuur. Zo bestaat traditionele actieve kool vooraal uit microporeuze koolstof. Deze is geschikt om kleine moleculen te vangen uit een lucht- of waterstroom. Mesoporiën daarentegen zijn iets groter. Macroporiën houden geen moleculen vast, maar zorgen vooral voor een goede bereikbaarheid van de microporiën in de kern (bron: Desotec). Gedurende voorbije jaren is de interesse in mesoporeuze actieve

kool sterk gestegen omdat zo toepassingen kunnen worden gecreëerd om vooral grotere moleculen te kunnen vangen (Yang & Qiu, 2011).

De porositeit van actieve kool is dan ook een belangrijke factor om te bepalen voor welke toepassing bepaalde actieve kool geschikt is. Fysische activatie levert in het algemeen actieve kool met een hoog microporeus karakter op. Chemische activatie met fosforzuur zorgt dan weer voor actieve kool met zowel micro- als mesoporiën (Molina-Sabio & Rodríguez-Reinoso, 2004).

Uit een ander onderzoek blijkt dat de vorming van mesoporiën vooral beïnvloed wordt door 2 parameters. Enerzijds zijn de omstandigheden van het productieproces van belang. Concreet spelen hier voornamelijk temperatuur, reactietijd en verwarmingsnelheid een rol. Anderzijds is de samenstelling van de biomassa van belang. Meer precies hangt dit af van de respectievelijke gehalten aan cellulose, lignine en hemicellulose (Solum, Pugmire, Jagtoyen & Derbyshire, 1995).

3.2.2 Vergelijking thermische en chemische activatie

De opbrengst van chemische activatie ligt over het algemeen hoger dan die van thermische activatie. Men spreekt over 13% rendement voor thermische activatie. Dit is echter voor het ganse activatieproces met carbonisatie als eerste stap. Omdat char reeds gecarboniseerd is, is het rendement voor de activatiestap alleen ongeveer 50% (Girods et al., 2009). We werken verder met dit activatierendement van 50% omdat de charopbrengst uit carbonisatie sterk afhankelijk is van de carbonisatietemperatuur. Deze charopbrengst kunnen we dan als variabele factor in het onderzoek opnemen. Voor chemische activatie zou een rendement van 29% kunnen behaald worden (Ng et al., 2003). Voor Chemische activatie van wilg spreekt onderzoek van Stals, (2011) over een rendement van 37% op het normale charrendement. In dat geval ligt het rendement chemisch geactiveerde kool zelfs iets lager dan het rendement van fysisch geactiveerde kool.

Er kan bijgevolg van worden uitgegaan dat er $2411,5 \text{ ton} \left(\frac{4823 \text{ ton char}}{2} \right)$ actieve kool kan geproduceerd worden indien men thermische activatie toepast. De productiekost van chemische activatie ligt hoger maar zijn hogere rendement en kwaliteit maken dat meestal goed. De verkoopprijs van chemisch geactiveerde char ligt door de betere eigenschappen dan ook hoger dan die van fysisch geactiveerde char uit hetzelfde materiaal.

Qua uitrusting en installatie zijn de vereisten redelijk analoog met die van pyrolyse omdat activatie ook in een pyrolyse-oven plaatsvindt. Voor de investeringsanalyse zal een gedeelte

van de berekening dus kunnen gebeuren aan de hand van de kostenberekening voor pyrolyse. Meer specifiek voor de installatie en het personeel kan verwacht worden dat deze kosten vergelijkbaar zijn met een pyrolyse-installatie van dezelfde grootte. Maar ook kosten van bijvoorbeeld onderhoud, opslag en koeling kunnen op een analoge manier berekend worden. Hiervoor zijn diverse formules beschikbaar uit de literatuur. Deze worden toegepast voor de investeringsmodellen (Vanreppelen, Kuppens, Thewys, Carleer, Yperman en Schreurs, 2011).

3.3 Gedrag van zware metalen in de reactor

Cadmium, zink en lood hebben de eigenschap dat ze door hun vluchtige karakter meer en meer in vlieggas terechtkomen dan bodemas als de temperatuur van de activatie-oven stijgt (Jung, Matsuto, Tanaka and Okada, 2004). Dit komt doordat deze vluchtige metalen bij het afkoelen van de uitlaatgassen, condenseren op de vliegassen. (Pöykiö, Nurmesniemi and Keiski, 2010). We kunnen tevens berekenen hoe groot de concentratie aan zware metalen zal zijn in de uitlaatgassen van de activatie-oven.

Om deze concentratie te berekenen, berekenen we eerst het totale volume uitlaatgas. Dit gas bestaat voornamelijk uit de 50% massa die we verliezen tijdens de activatiestap waarbij een rendement gehaald wordt van 50%. De berekening voor de gecreëerde uitlaatgassen gaat dan als volgt.

Per uur wordt er 689 kg char ingevoerd in de activatie-oven. Van deze massa wordt de helft omgezet in actieve kool. De andere helft reageert weg en wordt als gas uitgestoten. Deze 344,5 kg per uur wordt dus als uitlaatgas uitgestoten uit de reactor.

Onderzoek heeft verder uitgewezen dat de gecreëerde gassen een dichtheid hebben van 1,3 kg per m³ (Vanreppelen, 2012). We delen bijgevolg de massa van 344,5 kg door 1,3 kg/m³. Dit geeft als resultaat een uitstoot van 265 m³ per uur. Het volume dat werkelijk uitgestoten wordt zal lager liggen door de vliegassen die als kleine vaste deeltjes bij in het gas zitten. Er wordt echter ook stikstofgas toegevoegd aan het proces om een zuurstofvrije omgeving te creëren. We nemen hier aan dat deze massa's mekaar teniet doen en werken bijgevolg met 265 m³ per uur als uitstoot.

Nu we de uitlaatstroom berekend hebben, moet er bepaald worden hoeveel zware metalen er in die stroom terechtkomen. We veronderstellen dat bij de hoge activatietemperatuur alle zware metalen in de vliegassen zullen terechtkomen (Jung et al., 2004). Verder veronderstellen we nog steeds het 2^e scenario waarbij de bladeren in het derde jaar mee geogst worden. Deze combinatie van bladeren en hout geeft een gemiddelde cadmiumconcentratie van 27,27 g/ton voor de mix van biomassa volgens de berekening in

een vorig deel. We weten ook dat 60% van de initiële hoeveelheid Cd in de char achterblijft (Stals et al., 2010). Aangezien het rendement van pyrolyse 23% bedraagt, zit er dus $0,6 * 27,27$ g/ton per 0,23 ton char. Dit is een totale hoeveelheid van 62,6 gram per ton char.

Om te gaan berekenen hoeveel cadmium er nu in die 265 m^3 gas/h zit vermenigvuldigen we de cadmiumconcentratie met de input-rate van char per uur. We krijgen zo $62,6 \text{ g/ton} * 0,689 \text{ ton/h} = 49,02 \text{ g/h}$. De concentratie van cadmium in de uitlaatgassen bedraagt bijgevolg $49,02 \text{ gram per } 165 \text{ m}^3$. Vereenvoudigd komt dit neer op een cadmiumconcentratie van $184,98 \text{ mg/m}^3$.

Deze berekening kunnen we herhalen om de concentratie van de andere zware metalen te bepalen in de uitlaatgassen. Vooral zink zou nog van enig belang kunnen zijn. De zinkconcentratie wordt analoog berekend met gegevens uit Stals et al., (2010) en Meers et al., (2007). Nog steeds onder de assumptie van het tweede oogstscenario met oogst van bladeren elk derde jaar, vinden we voor zink een concentratie van 4333 mg/m^3 uitlaatgas. Voor lood en koper vinden we respectievelijk $13,57 \text{ mg/m}^3$ en $32,68 \text{ mg/m}^3$. Deze berekeningen vindt u samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 3: Concentraties zware metalen in ongefilterd rookgas

<u>te verwijderen element</u>	<u>Cd</u>	<u>Zn</u>	<u>Pb</u>	<u>Cu</u>
<u>scenario</u>	<u>2</u>			
rendement activatie	50%	50%	50%	50%
uitlaatgassen activatie Nm^3/h	265,01	265,01	265,01	265,01
uitlaatgassen activatie Nm^3/ton	384,62			
metaalvervlieging (g/h)	49,02	1148,20	3,59	8,66
concentratie zware metalen in ongefilterd gas (mg/m^3)	184,98	4332,65	13,57	32,68

Bij verbranding blijft er zo'n 20 kg vliegashoudende stof in de filters achter bij verbranding van 1000 kg huisvuil. Deze fractie bevat dezelfde hoeveelheid zware metalen die in één ton pyrolysechar zaten. De concentratie aan zware metalen is bijgevolg met een fractie 50 toegenomen in dit scrubberresidu. Deze fractie moet uiteraard op gepaste wijze behandeld worden. De te behandelen massa is echter ook met een factor 50 gereduceerd. Dit vergemakkelijkt de hele operatie en drukt uiteraard ook de verwerkingskosten (Youcai, Lijie en Guojian, 2002).

3.4 Char als brandstof

Het is ook mogelijk om pyrolysechar in te zetten als brandstof. Ten eerste heeft deze koolstof een hoge verbrandingswaarde van 30,83 GJ/ton. Mark Stals relateert deze cijfers en bekomt uit labo-analyses een waarde van 24 GJ/ton. Aangezien de eerste een theoretische waarde is terwijl de tweede een experimentele waarde is, wordt er veiligheidshalve verder gewerkt met een verbrandingswaarde van 24 GJ/ton. Ten tweede is de char afkomstig van wilgenhout, waardoor deze kan aanzien worden als hernieuwbare brandstof. Dit komt door de korte cyclus die koolstof doorloopt in de productie van de biomassa in vergelijking met de zeer lange cyclus die nodig is om fossiele brandstoffen te vormen. In tijden waarin milieuproblematiek een steeds belangrijker factor wordt binnen de maatschappij is dit wel een interessant gegeven. Op deze manier kan heel wat fossiele brandstof uitgespaard worden.

3.5 Vergelijking van beide opties

Of we de char nu gaan activeren of als brandstof gebruiken moet een weloverwogen beslissing zijn. Deze beslissing hangt af van enkele cruciale factoren in verband met de verwerking. De twee belangrijkste lijken het ecologisch oogpunt enerzijds en het economisch anderzijds. In vele procesbeslissingen zijn deze twee factoren de twee die mekaar uitconcurreren en waartussen een optimaal evenwicht zou moeten bestaan. De reden hiervoor is dat het economisch en het ecologisch belang bijna steeds lijnrecht tegenover mekaar staan. Ecologische oplossingen zijn dan ook stevast duurder. We zoeken dus de oplossing die het beste compromis geeft tussen beide.

3.5.1 Ecologisch standpunt

Indien koolstof toch in de atmosfeer terechtkomt door afbraak of verbranding van biomassa, gebeurt dit in de vorm van CO₂. Deze CO₂ is het bekendste broeikasgas. Broeikasgassen zorgen ervoor dat warmte beter wordt vastgehouden in de atmosfeer. Dit zorgt voor een opwarmend effect dat het bestaande klimaat op aarde sterk wijzigt. Verbranden is in de huidige thematiek van global warming dus een situatie die men, indien mogelijk, beter kan vermijden (Jan Yperman & Robert Carleer via mondelinge communicatie).

Als we de koolstof echter activeren, blijft deze koolstof in een stabiele vaste toestand. Op deze manier wordt de koolstof uit de CO₂ die gevangen is door de biomassa vastgehouden en is er een netto daling van de concentratie CO₂ in de atmosfeer. Actieve kool kan zelfs meerdere malen geregenereerd worden wanneer deze verzadigd is. Op deze manier kan de gevangen koolstof lang op een stabiele wijze vastgehouden worden. Om deze redenen geniet

de activatie de voorkeur wanneer we de verwerking vanuit ecologisch standpunt bekijken (Jan Yperman & Robert Carleer via mondelinge communicatie).

3.5.2 Economisch standpunt

Los van de implicaties die de verwerking heeft op het milieu, mogen we natuurlijk ook het economische luik niet uit het oog verliezen. Een optie die wat minder goed is voor het milieu maar economisch meer baten met zich meebrengt dan de meest ecologische oplossing die toch niemand bereid is te financieren is misschien haalbaarder om in de praktijk uit te voeren. Het bepalen welk van beide opties op economisch vlak de voorkeur geniet is moeilijker te stellen dan voor de ecologische beslissing waar reeds veel algemeen onderzoek naar verricht is. Een economische procesbeslissing is echter zeer specifiek en hangt steeds van de situatie af waarin de beslissing moet genomen worden. Hierdoor moeten we een gedetailleerde economische analyse uitvoeren op de case om tot een definitief resultaat te komen. Deze economische analyse is het zwaartepunt van deze masterproef en zal het resterende deel omvatten.

3.6 Stabilisatie van zware metalen

Het vliegias dat gevangen wordt in de rookgaszuiveringsinstallatie bevat al de zware metalen uit de ongefilterde stroom van uitlaatgassen. Deze scrubber-assen zijn bijgevolg meestal erg toxisch voor het milieu. Aangezien we in de fyto-remediatieteelten veel zware metalen opnemen zullen in deze specifieke case de milieu-eisen van scrubberresidu sterk overschreden worden. Om te voorkomen dat de gevangen vervuiling zich weer gaat verspreiden in het milieu, moet de vervuiling vastgezet of gestabiliseerd worden (Hu, 2005).

Uit hetzelfde onderzoek komen vier behandelingen naar voor die een oplossing bieden voor het vastzetten van de vervuiling. Allereerst is er de methode van de cement- of asfalt-solidificatie. Deze methode bestaat erin de vervuiling vast te zetten in een cement of asfaltstructuur. Dit is de meest gebruikte methode (jaar 2002) om een vervuiling van zware metalen vast te zetten. Er is echter het risico dat de solidificatie aan kwaliteit verliest als bepaalde componenten in de scrubberresidu's vocht opnemen. Hierdoor zouden er kleine hoeveelheden zware metalen kunnen lekken. Als de resulterende massa dus niet gedurende lange tijd blootgesteld wordt aan vocht is dit een goede en goedkope methode om de vervuiling te immobiliseren (Hu, 2005) en (Youcai et al., 2002).

Een tweede methode bestaat erin de zware metalen te scheiden van het scrubberresidu door middel van water of een zuur oplosmiddel. Het overblijvende residu zou volledig vrij moeten zijn van zware metalen. Aangezien de vervuiling nadien volledig in deze zuren of wateroplossing zit, moeten de zware metalen nadien nog uit deze oplossing gehaald worden

met chemicaliën. Dit is echter een ingewikkeld proces waarbij de zware metalen geconcentreerd worden in slib en hierin moeilijk te stabiliseren zijn. Om deze redenen wordt deze oplossing nauwelijks toegepast (Hu, 2005).

Een derde mogelijke verwerkingstechniek is het smelten en daarna vastzetten van de zware metalen. Dit proces heeft bewezen het meest betrouwbare te zijn door de stabilisatie op hoge temperatuur. De behandelde assen zijn bijgevolg geschikt om te gebruiken in constructiematerialen (Hu, 2005) en (Youcai et al., 2002). De nadelen zijn daarentegen de relatief hoge kosten van materiaal en behandeling.

Een laatste oplossing bestaat erin de oplosbaarheid van de vliegassen te veranderen door middel van een chelatie. Deze oplossing is simpel en effectief maar de chelatie reagentia zijn duur en er zijn nog wat twijfels over de duurzaamheid van deze oplossing. Het onderzoek stelt dat dit voor anorganische componenten kan door middel van een behandeling met ijzersulfaat (Hu, 2005) en (Zhao en Stanforth, 2000).

4 Investeringsmodel

Alvorens een investering te plaatsen wil een ondernemer weten wat de verwachte return is van zijn investering. Een ondernemer zal immers enkel zijn geld in een project steken indien de verwachte return hoger is dan wanneer hij zijn geld risicoloos vastzet. Dit kan bijvoorbeeld door de return op de investering te vergelijken met de rente op een spaarrekening. Als het rendement van de investering niet hoger ligt dan de rente op een spaarboekje, is de investeerder uiteraard niet geneigd zijn geld in een risicovoller project te steken.

Om te kunnen beoordelen wat nu precies de verwachte waarde is van een investering, moet er een investeringsmodel opgesteld worden om op basis daarvan de investering te beoordelen. Voor deze studie wordt er gebruik gemaakt van een kosten-baten analyse door middel van een Netto Contante Waarde-model.

4.1 Tijdswaarde van het geld

Alvorens een Netto Contante Waarde-model op te stellen, bekijken we eerst welke theorie er schuilt achter dit model. Allereerst speelt de tijdswaarde van het geld een belangrijke rol. Een euro vandaag is niet evenveel waard als diezelfde euro volgend jaar. Door inflatie in de markt, stijgen de prijzen van quasi alle goederen immers jaar na jaar. Hierdoor wordt een euro jaar na jaar wat minder waard. Op één of enkele jaren is dit verschil nog niet zo groot. Als we echter een investering gaan bekijken over 20 jaar zoals hier het geval is, wordt dit verschil in waarde van één euro tussen jaar 1 en jaar 20 wel enorm groot.

Om te bekijken hoe deze inflatie tot uiting komt, nemen we terug het voorbeeld van de spaarrekening. Als we vandaag 1 euro beleggen in een spaarrekening, groeit deze euro aan tot $1+r$ euro binnen 1 jaar. De "r" die in deze formule gebruikt wordt is dan de rente die men krijgt om geld gedurende 1 jaar op een spaarrekening te zetten. Laat men dit geld vervolgens gedurende een extra jaar staan, dan krijgt men na dat tweede jaar niet enkel rente op het basisbedrag van 1 euro, maar eveneens op de rente die verkregen is na het eerste jaar. Na jaar 2 is die ene euro waarmee de initiële belegging gebeurde, bijgevolg aangegroeid tot $€ 1 * (1 + r) * (1 + r)$. Dit kan anders geschreven worden als $€ 1 * (1 + r)^2$. Voor de waarde na een willekeurig jaar n, volgt hieruit een meer algemene formule: $€ 1 * (1 + r)^n$.

Nu duidelijk is dat een euro doorheen de tijd niet steeds dezelfde waarde heeft, maar gestaag daalt in waarde, nemen we dit principe mee in de analyse van de investering. Om een investering te beoordelen moet er immers gekeken worden naar de volledige verwachte levensduur van die investering. Om de investering te gaan beoordelen gaat er bij de

methode van de netto contante waarde worden gekeken naar al de verwachte cashflows die deze investering zal genereren. Gezien de waarde van een kasstroom met dezelfde absolute waarden elk jaar daalt en deze zo onvergelijkbaar maakt, moeten we deze kasstromen omzetten in euro's van vandaag. Dit noemt men verdisconteren en hierbij keert men eigenlijk de methode van intrestberekening om. Waar men bij de berekening van intrest het basisbedrag gaat vermenigvuldigen met $(1 + r)^n$, gaat men om een toekomstige kasstroom te verdisconteren, deze delen door $(1 + r)^n$, met 'n' het aantal jaar in de toekomst dat deze kasstroom gegenereerd wordt (Gitman, 2004).

4.2 Netto Contante Waarde model

Nu duidelijk is hoe toekomstige kasstromen kunnen worden uitgedrukt in euro's van vandaag, bekijken we hoe deze verdisconteerde kasstromen kunnen gebruikt worden om het totaalplaatje van een investering te beoordelen. Een investering kan worden opgesplitst in twee types kasstromen. Eerst en vooral is er de investering zelf. Dit is de uitgave die in jaar 0 wordt gemaakt aan machines en uitrusting die nodig zijn om in de gewenste productie te kunnen voorzien. Aangezien deze uitgave plaatsvindt in het basisjaar, moet deze kasstroom niet verdisconteerd worden. Deze kasstroom is immers al uitgedrukt in euro's van vandaag.

Buiten de uitgaven voor de investering, zijn er ook werkingskosten. Deze omvatten alle kosten die nodig zijn voor de jaarlijkse productie en bevatten onder meer onderhoudskosten, personeelskosten en grondstofkosten. Uiteraard zijn er niet enkel jaarlijkse kosten maar staan hier jaarlijkse inkomsten tegenover. Voor de creatie van deze inkomsten is de investering immers initieel uitgevoerd. De inkomsten zijn in de meeste omstandigheden enkel de verkoop van het eindproduct. Als deze jaarlijkse inkomsten dan verminderd worden met de jaarlijkse kosten, bekomt men de netto kasstroom voor dat specifieke jaar (Mercken, 2004).

Aangezien de investering die hier behandeld wordt, een levensduur heeft van 20 jaar bekomen we nu volgende situatie. Er is één grote uitgave in het basisjaar en verder zijn er nog 20 netto kasstromen die elk uitgedrukt zijn in euro's van het jaar waarin de kasstromen gegenereerd worden. Als we dan elk van deze 20 kasstromen verdisconteren naar jaar 0, mogen we al deze bedragen in eenzelfde formule gebruiken als de investering in het basisjaar.

Het uiteindelijke doel van de netto contante waarde methode is om te na te gaan of de som van de 20 verdisconteerde kasstromen groter is dan, of minstens gelijk is aan de uitgaven voor de initiële investering (Baker, 2000). De som van deze verdisconteerde kasstromen, verminderd met de initiële investering is de uiteindelijke netto contante waarde. Deze netto contante waarde kan dus rechtstreeks berekend worden via volgende formule.

$$\sum_{n=1}^t \frac{CF_n}{(1+r)^n} - I_0$$

In deze formule is t , de levensduur van de investering, zijnde 20 jaar. I_0 is het initiële investeringsbedrag voor het project en r is de discontovoet die gebruikt wordt om de toekomstige kasstromen te converteren in huidige kasstromen. Verder is CF_n de netto kasstroom in jaar n . Belangrijk hierbij te vermelden is dat positieve kasstromen van een jaar belast worden met vennootschapsbelasting. Als er in een jaar dus een positieve kasstroom is, moet deze kasstroom vermenigvuldigd worden met $(1 - t)$. 't' is in dit geval de belastingsvoet van de vennootschapsbelasting in België. Het basistarief voor deze belastingsvoet bedraagt 33,99% (bron: http://www.belgium.be/nl/economie/onderneming-/fiscaliteit_en_boekhouding/vennootschapsbelasting/). De formule voor de jaarlijkse kasstroom is dus voorlopig $(1 - t) * (\text{verkoopopbrengsten} - \text{werkingskosten})$.

Ten slotte moet er nog rekening gehouden worden met het feit dat de afschrijvingen, als niet-kaskosten in de 'profit and loss' account, ervoor zorgen dat we teveel belastingen zouden betalen. De kasstroom moet bijgevolg nog vermeerderd worden met $(t * D)$, met D zijnde de jaarlijkse afschrijving op de investering (Mercken, 2004). We veronderstellen een lineaire afschrijving gedurende de verwachte levensduur van de reactor van 20 jaar. D wordt voor deze formule bijgevolg berekend als zijnde $(I_0 / 20)$ en de correctie van de jaarlijkse kasstroom wordt dan $t * (I_0 / 20)$. De volledige formule voor de kasstroom CF_n wordt dus $(1 - t) * (O - K) + [t * (I_0 / 20)]$. (Kuppens et al., 2010)

Als de netto contante waarde positief is, dan kan men stellen dat een investering zichzelf terug zal verdienen. De verwachte return voor het geïnvesteerde kapitaal is bijgevolg hoger dan de discontovoet. Deze discontovoet bevat de risicoloze rente, aangevuld met een bepaalde risicopremie. Deze risicopremie is onder andere afhankelijk van de aard van de investering, de risicoaversie van de investeerder en de toestand van de markt. Aangezien een positieve netto contante waarde wil zeggen dat het verwachte rendement hoger is dan deze discontovoet, zal de investeerder dit een interessante belegging vinden en bijgevolg zijn geld investeren.

Is de netto contante waarde daarentegen negatief, dan wil dit zeggen dat de toekomstige kasstromen, de uitgaven van de initiële investering niet kunnen dekken. De investeerder krijgt bijgevolg een te laag rendement op zijn investering en zal niet willen investeren maar zijn geld op een andere manier beleggen, die wel een voor hem acceptabele return oplevert of een gelijke return maar met minder risico.

4.2.1 Internal Rate of Return

Bij het afwegen van een investering kan nog een extra afweging worden gemaakt. Er kan immers sprake zijn van enige moeilijkheid met het vastleggen van de discontovoet. De methode van de netto contante waarde verlangt echter dat de discontovoet vastgelegd wordt. Als een investeerder wil bepalen wat de verwachte return van een bepaald project nu precies is, afgaande op de investeringskosten en de netto kasstromen, kan hij gebruik maken van de Internal Rate of return. Dit is de discontovoet waarbij de netto contante waarde exact gelijk is aan nul. Een investeerder kan dan op basis van deze IRR beoordelen of hij dat rendement voldoende vindt om te investeren. De beide methodes, IRR en NCW, zijn dus op zich niet zo verschillend maar bekijken de situatie vanuit een ander perspectief.

We kunnen hier wel een kanttekening maken. De kost voor het lenen van geld dat als investeringskapitaal kan gebruikt worden zit bij in de berekeningen door de integratie van deze financiële kost in de discontovoet. We zouden er dus kunnen vanuit gaan dat er ongelimiteerd kan geleend worden. In dat geval wordt de IRR ondergeschikt aan de NCW omdat de investeerder steeds de opportuniteit met de hoogste NCW zou kiezen omdat hij dan nadien het hoogste bedrag in handen heeft, ongeacht het rendement dat de investeerder behaald heeft op die investering.

5 Char verkopen als brandstof

5.1 Mogelijkheden

De vervuilde char heeft nog een bepaalde energetische waarde. Bij verbranding echter komen de zware metalen vrij door de hogere temperaturen. Zelf in een zuiveringsinstallatie investeren is zeer duur en lijkt dus onhaalbaar. Bij Umicore in Hoboken echter is er een verbrandingsunit waar een uitgebreide zuiveringsinstallatie op zit voor zware metalen. De char zou dus eventueel aan Umicore kunnen verkocht worden als energiedrager zodat er een bepaald bedrag kan gekregen worden voor de char. Deze moet dan niet gestort worden zodat de kosten hiervan wegvallen.

Ze verbranden nu bijvoorbeeld reeds afgedankte printplaten waar ze geld voor krijgen om deze te verwerken als alternatieve brandstof. Aangezien de char een lagere energetische waarde heeft dan deze printplaten is de waarde hiervan normaal ook negatief en moet er voor deze optie nog steeds betaald worden om van de char af te geraken. Indien deze lager is dan €114/ton char, dan is deze optie te verkiezen boven storten.

Ondanks de lagere energetische waarde dan alternatieve (afval)brandstoffen heeft pyrolysechar een extra troef achter de hand. Doordat brandstof met een korte koolstofketen, zoals hout en andere biomassaproducten, beschouwd worden als hernieuwbare energie, telt dit voor bedrijven mee om bepaalde energiequota te behalen in termen van hernieuwbare energie. Ondanks de concurrentie met bijvoorbeeld printplaten zouden bedrijven dus toch meer waarde kunnen hechten aan de char als brandstof dan eerst aangenomen.

Na een gesprek met de verantwoordelijke voor de ecologische ontwikkelingen van Umicore blijkt het volgende: Ondanks dat het in theorie zou gaan om pyrolysechar in te zetten als hernieuwbare brandstof willen ze liever niet deelnemen aan het project. "Pyrolysechar blijft net als andere houtskolen lang nasmeulen. Hierdoor bestaat het risico dat de filters van de rookgasreiniging verbranden indien deze nasmeulende vliegassen niet voldoende gekoeld geraken alvorens gefilterd te worden" (Jan Kegels, departementshoofd Leefmilieu en milieucoördinator voor de site Hoboken van Umicore).

Verder onderzoekwerk leert ons dat nog enkele andere industrieën verbrandingsinstallaties hebben waar allerhande afvalproducten gebruikt worden als brandstof. Vanzelfsprekend hebben zulke bedrijven ook een uitgebreide rookgasreiningsinstallatie. Zo blijkt dat ook in de betonnijverheid en kalkproductie veelvuldig afvalstoffen aangewend worden als extra brandstof bij de productie aangezien deze bedrijven voor hun activiteiten een zeer hoge temperatuur moeten bekomen. Deze fabrieken zijn dan ook voorzien van de nodige vergunde zuiveringsinstallaties. Deze industrieën hebben door hun hoge investeringskosten

slechts een beperkt aantal spelers op de Belgische markt. Deze grote fabrikanten zijn gecontacteerd met de vraag of er eventueel interesse zou kunnen zijn in de vervuilde char als hernieuwbare brandstof. Gezien de relatief hoge responsrate lijkt deze piste interessant voor de gecontacteerde bedrijven. Er zijn enkele punten op te merken na ontvangst van de eerste reacties.

5.2 Technische specificaties

Technische afdelingen van de bedrijven hebben nood aan zo gedetailleerd mogelijke info betreffende de pyrolysechar om het verbrandingsgedrag van dit materiaal zo goed mogelijk te kunnen voorspellen. Idealiter ontvangen zij stalen van de labotesten ter analyse in hun eigen onderzoekscentra. Uit mailcontact met een aantal bedrijven, blijkt dat er een aantal problemen bestaan. Er is nood aan een concrete asconcentratie van de char. Verder speelt het vochtgehalte een belangrijke rol in de waardering. De verbrandingswaarde tenslotte is een laatste belangrijke parameter omdat men zo een idee krijgt hoeveel energie er uit de brandstof te halen valt. Uit onderzoek van Stals, (2011) kunnen we al volgende informatie bekomen die de char karakteriseert:

Char:

- Concentratie Cd: 71,15 ppm
- Asgehalte in char na pyrolyse bij 450°C : 12,2%
- Vaste koolstof: 62,8%
- HHV: 24 GJ/ton

Biomassa-wilgenhout:

- Cadmiumconcentratie: 40,9 ppm
- Asgehalte: 2,4%
- Vaste C: 18,5%
- HHV: 17,5 MJ/kg

Biomassa-bladeren

- Concentratie Cd bladeren: 80 ppm
- Asgehalte: 9,7%
- Vaste C: 28,4%
- HHV: 19,3 MJ/kg

5.3 Potentiële waardering

Om een accurate schatting naar de verkoopwaarde te kunnen uitvoeren, zijn stalen van de voorgestelde brandstof vereist. Aangezien we deze niet hebben kunnen bemachtigen is er langs deze weg geen verdere informatie beschikbaar. Aan de hand van de wel beschikbare informatie uit een laboverslag van Mark Stals, heb ik toch één schatting ontvangen van Steven Vandenbulcke van A&S Energie. Dit is een bedrijf dat groene stroom opwekt, voornamelijk aan de hand van afvalhout uit de houtindustrie. Zij zijn vergund voor de verwerking van energiedragers met concentraties tot 50 ppm cadmium. Dit wil zeggen dat char uit fast-pyrolyse op zich niet bruikbaar is als grondstof wanneer we blijven uitgaan van een pyrolysetemperatuur van 450°C omdat de cadmiumconcentratie in de char dan hoger ligt dan de toegelaten 50 ppm. Voor deze toepassing zal bijgevolg gebruik moeten gemaakt worden van een lagere pyrolysetemperatuur of moet rechtstreeks vertrokken worden van de biomassa, zodat er een lagere opconcentratie van zware metalen is (Steven Vandenbulcke, zaakvoerder A&S Energie).

Met behulp van Excel kan in het werkblad met de concentraties berekend worden welk charrendement de pyrolyse moet hebben om een maximale Cd-concentratie van 50 ppm te bekomen. We vertrekken hiervoor van de concentratie aan cadmium in de biomassa onder de assumptie van het tweede scenario, zoals we reeds eerder bepaald hebben. Dit is het geval wanneer er gewerkt wordt met een oogstregime waarbij zowel hout als bladeren om de drie jaren geoogst worden. De concentratie in de biomassa bedraagt dan 27,27 ppm zoals reeds berekend werd in paragraaf 2.5. We weten ook dat 60 % van de zware metalen in de char blijft terwijl de overige 40% in de bodemassen terecht komen. 60% van de totale massa zware metalen zit dus in de gereduceerde massa van de charfractie die slechts 23 massapercenten van de initiële biomassa omvat (Stals et al., 2010).

Als we dan gaan kijken voor welke 'x' $\frac{27,27 * 60\%}{x}$ '50' bedraagt. We berekenen dat het charrendement minimaal 32,75% moet bedragen om de cadmiumconcentratie onder de 50 ppm te houden. We veronderstellen uit onderzoek van Bridgwater, (2011) dat dit rendement probleemloos haalbaar is door gebruik van een lagere pyrolysetemperatuur. Steven Vandenbulcke heeft het voorstel bestudeerd aan de hand van het gehalte vaste koolstof, de asconcentratie en de HHV van de pyrolysechar en komt tot volgende conclusies.

De biomassa of pyrolysechar is geschikt voor verbranding om zo hernieuwbare energie op te wekken. Voor zuiver afvalhout kunnen ze de assen na verbranding gebruiken als vulmiddel in beton. Hij acht de kans reëel dat de verontreinigde assen bij verwerking van pyrolysechar niet zullen voldoen aan de eisen van fabrikanten om deze eveneens voor deze nuttige neventoepassing aan te wenden. Bovendien moeten de assen op een gepaste manier

verwerkt worden zodat de zware metalen niet terug in het milieu kunnen terechtkomen (Steven Vandenbulcke via schriftelijke mededeling).

Al deze punten in beschouwing genomen, schat hij dat er voor de verwerking van de char of biomassa tussen de 40 en 60 euro per ton zal moeten betaald worden. Dit is dus iets meer dan een halvering van de verwerkingskost van de initiële oplossing waar de char als afval verwerkt wordt zonder nuttige toepassing. We kunnen dus concluderen dat dit voorlopig een betere oplossing is. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat ondanks er een deel energie gerecupereerd is ten opzichte van een loutere storting van de char, verwerking als actieve kool wenselijker zou kunnen zijn vanuit ecologisch standpunt. Op die manier blijft er immers een gedeelte van de koolstof die uit de lucht gevangen is (als CO₂) in vaste toestand en is er een netto daling van de CO₂ in de atmosfeer. We houden de optie 'brandstof' dus voorlopig even in beraad maar kijken eerst wat de economische implicaties zijn van een opwerking tot actieve kool. In het volgende hoofdstuk voeren we dan ook een economische analyse uit.

6 Investeringsmodel voor fysische activatie

Nu duidelijk is wat er nodig is om een investering te kunnen beoordelen, kunnen we de formule gaan invullen. Zoals blijkt uit het vorige hoofdstuk hebben we nood aan enerzijds de initiële investeringskosten en anderzijds de jaarlijkse kasstromen. De kosten, zijnde de investeringskosten en de jaarlijkse werkingskosten worden eerst opgelijst in dit hoofdstuk. Daarna bepalen we de potentiële opbrengsten. In het volgende hoofdstuk wordt op basis van deze gegevens dan een kasstromentabel ontwikkeld waaruit we de netto kasstromen kunnen berekenen. Deze netto kasstromen worden dan na actualisatie gebruikt om de netto contante waarde te berekenen. Ten slotte wordt nog de Internal Rate of Return berekend om de investering zo optimaal mogelijk te kunnen bespreken.

6.1 Investeringskosten

De analyse begint zoals eerder gezegd met de investeringskosten. We bekijken welke kosten er moeten worden gemaakt vooralleer met de eigenlijke productie kan worden begonnen. Er kan onderscheid gemaakt worden in drie categorieën. Eerst en vooral is er de investeringskost in de activatie-oven die nodig is als reactor om de actieve kool te produceren. Verder zijn er nog enkele diverse kleinere investeringen in voorzieningen voor opslag en nabehandeling van de actieve kool. Ten slotte is er nog de investering in een installatie die moet instaan voor de rookgasreiniging om te voorkomen dat de zware metalen zouden worden uitgestoten in het milieu.

6.1.1 Investeringskosten reactor

In de literatuur worden een aantal formules gevonden voor de schatting van investeringskosten voor een pyrolyse reactor en de bijkomende kosten voor het ganse pyrolyseproces. Chronologisch zijn dit de volgende formules. Ze zijn allen het resultaat van een regressie die uitgevoerd is op data uit wetenschappelijke literatuur. Meestal zijn de formules gebaseerd op de instroom aan grondstof per uur. Voor een activatiereactie is de gemeten input bijgevolg de hoeveel char per uur die ingevoerd wordt in de pyrolyse reactor (Kuppens et al. 2010).

Om de activatie in lijn te brengen met de pyrolyse van de biomassa, wordt er uitgegaan van eenzelfde aantal draaiuren van 7000 per jaar. Als we dan rekenen op een charopbrengst van 4823 ton / jaar, bekomen we een input per uur van $4823 \text{ ton} / 7000 \text{ draaiuren} = 0,689 \text{ ton char per uur}$.

Er is echter een grote marge op de verschillende investeringsbedragen die resulteren uit de verschillende formules. Als van de formules die beschikbaar zijn in de literatuur het

gemiddelde wordt genomen en bijgevolg een regressieanalyse wordt uitgevoerd op deze gemiddelde waarden, dan verkrijgen we volgende formule voor het totale investeringsbedrag: $I = 3.457.958,82 * (\Phi)^{0,6867}$. Φ is in dit geval ook de instroom aan char per uur in de reactor (Tom Kuppens via mondelinge verslaggeving, 2012).

We gebruiken voor de investeringskosten dus deze formule waarin we vervolgens de input aan char per uur invullen. We krijgen dan volgende berekening voor de investeringskosten in de reactor: $I = 3.457.958,82 * (0,69)^{0,6867} = \text{€ } 2.677.545,31$.

Verder missen we hier nog de investering in een koeler voor de actieve kool en kosten voor opslag, screening en verpakking (Vanreppelen et al., 2011).

6.1.2 Diverse investeringskosten

Er is dus nog nood aan een koeler voor de actieve kool. Door de hoge temperatuur van de geactiveerde char, gebruikt men een indirecte roterende koeler omdat dit type koelers zeer geschikt is voor gebruik met stoffen die binnenkomen aan hoge temperatuur (Ng et al., 2003). De bedoeling is dat de actieve kool binnen het uur een temperatuur bereikt van minder dan 100°C. In de studie van Ng et al., 2003 wordt voor twee verschillende groottes van deze koelers een prijs berekend. Voor een installatie met een output van 1440 kg actieve kool per dag is een koeler nodig met een oppervlakte van 2,32 m². De kost voor een koeler van deze grootte is \$ 65.000. Om rekening te houden met schaalvoordelen bij de herschaling, kan gebruik gemaakt worden van een tweede kostenberekening. De koeler van een andere installatie heeft een output aan actieve kool van 3600 kg per dag. De kost voor deze installatie is \$100.000.

Om de kost van de koeler voor deze investering te kunnen bepalen, moet eerst bepaald worden wat de dagelijkse productie aan actieve kool is. Met een jaarlijkse activiteit van 7000 uren kan de respectievelijke jaarlijkse productie herrekend worden naar de dagelijkse productie. De productie van één jaar is bij de huidige veronderstellingen vastgelegd op 2412 ton per jaar. De dagelijkse output is bijgevolg $[2412 \text{ ton} * 24 \text{ uur per dag}] / 7000 \text{ uur per jaar} = 8270 \text{ kg per dag}$. Er moet bovendien rekening gehouden worden met een verlies van 5% dat nog optreedt na het koelen. De werkelijke massa actieve kool die moet gekoeld worden is bijgevolg $8270 \text{ kg} / 0,95 = 8704 \text{ kg per dag}$.

Om de gevonden investeringskosten te herschalen naar deze installatie wijken we een beetje af van de traditionele "zes-tienden-regel" omdat we twee installatiekosten kennen uit de literatuur. Het idee is om de formule van deze zes-tienden-regel aan te passen zodat deze de relatie weergeeft tussen de twee gegeven investeringskosten. Dit doen we door de macht te

zoeken die nodig is om de verhouding tussen beide kosten en schaalgroottes te bepalen. In formulevorm geeft dit:

$$100.000 = 65.000 * \left(\frac{3600}{1440}\right)^x$$

De waarde van x die deze vergelijking oplost is in dit geval 0,47 in plaats van de 0,6 die algemeen aangenomen wordt.

We gebruiken deze macht nu om de kost van de nieuwe installatie te berekenen vertrekkende vanaf de twee gegeven installaties. We bekommen dan twee schattingen van de kost van de nieuwe installatie. Van deze twee geschatte waardes kan dan het gemiddelde genomen worden als benadering voor de investeringskost.

$$Ia = 65.000 * \left(\frac{8704}{1440}\right)^{0,47}$$

$$Ib = 100.000 * \left(\frac{8704}{3600}\right)^{0,47}$$

Voor Ia vinden we dan een investeringskost van \$ 151.428 en voor Ib een kost van \$ 151.408. Deze kosten blijken dus nagenoeg identiek te zijn. We vermoeden dus dat \$ 151.400 een goede schatter is voor de investeringskost in de koeler voor actieve kool

Aangezien dit bedrag in dollars staat moet dit eerst omgerekend worden naar euro's. Dit kan gebeuren door te vermenigvuldigen met een wisselkoers 0,75 euro/dollar. Het bedrag in euro is dan € 113.550. Deze waarde staat echter nog in euro's in 2003. Deze waarde moet bijgevolg nog geactualiseerd worden naar 2010 omdat we dit als basisjaar gebruiken voor het investeringsmodel. Omdat de koeler bij een chemisch bedrijf hoort kan gebruik gemaakt worden van de Chemical Engineering Cost Plant Index (CEPCI). De waarde hiervoor is 402 in 2003 en 550,8 in 2010. De omrekeningsfactor om de investeringskost van 2003 om te zetten in euro's van 2010 is bijgevolg $550,8/402 = 1,37$. De investeringskost is dan € 113.550 * 1,37 = € 155.588.

Verder moet er nog geïnvesteerd worden in een silo voor de opslag van de actieve kool. Zulke silo voor de opslag van actieve kool kost € 380.000 bij een char-input van 1 ton per uur (Lima, McAloon and Boateng, 2008). Voor deze installatie van 0,689 ton per uur herschalen we de grote silo met behulp van de "zes-tienden-regel". We krijgen dan € $380.000 * \left(\frac{0,689}{1}\right)^{0,6} = € 303.896$. Dit bedrag staat in euro's van 2008. We rekenen dit bedrag

vervolgens om via dezelfde CEPCI-index als bij de koeler. De index heeft de waarde 575,8 voor 2008 en 550,8 voor het jaar 2010. De omrekeningsfactor is bijgevolg kleiner dan 1 en bedraagt $550,8/575,8 = 0,958$. De investeringskost voor de silo is dus $€ 303.896 * 0,958 = € 291.106$

Vervolgens is er nog een investering nodig in screening en verpakking van de actieve kool. Deze investeringskost is voor beide \$ 25.000 bij een capaciteit actieve kool van 139,9 kg/uur (Lima et al., 2008). De initiële \$ 50.000 rekenen we om naar $€ 50.000 * 0,75 €/\$ = € 37.500$. Vervolgens herschalen we de kost voor deze installatie van 689 kg/uur * 50% rendement van de activatiestap = 345 kg per uur met behulp van volgende berekening: $€ 37.500 * \left(\frac{345}{139,9}\right)^{0,6} = € 64.397$. De kost rekenen we opnieuw om met de CEPCI index naar euro's in 2010. De omrekeningsfactor is dan gelijk aan deze voor de silo die hierboven berekend is en bedraagt 0,958. De kost voor screening en verpakking is dan € 61.692.

Tabel 4: Investeringskosten activatie-installatie

investeringskosten	€ 4.794.718,97
investeringskosten reactor	€ 4.314.986,77
koeler voor actieve kool	€ 136.575,00
opslag	€ 250.810,78
screening en verpakking	€ 92.346,42

6.1.3 Investering rookgasreiniging

Verder is er bij fysische activatie nog een installatie nodig om de zware metalen te verwijderen. Dit kan door middel van een scrubber die als filter dient om de rookgassen te reinigen. Hiertoe bestaan verschillende soorten filters die elk gespecialiseerd zijn in één of meerdere specifieke pollutanten in de rook. Voor de specifieke case waar zware metalen zo goed mogelijk moeten verwijderd worden uit de rookgassen van het activatieproces is het van belang om enerzijds een natte scrubber in te zetten en anderzijds een filter op basis van actieve kool. De natte filter vangt in dat geval de zware metalen die neergeslagen zijn op stofdeeltjes. Deze stofdeeltjes worden dan door de natte scrubber uit de rook gehaald. De zware metalen die als ionen in de rook zitten worden op hun beurt dan weer gevangen door de actieve kool die door middel van zijn poreuze structuur, deze ionen kan vangen en vasthouden. (Sedman & Esparza, 1991 en Poggio & Grieco, 2010).

Investering in een complete en geavanceerde rookgasreiniging zou tussen de 7 en 15 miljoen dollar bedragen (bron: <http://www.itas.fzk.de/deu/Itaslit/acri00a.pdf>). Een andere bron vermeldt dan weer een investeringskost van 6.000.000 PLN. Dit is ongeveer

€ 1.500.000 voor een rookgasreinigingsinstallatie van een Poolse huisvuilverbrandingsinstallatie (bron: http://epe.pwr.wroc.pl/2010/gostomczyk_4-2010.pdf). Het is dus duidelijk dat we niet zomaar kunnen zeggen welke installatie er nodig zal zijn en wat dan de bijhorende kost zal zijn.

Om na te gaan welke installatie geschikt is om een oplossing te bieden voor de pyrolysefase moet er eerst en vooral gekeken worden naar de verwachte concentratie van cadmium gedurende het ganse verwerkingsproces. Beginnen doen we dan uiteraard bij de pyrolysechar. We veronderstellen opnieuw dat er geoogst wordt onder het tweede scenario. Deze analyse werd reeds gemaakt in hoofdstuk 2 waar de eigenschappen van de charfractie beschreven worden. Onder de gemaakte assumpties is de concentratie Cd in de char 71,15 gram/ton. We vertrekken dus van deze concentratie om na te gaan hoe zwaar de rookgasreiniger moet zijn.

We gaan ervan uit dat bij activatie alle zware metalen zullen vervliegen en bijgevolg in de vliegassen terecht komen. We kunnen eveneens een rendement van 50% vooropstellen voor de activatie (Girods et al., 2009). De helft van de charmassa wordt omgezet in rookgassen waar de zware metalen in zitten. Elke ton char wordt dus omgezet in 500 kg actieve kool en 500 kg gassen. We kunnen op basis van die gegevens dan de concentratie van cadmium berekenen in de rookgassen via de massadichtheid van de gassen. Het gewicht van de gassen kan geschat worden op $1,30 \text{ kg/m}^3$ (Tom Kuppens via mondelinge verslaggeving). Per ton char die geactiveerd wordt, is de rookopbrengst van 500 kg gelijk aan $\frac{500 \text{ kg}}{1,30 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 384,62 \text{ m}^3$. Aangezien de invoer van pyrolysechar 0,69 ton per uur bedraagt is de gasstroom per uur bijgevolg $384,62 \text{ m}^3 * 0,69 = 265,01 \text{ m}^3$.

Nu kan gekeken worden naar de hoeveelheid cadmium die gedurende dit uur uitgestoten zou worden. Deze hoeveelheid wordt bepaald door de concentratie van 71,15 g/ton te vermenigvuldigen met de invoer van 0,69 ton per uur. Dit geeft een hoeveelheid Cadmium die per uur vervliegt van 49,02 gram. Op het berekende volume van $265,01 \text{ m}^3$, geeft dat een concentratie van 185 mg/m^3 . Dit is enorm hoog gezien de Vlaamse emissienorm van $0,05 \text{ mg/m}^3$. Om tot deze norm te komen is een zuiveringsgraad van $\frac{185-0,05}{185} = 99,973\%$ vereist. Hiervoor zullen we een rookgasreiniger moeten zoeken die aan deze minimale zuiveringsgraad voldoet.

De selectie van een geschikte installatie gebeurt op basis van een onderzoek van Achternbosch en Richers (beschikbaar via: <http://www.itas.fzk.de/deu/itaslit/acri02b.pdf>). In dit onderzoek vergelijken zij 10 rookgasreinigers die steeds opgebouwd zijn als een combinatie van verschillende filtercomponenten op basis van de mate waarin zware metalen

gezuiverd worden. Tevens maken zij een kostenvergelijking van deze 10 installaties. De installaties kunnen op basis van filtermethodes opgedeeld worden in drie verschillende categorieën. Er zijn zes installaties van het type 'wet', twee installaties die onder de noemer 'semi wet' vallen en nog twee andere zijn 'semi dry'. We wijden hier niet verder over uit omdat enkel belangrijk is wat de uiteindelijke zuiveringsgraad is van de installatie.

Voor elk van de onderzochte installaties wordt schematisch weergegevens in welke mate de belangrijkste onzuiverheden door elk stadium in het filterproces gezuiverd worden. We kijken louter naar de 10 schema's die de zuivering van cadmium voorstellen. Er wordt steeds vertrokken van 5,76 gram vliegassen per ton verbrand afval. We zien duidelijk dat we de installaties in twee groepen kunnen verdelen. De zes laatste reinigers hebben steeds een eindconcentratie cadmium van 0,0047 gram per ton afval. De eerste vier installaties daarentegen hebben een eindconcentratie lager dan 0,0047 gram/ton. Deze vier installaties hebben dus een hogere reinigingsgraad dan de zes laatste. De laatste zes installaties zijn echter goedkoper dan de eerste.

We gaan dus eerst onderzoeken of de zuiveringsgraad van deze goedkopere installaties voldoende is om de norm te halen. Het percentage cadmium dat bij deze installaties verwijderd wordt is $\frac{5,76-0,0047}{5,76} = 99,91\%$. Aangezien 99,973% de minimale zuiveringsgraad is, kan de norm van 0,05 g/Nm³ niet gehaald worden. De berekende concentratie is dan immers nog 0,15 g/Nm³, het drievoud van wat wettelijk toegelaten is. De berekening is visueel weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 5: Concentraties zware metalen in char

te verwijderen element	Cd	Zn	Pb	Cu
scenario	2			
rendement activatie	50%	50%	50%	50%
zuiveringsgraad gasreiniger	99,973%	99,973%	99,973%	99,973%
uitlaatgassen activatie Nm ³ /h	265,01	265,01	265,01	265,01
uitlaatgassen activatie Nm ³ /ton	384,62			
metaalvervlieging (g/h)	49,02	1148,20	3,59	8,66
concentratie ZM in ongefilterd gas (mg/m ³)	184,98	4332,65	13,57	32,68
concentratie ZM in gefilterd gas (mg/m ³)	0,05	1,17	0,00	0,01

Er zal dus een keuze moeten gemaakt worden tussen één van de vier eerste en duurste installaties. Een idee is om te kijken naar hoe andere zware metalen, die nog wel in meetbare hoeveelheden aanwezig zijn, zich gedragen tijdens de laatste filterstap. Als we de 4 schema's van eenzelfde zwaar metaal met elkaar vergelijken zien we dat de reiniging in de laatste stap steeds gelijk is. Als de theoretische prestaties toch gelijk zijn aan elkaar spreekt

het voor zich dat er vervolgens geselecteerd wordt op de kostprijs. We zien dat voor de eerste twee natte scrubbers de prijs vastligt op 29.000.000 DEM terwijl de twee andere een kostprijs hebben van 30.000.000 DEM. De keuze zal dus gaan tussen één van de twee eerste installaties door de iets lagere investeringskost.

Als we kijken naar de verschillende componenten van beide scrubbers blijkt dat de tweede installatie in het laatste stadium een actieve kool filter bevat. Omdat uit onderzoek van Sedman & Esparza (1991) en Poggio & Grieco (2010) blijkt dat een actieve kool filter zeer efficiënt is in het vangen van zware metalen wanneer deze voorkomen als ionen. Op basis van deze informatie zou men dus geneigd kunnen zijn deze installatie te verkiezen. Omdat de prijzen echter identiek zijn laten we een definitieve keuze in het midden voor deze analyse. Een technische keuze kan dan door experts ter zake gemaakt worden.

Voor de investeringskost baseren we ons dus op de kost van 'natte scrubber 1' uit het onderzoek van Achternbosch en Richers. De kost voor de installatie uit het onderzoek bedraagt 29.000.000 DEM. Om de installatie te kunnen herschalen naar de installatie voor de case van dit onderzoek bekijken we eerst wat de parameters zijn van de onderzochte installatie. De investering blijkt te bestaan uit twee identieke scrubbers die beide aangesloten zijn op een verbrandingsinstallatie, waarvan elke installatie een jaarlijkse capaciteit heeft van 100.000 ton huisvuil. Om de scrubbers te bekijken is het echter beter om te kijken naar de uitlaatstroom die door deze installatie gaat.

Uit het onderzoek blijkt dat deze stroom rookgassen gemiddeld $4700 \text{ Nm}^3/\text{ton}_{\text{input}}$ bedraagt voor de 10 bestudeerde installaties. Voor deze case is de uitstoot per ton geactiveerde char zo'n 385 Nm^3 . De installaties uit het onderzoek van Achternbosch en Richers hebben dus tien keer zo veel uitlaatgassen te verwerken dan de scrubber die het onderwerp is van dit onderzoek. Belangrijk hierbij te vermelden is dat de bestudeerde installaties steeds bestaan uit twee parallelle scrubbers met gelijke capaciteit. Om deze reden werken we voor de herschaling van de investeringskosten met de helft van de luchtstroom en investeringskosten. Deze zijn dus respectievelijk $2350 \text{ Nm}^3/\text{ton}$ en 14.500.000 DEM. Elk van beide installaties krijgt dus vijf keer meer uitlaatgassen te verwerken per ton input ten opzichte van de installatie uit dit onderzoek.

Daar stopt het echter niet. Buiten het feit dat de installaties meer rookgas verwerken per ton ingevoerde brandstof, hebben deze installaties ook nog eens een veel grotere invoercapaciteit per uur. We drukken nu de totale luchtstroom uit in uren omdat het aantal operationele uren van beide installaties gelijk is aan 7000 uur/jaar. Onze installatie heeft dan een stroom rookgassen van $385 * 0,69 = 265 \text{ Nm}^3/\text{h}$ tegenover $2350 * [100.000/7000] = 67.143 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Om de herschaling uit te voeren maken we gebruik van de "zes-tiendenregel" om economische schaalvoordelen te schatten. Via de formule:

$$I = 14.500.000 \text{ DM} * \left(\frac{265}{67.143}\right)^{0,6} = 523.772 \text{ DEM.}$$

berekenen we deze kost. Voor de Duitse Mark vinden we als wisselkoers voor 1 euro; 1,956 DM (bron: <http://www.sussex.ac.uk/Units/currency/>). De kost van de installatie in euro's bedraagt bijgevolg € 267.767.

Deze kost is echter nog steeds niet correct. Het onderzoek van Achternbosch en Richers dateert immers van 1999. We actualiseren daarom de investeringskost via de Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) van 1999 naar 2010. De index vermeldt voor 1999 een waarde van 390,6 en voor 2010 heeft deze CEPCI-index een waarde van 550,8 (bron: <http://es.scribd.com/doc/30495605/VARIACION-DE-CEPCI>). De verhouding tussen beide waardes is dus de ratio waarmee we de gevonden investeringskost nog moeten gaan vermenigvuldigen. Voor deze verhouding vinden we een waarde van $\frac{550,8}{390,6} = 1,410$. De geactualiseerde materiaalkost voor de rookgasreiniger bedraagt dus € 267.766,72 * 1,410 = € 377.551,08. Deze kost is de materiaalkost voor de investering. We moeten dus nog vermenigvuldigen met een factor voor de installatiekost om tot de uiteindelijke investeringskost te komen. Onderzoek toont aan dat de totale investeringskost 509% van de materiaalkost bedraagt. Om van de materiaalkost naar de totale investeringskost te gaan kan deze materiaalkost dus vermenigvuldigd worden met een factor 5,09 (Peters, Timmerhaus en West., 2004). Voor onze installatie levert dit een uiteindelijke investeringskost op van € 1.921.735,00.

Deze kost lijkt de meest realistische die kan berekend worden uit de beschikbare literatuur. De kostenberekening voor de rookgasreiniger is uitgewerkt in volgende tabel.

Tabel 6: Berekening investeringskosten scrubberinstallatie

investeringskost rookgasreiniger	€ 1.921.735,00
kostprijs installatie 67143 Nm ³ /h	DEM 15.000.000,00
herschaalde kostprijs 265 Nm ³ /h	DEM 523.751,71
wisselkoers (DEM/EUR)	1,956
kostprijs equipment EUR (1999)	€ 267.766,72
kostprijs equipment EUR (2010)	€ 377.551,08
investeringskost rookgasreiniger (geïnstalleerd)	€ 1.921.735,00

Met de rookgasreiniger inbegrepen, is de ophijsting van de kostencomponenten binnen de investering compleet. Alvorens de operationele kosten en opbrengsten besproken worden vindt u hieronder ten slotte nog een overzicht van de totale investering, opgesplitst in de verschillende onderdelen.

Tabel 7: Samenvatting investeringskosten fysische activatie

investeringskosten	€ 5.120.456,77
investeringskosten reactor	€ 2.677.545,31
koeler voor actieve kool	€ 155.587,93
opslag	€ 303.896,36
screening en verpakking	€ 61.692,17
scrubber	€ 1.921.735,00

6.2 Werkingskosten

Nu het totale kostenplaatje van de investering in het basisjaar gekend is, is het tijd om de jaarlijkse werkingskosten te bepalen. Eens deze kosten geschat zijn kunnen deze gebruikt worden om de jaarlijkse kasstroom te berekenen als deze afgetrokken wordt van de geschatte inkomsten die in het volgende punt besproken zullen worden. De kosten die samen de werkingskosten vormen zijn personeelskosten, vaste operationele kosten, energiekosten en kosten voor koelwater en stikstof (Vanreppelen et al., 2011). Als gevolg van de uitbreiding van de installatie met de scrubber voor rookgasreiniging, moeten er nog vaste operationele kosten geteld worden voor deze installatie.

6.2.1 Personeelskosten

Buiten de loutere investeringskosten zijn er uiteraard nog andere kosten. Er zijn personeelskosten voor de werknemers die nodig zijn voor de werking van de reactor. Deze personeelskosten worden geschat via de formule $C_{\text{labour}} = 1,56 \times 10^5 * (1,04 \times \Phi^{0,475})$ met Φ de input aan droge massa. Aangezien deze formule is opgesteld voor 2005, vermenigvuldigen we nog met een factor voor de loonindex. We gebruiken hiervoor de loonindex van België en vinden hiervoor de volgende waardes op de site van vakbond ACV.

Voor einde 2005 was de index 103,45 (basisjaar is hier 2004). Einde 2010 was de waarde van deze index 115,0; ook met 2004 als basisjaar. Als we de loonevolutie tussen 2005 en 2010 dan berekenen, bekommen we een herschalingsfactor van $(115/103,45) = 1,11$ (bron: http://lbc-nvk.acv-online.be/Sociale_wetgeving/loon/index/inleiding_index.asp). We vullen de formule voor de berekening van de loonkost aan met deze factor. We krijgen bijgevolg de volgende formule: $C_{\text{labour}} = [1,56 \times 10^5 * (1,04 \times \Phi^{0,475})] * 1,11 = € 150.884,02$.

6.2.2 Vaste operationele kosten

Verder kan worden uitgegaan van 7% vaste operationele kosten op de totale investeringskosten (Islam & Ani, 2000). Ook vinden we in de studie van Vanreppelen et al., (2011) een tabel met een overzicht van de vaste operationele kosten. Samenvattend kunnen we stellen dat volgende gemiddeldes bekomen worden aan de hand van de tabel.

Tabel 8: Kostenpercentages uit literatuur voor vaste operationele kosten

Jaarlijkse operationele kost	uitgedrukt als	
Onderhoud	3%	van investeringsbedrag
	5%	van investeringsbedrag
	3%	van investeringsbedrag
	4%	van investeringsbedrag
	6%	van investeringsbedrag
	2,5%	van investeringsbedrag
	2%	van investeringsbedrag
verzekering	2%	van investeringsbedrag
	1%	van investeringsbedrag
verzekering en algemene overheadkosten	4%	van investeringsbedrag
	2%	van investeringsbedrag

Bron: Vanreppelen et al., 2011

Het gemiddelde van de onderhoudskosten bedraagt zo'n 4%. Voor verzekering vinden we 1,5% en voor overhead 1,5%. Dit geeft een totaal van 7%. Voor deze studie zal bijgevolg gebruik gemaakt worden van een kost van 7% op de investeringskosten zoals ook Islam et al (2002) reeds aangaven.

6.2.3 Werkingskosten rookgasreiniging

Buiten de investeringskosten in een luchtzuiveringsinstallatie moeten er jaarlijks enkele extra kosten in rekening gebracht worden. Ten eerste is er een onderhoudskost voor de rookgasreinigingsinstallatie. Bij diverse bronnen vinden we hiervoor 3-4% van de investeringskosten (Joo-Youp, Yuhong & Sang-Sup, 2008) en (Geysen, Imbrechts, Vandecasteele, Jaspers & Wauters, 2004). Het blijkt ook dat dit percentage onderhoudskost bijna altijd gelijkgesteld wordt aan de onderhoudskost van een pyrolyse-installatie. Omdat

een activatie-oven eigenlijk hetzelfde is als een pyrolyse reactor, nemen we hiervoor hetzelfde kostenpercentage.

Als we deze denkwijze volgen kunnen we de onderhoudskosten bijgevolg schatten op een 3,5% van de investeringskosten zoals we ook verondersteld hebben voor de onderhoudskosten van de activatie-oven. Verder zijn er nog kosten voor elektriciteitsverbruik en verzekering en andere overheadkosten. We veronderstellen hiervoor dat de kostenpercentages die gelden voor een pyrolyse-oven kunnen worden doorgetrokken naar de kosten op de investering in de rookgasreinigingsinstallatie. We gaan daarom uit van 7% jaarlijkse overheadkosten op het totale investeringsbedrag inclusief de rookgaszuiveringsinstallatie. De Vaste operationele kosten voor de totale investering is bijgevolg gelijk aan $\text{€ } 3.198.721,78 * 7\% + \text{€ } 1.921.735 * 7\% = \text{€ } 358.431,97$.

Tabel 9: Vaste operationele kosten fysieke activatie

Vaste Operationele Kosten	€ 358.431,97
kostenpercentage (op investering)	7,0%
totale vaste operationele kosten	€ 358.431,97

6.2.4 Energiekosten

In tegenstelling tot bij de pyrolyse, komen er bij de activatie geen brandbare gassen vrij om het proces op gang te houden. Er is dus nog energie vereist om de activatie-oven te verwarmen. Voor de verwarming van biomassa is ongeveer 2,5 MJ/kg vereist om de temperatuur van 800°C te bereiken die nodig is voor activatie (Vanreppelen et al., 2011). Ook moet er water verwarmd worden voor de stoom die nodig is bij thermische activatie. De benodigde energie hiervoor bedraagt 5,5 MJ/kg. De totale behoefte aan energie is dus 8 MJ per kg char-input.

Voor de verwarming van oven en stoom is het efficiënter om te verwarmen met een andere brandstof dan elektriciteit. Aardgas is een efficiënte energiebron voor verwarming dus kiezen we deze brandstof. We vinden een eenheidsprijs voor de industrie in België voor het vierde kwartaal van 2007 van 25 eurocent/m³ (bron: Gasterra). De energie-inhoud van aardgas in België schommelt volgens de CREG tussen de 9,52 en 12,79 kWh per m³. Voor de berekening werken we bijgevolg met het gemiddelde van beide waarden, zijnde 11,16 kWh/m³ (bron: CREG). Aangezien uit deze brochure ook blijkt dat de aardgasprijs in het

laatste kwartaal van 2007 en in 2010 nagenoeg gelijk waren, voeren we hier geen indexering door.

Als we 8 MJ verwarmingsenergie nodig hebben per kg char, kunnen we dit omrekenen naar 8 GJ per ton char. Dit betekent dat we op jaarbasis $8 \text{ GJ} * 4823 \text{ ton char} = 38.586 \text{ GJ}$ verwarmingsenergie nodig hebben. Als we dit vervolgens omrekenen naar kWh krijgen we $38.586.000 \text{ MJ} / 3,6 = 10.718.204 \text{ kWh}$. Aangezien we uitgaan van een energie-inhoud van aardgas van $11,16 \text{ kWh/m}^3$, vinden we een jaarlijkse vraag naar aardgas van $10.718.204 \text{ kWh} / 11,16 \text{ kWh/m}^3 = 960.843 \text{ m}^3$. Met een industriële aardgasprijs van 25 eurocent per m^3 , bekomen we dan een jaarlijkse aardgaskost van € 240.211.

Verder is er elektriciteit nodig voor de overige processen van de bedrijfsvoering. Dit gaat ondermeer over verlichting, verwarming van de gebouwen, gebruik van computers en dergelijke. Voor een 1 ton/h installatie is er een verwacht verbruik van 160 kW. Als we dit herschalen naar een 0,69 ton/h installatie geeft dat ongeveer 110 kW. Als we dit vermogen vermenigvuldigen met de 7000 draaiuren krijgen we het jaarlijkse elektriciteitsverbruik van 771.710 kWh. Een kost van € 0,08 per kWh lijkt een redelijke schatting voor de elektriciteitskost in Vlaanderen (Vanreppelen et al., 2011). De totale elektriciteitskost bedraagt zo € 61.737 per jaar. De berekeningen van de totale energiekost zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 10: Berekening energiekosten fysische activatie

energiekosten	€ 301.948
VERWARMING	
oven (in MJ/kg char)	2,5
stoom (in MJ/ kg char)	5,5
energiebehoefte verwarming /jaar (MJ)	38.585.536
energiebehoefte verwarming/jaar (kWh)	10.718.204
gem. energie-inhoud aardgas (kWh/m ³)	11,16
benodigd aantal m ³ aardgas	960.843
prijs aardgas / m ³	0,25
totale aardgaskost	240.211
ELEKTRICITEIT	
energiebehoefte elektriciteit in kW	110
energiebehoefte elektriciteit/jaar (kWh)	771.711
kostprijs/kWh	0,08
totale elektriciteitskost	61.737

6.2.5 Koelwater

Verder is er nog de nood aan koelwater om de geproduceerde actieve kool af te koelen van 800°C tot 20°C. Indien men rekening houdt met een warmtecapaciteit van actieve kool die vergelijkbaar is met die van grafiet (709 kJ/t*°C), dan is er voor het koelwater 13,5 m³ water nodig per ton actieve kool (Vanreppelen et al., 2011). De jaarlijkse hoeveelheid water die nodig is, vinden we dus als volgt: 13,5 m³/ton * 4823,19 ton char = 65.113,09 m³ koelwater. Deze hoeveelheid water kan geteld worden aan een kost van €1,27/m³ voor industrieel proceswater (Peacocke, Bridgwater en Brammer, z.d.). De totale kost is dus 65.113,09 m³ * €1,27/m³ = €82.694.

Tabel 11: Kosten koelwater fysieke activatie

koelwater	€ 82.694
benodigde hoeveelheid (m ³)	65.113,092
kost/m ³ (€)	€ 1,27

6.2.6 Kosten voor de verwerking van uitgefilterde vliegassen

Door de grote vluchtigheid van de zware metalen kan men ervan uitgaan dat alle zware metalen volledig in de rook terecht komen waardoor deze deeltjes quasi allemaal in de gefilterde vliegassen zitten. Dit komt doordat er zeer strenge eisen gaan gesteld worden aan de installatie voor de rookgasreiniging. De concentratie van zware metalen in de vliegassen is hierdoor dus nog een heel stuk hoger dan in de pyrolysechar. Men kan ervan uitgaan dat per 1000 kg geactiveerde char er 20 kg vliegase ontstaat. Deze assen worden vervolgens bijna geheel gefilterd uit de rook. Aangezien de massa met een factor 50 daalt, zal de concentratie hierdoor met een factor 50 stijgen. Voor cadmium wil dit zeggen dat de concentratie in de gefilterde vliegassen bijgevolg 92 ppm * 50 = 4600 ppm bedraagt. De vliegassen die gevangen worden in de rookgasreiniger moeten bijgevolg met veel zorg behandeld worden. Dit kan door middel van solidificatie van het met zware metalen besmette residu. De prijs van verschillende solidificatiemethodes is echter niet bekend. We waarderen deze assen dus als afval en de kost daarvoor is €114/ton (OVAM). De totale kost komt dan neer op €10.996,88

Tabel 12: Verwerkingskosten scrubberresidu

zuiveringskosten	€ 10.996,88
scrubberresidu (ton)	96,46
kostprijs storten scrubberresidu per ton	€ 114

6.2.7 Diverse kosten

Verder is er een kost van € 2,5/kg voor stikstof die gebruikt wordt om de zuurstofvrije atmosfeer te creëren in de activatiereactor die nodig is voor de activatie. De benodigde hoeveelheid stikstof bedraagt 8 kg/ton char (Vanreppelen et al., 2011). Als eenheidskost voor stikstof kan volgens hetzelfde onderzoek gebruik gemaakt worden van € 2,5 per kg. De totale vraag naar stikstof bedraagt dus 38.585,54 kg per jaar. De kost die hier mee kan gerelateerd worden is dan € 96.464. De resultaten staan in volgende tabel.

Tabel 13: Kostenberekening stikstofgas voor fysieke activatie

stikstofgas	€ 96.464
#kg N/ton char	8
# kg N	38.585,54
kost /kg N	€ 2,50

Voor dit onderzoek wordt er abstractie gemaakt van grondstofkosten en transportkosten. De activatiereactor zou immers toegevoegd worden aan de pyrolyse-unit die gebruikt wordt om de biomassa te verwerken. Hierdoor is de char er ter plaatse beschikbaar. Een grondstofkost is er in principe wel, maar omdat het onderzoek gevoerd wordt met char die reeds ter plaatse beschikbaar is, nemen we deze niet mee op in het investeringsmodel. In een later stadium kan wel gekeken worden welke maximumprijs er kan betaald worden voor de char door deze kost bij op te nemen in het NCW-model.

Veel studies brengen ook een financiële kost in rekening voor de aflossing van een lening die wordt afgesloten om de investeringskosten te dekken. We doen dit echter niet omdat deze kost bij in de discontovoet zit. Zo kunnen we uit de Netto Contante Waarde intuïtief afleiden wat de huidige waarde is van de investering die we willen doen, na betaling van de intrest op de kapitaalkost.

Tabel 14: Overzicht operationele kosten fysieke activatie

Operationele kosten	€ 1.001.417,97
personeelskosten	€ 150.884,02
vaste operationele kosten	€ 358.431,97
energiekosten	€ 301.947,63
koelwater	€ 82.693,63
stikstof	€ 96.463,84
verwerkingskosten filterresidu	€ 10.996,88

6.3 Opbrengsten

De belangrijkste inkomstenbron is uiteraard de verkoopprijs die kan behaald worden voor de actieve kool. Deze verkoopprijs is echter sterk afhankelijk van de kwaliteit van het eindproduct. In de literatuur liggen cijfers vaak ook zeer ver uit elkaar. Belangrijke parameters die de verkoopprijs bepalen zijn vooral grondstof, activatie-methode, de specifieke oppervlakte en porositeit zoals reeds gesteld is in hoofdstuk 3.

Ondanks dat de verkoopprijzen sterk schommelen, kan wel gesteld worden dat de prijs van chemisch geactiveerde kool substantieel hoger ligt dan die van fysisch geactiveerde kool. Voor chemisch geactiveerde kool zijn verkoopprijzen te vinden van 2500 tot 15000 euro/ton. Voor fysisch geactiveerde kool moet men rekenen op 1000-8000 euro/ton (Vanreppelen et al., 2011) &

Hout geeft over het algemeen actieve kool van superieure kwaliteit ten opzichte van actieve kool uit afvalstoffen zoals bijvoorbeeld het geval is bij actieve kool uit gebruikte autobanden. Dit is een eerste zaak waar de actieve kool uit wilgenhout interessanter is dan actieve kool uit deze afvalstoffen. Uit vergelijkende studies blijkt echter dat zelfs tussen verschillende soorten biomassa de verschillen in kenmerken en eigenschappen zeer ver uit elkaar liggen. Het is dus zeer moeilijk om actieve kool te beoordelen, afkomstig van een type biomassa dat nog niet eerder geactiveerd is (Ioannidou et al., 2007) en (Cagnon, Py, Guillot, Stoekli & Chambat, 2009)

Gezien de grote marge in verkoopprijzen die in de literatuur terug te vinden zijn, is het noodzakelijk een zo goed mogelijke inschatting te kunnen maken van de verwachte kenmerken van de resulterende actieve kool. Het vermoeden bestaat dat de uiteindelijke verschillen reeds vanaf het begin van het proces afhankelijk zijn van de samenstelling van de biomassa die als grondstof gebruikt wordt. We beginnen het onderzoek bijgevolg met een

analyse van de samenstelling van wilgenhout en nadien wordt dan getracht deze samenstelling te linken aan bepaalde kenmerken van actieve kool.

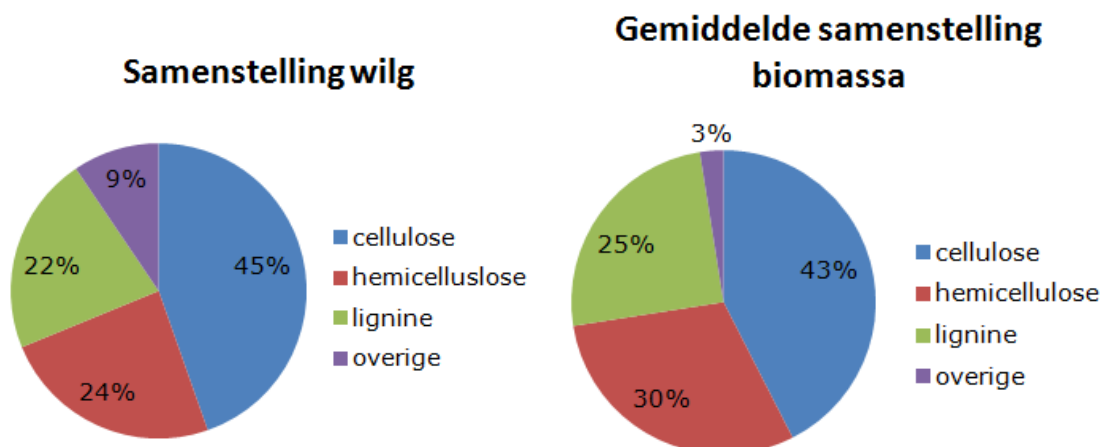
De structuur van biomassa bestaat uit drie hoofdcomponenten. Deze drie componenten zijn cellulose, hemicellulose en lignine en zijn allemaal polysachariden. Houtachtige plantentypes worden door hun trage groei en taaie structuur gekenmerkt door een hoger gehalte aan lignine. Grasachtigen en zachte plantendelen hebben daarentegen een lager gehalte aan taaie ligninevezels om de cellulose te binden. Aangezien de biomassamix die voor dit onderzoek zal gebruikt worden voornamelijk samengesteld is uit stammen en slechts voor een klein gedeelte uit bladeren verwachten we dat de mix een relatief hoog percentage lignine bevat. De gemiddelde samenstelling van biomassa is als volgt verdeeld: 40-45% cellulose, 30% hemicellulose en 25% lignine (Vasilev, Baxter, Andersen, Vassileva en Morgan, 2012)

Onderzoek naar de verdeling van de drie genoemde componenten geeft ons een beeld van wat de exacte samenstelling is van wilgenhout. Vanaf dan splitst het onderzoek zich deels op. Enerzijds kan onderzocht worden welke invloed de percentages cellulose, hemicellulose en lignine hebben op de eigenschappen van actieve kool. Vervolgens kan dan een schatting gemaakt worden van de verwachte specificaties van actieve kool uit wilgenhout. Anderzijds kan aan de hand van de specifieke samenstelling van wilgenhout een tegenhanger gezocht worden die zeer gelijkend is qua samenstelling en waar reeds activatiereacties op toegepast zijn. Uit de literatuur kunnen dan de eigenschappen van deze actieve kool doorgetrokken worden naar actieve kool uit wilg.

Uit onderzoek van Stolarski, Szczukowski, Tworkowski, Wróblewska en Krzyżaniak, 2011 blijkt dat de samenstelling voor deze 3 componenten van wilgenhout bij een rotatiesysteem van 3 jaar de volgende is: 44,61% cellulose, 21,77% lignine en 24,17% hemicellulose.

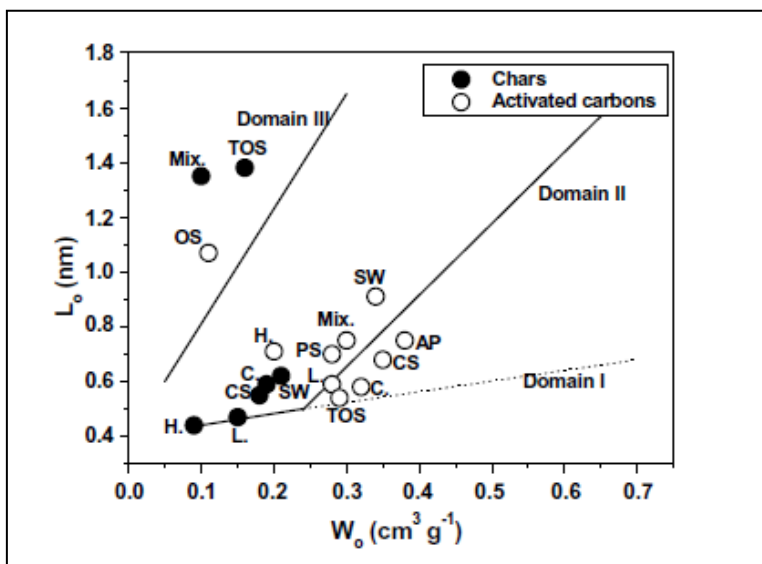
Uit een vergelijking met andere soorten biomassa voor actieve kool productie, leiden we af dat het wilgenhout een relatief hoog gehalte heeft aan cellulose, een gemiddeld gehalte aan lignine en een laag gehalte aan hemicellulose (Cagnon et al., 2009). Dit zien we ook als we de samenstelling van wilg vergelijken met de gemiddelde samenstelling van biomassa. Beide samenstellingen zijn hieronder weergegeven in taartdiagrammen.

Figuur 1: Vergelijking samenstelling gemiddelde biomassa tegenover wilg



Als we met deze biologische samenstelling naar de grafiek kijken die uit de studie voortkomt, zien we de mate waarin cellulose, hemicellulose en lignine bijdragen aan de porositeit van de actieve kool. Zoals eerder vermeld is deze porositeit een belangrijk kenmerk van actieve kool. Op de horizontale as staat het porievolume van de actieve kool in cm^3/gram . Op de verticale as vinden we de gemiddelde poriegrootte terug in nm.

Figuur 2: Verband tussen samenstelling biomassa en poriestructuur



Bron: Cagnon et al., 2009

Cellulose is in deze grafiek voorgesteld als "C", hemicellulose als "H" en lignine als "L". We kijken naar de 3 witte bollen bij deze 3 letters om de waarden voor de actieve kool te kunnen

aflezen. Als we dan vooral rekening houden met C, matig rekening houden met L en weinig met H, kunnen we concluderen dat we ongeveer rechtsboven van "C" uitkomen. Hiervoor gaan we eerst rechts van C door de lijn tussen oorsprong en C te verlengen. Vervolgens corrigeren we naar links voor het gehalte aan lignine en gaan we lichtjes naar boven voor het lage gehalte aan hemicellulose. Hieruit kunnen we afleiden dat we de actieve kool uit wilg, qua eigenschappen kunnen vergelijken met actieve kool uit kokosnootschaal (CS) en appelpulp (AP) (Cagnon et al., 2009).

De assumptie dat we actieve kool uit wilg kunnen vergelijken met actieve kool uit kokosnootschaal is belangrijk. Deze kokosnootschil is namelijk een veel gebruikte grondstof bij de productie van commerciële actieve kool (Ioannidou & Zabaniotou., 2007). Dit zou betekenen dat de eigenschappen van de actieve kool die we zouden gaan produceren uit de pyrolysechar van zeer behoorlijke kwaliteit zijn en verkocht kunnen worden aan een prijs die gelijklopend is met de gangbare marktwaarde van commerciële fysisch geactiveerde kool van om en bij de €2000 per ton. Enige voorzichtigheid is echter wel geboden aangezien het hier enkel gaat over de porositeit van de actieve kool.

De specifieke oppervlakte, die eveneens van belang is, werd in het onderzoek van Cagnon et al., (2009) immers niet behandeld. Voor de productie van commerciële actieve kool uit houtachtigen vinden we in de literatuur 800 m²/g actieve kool als vereiste specifieke oppervlakte om commercieel interessant te zijn (Stavropoulos & Zabaniotou, 2009). Als we de vergelijking tussen de actieve kool uit wilg en kokosnootschil kunnen doortrekken kunnen we verwachten dat de kwaliteit van de actieve kool uit wilg, in de buurt zit van de kwaliteit van actieve kool uit kokosnootschil. Er is echter geen aanwijzing dat deze vergelijking van porositeit van actieve kool mag worden doorgetrokken naar de specifieke oppervlakte.

Om de hypothese dat de eigenschappen toch mogen worden doorgetrokken naar deze oppervlakte te testen gaan we deze theoretische cijfers vergelijken met een experimentele laboproef uitgevoerd door Mark Stals. Aangezien dit de enige proef is in zijn soort leek het voor het onderzoek onvoldoende om enkel op deze cijfers te vertrouwen. Indien deze cijfers echter de theoretische porositeit en specifieke oppervlakte die net afgeleid zijn, bevestigen, kan met wat meer zekerheid een verwachte verkoopprijs bepaald worden.

De activatie die op laboschaal is uitgevoerd vertrok voor deze studie van pyrolysechar, geproduceerd door de pyrolyse van een realistische biomassamix van wilg, die gedurende drie jaar gecultiveerd is op een proefveld dat sterk vervuild is met zware metalen. De fysische activatie werd uitgevoerd bij een aantal temperaturen. Bij een activatie-temperatuur van 800°C geeft het onderzoek volgende resultaten.

Het totale volume aan poriën is $0,464 \text{ cm}^3/\text{gram}$. Voor de microporiën bekomt men $0,314 \text{ cm}^3/\text{gram}$. De relatieve verhouding van microporiën ten opzichte van het totale volume aan poriën is bijgevolg $0,67$. Aangezien het overige volume aan poriën voornamelijk de mesoporiën omvat kunnen we stellen dat het gehalte aan mesoporiën ongeveer 30% is. De modus van de poriegroottes werd berekend als zijnde $0,6 \text{ nm}$. De algemene conclusie van het onderzoek naar de poriegroottes en volumes is dat de actieve kool uit pyrolysechar van wilg na fysische activatie, zeer gelijkaardig is qua kenmerken aan commerciële actieve kool uit fysische activatie.

We toetsen deze bevindingen aan de analyse van de grafiek van Cagnon et al., (2009). Voor het duo appelpulp en kokoschil blijkt dat de gemiddelde poriegrootte ongeveer $0,7 \text{ nm}$ bedraagt. Dit is slechts een klein verschil met de experimentele waarde van $0,6 \text{ nm}$ die gevonden wordt voor actieve kool uit wilg.

In verband met het totale volume aan poriën, kunnen we concluderen dat het experimenteel gevonden volume iets groter is dan deze van appelpulp en kokoschil. Voor wilg wordt een waarde gevonden van $0,46 \text{ cm}^3/\text{gram}$ terwijl er voor appel en kokos een iets lagere waarde gevonden wordt in de grafiek van zo'n $0,35$ à $0,4 \text{ cm}^3/\text{gram}$. We kunnen dus concluderen dat de poriegroottes ongeveer gelijk zijn aan deze uit kokoschil en appelpulp, terwijl het volume aan poriën iets groter is. De kwaliteit van deze actieve kool doet bijgevolg zeker niet onder voor commerciële actieve kool.

Gezien de vrij gelijklopende kenmerken van actieve kool op gebied van poriestructuur, gaan we er met enige voorzichtigheid vanuit dat ook de resultaten voor de specifieke oppervlakte uit de experimenten van Mark Stals kunnen worden doorgetrokken. Deze experimentele waarde is $794 \text{ m}^2/\text{gram}$ actieve kool. Aangezien uit de literatuur blijkt dat commerciële actieve kool gemiddeld 800 m^2 heeft, kunnen we stellen dat deze actieve kool op vlak van kwaliteit over de ganse lijn niet hoeft onder te doen voor commercieel geproduceerde actieve kool.

Uit diverse onderzoeken blijkt dat de gangbare verkoopprijs voor actieve kool om en bij de $2000 \text{ euro per ton}$ bedraagt (Stavropoulos & Zabaniotou, 2009) & (Ioannidou et al., 2007) Aangezien de zware metalen volledig vervlogen zijn tijdens de activatie en onder de assumptie dat de kwaliteit van de actieve kool uit wilg die van de commerciële actieve kooltypes kan evenaren, kunnen we met enige zekerheid stellen dat $2000 \text{ euro per ton}$ een realistische verkoopprijs is. Het is zeer belangrijk voor het investeringsmodel dat een vrij solide verkoopprijs kan voorspeld worden. Deze parameter is gezien zijn grote range van mogelijke bedragen uit de literatuur immers een zeer invloedrijke factor om over de investering te kunnen oordelen. Deze beoordeling volgt in het volgende hoofdstuk, samen met een sensitiviteitsanalyse.

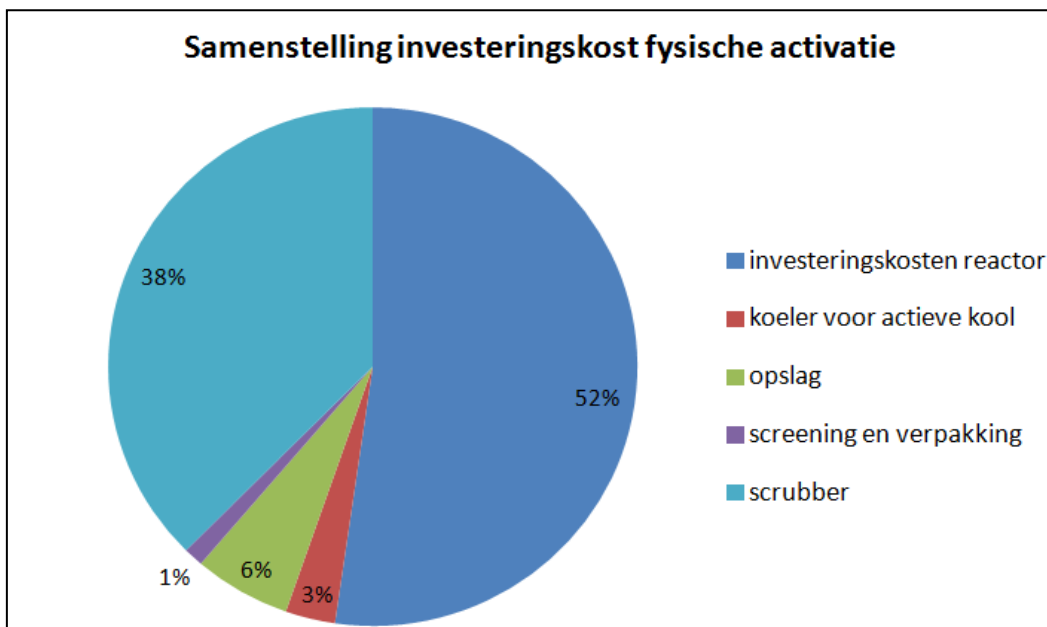
6.4 Analyse van het investeringsmodel voor fysische activatie

De kosten- en opbrengstengegevens die gevonden zijn in paragrafen 6.2 en 6.3 zeggen op zich relatief weinig. Door deze kosten en opbrengsten weer te geven in een kasstromentabel krijgt men een duidelijk beeld over de gemaakte kosten en de verwachte opbrengsten. In hoofdstuk vier werd ook reeds het belang aangehaald van de tijds waarde van het geld. Op basis van een kasstromentabel gaan we daarom de verdisconteerde kasstromen berekenen. In laatste instantie moet dan blijken of de som van deze verdisconteerde kasstromen voldoende hoog is om de initiële investeringskosten te dekken. We gaan dus eerst een kasstromentabel opstellen om deze vervolgens uit te breiden met verdisconteerde kasstromen zodat de Netto Contante Waarde kan berekend worden.

6.4.1 Kasstromentabel

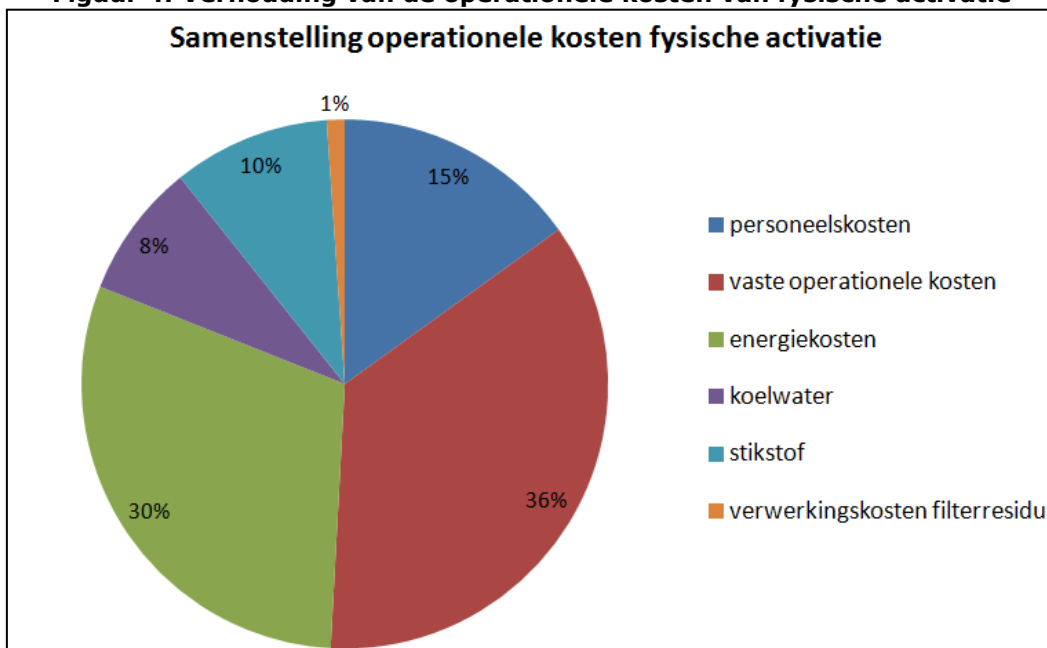
De kasstromentabel voor een investering bestaat gewoonlijk uit drie datacomponenten: investeringskosten, operationele kosten en operationele opbrengsten. De investeringskosten gebruiken we dan als enige kost in jaar 0. Vanaf jaar één tot en met jaar 20, brengen we dan de operationele kosten en opbrengsten in rekening. Deze kosten en opbrengsten zijn in elk van deze 20 jaren even groot aangezien we elk jaar evenveel produceren. Hieronder worden grafisch de samenstelling van respectievelijk de investeringskosten en de operationele kosten weergegeven.

Figuur 3: Verhouding componenten investeringskost fysische activatie



Uit voorgaande grafiek is het duidelijk dat de reactor en de scrubber het grootste aandeel hebben in de totale investeringskosten. 90% van deze kost bestaat immers uit deze twee kostencomponenten. De overige 10% van de investering is nog voor iets meer dan de helft voor opslag en in mindere mate voor de koeler voor actieve kool en een screenings- en verpakkingsinstallatie. We hernemen ook nog even uit paragraaf 6.1 dat het totale bedrag van de initiële investering € 5.120.457 bedraagt.

Figuur 4: Verhouding van de operationele kosten van fysieke activatie



Uit de grafiek kan men afleiden dat de vaste operationele kosten en de energiekosten, de twee grootste posten zijn binnen de operationele kosten. Samen zijn zij goed voor tweederde van de operationele kosten. Het overige derde deel van de grafiek bestaat voor bijna de helft uit personeelskosten. Stikstof, koelwater en slechts in kleine mate verwerkingskosten van het filterresidu vormen de andere helft van dit restgedeelte operationele kosten. Het totaalbedrag van deze operationele kosten is € 1.656.929.

De operationele opbrengsten worden niet weergegeven in een grafiek omdat deze slechts uit één component bestaan, de opbrengsten uit de verkoop van actieve kool. De geschatte opbrengsten voor de verkoop zijn € 4.823.192 per jaar. De kasstromentabel van jaar nul tot jaar drie is hier weergegeven. De kosten en opbrengsten blijven op dezelfde manier doorlopen tot en met jaar 20.

Tabel 15: Kasstromentabel fysische activatie

kasstromentabel	jaar 0	jaar 1	jaar 2	jaar 3
<u>opbrengsten</u>		€ 4.823.192	€ 4.823.192	€ 4.823.192
investeringskosten reactor	€ 3.198.722			
investeringskosten scrubber	€ 1.921.735			
personeelskosten		€ 150.884,02	€ 150.884,02	€ 150.884,02
vaste operationele kosten		€ 358.431,97	€ 358.431,97	€ 358.431,97
energiekosten		€ 301.947,63	€ 301.947,63	€ 301.947,63
koelwater		€ 82.693,63	€ 82.693,63	€ 82.693,63
stikstof		€ 96.463,84	€ 96.463,84	€ 96.463,84
Verwerking filterresidu		€ 10.996,88	€ 10.996,88	€ 10.996,88
<u>TOT kosten</u>	€ 5.120.457	€ 1.001.418	€ 1.001.418	€ 1.001.418

We hernemen nu de formule voor de Netto Contante Waarde

$$\sum_{1-20}^n [(1 - t) * (O - K) + [t * (I_0 / 20)] * a_n] - I_0$$

We hebben hiervoor reeds de operationele kasstromen O en K berekend. Ook I_0 is inmiddels gekend. Nu hebben we enkel de belastingsvoet voor vennootschapsbelasting t nodig om voor elk jaar de toekomstige kasstroom te berekenen. De Belgische vennootschapsbelasting werd besproken in paragraaf 4.2 en bedraagt 33,99%. Als we deze gegevens dan invullen in de formule ontbreekt enkel nog de actualisatievoet a_n die nodig is om de toekomstige kasstromen om te zetten naar huidige kasstromen door middel van de discontovoet r. De actualisatieparameter a_n kan dan geschreven worden als $\frac{1}{(1+r)^n}$ met n het jaar van één tot 20 waarvoor men de toekomstige kasstroom wenst te actualiseren. Aan de hand van deze gegevens kan een uitgebreide kasstromentabel opgesteld worden waaruit de Netto Contante Waarde kan worden berekend. Deze tabel is hieronder weergegeven.

Tabel 16: Berekening NCW fysische activatie

ZONDER grondstofkost	jaar 0	jaar 1	jaar 2	jaar 3
opbrengsten		€ 4.823.192	€ 4.823.192	€ 4.823.192
investeringskosten installatie	€ 3.198.722			
investeringskosten scrubber	€ 1.921.735			
personeelskosten		€ 150.884	€ 150.884	€ 150.884
vaste operationele kosten		€ 358.432	€ 358.432	€ 358.432
energiekosten		€ 301.948	€ 301.948	€ 301.948
koelwater		€ 82.694	€ 82.694	€ 82.694
stikstof		€ 96.464	€ 96.464	€ 96.464
onderhoudskosten gasreiniging		€ 10.997	€ 10.997	€ 10.997
TOT kosten		€ 1.001.418	€ 1.001.418	€ 1.001.418
Future Cashflow $[(1-t)*(O-K) + (t*Afschrijving)]$	€ -5.120.457	€ 3.821.774	€ 3.821.774	€ 2.577.115
present cashflow (Future cashflow * a_n)	€ -5.120.457	€ 3.506.215	€ 3.216.711	€ 1.990.006
<i>discontovoet</i>		9%		
gecumuleerde cashflows	€ -5.120.457	€ -1.614.242	€ 1.602.469	€ 3.592.475
NCW	€ 20.594.351			

We zien nu voor het basisjaar en de drie eerste operationele jaren de future en present cashflows die afgeleid worden uit de kasstromen die we in de vorige tabel reeds berekend hadden. In de voorlaatste rij vindt u dan de gecumuleerde huidige cashflows in het rood wanneer deze negatief zijn en in het zwart wanneer deze positief zijn. Wat opvalt is dat de future cashflow plots daalt in jaar drie. Dit komt omdat er vanaf dat jaar geen overgedragen verlies meer is en er dus een winstbelasting moet betaald worden. Dit was niet nodig voor de jaren voordien omdat bedrijven pas onderhevig zijn aan vennootschapsbelasting wanneer het overgedragen verlies is weggewerkt (Vademecum voor de ondernemer, FOD Economie)

In de laatste rij tenslotte, vindt u de gecumuleerde cashflow van jaar 20. Dit is de uiteindelijke Netto Contante Waarde. Een pyrolyseplant die reeds operationeel is en op dit moment zijn pyrolysechar nog niet nuttig aanwendt, kan bijgevolg rekenen op een positieve investeringsreturn van € 20.594.351, uitgedrukt in euro's van vandaag, indien dit bedrijf zou

investeren in een installatie voor fysieke activatie van de pyrolysechar. De tabellen die de berekening tonen tot en met jaar 20 kunt u vinden in bijlage 1.

7 Warmtekrachtkoppeling (WKK)

Nu we hebben becijferd dat fysisch activeren van pyrolysechar een sterk positieve Netto Contante Waarde heeft, opent dit nieuwe perspectieven voor het pyrolyseproces op zich. Door de activatie zou het kunnen dat de char nu plots meer waard is dan de bio-olie. Het lijkt bijgevolg interessant om te gaan kijken welk effect veranderende pyrolyserendementen hebben op de rendabiliteit van het totale pyrolyseproces. Het is immers mogelijk dat pyrolyse op relatief hoge temperatuur om hoge olierendementen te verkrijgen niet meer de beste oplossing is nu er een alternatief is om de char ook op een nuttige en waardevolle manier te verwerken. In plaats daarvan, kan pyrolyse op lage temperatuur, met hogere charrendementen als gevolg, uiteindelijk beter zijn dan de tot nog toe aangenomen fast-pyrolyse op 450°C (Yoder, Galinato, Granatstein en Garcia-Pérez, 2011). In dit hoofdstuk gaan we een economische analyse uitvoeren ter verwerking van de bio-olie. Deze gegevens integreren we uiteindelijk in een globaal economisch model waarin de verwerking van bio-olie en pyrolysechar gecombineerd worden.

Om de totale opbrengst van de pyrolyseproducten te kunnen bepalen gaan we buiten de verwerking van de char ook kijken naar toepassingen voor de bio-olie. Deze olie is zonder extra behandeling vooral geschikt voor stationaire toepassingen, daarom focussen we ons voor dit onderzoek op gebruik van deze olie in warmtekrachtkoppelinginstallaties (Bridgwater et al., 2002). De reden dat voor dit soort installatie gekozen wordt is het hoge rendement dat kan gehaald worden voor de combinatie van elektriciteitsopwekking en simultane warmteopwekking. Zo kan de hoogste potentiële waarde gecreëerd worden uit een bepaalde hoeveelheid bio-olie (Venderbosch & Prins, 2010).

Als we beide uitgangproducten van pyrolyse kunnen waarderen, kunnen we bekijken hoe we de rendementen van respectievelijk char en bio-olie het beste sturen om een zo hoog mogelijke NCW te bekomen. Een economische analyse van actieve kool is reeds uitgevoerd in het vorige hoofdstuk, vandaar dat in dit hoofdstuk verwerking van pyrolyse-olie behandeld wordt in een WKK-installatie. Nadien kunnen beide processen geïntegreerd worden in één investeringsmodel om een volledige waardering uit te voeren van de pyrolyseproducten en een vergelijking te maken met chemische activatie.

7.1 Wat is warmtekrachtkoppeling

Vooralleer de economische analyse van een warmtekrachtkoppelinginstallatie uit te voeren volgt eerst een korte bespreking

7.1.1 Energie

Energie is het vermogen om arbeid te kunnen leveren en wordt uitgedrukt in de SI-eenheid Joule (J). Energie is alom tegenwoordig op aarde en zonder deze energie is er uiteraard ook geen leven mogelijk. Energie komt echter in verschillende vormen voor. Warmte, beweging en elektrische energie zijn enkele van de meest voorkomende soorten. Deze soorten zijn echter verschillend op het vlak van praktisch nut. Onder dit praktisch nut worden bijvoorbeeld, de transportmogelijkheden, mogelijkheid tot opslag en mogelijkheid tot conversie verstaan. Hierdoor kunnen we energiesoorten kwalificeren aan de hand van hun praktisch nut voor bepaalde toepassingen. Zo is onder meer bepaald dat warmte energie een lagere kwaliteit heeft dan elektrisch energie omdat elektrische energie makkelijker te verplaatsen is en op te slaan, terwijl van thermische energie of warmte, veel energie verloren gaat bij de omzetting van warmte naar een andere energievorm. Elektriciteit is dus een kwalitatievere energie dan warmte (Cogen Vlaanderen, 2006).

We zijn doorheen de tijd ook meer en meer afhankelijk geworden van externe energie, dus buiten de arbeid die we zelf kunnen leveren aan de hand van het voedsel dat we consumeren. Hierdoor is er een snelle stijging van productiviteit, leefcomfort en het welvaartsniveau gecreëerd met onder meer een groot energieverbruik voor transport, verwarming en productiemachines tot gevolg. Hierdoor zijn we sterk afhankelijk geworden van deze externe energiebronnen. We moeten de beschikbare energie dus proberen zo efficiënt mogelijk in te zetten.

7.1.2 Traditionele energie-opwekking

Twee soorten energie zijn binnenshuis zeer belangrijk. Enerzijds elektrische energie voor verlichting en de werking van machines en anderzijds thermische energie voor verwarming. Traditioneel worden deze beide energievormen gescheiden opgewekt. Elektriciteit wordt centraal geproduceerd in grote elektriciteitscentrales, terwijl warmte meestal lokaal in elk gebouw apart opgewekt wordt in een verwarmingsketel. De reden hiervoor is voor de hand liggend en koppelt weer terug naar het gemak van elektriciteitstransport enerzijds en het onvermogen van warmtetransport anderzijds. De opwekking van elektriciteit bijvoorbeeld, gaat gepaard met een relatief laag rendement van om en bij de 40% terwijl een groot gedeelte warmte-energie verloren gaat in onder meer de koeltorens van een elektriciteitscentrale. Warmterecuperatie in die grote installaties is echter niet interessant aangezien warmte zich zeer moeilijk laat transporteren.

7.1.3 Definitie WKK

Als we dan toch warmterecuperatie willen koppelen aan elektriciteitsproductie moet er dus een omschakeling gemaakt worden van centrale productie naar lokale productie zodat de warmte kan herwonnen worden en ter plaatse terug nuttig ingezet voor verwarming van een gebouw of water. We zien dat deze trendverschuiving zich stilaan begint door te zetten door inspanningen van de overheid om gekoppelde opwekking van warmte en elektriciteit te promoten (Cogen Vlaanderen, 2006).

Warmtekrachtkoppeling is de meest voorkomende vorm van simultane energie-opwekking en duidt eigenlijk op de combinatie van warmte en mechanische energie. Omdat deze mechanische energie echter niet erg kwalitatief is in stationaire toepassing gaat men deze meestal via een dynamo omzetten in elektrische energie. Zo komt het dat de meeste van deze installaties een gezamenlijke opwekking hebben van warmte en elektrische energie. Het rendement van deze installaties loopt dan op tot 80 à 90 %. Dit is een verdubbeling van de energetische efficiëntie ten opzichte van de 40% rendement voor enkel energieproductie op grote schaal. De nuttig gebruikte energie stijgt dus zeer sterk door deze gekoppelde opwekking (Cogen Vlaanderen, 2006)

7.2 Pyrolyseolie en WKK

Als gevolg van het hoge rendement dat kan gehaald worden door de gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit, bekijken we deze optie om de pyrolyse-olie zo hoog mogelijk te waarderen. Een hoge energetische efficiëntie duidt namelijk niet enkel op lage energieverliezen maar ook op lagere economische verliezen. De economische analyse van de olie zal op vrijwel dezelfde manier gebeuren als bij de actieve kool. Dit wil concreet zeggen dat we een investeringsmodel opstellen aan de hand van de Netto Contante Waardemethode. Op basis van het gecreëerde model kan dan aan de hand van de jaarlijkse kasstromen bepaald worden wat de waarde is van pyrolyseolie. We zullen dus in het vervolg van dit hoofdstuk gaan bepalen wat de verwachte grootteorde is van de drie hoofdstromen in deze kasstromentabel. Investeringskosten, operationele kosten en operationele opbrengsten.

7.3 Geschikte installatie formuleren

Vooralleer we de kosten en opbrengsten voor deze installatie kunnen formuleren moet er nagegaan worden wat de optimale schaalgrootte is van de installatie. Een optimale schaling is immers van primordiaal belang voor zowel energetische als economische efficiëntie. De schaalgrootte van de installatie hangt eigenlijk ook maar af van één enkele factor en dat is de energetische input per jaar. We moeten dus berekenen wat de verwachte energie is die jaarlijks in de aangevoerde pyrolyseolie aanwezig is. Een optimale schaling zorgt ervoor dat

de installatie continu kan draaien en tegelijkertijd ook al de aangevoerde bio-olie kan verwerken binnen de voorziene tijdspanne.

7.3.1 Van totale energie-inhoud naar elektrisch vermogen

Men karakteriseert een WKK-installatie typisch door het elektrisch vermogen dat deze levert. Dit is het elektrisch vermogen dat de installatie levert, los van de hoeveelheid warmte die er simultaan geproduceerd wordt. Om dit elektrisch vermogen te berekenen hebben we het rendement van de elektriciteitsproductie nodig voor die specifieke installatie en de totale hoeveelheid energie die in de jaarlijks aangevoerde bio-olie zit. Door de aangevoerde energie te vermenigvuldigen met het elektrisch rendement van de installatie weten we hoeveel elektrische energie er jaarlijks geproduceerd wordt. Vermogen is echter niet de totale hoeveelheid energie die geproduceerd wordt maar de hoeveelheid die geproduceerd wordt per tijdseenheid. In SI eenheden is dit de energiehoeveelheid in Joule gedeeld door de tijdsaanheid in seconden. Zo komt men het vermogen in Watt, waar één Watt gelijk is aan 1 Joule per seconde.

7.3.2 Energie-inhoud van de bio-olie

Als we uitgaan van het tweede oogstscenario, waarbij hout en bladeren elke 3 jaar worden geoogst, dan kunnen we stellen dat er jaarlijks 20.970,4 ton biomassa beschikbaar is. Dit komt overeen met een input van 3 ton biomassa per uur op basis van een installatie die gedurende 7000 uren per jaar actief is. Vervolgens kan hieruit de totale energie-inhoud van deze biomassastroom berekend worden. Voor de berekening maken we gebruik van de Higher Heating Value van het wilgenhout en de bladeren. De HHV van de bladeren is gelijk aan 19,3 GJ/ton. Die van het hout bedraagt daarentegen 17,5 GJ/ton. Als we dan het gewogen gemiddelde nemen van deze verbrandingswaardes bekommen we $\frac{(19,3*8)+(17,5*8)}{8,8} = 17,66$ GJ/ton. De totale energie-inhoud van de jaarlijkse biomassastroom is bijgevolg $20.970,4 \text{ ton} * 17,66 \text{ GJ/ton} = 370.337 \text{ GJ}$ of 370,3 TJ (Stals, 2010).

Vanaf dit punt hangt de verdere berekening af van de configuratie van het pyrolyseproces. Door wijziging van de temperatuur en de reactietijd, wijzigt de verhouding van de drie eindproducten van pyrolyse. We focussen ons voor de activatie en de WKK op de verhouding van respectievelijk de pyrolyseolie en de pyrolysechar. Zo daalt bijvoorbeeld de hoeveelheid geproduceerde char bij stijging van de temperatuur. Bij lage temperaturen zal de olieproductie daarentegen stijgen, bij stijgende temperatuur. Het uiteindelijke doel van de analyse is dat er een trade-off kan gemaakt worden tussen de waarde van bio-olie en char. Op deze manier wordt de pyrolyse afgestemd op de collectieve maximale opbrengst van de beide eindproducten (Yoder, Galinato, Granatstein en Garcia-Pérez, 2011).

We werken eerst het voorbeeld uit dat aansluit bij de pyrolyse op 450°C met de actieve kool productie die we uitgewerkt hebben in de vorige hoofdstukken. Bij deze pyrolyseconfiguratie met een rendement van 23% char, noteren we een rendement van 52% voor de bio-olie (Stals et al., 2010). Aan de hand van dit rendement kunnen we nu berekenen hoeveel energie er jaarlijks door de bio-olie kan aangevoerd worden.

Een massarendement van 52% olie geeft een totale jaarlijkse beschikbaarheid aan bio-olie van $0,52 * 20.970,4 = 10.904,6$ ton. Over de energie-inhoud van deze pyrolyseolie bestaat wel enige discussie in de literatuur. We vinden namelijk drie verschillende waarden of ranges van waarden die de HHV van pyrolyseolie moet weergeven. De laagste waarde is 15 GJ/ton (Voets, Kuppens, Cornelissen en Thewys., 2011). Daarop volgend is er een range van 16-19 GJ/ton (Bridgwater, 2003). De laatste range is specifiek voor bio-olie uit pyrolyse van gecontamineerd wilgenhout en bedraagt 23-27 GJ/ton (Lievens, Carleer, Cornelissen en Yperman., 2009). Voor deze laatste studie moeten we echter oppassen omdat dit gegevens voor watervrije bio-olie. Omdat moeilijk in te schatten is hoe hoog de HHV van de pyrolyse-olie is zonder onttrekking van de waterfractie verkiezen we deze range te negeren. We nemen bijgevolg voor de berekening van een gemiddelde verbrandingswaarde als eerste getal de 15 GJ/ton (Voets et al., 2011) en als tweede waarde de range 16-19 GJ/ton (Bridgwater, 2003) waar we vervolgens als gemiddelde 17,5 GJ/ton vinden. Het gemiddelde van beide is dus $\frac{15+17,5}{2} = 16,25$ GJ/ton. De totale jaarlijkse input aan energie bedraagt dan $10.904,6 \text{ ton} * 16,25 \text{ GJ/ton} = 177.200 \text{ GJ}$ of 177,2 TJ.

Tabel 17: Berekening energetische waarde van pyrolyseolie

Berekening energie-inhoud pyrolyseolie	
# ton biomassa/jaar	20970,4
# ton biomassa/h	3,00
HHV/ton (GJ)	17,66
totale energie-inhoud (TJ)	370,3
rendement olie (%)	52
# ton olie/jaar	10904,6
HHV pyrolyseolie (GJ/ton)	16,25
totale energie-inhoud olie (TJ)	177,200

7.3.3 Berekening van het elektrisch vermogen

De totale energie die jaarlijks in de WKK installatie kan gebracht worden is nu bekend. De volgende stap bestaat erin het elektrisch rendement en daarop volgend, het elektrisch vermogen van de WKK installatie te berekenen. Hiervoor kunnen we beroep doen op een excelbestand van Stroobandt, (2007) dat voor enkele elektrische vermogens het bijhorende elektrisch rendement geeft. Aan de hand van dit rendement en vermogen kunnen we voor elk van de 24 gegevens de totale jaarlijkse vraag naar energie uit bio-olie berekenen. Dit doen we door het vermogen te vermenigvuldigen met 3600 seconden in een uur en 7000 operationele uren per jaar. Als we deze totale energie dan delen door de HHV van de pyrolyseolie en vervolgens delen door de jaarlijkse input aan biomassa, bekomen we het minimaal vereiste rendement aan bio-olie uit het pyrolyseproces.

Als deze berekening uitgevoerd is voor elk van de 24 entries in de dataset kunnen we voor elk van de olierendementen het bijhorende elektrisch rendement en elektrisch vermogen berekenen. We kunnen deze waardes echter enkel berekenen voor de 24 gegevens omdat er geen formele relatie bestaat tussen het olierendement, het elektrisch vermogen en het elektrisch rendement.

Omdat we willen dat het model aanpasbaar is op een continue schaal voor een grote range van olierendementen en niet enkel voor de waardes gegeven in de tabel, proberen we een functie op te stellen die het verband weergeeft tussen het rendement van olie in de pyrolysestap en het elektrisch rendement. We kiezen voor deze exacte waarde omdat we verwachten dat een kleine afwijking in het rendement voor grote verschillen kan zorgen aan het einde van de berekeningen wanneer we jaartotalen berekenen. Voor de constructie van een dergelijke functie baseren we ons op een regressieanalyse op de gegevens die voortkomen uit de tabel van Stroobandt, (2007). Voor dit onderzoek is de originele tabel lichtjes gewijzigd om de regressieanalyse te kunnen uitvoeren. Enerzijds zijn de kolommen die irrelevant waren voor de kostenberekening weggelaten in de nieuwe tabel. Anderzijds zijn er twee kolommen toegevoegd die cruciaal zijn voor dit onderzoek. Deze variabelen zijn het olierendement en de jaarlijkse energie-input uit pyrolyseolie en de gegevens in de tabel zijn de waardes die deze twee parameters aannemen voor al de berekende schaalgroottes van de installaties uit de 24 entries. Deze tabel is toegevoegd in bijlage 2

De regressies worden uitgevoerd met SPSS waar gekozen wordt voor de optie 'curve estimation' om een geschikte regressie te vinden die de data zo goed mogelijk fit. Onder 'zo goed mogelijke fit' verstaan we een R^2 die zeer dicht bij 1 ligt. Indien we geen goede fit bekomen is er geen meerwaarde om de data om te zetten in een functie, aangezien de foutenmarge dan te groot zou worden.

Omdat we bij de sensitiviteitsanalyse gaan bekijken hoe de kosten en opbrengsten gaan wijzigen bij een verandering van het bio-olierendement, nemen we dit rendement als de onafhankelijke variabele in de regressies. De diverse kosten zijn dan steeds de afhankelijke variabelen, zodat we deze kosten allemaal kunnen uitdrukken in functie van het pyrolyserendement van de bio-olie. Het Excel-model wordt daarom opgebouwd rondom dit percentage.

De eerste regressie zal dus gebruikt worden om een formule te vinden die ons in staat stelt het elektrisch rendement op een continue wijze te schatten. De onafhankelijke variabele is, zoals reeds vermeld, het rendement van olie in het pyrolyseproces omdat we dit rendement ten allen tijde zelf in de hand hebben via manipulatie van de pyrolysetemperatuur. De afhankelijke variabele is bijgevolg het elektrisch rendement, zodat dit rendement steeds geldt voor een installatie die aangepast is aan de invoer die we verwachten uit de pyrolyse gegeven het olierendement dat bij die temperatuur wordt behaald. De resultaten van de regressie zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 18: Regressieresultaten elektrisch rendement in functie van het olierendement van pyrolyse

Equation	Model Summary					Parameter Estimates			
	R Square	F	df1	df2	Sig.	Constant	b1	b2	b3
Linear	,645	40,031	1	22	,000	34,464	,168		
Logarithmic	1,000	1255398,434	1	22	,000	32,615	2,459		
Quadratic	,832	52,013	2	21	,000	32,368	,459	-,005	
Cubic	,916	72,734	3	20	,000	30,995	,848	-,021	,000
Power	,996	5278,444	1	22	,000	32,410	,069		
Exponential	,593	32,119	1	22	,000	34,287	,005		

The independent variable is olierendement.

Uit de regressieanalyse blijkt dat de logaritmische benadering de beste fit geeft voor de gegeven datareeks. Met een R^2 -waarde van 1 is deze regressie duidelijk de best mogelijke om het elektrisch rendement te schatten. Als we de regressie dan toepassen op de case met een pyrolyseolierendement van 52% geeft dit een elektrisch rendement van $32,615 + 2,459 * \ln(52) = 42,33\%$

Voor de berekening van het elektrisch vermogen vermenigvuldigen we de 177,2 TJ energie met het elektrisch rendement van 42,33%. Hieruit blijkt dat jaarlijks 75,01 TJ elektrische energie geproduceerd wordt. Aangezien de installatie gedurende 7000 uren per jaar actief is en er 3600 seconden zitten in een uur moeten we deze jaarlijkse productie delen door (7 *

3,6) om het elektrisch vermogen van de installatie (in MW_e) te berekenen. We kunnen dan concluderen dat een WKK installatie nodig is met een elektrisch vermogen van 2,977 MW_e, of omgerekend; 2976,61 kW_e. Dit is een jaarlijkse productie van 2,977 MW * 7000h = 20.836,3 MWh.

Tabel 19: Berekening elektrisch vermogen

vermogen eCentrale (kW)	2976,61
Elektrisch rendement	42,33%
jaarlijkse elektriciteitsproductie (TJ)	75,01
Jaarlijkse elektriciteitsproductie (MWh)	20.836,30

7.4 Economische analyse

Analoog aan het investeringsmodel voor fysisch geactiveerde actieve kool gaan we de investering in de WKK-installatie evalueren met een NCW-model. Hiervoor gaan we de kosten ook weer opsplitsen in investeringskosten en jaarlijkse kosten en opbrengsten. Zo kunnen we de bio-olie waarderen op een objectieve manier. Uit het excelbestand van Stroobandt, 2007; kunnen we data halen voor een opsomming van een aantal kosten in functie van bepaalde elektrische vermogens van de WKK installatie. Aangezien we erin geslaagd zijn een regressie te vinden met een zeer goede fit om het elektrisch rendement en daaraan gekoppeld, het elektrisch vermogen te berekenen, kunnen we deze functierelaties gebruiken om de kosten te berekenen aan de hand van het geschatte elektrisch vermogen via de gevonden regressie.

7.4.1 Investeringskosten

De investering bestaat ruwweg uit 2 componenten. Enerzijds is er een verbrandingsmotor nodig om de elektriciteit op te wekken en warmte te genereren. Anderzijds is er nog een investering nodig in een installatie voor zuivering van de rookgassen uit de verbrandingsmotor. De levensduur van deze beide installaties wordt geschat op tien jaar. Deze investering zal dus tweemaal moeten uitgevoerd worden om de levensduur van de pyrolyse reactor van 20 jaar te dekken (Stroobandt, 2007).

7.4.1.1 Verbrandingsmotor

Voor een WKK installatie, kan de kostprijs van de verbrandingsmotor eenvoudig gegeven worden door twee verschillende functies, elk voor een eigen interval van de elektrische vermogens. We zien dat er tot 1600 kW schaalvoordelen optreden. Voor installaties vanaf

1600 kW blijft de investeringskost per kW_e ongewijzigd. Dit verloop kan geschetst worden aan de hand van de volgende twee formules.

$$\leq 1600 \text{ kW}_e: I = [(-93,709 \times \ln(P_e) + 991.53) \times 2] * P_e$$

$$\geq 1600 \text{ kW}_e: I = 600 * P_e$$

Met P_e het elektrisch vermogen van de WKK installatie.

Het elektrisch vermogen is reeds gekend en moet om de investeringskost te berekenen, enkel nog ingevuld worden in de tweede formule omdat het vermogen van ongeveer 3000 kW_e duidelijk binnen de range van deze tweede formule valt (>1600kW_e). Voor installaties van deze schaalgrootte moeten we rekening houden met een kost van € 600 per kW_e. De totale investering in de verbrandingsmotor bedraagt dan $I = €600 * 2977 \text{ kW}_e = € 1.785.968,41$.

7.4.1.2 Rookgasreiniger

De tweede component van de investering is, zoals reeds eerder vermeld, een rookgasreiniger om de rookgassen van de verbrandingsmotor te filteren. De investeringskost van deze component kan beschreven worden aan de hand van een formule in functie van het elektrisch vermogen. Deze formule is gebaseerd op de investeringskost in de rookgasreiniger voor een installatie van 1500 kW_e. Via de formule wordt deze investeringskost dan herschaald naar andere schaalgroottes. De formule wordt net als bij de investering in de verbrandingsmotor gegeven voor twee ranges. De ene is voor opschaling vanaf 1500 kW_e, de andere formule is voor schaalverkleining onder de 1500 kW_e (Stroobandt, 2007).

$$I = 66,667 * P_e * 1,1 \quad P_e < 1500 \text{ kW}_e$$

$$I = 110.000 \quad P_e = 1500 \text{ kW}_e$$

$$I = 66,667 * P_e * 1,05 \quad P_e > 1500 \text{ kW}_e$$

Voor deze case werd een elektrisch rendement bepaald van 2977 kW_e. We moeten dit vermogen dus invullen in de derde formule. Het investeringsbedrag voor een gepaste rookgasreinigingsinstallatie bedraagt dan $€ 66,667 * 2977 \text{ kW}_e * 1,05 = € 229.199,28$. Het totale investeringsbedrag komt hiermee op $€ 2.015.167,69$. Deze bedragen komen echter uit een datasheet van 2007. Om bruikbaar te zijn in ons model van fysische activatie, moeten deze kosten eerst nog geactualiseerd worden naar euro's in 2010. Deze omrekening gebeurt

net als bij de actieve kool met de CEPCI-index die een index is voor industriële installaties in de chemische sector.

Voor 2007 heeft deze index een waarde van 525,4. Voor 2010 is deze index gestegen tot 550,8. De verhouding van deze twee indexwaardes is bijgevolg de parameter waarmee de investeringskosten nog moeten worden vermenigvuldigd om te actualiseren naar 2010. Voor deze verhouding vinden we $\frac{550,8}{525,4} = 1,0483$. De totale investeringskosten in het jaar 2010 worden dan € 2.015.167,69 * 1,0483 = € 2.112.589,19. De investeringskosten kunnen worden teruggevonden in de samenvattende tabel hieronder.

Tabel 20: Investeringskosten WKK

jaartal	2007	2010
<u>Investeringskosten</u>	<u>€ 2.015.167,69</u>	<u>€ 2.112.589,19</u>
verbrandingsmotor	€ 1.785.968,41	€ 1.872.309,48
scrubber	€ 229.199,28	€ 240.279,72

7.4.2 Werkingskosten

Buiten de initiële investering in de WKK-installatie moeten we nog rekening houden met de jaarlijkse uitgaande kasstromen om het kostenplaatje compleet te maken. Zo worden er elk jaar kosten gemaakt voor onderhoud en verzekeringen. Verder moet personeel uiteraard ook betaald worden.

Van aankoopkosten maken we voorlopig abstractie. We starten de analyses waar de pyrolyse eindigt en naar analogie van de actieve kool productie laten we de grondstofkosten hier voor wat ze zijn. Zo kan achteraf bekeken worden welk scenario het meeste waarde toekent aan de eindproducten van de pyrolyse. De kost van pyrolyse veronderstellen we immers gelijk ongeacht de verhouding van olie- en charrendementen.

7.4.2.1 Onderhoudskosten

Zowel de verbrandingsmotor als de scrubber moeten onderhouden worden om de verwachte levensduur van 10 jaar te bereiken. Uit onderzoek blijkt dat de onderhoudskosten voor een verbrandingsmotor veel hoger liggen wanneer deze draait op pyrolyse-olie dan wanneer deze op conventionele brandstoffen draait (Faes, 2011). Ook voor deze onderhoudskosten geeft Stroobandt (2007) data in de excelsheet. De formules voor zowel de onderhoudskosten op

de verbrandingsmotor als de rookgasreiniger zijn net zoals de investeringskosten uitgedrukt in functie van het elektrisch vermogen.

$$\text{Onderhoudskost generator} = 84,951 * Pe^{-0,1544}$$

$$\text{Onderhoudskost rookgasreiniger} = 26,209 * Pe^{-0,1112}$$

Als we de gevonden formules dan toepassen op de huidige case, bekomen we een werkingskost voor de motor van $84,951 * 2977^{-0,1544} = \text{€ } 24,71/\text{MWh}_e$ en van $26,209 * 2977^{-0,1112} = \text{€ } 10,77/\text{MWh}_e$ voor het onderhoud van de scrubber. De totale werkingskost voor de WKK-installatie per geproduceerde MWh_e kan bijgevolg worden berekend door de som te nemen van beide bedragen. We kunnen concluderen dat deze werkingskost € 35,48 bedraagt. Om de totale onderhoudskosten te berekenen moeten we alleen nog vermenigvuldigen met de jaarlijkse elektriciteitsproductie van 20.836,30 MWh. Voor deze berekening bekomen we dan een jaarlijkse onderhoudskost van € 739.194,42.

Hierbij moet wel nogmaals de bemerking gemaakt worden dat deze kost uitgedrukt is in euro's in 2007. We moeten deze werkingskost dus nog actualiseren naar het jaar 2010 vooralleer we deze kosten in het investeringsmodel kunnen invoegen. Dit doen we net als bij de investeringskosten met de verhouding van de CEPCI-index voor de jaren 2007 en 2010. In principe wordt deze index enkel gebruikt voor de actualisatie van kapitaalkosten maar omdat de onderhoudskost in vele gevallen uitgedrukt wordt als percentage op de investeringskost lijkt het voor de onderhoudskosten verantwoord om deze index te gebruiken. Uit de omrekeningscoëfficiënt van 1,0483 leiden we af dat de kosten gestegen zijn met ongeveer 4,83% ten opzichte van 2007. De jaarlijkse werkingskosten voor 2010 bedragen dus $\text{€ } 739.194,42 * 1,0483 = \text{€ } 774.930,12$.

In onderstaande tabel hebben we de onderhoudskost gespiltst in het gedeelte voor onderhoud van de verbrandingsmotor enerzijds en voor de scrubber anderzijds. Voor de verbrandingsmotor bedraagt deze kost € 539.697,83. Voor het onderhoud van de scrubber is er jaarlijks € 235.232,29. Een samenvatting van de jaarlijkse kosten die verbonden zijn aan de WKK-installatie is weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 21: Operationele kosten WKK

Werkingskosten	per MWh_e	per jaar (2007)	per jaar (2010)
onderhoud verbrandingsmotor	€ 24,71	€ 514.809,81	€ 539.697,83
onderhoud scrubber	€ 10,77	€ 224.384,61	€ 235.232,29
Totale onderhoudskosten	€ 35,48	€ 739.194,42	€ 774.930,12

7.4.2.2 *Grondstofkosten*

Grondstofkosten zijn er zoals eerder gezegd in principe wel. We maken voor deze studie echter abstractie van deze grondstofkosten omdat we enerzijds de pyrolysechar zelf eerst produceren in onze pyrolyse-installatie en deze dus ter plaatse beschikbaar is voor verwerking. Anderzijds laten we deze kost in deze berekening weg om een zo goed mogelijke vergelijking te kunnen maken van het activatieproces aan de ene kant en de WKK-installatie aan de andere kant. Omdat beide toch van dezelfde grondstof vertrekken kunnen we deze kosten uit de berekening laten. Dit laat ons toe om beter te kunnen focussen op de specifieke kosten en opbrengsten van elk van beide verwerkingsmethodes. Zo kan op een optimale wijze de rendabiliteit van beide processen bepaald worden.

7.4.3 Jaarlijkse inkomende kasstromen

Naast uitgaande kasstromen zijn er natuurlijk ook inkomende kasstromen. Het is de bedoeling dat deze inkomende kasstromen de kosten gaan dekken om de investering als waardevol te kunnen gaan beoordelen. Vrij intuïtief kan opgemerkt worden dat de inkomsten onder andere de verkoop van de geproduceerde elektriciteit en warmte zullen omvatten. Minder straightforward is misschien het feit dat we de geproduceerde elektriciteit deels kunnen aanwenden voor eigen gebruik. In dat geval moet er minder of geen elektriciteit extern aangekocht worden. Deze vermeden elektriciteitskost kan eveneens aanzien worden als een inkomende kasstroom. Verder vallen onder de inkomende kasstromen nog de steunmaatregelen van de overheid. Deze steunmaatregelen omvatten zowel subsidies als verhoogde aftrek van belastingen.

7.4.3.1 *Vermeden kost van aankoop elektriciteit*

Om te kunnen bepalen welk gedeelte van de elektriciteit beschikbaar is voor verkoop gaan we eerst na welk gedeelte van de productie we kunnen inschakelen voor eigen gebruik. We verkiezen zoveel mogelijk van de benodigde elektriciteit van de eigen productie af te nemen. De reden hiervoor is het verschil tussen de aankoop- en de verkoopprijs. Als we elektriciteit

verkopen op de markt krijgen we hiervoor ongeveer 5 eurocent per kWh. Aangekochte elektriciteit daarentegen kost ons om en bij de 8 eurocent per kWh.

Als we bijgevolg elektriciteit die we zelf hadden kunnen gebruiken, toch verkopen, lopen we dus eigenlijk 3 eurocent per kWh mis omdat we deze aan 8 eurocent moeten aankopen terwijl we voor de verkochte elektriciteit slechts 5 eurocent krijgen per kWh. Voor de gegevens werken we voorlopig met de gebruikelijke case waar we uit pyrolyse 23% rendement hebben aan char en 52% aan pyrolyse-olie.

Voor het gedeelte eigen verbruik van elektriciteit nemen we de elektriciteit die nodig is voor de activatie-installatie. Uit de case van de activatie uit hoofdstuk 6 Weten we dat er voor het activatieproces een jaarlijkse elektriciteitsbehoefte is van 771.711 kWh. Met een productie van 20.836,30 MWh per jaar kan deze elektriciteitsvraag uiteraard makkelijk zelf voorzien worden. De elektriciteitskost van € 61.737 per jaar voor de activatie valt bijgevolg volledig weg.

7.4.3.2 Verkoop elektriciteit

De resterende geproduceerde elektriciteit kan op het elektriciteitsnet gezet worden en verkocht worden. Voor de huidige case kunnen we concluderen dat er nog een netto elektriciteitsproductie is van $20.836,30 \text{ MWh} - 771,71 \text{ MWh} = 20.064,59 \text{ MWh}$ na aftrek van de elektriciteit voor eigen gebruik. Als we als verkoopprijs van deze elektriciteit € 50/MWh nemen voor verkoop aan het net, bekomen we een verkoopwaarde van $20.064,59 \text{ MWh} * € 50 = € 1.003.229,37$ per jaar. Deze berekening is samenvattend weergegeven in de tabel hieronder.

Tabel 22: Inkomsten uit verkoop geproduceerde elektriciteit

Inkomsten uit verkoop elektriciteit	€ 1.003.229,37
jaarlijkse productie Elektriciteit (MWh)	20.836,30
Eigen verbruik per jaar (MWh)	771,71
beschikbaar voor verkoop (MWh)	20.064,59
prijs per MWh	€ 50
totale verkoopwaarde	€ 1.003.229,37

7.4.3.3 *Inkomsten uit verkoop groenestroomcertificaten*

Voor het opwekken van hernieuwbare energie, worden net zoals bij thermische energie certificaten uitgereikt. Zo kunnen we voor de geproduceerde elektrische energie groenestroomcertificaten krijgen. Deze kunnen we op de markt verkopen tegen een gegarandeerde minimumprijs. Voor elektrische energie die geproduceerd wordt uit pyrolyseolie geldt dat voor deze productie kan gerekend worden op groenestroomcertificaten. De regel is dat één certificaat verkregen wordt per geproduceerde MWh elektrische energie. Elke maand worden de certificaten dan op maandelijkse basis toegekend per volledige schijf van 1 MWh geproduceerde elektrische energie (VREG).

Omdat het voor de uitreiking van groenestroomcertificaten onbelangrijk is wie de elektriciteit verbruikt, kan voor de berekening van het aantal toegekende certificaten gesteld worden dat we zowel de elektriciteit voor eigen verbruik als voor verkoop mogen tellen (VREG). Zoals reeds hiervoor berekend is de totale jaarlijkse elektriciteitsproductie van de WKK-installatie voor de basiscase 20.836,30 MWh. Belangrijk is echter dat de netto groene elektriciteitsproductie geldt voor de berekening van de toekenning van het aantal groenestroomcertificaten. Concreet betekent dit dat alle energie die nodig is om de elektriciteit zelf op te wekken moet afgetrokken worden van de totale bruto productie. De twee intensiefste verbruiksposten voor pyrolyse zijn dan de productie van de biomassa (land bewerken, zaaien, oogsten,...) en aan de pyrolyse zelf die vrij energie-intensief is.

Volgens Tom Kuppens kan voor pyrolyse verondersteld worden dat 10% van de geproduceerde energie nodig was voor de productie van de groene stroom. De netto 'groene' elektriciteitsproductie is dus 90% van de jaarlijkse bruto productie. Op jaarbasis kunnen we dan veronderstellen dat we $20.836,30 * 0,9 = 18.752,00$ groenestroomcertificaten krijgen van de VREG. We zouden deze certificaten kunnen waarderen aan de minimumprijs die door de Vlaamse overheid gegarandeerd wordt zodat we de opbrengsten uit de verkoop van deze certificaten eerder pessimistisch dan optimistisch gaan schatten. Uit data van de VREG blijkt echter dat de gemiddelde marktprijs steeds boven de € 100 per groenestroomcertificaat ligt. We verkiezen de certificaten bijgevolg te waarderen aan € 100 om de data zo realistisch mogelijk te maken. Per jaar levert de verkoop van deze certificaten dus $18.752,00 * € 100 = € 1.875.200,00$ op. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de berekening.

Tabel 23: Jaarlijkse opbrengsten uit GSC

verkoop GSC	€ 1.875.200
Bruto elektriciteitsproductie (MWh)	20.836,30
% energie nodig voor productie	10%
Netto elektriciteitsproductie (MWh)	18.752,67
# GSC/jaar	18.752,00
minimumprijs per certificaat	€ 100

7.4.3.4 Verkoop Warmte

Nu de elektriciteit gewaardeerd is, kunnen we gaan kijken wat de parallel geproduceerde warmte waard kan zijn. Voor deze berekening moet natuurlijk eerst de totale hoeveelheid geproduceerde warmte gekend zijn. Om deze totale hoeveelheid te kennen, vertrekken we van het thermisch rendement van de WKK-installatie uit de case. Uit het excelbestand van Stroobandt (2007) blijkt dat de som van het elektrisch en het thermisch rendement voor alle installatiegroottes gelijk is aan 80%. We kunnen het thermisch rendement daarom simpelweg berekenen door van 80%, het elektrisch rendement van 42,33% af te trekken. Het thermisch rendement is dus 37,67%

Voor het vermogen gerelateerd aan dit thermisch rendement hernemen we even de jaarlijkse energie-input van de pyrolyse-olie. Deze input bedroeg 177,2 TJ/jaar. Met een rendement van 37,67% betekent dit een jaarlijkse warmteproductie van 66,749231 TJ. Het verbruik per seconde, het vermogen, wordt dan 2,65 MW_{th}. Nu het vermogen gekend is, betekent dit dat er per uur 2,65 MWh thermische energie geproduceerd wordt. De jaarlijkse productie is bijgevolg 18.541,45 MWh_{th}.

Tabel 24: Thermische energieproductie

Thermische energieproductie	
thermisch rendement (%)	37,67
jaarlijkse warmteproductie (TJ)	66,749231
thermisch vermogen (MW)	2,65
productie (MWh)	18.541,45

Deze jaarlijkse warmteproductie wordt niet noodzakelijk zelf verbruikt. Aangezien in de installatie reeds veel sterk verwarmende installaties staan is het eigen verbruik qua verwarming verwaarloosbaar. Al de geproduceerde warmte kan bijgevolg verkocht worden

aan marktprijs van € 20 (Tom Kuppens). Dit levert jaarlijks een bedrag op van 18.541,45 * € 20 = € 370.829,06.

Tabel 25: Jaarlijkse opbrengsten uit verkoop geproduceerde warmte

Verkoop Warmte	€ 370.829,06
prijs per MWh	€ 20
# MWh	18.541,45

7.4.3.5 Verkoop warmtekrachtcertificaten

Zoals de regering met groenestroomcertificaten als steunmaatregel de groene energieproductie een duwtje in de rug wil geven is er een gelijkaardige regeling voor uitgespaarde warmteproductie met fossiele brandstoffen. Voor deze energieproductie worden warmtekrachtcertificaten uitgereikt onder bepaalde voorwaarden.

Een eerste voorwaarde is dat de Relatieve Primaire Energie Besparing groter moet zijn dan 10% voor installaties met een vermogen groter dan 1 MW (VREG). Hiervoor is door Vlaanderen een formule gecreëerd die in staat stelt om de RPEB te berekenen. Hiervoor zijn de twee Europese referentierendementen van de thermische en elektrische energie nodig. Voor een WKK-installatie op pyrolyse-olie is het thermisch referentierendement gelijk aan 89%. Voor elektriciteit over het laagspanningsnet 41,26% (Faes, 2011). Verder hebben we nog nood aan het thermisch en elektrisch rendement van de WKK-installatie. Voor deze case hebben we die rendementen bepaald als zijnde 38,16% en 42,14% voor respectievelijk thermisch en elektrisch rendement. Dit levert dan volgende formule op voor de RPEB.

$$RPEB = 1 - \frac{1}{\frac{0,3785}{0,89} + \frac{0,4215}{0,4126}} = 30,8\%.$$

De Relatieve Primaire Energie Besparing is dus duidelijk groter dan 10%. Een tweede voorwaarde geldt enkel voor installaties met een vermogen groter dan 1 MW. Deze voorwaarde is voor deze installatie dus aan de orde. Het komt erop neer dat de installatie extra moet gekeurd worden (VREG). We gaan er vanuit dat deze extra keuring positief zal uitvallen en we dus kunnen rekenen op warmtekrachtcertificaten. De voorwaarden zijn vervuld, dus gaan we kijken naar de opbrengsten van deze certificaten. De opbrengstenberekening voor warmtekrachtcertificaten verloopt echter niet helemaal hetzelfde als bij groenestroomcertificaten.

In tegenstelling tot GSC waar men moet bewijzen welke netto hernieuwbare elektriciteitsproductie men heeft, is er voor WKC een formule om de absolute

energiebesparing te berekenen. Per bespaarde MWh krijgen we voor de WKK-installatie één WKC. De formule die men hanteert is de volgende:

$$PEB = E \left(\frac{1}{\eta_e} + \frac{\alpha_Q}{\alpha_E * \eta_Q} - \frac{1}{\alpha_E} \right)$$

In deze formule zijn η_e en η_Q de respectievelijke elektrische en thermische referentierendementen. De parameters α_E en α_Q zijn de rendementen van de WKK-installatie en E is de jaarlijkse elektriciteitsproductie in MWh.

Een eerste verschil met de GSC is dat slechts gedurende de eerste 48 maanden het volledig aantal WKC als 'aanvaardbaar' beschouwd wordt. Om te berekenen welk percentage van de certificaten als aanvaardbaar wordt beschouwd na deze termijn van 48 maanden is er een formule ontwikkeld (VREG).

$$100 * \frac{RPEB - 0,2 * (T - 48)}{RPEB}$$

Als we deze formule invullen met 30,8 als RPEB en 49 als T (in maanden); krijgen we X= 99,351%. We herhalen deze bewerking voor al de maanden van de zes laatste jaren. Vervolgens berekenen we opnieuw de totalen van elk jaar door het aantal certificaten van elke maand te sommeren. Deze resultaten staan vermeld in de middelste kolom van onderstaande tabel. De tabel met de degressieresultaten per maand van de laatste zes jaren is bijgevoegd in bijlage 3

Voor WKC geldt net zoals bij GSC een minimumprijs en een marktprijs. Omdat deze certificaten minder vaak aan marktprijs verkocht worden geniet het de voorkeur om deze aan minimumprijs te waarderen om de opbrengst niet te overschatten. Deze minimumprijs bedraagt €31 per certificaat (VREG). De minimale verkoopwaarde is dus het aantal certificaten dat er jaarlijkse wordt verkregen, vermenigvuldigd met deze prijs van €31. In de laatste kolom is deze jaarlijkse minimumopbrengst weergegeven.

Tabel 26: Degressietabel aantal ontvangen WKC per jaar

degressietabel WKC		
Jaar	# WKC	Verkoopprijs
jaar 1	21.879	€ 678.262,05
jaar 2	21.879	€ 678.262,05
jaar 3	21.879	€ 678.262,05
jaar 4	21.879	€ 678.262,05
jaar 5	20.962	€ 649.815,77
jaar 6	19.268	€ 597.299,56
jaar 7	17.574	€ 544.783,35
jaar 8	15.880	€ 492.267,14
jaar 9	14.186	€ 439.750,93
jaar 10	12.491	€ 387.234,72

7.4.4 Netto Contante Waarde-berekening

Een NCW berekening van louter de investering in een WKK installatie is niet zo zinvol omdat het olierendement niet gelijk is aan het charrendement. De gevonden resultaten zouden dan toch niet kunnen dienen als vergelijkingsmateriaal met de NCW van fysische activatie. Een alternatieve en betere methode lijkt het toevoegen van de economische gegevens voor een WKK installatie aan het NCW-model van fysische activatie. Zo wordt een model gecreëerd dat bekijkt wat de gezamenlijke waarde is van beide pyrolyseproducten. Op zich zegt ook dat model nog relatief weinig. Er moet dus nog een aanpassing gebeuren die ervoor zorgt dat er een trade-off kan gemaakt worden tussen focussen op olieproductie of focussen op charproductie. Dit kunnen we doen we aan de hand van de pyrolysetemperatuur (Bridgwater 2011). We beginnen de analyse alvast met het opstellen van de nieuwe kasstromentabel met de kosten- en opbrengsteninformatie van WKK toegevoegd de kasstromentabel van fysische activatie. We krijgen dan volgende tabel:

Tabel 27: Berekening NCW van fysische activatie gecombineerd met WKK

ZONDER grondstofkost	jaar 0	jaar 1	jaar 2	jaar 3
Opbrengsten AK		€ 4.823.192	€ 4.823.192	€ 4.823.192
Opbrengsten WKK		€ 3.927.520	€ 3.927.520	€ 3.927.520
Totale opbrengsten		€ 8.750.712	€ 8.750.712	€ 8.750.712
investeringskosten AK	€ 5.120.457			
investeringskosten WKK	€ 2.112.589			
werkingskosten AK		€ 1.001.418	€ 1.001.418	€ 1.001.418
werkingskosten WKK		€ 774.930	€ 774.930	€ 774.930
besparing elektriciteitskosten		€ -61.737	€ -61.737	€ -61.737
TOT kosten		€ 1.714.611	€ 1.714.611	€ 1.714.611
Future Cashflow $(1-t)*(O-K) + (t*\text{afschrijving})$	€ -7.233.046	€ 7.036.101	€ 7.036.101	€ 4.680.434
present cashflow	€ -7.233.046	€ 6.455.139	€ 5.922.146	€ 3.614.154
discontovoet		9%		
gecumuleerde CF (jaar 1 tot n)	€ -7.233.046	€ -777.907	€ 5.144.238	€ 8.758.392
NPV	€ 38.609.903			

Uit de tabel blijkt duidelijk dat de verwerking van de eindproducten van pyrolyse bij 450°C best veel oplevert. De NCW is immers bijna 40 miljoen euro. Dit is dus het resultaat wanneer gefocust wordt op olieproductie. Het is echter mogelijk dat de activatie van pyrolysechar in grotere mate verantwoordelijk is voor de hoge NCW. Om pyrolyse zo rendabel mogelijk uit te voeren, voegen we nog een extra 'optie' toe aan het model

Uit onderzoek van Bridgwater (2011) blijkt dat de rendementen van olie en char sterk afhangen van de temperatuur waarop de pyrolyse uitgevoerd wordt. Onderzoek van Yoder et al., (2007) staft dit gegeven en voegt eraan toe dat tussen 250°C en 450°C de charproductie stijgt met dalende temperatuur en de olieproductie stijgt met stijgende temperatuur. Boven de 450°C dalen de rendementen van beide producten. Pyrolyse boven de 450°C is dus met zekerheid nefast voor de rendabiliteit van het pyrolyseproces.

In het onderzoek van Yoder et al.,(2007) vinden we twee formules die de rendementen van pyrolyseolie en char geeft in functie van de pyrolysetemperatuur. Deze formules zijn

$$\text{charrendement} = 80,67 - 0,1655 * T + 9,4 * 10^{-5} * T^2$$

$$\text{olierendement} = -3,42 + 0,2205 * T - 2,1 * 10^{-4} * T^2$$

Met "T" de pyrolysetemperatuur in °C

Als we deze formules invullen voor de pyrolysetemperatuur van 450°C uit de case bekomen we een charrendement van 25,23% en een olierendement van 53,28%. Om de berekeningen in het investeringsmodel niet te ontregelen wijzigen we de constante lichtjes naar beneden zodat we respectievelijk 23% en 52% bekomen voor char- en olierendementen. Deze aanpassing naar onder is verantwoord aangezien de output daalt en dus ook de economische situatie lichtjes onderschat. Dit is beter dan de economische analyse rooskleuriger voorstellen dan ze in werkelijkheid is. Na aanpassing bekomen we dan volgende formules.

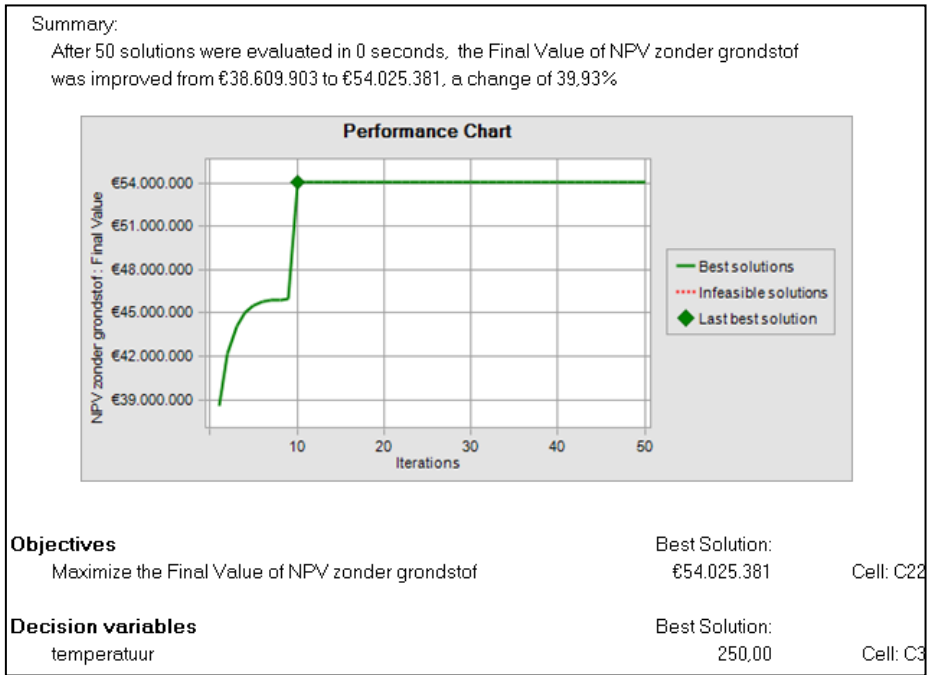
$$\text{charrendement} = 78,44 - 0,1655 * T + 9,4 * 10^{-5} * T^2$$

$$\text{olierendement} = -4,7 + 0,2205 * T - 2,1 * 10^{-4} * T^2$$

Door beide rendementen te laten variëren in functie van de pyrolysetemperatuur kunnen we nu bepalen of het beter is om te focussen op lage temperatuur met hogere charproductie tot gevolg of hogere temperatuur die de vorming van bio-olie bespoedigt. Als ondergrens leggen we 250°C vast omdat dit de laagste temperatuur is waarop pyrolyse mogelijk is en als bovengrens 450°C omdat boven deze temperatuur de beide rendementen dalen en dit automatisch een daling van de rendabiliteit tot gevolg heeft (Yoder et al., 2007).

Aan de hand van de functie OptQuest in het programma Crystal Ball zoeken we naar de temperatuur die de NCW optimaliseert binnen de range van 250-450°C. De figuur hieronder geeft het resultaat van deze berekening. Hieruit blijkt dat de optimale temperatuur om de NCW zo hoog mogelijk te krijgen, 250°C bedraagt. De Netto contante Waarde is gestegen van € 38.609.903 naar € 54.025.381 door het verleggen van de focus van olieproductie naar charproductie. Het activeren van char draagt dus in grotere mate bij tot de hoge NCW dan het gebruiken van bio-olie in een WKK installatie.

Figuur 5: Optimale temperatuur pyrolyse voor maximalisatie rendabiliteit



De keuze om gecombineerd char te activeren en bio-olie in zetten voor WKK, lijkt gezien de hoge NCW een interessante optie om als verwerkingstechniek van pyrolyseproducten te beschouwen. Buiten fysische activatie is er echter ook nog chemische activatie, een techniek die meer en meer aan interesse wint de laatste jaren. In het volgende hoofdstuk maken we een nieuwe analyse voor de productie van chemisch geactiveerde kool. Nadien kunnen we dan op basis van de twee gemaakte modellen bekijken welke optie het interessantste is onder de gemaakte assumpties.

8 Economische analyse chemische activatie

8.1 Chemische activatie van biomassa

Er bestaat verder nog een tweede methode om actieve kool te verkrijgen. Deze methode heeft enkele cruciale verschillpunten met fysische activatie waardoor deze in een ander hoofdstuk behandeld wordt dan fysische activatie. In dit hoofdstuk bespreken we de verschillpunten en gelijkenissen tussen de verschillende methodes..

8.1.1 Eigenschappen

Allereerst vertrekt men bij chemische activatie van een bepaalde grondstof die in dit geval de gecontamineerde biomassa is. Deze biomassa wordt vervolgens voorbehandeld met een base waarna ze terug gewassen en gedroogd wordt. Daarna volgt een tweede voorbehandeling met een zuur. Eens de zuren uitgewassen zijn, gaat men het behandelde materiaal activeren in een activatie-oven bij een temperatuur van 450°C. Op deze manier creëert men een hoog mesopore actieve kool. Dit is positief aangezien blijkt dat de markt van mesopore actieve kool een echte groeimarkt is met continu evoluerende en nieuwe toepassingen.

8.1.2 Verschillen met fysische activatie

Uit de literatuur kunnen de methodes van chemische activatie en die van fysische activatie vergeleken worden met elkaar om zo de belangrijkste verschillen te bepalen. Dit dient dan als basis voor de opbouw van een investeringsmodel voor chemische activatie. De belangrijkste verschillen zijn de grondstof, voorbehandeling, activatietemperatuur en eigenschappen van de geproduceerde actieve kool

8.1.2.1 *Grondstof*

Het fysische activatieproces verloopt in 2 stappen, carbonisatie tot char en vervolgens activatie. Beide acties zijn een thermische behandeling en geven fysisch geactiveerde kool. Het speciale in deze studie is dat de biomassa reeds gecarboniseerd was tot char door de voorbehandeling in een pyrolyse reactor. Hierdoor was de carbonisatiestap reeds uitgevoerd en moest enkel de activatiestap nog behandeld worden. De grondstof was dus onrechtstreeks wel de oorspronkelijke biomassa, maar de carbonisatie werd weggelaten zodat tot nog toe de char werd bekeken als zijnde de grondstof voor actieve kool.

Voor chemische activatie vertrekt men echter rechtsreeks van een organisch materiaal, zoals biomassa, zonder deze thermisch te carboniseren in een pyrolyse reactor. We moeten dus,

om de chemische activatie te bekijken, een stapje terug zetten en de pyrolyse even wegdenken.

8.1.2.2 Voorbehandeling

De voorbehandeling verschilt grondig tussen de fysische en de chemische methode. Bij de fysische methode bestond de voorbehandeling uit de carbonisatie van de biomassa door middel van pyrolyse. Bij de chemische activatie bestaat de voorbehandeling daarentegen uit 2 processen die ervoor zorgen dat bij de activatie de porievorming bespoedigd wordt.

De eerste behandeling is een voorbehandeling met een base. Liou (2010), gebruikt hiervoor een 0,5 molair basische oplossing van water en NaOH. Een molair is de concentratie waarbij één mol opgeloste stof in één liter oplossing aanwezig is. De biomassa wordt in deze oplossing gedurende 1 uur gekookt bij 100°C. Vervolgens wordt de biomassa gewassen met water om de basische oplossing te verwijderen. Na het wassen wordt de biomassa gedroogd gedurende 24 uur bij 105°C. Uit onderzoek blijkt duidelijk dat deze voorbehandeling de concentratie assen in de biomassa doet dalen. Dit zorgt ervoor dat de assen die normaal gezien het vormen van poriën bemoeilijken, minder talrijk zijn en de uiteindelijke char een hogere kwaliteit kan bereiken.

De tweede stap bestaat uit een behandeling in een zuurbad. Uit onderzoek blijkt dat twee zuren en één base voor een hoog rendement in actieve kool kunnen zorgen. De twee zuren die een goede activatie-agent zijn, zijn fosforzuur (H_3PO_4), zinkchloride ($ZnCl_2$) en kaliumhydroxide (KOH) (Anas nahil & Williams, 2012). De biomassa wordt geïmpregneerd in een zure oplossing van één van deze stoffen met een verhouding van 1 deel zure oplossing op 4 delen biomassa of een verhouding van 2 op 4 (Liou, 2010). De geïmpregneerde biomassa wordt vervolgens terug gedroogd. Na deze stap is de voorbehandeling van de biomassa afgelopen en is de bewerkte biomassa klaar om geactiveerd te worden. De activatiekatalysator kan op zijn minst gedeeltelijk herwonnen worden (Ould-Idriss et al., 2011).

8.1.2.3 Activatie

Activatie bij de fysische methode vindt plaats in een pyrolyse reactor van temperaturen van om en bij de 800°C. Voor chemisch voorbehandelde biomassa echter, is slechts een veel lagere reactietemperatuur vanaf 300°C vereist voor activatie (Anas Nahil & Williams, 2012). Dit is belangrijk met het oog op de zware metalen waarvan we veronderstellen dat ze nog steeds aanwezig zijn in de behandelde biomassa. De activatie gebeurt dus gedurende een

uur in een pyrolyse-oven bij lagere temperatuur. Het is belangrijk hierbij te bemerken dat, indien we voor de activatie de temperatuur kleiner of gelijk aan 450°C houden, de zware metalen niet zullen vervliegen en in de koolstructuur zullen blijven. Aangezien actieve kool net vaak gebruikt wordt om zware metalen te vangen, wordt verondersteld dat het niet echt een probleem is dat de actieve kool reeds een beperkte hoeveelheid zware metalen bevat. Activatie op lage temperatuur wordt bovendien nog eens aangemoedigd door gegevens uit de literatuur. Het blijkt immers dat men bij hogere activatietemperaturen lagere rendementen bekomt (Anas Nahil & Williams, 2012).

8.1.2.4 Eigenschappen

Chemisch geactiveerde kool heeft als belangrijkste eigenschap dat het over het algemeen een groter volume mesoporiën bezit dan fysisch geactiveerde kool. Dit type poriën is zoals reeds gezegd het middelpunt geworden van recent onderzoek omdat die belangrijke nieuwe toepassingen zou kunnen creëren doordat andere moleculen die nu nog niet konden worden gevangen met de structuur van fysisch geactiveerde, nu wel kunnen worden uitgefilterd en vastgehouden in de poriën. Tegelijk bevat deze chemische actieve kool ook veel microporiën die resulteert in zuivering van zeer kleine moleculen (Stals, 2011).

8.2 Toegepaste werkwijze

Door de vrij recente interesse in chemische activatie is gedetailleerde literatuur omtrent de economische aspecten van deze productietechniek nog niet beschikbaar. Om toch een idee te krijgen van de kostprijs van deze technologie werd een alternatieve methode ontwikkeld. De kostprijs zal hierdoor op een eerder theoretische wijze bepaald worden. Dit in tegenstelling tot de vrij praktische benadering die kon worden toegepast bij de berekening van de fysische activatiekosten. Door de afwezigheid van gedetailleerde literatuur lijkt deze methode echter wel gerechtvaardigd om een voorzichtige eerste schatting te maken.

8.2.1 Moeilijke praktische benadering

Het productieproces van actieve kool via chemische activatie bevat zoals aangegeven in het vorige hoofdstuk een aantal extra stadia ten opzichte van fysische activatie. Door de voorbehandeling waarbij de biomassa enkele malen wordt behandeld en daarna steeds 24 uur moet drogen, duurt het totale proces ook een stuk langer dan de fysische activatie onder stoom. Door de vrij recente interesse in deze werkwijze is er nog maar weinig economisch onderzoek verricht naar het productieproces. Een gedetailleerde economische bespreking van een chemisch activatieproces is bijgevolg voorlopig nog niet te vinden in de literatuur. Wel zijn er sporadisch vergelijkingen te vinden tussen de productie van actieve kool via chemische en fysische technieken.

8.2.2 Verhouding kostprijs fysische activatie vs. chemische activatie

In onderstaande kader zijn gegevens weergegeven van vier studies waar een economische vergelijking werd gemaakt tussen fysische en chemische activatie met eenzelfde grondstof. De eenheid waarin de kostprijzen vergeleken zijn, is telkens één geproduceerde kilogram. Concreet kan men deze kostprijs bekomen door de jaarlijkse kosten van de productie te vermeerderen met de jaarlijkse annuïteit van de initiële investering. Dit is het bedrag dat jaarlijks moet worden afgelost gedurende een periode van 20 jaar voor een geleende hoofdsom gelijk aan de totale investering. Voor deze lening veronderstellen we een rentevoet van 5% op het geleende bedrag.

Deze grondstoffen zijn twee keer amandelschil, één keer schil van pecannootjes en één keer schil van noten in het algemeen. Tweemaal was er een concrete kostprijs per kg actieve kool weergegeven. Bij de twee andere cases is er een interval gegeven. Voor verdere berekeningen met deze cijfers werd voor de intervallen met het gemiddelde gewerkt.

Tabel 28: Verhoudingen fysische vs. chemische activatie

materiaal	stoom	chemisch	ratio	bron
nut shell	1,5 - 1,9	2,4-2,8	1,529	Klasson et al., 2009
pecan shell	2,72	2,89	1,063	Ng et al., 2003
amandel	1,54	2,45	1,591	Ng et al., 2003
amandel	1,54 - 1,91	2,45-2,82	1,522	Lima et al., 2008
<u>gemiddelde</u>			<u>1,426</u>	

Voor elk van deze vier studies kan vervolgens de ratio berekend worden van de kostprijs van actieve kool via chemische activatie ten opzichte van de actieve kool die geproduceerd werd door fysische activatie. Concreet wordt deze ratio berekend door de kostprijs van 1 kg actieve kool die chemisch geactiveerd werd, te delen door de kostprijs van 1 kg actieve kool, geproduceerd door fysische activatie. Van deze vier ratio's kan vervolgens het gemiddelde genomen worden. De gemiddelde ratio is in principe 1,426. De tweede observatie is met een waarde van 1,063 echter een sterk negatieve uitschieter binnen de gegeven dataset. Het zou dus kunnen dat dit cijfer onrealistisch is. We verkiezen bijgevolg om het gewicht van dat cijfer voor de berekening van het gemiddelde te laten dalen en de gemiddelde ratio af te ronden naar 1,5. Deze factor kan dan nu dienen om op basis van de kostprijs van één kilogram fysisch geactiveerde kool, deze productiekost om te zetten in één kilogram chemisch geactiveerde kool.

8.2.3 Kostprijs fysisch geactiveerde kool

Om deze berekening te kunnen uitvoeren moet uiteraard eerst berekend worden wat de kostprijs is voor één ton actieve kool geproduceerd via fysische activatie. We doen dit op basis van het investeringsmodel dat eerder uitgevoerd is. Hier moet echter wel de bemerking gemaakt worden dat er in het gebruikte model enkel de activatiestap berekend is. Om de carbonisatiestap in de berekening op te nemen is een mogelijke oplossing om een 'charkost' toe te voegen aan de kostenberekening voor de activatie. Deze charkost moet dan de productiekost van 1 kg pyrolysechar zijn.

Dit wil zeggen dat we enkel kijken naar de kosten van de productie zelf en geen grondstofkost in rekening brengen voor de biomassa. Als we dit wel zouden doen, vermenigvuldigen we namelijk ook de aankoopprijs van de biomassa met de factor 1,5. Dit probleem vermijden we door met de pure kost van de productie te werken. De grondstofkost wordt dan achteraf wel aan het investeringsmodel toegevoegd als de productiekost omgerekend is naar chemische activatiekost. Een tweede aandachtspunt is dat de investering in de uitgebreide rookgaszuivering ook niet wordt meegenomen in deze berekening. De uitgebreide filter is immers niet noodzakelijk bij chemische activatie die slechts plaatsvindt bij een temperatuur van 450°C. Door deze werkwijze bekomt men de productiekost voor een kilogram actieve kool uit een zuivere grondstof, waar geen speciale rookgasreiniging voor vereist is.

8.3 Berekening

Om de uiteindelijke productiekost voor pyrolysechar te berekenen, tellen we eerst de jaarlijkse werkingskosten op en vermeerderen we deze met de jaarlijkse annuïteit op de kapitaalkost. Als laatste moet er nog vermeld worden dat er geen rekening wordt gehouden met subsidies om de pure kost van pyrolyse te kunnen bepalen. Op basis van deze charkost en de gemaakte assumpties, kunnen we een zo concreet mogelijke schatting maken van de productiekost van fysisch geactiveerde kool. Op basis van deze productiekost heeft de omrekeningsratio van fysische naar chemische productiekosten enig praktisch nut.

8.3.1 Kostprijs pyrolysechar

Beginnen doen we dus met de productiekost van pyrolysechar. Om deze te berekenen, worden zoals eerder vermeld, de werkingskosten vermeerderd met de jaarlijkse annuïteit op de kost van de reactor. Op deze manier kan de kostprijs berekend worden van één jaar charproductie. Deze kost kan dan gedeeld worden door de jaarlijkse productie.

8.3.1.1 Investeringskosten

De berekening van de kostprijs van de reactor gebeurt analoog aan de berekening die we toegepast hebben op de investering in de activatie-oven op basis van de formule van Tom Kuppens (2012):

$I = 3.457.958,82 * (\Phi)^{0,6867}$; Φ is in dit geval ook de instroom aan char per uur in de reactor. Deze waarde is voor de pyrolyse echter wel anders dan voor de activatie omdat de input aan biomassa hoger is dan de inputstroom van pyrolysechar bij de activatie. De input wilgenhout per jaar is ongeveer 21.000 ton per jaar als we opnieuw uitgaan van het tweede scenario waar we om de drie jaar hout en bladeren oogsten. Bij een productie van 7000 operationele uren per jaar, levert dit een input op van $(21000 \text{ ton/jaar}) / (7000 \text{ uur/jaar}) = 3$ ton per uur. Wanneer we deze waarde vervolgens invullen in de formule voor de investering in de pyrolyse reactor bekomen we een investeringsbedrag van $3.457.958,82 * (3)^{0,6867} = \text{€ } 7.352.905,47$.

Omdat deze investering loopt over 20 jaar moet eerst nagegaan worden welk deel van investering ten laste kan worden gelegd van één gebruiksjaar. Dit komt zoals reeds vermeld neer op de annuïteit op deze kapitaalkost van € 7.352.905,47. Dit is de eerste component die we zullen gebruiken om de kost van pyrolysechar te berekenen. De formule om een annuïteit te berekenen gaat als volgt: (BRON groen boek Limere)

$$\text{Annuïteit} = \text{investeringskost} * \left(\frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \right)$$

Als we deze formule invullen met de investeringskost van € 7.352.905,47; een rentevoet van 5% en een tijdspanne van 20 jaar, is de annuïteit € 590.016,16.

Tabel 29: Investeringskosten pyrolyse

investeringskosten	€ 590.016,16
reactor	$I = (5,497 * \Phi^{0,65}) * 10^6$
Φ	21000
totale investeringskosten	€ 7.352.905,47
levensduur reactor (in jaren)	20
rente	5%

8.3.1.2 Werkingskosten

Ook voor de werkingskosten kunnen we vrij analoog werken aan de werkingskosten voor de productie van actieve kool. Deze bestaan ondermeer uit vaste operationele kosten, personeelskosten, energiekosten en kosten voor koelwater. Grondstofkosten worden zoals vermeld niet meegerekend maar bij de pyrolyse komen er nog voorbehandelingskosten bij. Deze kosten omvatten alle kosten die nodig zijn voor de bewerkingen die plaatsvinden om de grondstoffen klaar te maken voor industriële verwerking. Voor fast pyrolyse moet de biomassa namelijk gedroogd worden zodat het vochtpercentage onder de 7% komt te liggen (bridgwater et al., 2002) en verkleind worden tot een deeltjesgrootte van maximaal 2 mm om optimaal te kunnen pyrolyseren in de reactor (laird et al., 2009).

Voor zowel drogen als verkleinen vinden we dezelfde kost van € 13,33 per ton droge stof. Met een jaarlijkse stroom van 20.970,4 ton droge stof betekent dit een totale voorbehandelingskost van $20.970,4 * € 26,66 = € 559.070,86$. Een overzicht van deze kosten staan in onderstaande tabel

Tabel 30: Voorbehandelingskosten pyrolyse

voorbehandelingskosten	€ 559.070,86
voorbehandelingskosten/tds	€ 26,66
# tds te verwerken	21000

De personeelskosten kunnen uiteraard berekend worden aan de hand van dezelfde formule als bij de activatie. Deze personeelskosten kunnen worden geschat via de formule $C_{labour} = 1,56 \times 10^5 * (1,04 \times \Phi^{0,475})$ met Φ de input aan droge massa. Aangezien deze formule is opgesteld voor 2005, vermenigvuldigen we nog met een factor voor de inflatie. We gebruiken hiervoor de consumentenprijsindex van België en vinden hiervoor de volgende waarden.

Voor einde 2005 was de index 103,45 (basisjaar is hier 2004). Einde 2010 was de waarde van deze index 115,0; ook met 2004 als basisjaar. Als we de loonevolutie tussen 2005 en 2010 dan berekenen bekomen we een herschalingsfactor van $(115/103,45) = 1,11$ (bron: http://lbc-nvk.acv-online.be/Sociale_wetgeving/loon/index/inleiding_index.asp). We vullen de formule voor de berekening van de loonkost aan met deze factor. We krijgen bijgevolg de volgende formule: $C_{labour} = [1,56 \times 10^5 * (1,04 \times 2,99^{0,475})] * 1,11 = € 302.172,32$ voor de personeelskosten.

Tabel 31: Personeelskosten pyrolyse

Personeelskosten	€ 302.172,32
$w = 1,56 \cdot 10^5 \cdot (1,04 \cdot \phi^{0,475}) \cdot 1,11$	
ϕ	2,99

Verder kan worden uitgegaan van 7% vaste operationele kosten op de totale investeringskosten (Islam et al., 2000). Ook vinden we in de studie van Vanreppelen et al., (2011) een tabel met een overzicht van de vaste operationele kosten. Samenvattend kunnen we stellen dat volgende gemiddeldes bekomen worden aan de hand van onderstaande tabel

Tabel 32: Typische percentages vaste operationele kosten

Jaarlijkse operationele kost	uitgedrukt als	
Onderhoud	3%	van investeringsbedrag
	5%	van investeringsbedrag
	3%	van investeringsbedrag
	4%	van investeringsbedrag
	6%	van investeringsbedrag
	2,5%	van investeringsbedrag
	2%	van investeringsbedrag
verzekering	2%	van investeringsbedrag
	1%	van investeringsbedrag
verzekering en algemene overheadkosten	4%	van investeringsbedrag
	2%	van investeringsbedrag

Zoals reeds bepaald bij de activatiestap geeft dit een gemiddeld totaalpercentage van 7%. Dit ligt in lijn met wat Islam et al. (2002) uitkwamen in hun onderzoek. Onderzoek van Voets & Bloemen (2009) naar de kosten van een pyrolyse-installatie geeft een kostenpercentage van 7,5%. Omdat die studie specifiek over pyrolyse van fyto-remediatie hout gaat, zal voor deze studie bijgevolg gebruikt gemaakt worden van 7,5% op de investeringskosten als kostenpercentage voor de vaste operationele kosten. Als we deze 7,5% dan berekenen op het investeringsbedrag van € 7.352.905,47 voor de pyrolyse reactor, dan komen we uit op een jaarlijkse kost van € 551.467,91 voor de vaste operationele kosten.

Tabel 33: Vaste operationele kosten pyrolyse

vaste operationele kosten	€ 551.467,91
% VOK	7,5%

De eindproducten van de pyrolyse moeten na de reactie snel gekoeld worden. Hiervoor is koelwater nodig à rato van 18,5 m³ per ton droge stof wilgenhout (Voets & Bloemen, 2010). Voor een jaarlijkse input van 20.970,4 ton korte omloophout, betekent dit een jaarlijkse vraag aan koelwater van 20.970,4 ton * 18,5 m³/ton = 387.952,4 ton. Voor de kosten nemen we de prijs voor industrieel proceswater van de activatie over van € 1,27 per m³ (Peacocke et al., z.d.). Als we deze eenheidskost dan vermenigvuldigen met de jaarlijkse vraag, bekomen we een jaarlijkse kostprijs van € 492.699,55 voor het koelwater.

Tabel 34: Kosten koelwater pyrolyse

kosten voor koelwater	€ 492.699,55
benodigde hoeveelheid /tds (m ³)	18,5
totale hoeveelheid water (m ³)	387.952,40
kostprijs/m ³	€ 1,27

Energiekosten zijn redelijk beperkt voor een pyrolyse-installatie. We kunnen er immers van uitgaan dat de gasfractie die geproduceerd wordt voldoende is om de pyrolyse aan de gang te houden (Bridgwater, 2011). Uit de studie van Voets en Bloemen (2009) kunnen we afleiden dat de overblijvende energievraag voor het pyrolyseproces 40 kWh per ton droge stof bedraagt. We gaan ervan uit dat dit vooral elektriciteit is.

Aangezien de eenheidskost per kWh van elektriciteit het hoogst is van de beschikbare conventionele energiebronnen is deze pessimistische schatting te verantwoorden. Voor de input van 21.000 ton per jaar komt dit neer op een jaarlijkse elektriciteitsvraag van 21.000 ton * 40 kWh/ton = 838.816 kWh. Net zoals bij de activatie waarden we elektriciteit aan een kost van € 0,08/kWh. De jaarlijkse kost is dan 838.816 * € 0,08 = € 67.105,28.

Tabel 35: Energiekosten pyrolyse

energiekosten	€ 67.105,28
benodigd # kWh /tds	40
# kWh/jaar	838.816
prijs elektriciteit / kWh	€ 0,08

Pyrolyse vindt steeds plaats onder een atmosfeer vrij van zuurstof. Om deze zuurstofvrije omgeving te creëren laat men de biomassa in de reactor reageren onder een stikstofatmosfeer. Hiertoe dient stikstof aangekocht te worden om te gebruiken gedurende het pyrolyseproces. Uit onderzoek van Vanreppelen et al., kan afgeleid worden dat er nood is aan 8 kg stikstof per ton biomassa. De jaarlijkse benodigde hoeveelheid stikstof is bijgevolg $8 \text{ kg/ton} * 21.000 \text{ ton} = 167.763,2 \text{ kg}$. De kost van 1 kg stikstof is € 2,5. Dit geeft een jaarlijkse kost van €4 19.408. Deze kosten zijn samengevat in tabel

Tabel 36: Stikstofkosten pyrolyse

stikstofgas	€ 419.408
#kg N/ton biomassa	8
jaarlijkse vraag N (kg)	167.763,20
kost /kg N	€ 2,50

Al deze kosten samen geven de jaarlijkse operationele kosten of werkingskosten voor een pyrolyse-installatie. Concreet hebben we voorbehandelingskosten van € 559.071, vaste operationele kosten van € 551.468, personeelskosten ten belope van € 303.265, jaarlijkse elektriciteitskosten van € 67.105, kosten voor de aankoop van koelwater van € 492.700 en kosten voor de aankoop van stikstof van € 419.408. Zoals blijkt uit onderstaande tabel zijn de totale jaarlijkse werkingskosten gelijk aan € 2.393.017.

Tabel 37: Operationele kosten pyrolyse

werkingskosten pyrolyse	€ 2.393.017
Voorbehandelingskosten	€ 559.071
VOK	€ 551.468
Personeelskosten	€ 303.265
energiekosten	€ 67.105
kosten voor koelwater	€ 492.700
stikstofgas	€ 419.408

Nu we beide kostencomponenten van pyrolysechar, afschrijving op investeringskosten en jaarlijkse werkingskosten, bepaald hebben, kunnen we hieruit trachten de kosten voor 1 ton pyrolysechar te schatten. Hier maken we de belangrijke assumptie dat we de kosten van het pyrolyseproces verdelen over de eindproducten volgens massarendement. Omdat we de gasfractie opgebruiken aan de verwarming van de reactor, stellen we dat deze fractie niet meer bestaat na pyrolyse. De enige 2 eindproducten die dan van tel zijn, zijn de oliefractie en de charfractie. Deze ingreep doen we omdat er geen energiekost geteld wordt voor de

verwarming van de reactor. Indien deze kost wel was opgenomen zou de gasfractie wel als derde eindproduct fungeren.

Beide rendementen van char en olie dienen dus herrekend te worden zodat zij samen terug 100% van de eindproducten omvatten. Zo kan de verdeling van de totale kosten gebeuren over de beide fracties. Voor carbonisatie op 300°C is er een charrendement van 37% en een olierendement van 43% verondersteld. Het absolute aandeel van beide producten is dus gelijk aan 80% van de initiële massa van de biomassa. Deze 80% wordt verondersteld nu 100% van de eindproducten te zijn. Het resulterende kostenaandeel voor char is bijgevolg $37\% * \frac{100}{80} = 46,68\%$. Voor olie is dit aandeel bijgevolg $100\% - 46,68\% = 53,32\%$.

De jaarlijkse productiekost van char is dus $46,68\% * € 2.983.032,93 = € 1.392.479,77$. Om te weten wat de kost van één ton char is, moeten we deze totaalkost nog delen door de jaarlijkse productie aan char. Bij een rendement van 37% voor de pyrolysechar is er een jaarlijkse productie van 7.759,05 ton char. De kost van € 1.392.479,77 moet dus verdeeld worden over deze jaarlijkse charproductie van 7.759,05 ton. De productiekost van één ton pyrolysechar kunnen we bijgevolg schatten als zijnde $\frac{€1.392.479,77}{7.759,05} = € 179,47$. Dit is de kostprijs van de carbonisatiestap. De € 1.392.479,77 is bijgevolg de jaarlijkse charkost. Deze nemen we in zijn geheel op als jaarlijkse grondstofkost in de berekening van de activatiekost.

Tabel 38: Berekening kostprijs pyrolysechar

kostprijs per ton char	€ 179,47
annuïteit investering	€ 590.016,16
jaarlijkse werkingskosten	€ 2.393.016,77
totale jaarlijkse kosten	€ 2.983.032,93
rendement char op nuttige fractie	46,68%
jaarlijkse kost toe te schrijven aan char	€ 1.392.479,77
totale jaarlijkse productie char (ton)	7.759,05

8.3.2 Kostprijs fysisch geactiveerde kool

Voor een fysisch activatieproces wordt de carbonisatiestap die net gesimuleerd is, gevolgd door een (fysisch) activatieproces onder stoom. De kosten voor deze stap in de productie werden reeds gedetailleerd besproken in de economische analyse van fysisch geactiveerde pyrolysechar. De analyse werd analoog aan de pyrolyse berekend met twee kostencomponenten. Deze twee componenten zijn wederom de investeringskosten en werkingskosten. Deze kosten worden vervolgens opnieuw herleid naar productiekosten op jaarbasis door te rekenen met de jaarlijkse operationele kosten als werkingskosten en de jaarlijkse afschrijving op de investeringskosten.

Voor de investering zijn deze kosten identiek aan deze uit de case van fysische activatie met uitzondering van de rookgasreiniger. De investeringskost bedraagt dan € 4.411.869,86 voor een reactor met een geschatte levensduur van 20 jaar. De componenten van deze investeringskost zijn terug te vinden in onderstaande tabel. De investeringskost die we ten laste kunnen leggen van één gebruiksjaar is ook hier te berekenen door de annuïteit voor één jaar te berekenen.

Tabel 39: Investeringskosten activatie

investeringskosten	€ 4.411.869,86
investeringskosten reactor	€ 3.728.470,73
koeler voor actieve kool	€ 195.161,06
opslag	€ 405.849,08
screening en verpakking	€ 82.388,98

De tweede kostencomponent omvat de jaarlijkse werkingskosten. Deze worden eveneens analoog berekend aan de case van fysische activatie met één grote uitzondering. Om de kostprijs van char te verrekenen worden nu wel grondstofkosten in rekening gebracht voor pyrolysechar. Hiertoe werd de berekening in voorgaand punt voor de kostprijs van pyrolysechar opgenomen. De werkingskosten die we overnemen uit de activatiecase bedragen € 1.277.729,52. Hiervan zijn de vaste operationele kosten voor de rookgasreiniger reeds afgetrokken. Bij deze kost moeten we de jaarlijkse charkost van € 1.392.479,77 optellen. De jaarlijkse operationele kosten voor de activatiestap bedragen dan € 2.670.209,29.

Tabel 40: Operationele kosten activatie

totale werkingskosten	€ 2.670.209,29
werkingskosten	€ 1.277.729,52
grondstofkosten char	€ 1.392.479,77

Nu beide kostencomponenten gekend zijn is het tijd om deze samen te voegen om zo de totale jaarlijkse kost voor actieve koolproductie te bepalen. Deze jaarlijkse productiekost is € 3.024.229,14 voor een totale productie van 3.879,52 ton fysisch geactiveerde kool. De productiekost van één ton actieve kool kan nu simpelweg berekend worden als het quotiënt van de totale kostprijs gedeeld door de jaarlijkse productie. Deze éénheidskost is € 779,54.

Tabel 41: kostprijs per ton fysisch geactiveerde kool

kost per ton AK fysisch	€ 779,54
afschrijving investering	€ 354.019,85
jaarlijkse werkingskosten	€ 2.670.209,29
<u>totale jaarlijkse productiekosten AK</u>	€ 3.024.229,14
# ton AK	3.879,52

8.3.3 Kostprijs chemisch geactiveerde kool

Nu de productiekost van één ton fysische actieve kool berekend is, kunnen we met behulp van de eerder gevonden verhouding tussen de kostprijzen van beide activatiemethodes de productiekost van één ton chemische actieve kool schatten. Deze ratio hebben we afgeleid uit tabel 28 en bedraagt 1,5. De kost voor chemische activatie zal dus bij benadering 50% hoger liggen dan de kost voor fysische activatie. Om de kost van één ton chemisch geactiveerde kool te berekenen, vermenigvuldigen we de productiekost van € 779,54 voor fysische activatie met deze verhouding. De kost om één ton chemisch geactiveerde kool te maken is dus € 1.169,30.

Tabel 42: productiekost per ton chemische activatie

Kosten Chemische activatie (per kg)	€ 1.169,30
1 kg fysische AK	€ 779,54
ratio Chemisch vs. Fysisch	1,5

Om een investeringsanalyse uit te voeren met de NCW methode is het noodzakelijk om de productiekost op te splitsen in een jaarlijkse investeringskost en een productie- of werkkost. Omdat we enkel weten wat het totaal van deze beide kostencomponenten is, moeten we een manier zoeken om de totaalkost op een realistische wijze op te splitsen.

Uit een studie van Stavropoulos et al.,(2009) kunnen we voor enkele installaties data halen waarin de productiekost van chemische activatie op basis van enkele typische grondstoffen volledig uitgesplitst wordt. Zo vinden we informatie voor chemisch geactiveerde kool op basis van bandenafval, hout, pet coke, carbon black, houtskool en ligniet. Voor al deze grondstoffen hebben we de som berekend van beide kostencomponenten. Vervolgens is het aandeel van de productiekost in deze totaalkost berekend. Het aandeel van de investeringskosten in de totale kosten is bijgevolg "1 – het aandeel van de productiekosten".

We zien dat het aandeel van de productiekost zeer stabiel is. De beide extremen zijn namelijk 83,8% voor het laagste en 85,9% voor het hoogste aandeel. Gemiddeld zien we een percentage van 84,9% voor het aandeel van de productiekosten ten opzichte van de totale productiekosten. Een samenvatting van de berekeningen is weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 43: Verhouding investeringskosten vs. operationele kosten

uitsplitsing totale productiekosten voor chemische activatie				
grondstof	investering	productiekost	totale kost	% productiekost
bandenafval	550.359	2.843.394	3.186.329	83,8%
hout	505.179	2.729.971	3.044.754	84,4%
pet coke	328.778	1.915.351	2.120.216	85,3%
carbon black	276.655	1.690.988	1.863.375	85,9%
houtskool	333.196	1.934.733	2.142.351	85,3%
ligniet	467.806	2.550.636	2.842.131	84,5%
Gemiddelde				84,9%

We bepalen eerst de initiële investeringskost aan de hand van de totale productie en de productiekost per ton. De totale productie kan volgens onderzoek van Stals, (2010) berekend worden aan de hand van een rendement van 42% op de charfractie. Het charrendement van carbonisatie op 300°C bedraagt 37%. Als we van deze fractie 42% nemen, geeft dit een totaal rendement van 15,54% op de biomassa. Aangezien de jaarlijkse instroom aan biomassa 21.000 ton bedraagt, is de jaarlijkse output chemisch geactiveerde kool gelijk aan 3258,8 ton. De éénheidsprijs van één ton chemische actieve kool hebben we vastgelegd op € 1.169,3. De jaarlijkse productiekost is dan gelijk aan 3258,8 * € 1.169,3 = € 3.810.528,72.

Tabel 44: Jaarlijkse productiekost chemisch geactiveerde kool

jaarlijkse kost	€ 3.810.528,72
rendement AK	15,54%
totale productie	3258,80
kost per ton AK	€ 1.169,30

De werkingskost is dan gelijk aan 84,9% van dit bedrag, zijnde € 3.234.295,05 per jaar. De jaarlijkse annuïteit op de investering is bijgevolg 15,1% van de totale kosten, oftewel € 576.233,67. Ook deze installatie wordt verwacht 20 jaar mee te gaan. Dit geeft een initiële investeringskost van € 7.181.145,25 als we deze gegevens invullen in volgende formule voor de berekening van de annuïteiten.

$$Annuïteitenfactor = \left(\frac{1 - (1,05)^{-20}}{0,05} \right) = 12,46$$

Op basis van deze initiële investering en werkingskosten kan vervolgens een Netto Contante Waarde model opgesteld worden. Het enige dat we nog missen om de NCW te gaan berekenen is uiteraard de opbrengst.

Tabel 45: Opsplitsing investeringskosten en operationele kosten voor chemische activatie

Opsplitsing werkingskost en annuïteit	
<u>werkingskost</u>	<u>€ 3.234.295,05</u>
jaarlijkse annuïteit	€ 576.233,67
annuïteitsfactor	12,46
<u>Initiële investeringskost</u>	<u>€ 7.181.145,25</u>

8.3.4 Opbrengst chemisch geactiveerde kool

Deze verkoopprijs hangt van dezelfde factoren die besproken zijn in hoofdstuk drie. Deze factoren zijn de interne oppervlakte, de poriegrootte en het totale porievolume. Onderzoek van Stals (2011) geeft aan dat chemisch geactiveerde actieve kool uit fyto-remediatiwilg een actieve kool van superieure kwaliteit geeft. De gemiddelde commerciële actieve kool voor diverse toepassingen heeft een interne oppervlakte van 800 à 1000 m²/gram (Stavropoulos & Ioannidou., 2011).

Voor de chemisch geactiveerde kool meet Mark Stals echter een waarde van 3880 m²/gram en een totaal porievolume van 891cm³/gram. De gemiddelde specifieke oppervlakte van commerciële actieve kool is echter maar 800-1000 m² per gram. De gevonden oppervlakte van de chemisch geactiveerde kool is dus ongeveer vier keer zo groot als voor commerciële

actieve kool. We kunnen dus stellen dat een actieve kool met deze kwaliteitskenmerken van superieure kwaliteit is ten opzichte van de gemiddelde commerciële actieve kool.

Om deze reden is het heel moeilijk om op zulk een actieve kool een verkoopwaarde te klevan. We gaan ervan uit dat de actieve kool hoger gewaardeerd zal worden dan de € 2000 per ton die men als gemiddelde verkoopprijs neemt voor commerciële actieve kool. Ondanks dat de kwaliteit van deze actieve kool zeer hoog ingeschat wordt, verkiezen we een pessimistische schatting om geen illusies te wekken in verband met de potentiële waarde ervan.

Uit onderzoek van Ioannidou & Zabaniotou (2007) bleek immers dat de range in verkoopprijzen van chemisch geactiveerde kool zich uitstrekt van 2500 tot 15000 euro/ton. Deze range is zo groot dat een accurate schatting onmogelijk wordt. Een pessimistische schatting is bijgevolg de enige optie die we hebben zonder bijkomend onderzoek. De prijs wordt voorlopig gezet op €3000/ton om in beperkte mate rekening te houden met de kwaliteit. In de sensitiviteitsanalyse die nog zal worden uitgevoerd, gaan we in deze brede range kijken welke verkoopprijs zou moeten gehaald worden om een hogere NCW te halen voor chemische activatie dan voor fysische activatie.

8.4 Netto Contante Waarde

Op basis van de kosten- en opbrengsteninformatie kan ook voor deze verwerkingsmethode een kasstromentabel opgesteld worden. Vertrekkende vanaf deze tabel is het dan mogelijk om voor de investering in een verwerkingsinstallatie voor chemische activatie, de NCW te berekenen. Uit de tabel die hieronder is bijgevoegd kunnen we een NCW van € 28.734.314 afleiden. Dit is lager dan de NCW voor de combinatie van activatie en WKK. Men zou dus kunnen vermoeden dat verwerking met activatie en WKK meer opbrengt dan chemisch activeren. De volledige kasstromentabel om tot deze NCW te komen vindt u in bijlage 4 In het volgende hoofdstuk zetten we de economische analyse verder.

Tabel 46: Berekening NCW chemische activatie

ZONDER grondstofkost	jaar 0	jaar 1	jaar 2	jaar 3
TOT opbrengsten		€ 9.776.400	€9.776.400	€ 9.776.400
initiële investering	-€ 7.181.145			
TOT kosten		€ 4.282.795	€ 4.282.795,	€ 4.282.795
Future Cashflow (1-t)*(O-K)+ (T*D)	-€ 7.181.145	€ 5.493.605	€ 5.493.605	€ 3.562.227
Netto Cashflow discontovoet	-€ 7.181.145	€ 5.040.005 9%	€ 4.623.858	€ 2.750.693
Gecumuleerde CF	€ -7.181.145	€ -2.141.140	€ 2.482.718	€ 5.233.410
NCW	€ 28.734.314			

9 Economische analyses

9.1 Vergelijking Netto Contante Waardes

We moeten echter oppassen voor een valkuil wanneer we de NCW van beide opties gaan vergelijken. Voor de productie van chemische actieve kool vertrekt men van biomassa. Fysische activatie en WKK daarentegen bouwen voort op de eindproducten van pyrolyse, char en bio-olie. Deze vergelijking is er dus spreekwoordelijk één van appels en peren.

Om dit probleem op te lossen volstaat het om beide analyses te laten vertrekken vanaf eenzelfde grondstof. We verkiezen om beide modellen terug te brengen tot biomassa en de kost voor biomassa in te sluiten in de analyses zodat een rendabiliteitsanalyse bekomen wordt van het totale proces. Voor de chemische activatie volstaat het dan om een grondstofkost toe te voegen voor de biomassa. Deze kost is, inclusief een kleine winstmarge voor de landbouwer, € 50 per ton droge stof (Voets & Bloemen, 2010). Door toevoeging van een jaarlijkse kost van 20.970,4 ton * € 50/ton = € 1.048.520 wordt deze aanpassing op simpele wijze gerealiseerd. De aangepaste tabel is hier weergegeven:

Tabel 47: Berekening NCW chemische activatie met grondstofkosten

MET grondstofkost	jaar 0	jaar 1	jaar 2
opbrengsten		€ 9.776.400	€ 9.776.400
initiële investering	€ -7.181.145		
werkingskosten activatie		€ 4.282.795	€ 4.282.795
grondstofkosten		€ 1.048.520	€ 1.048.520
TOT kosten		€ 5.331.315	€ 5.331.315
Future Cashflow $(1-t)*(O-K)+(T*D)$	€ -7.181.145	€ 4.445.085	€ 4.445.085
Netto Cashflow	€ -7.181.145	€ 4.078.060	€ 3.741.339
discontovoet		9%	
Gecumulerde cashflows	€ -7.181.145	€ -3.103.085	€ 638.254
NCW	€ 21.712.761		

We zien dat de NCW door toevoeging van de grondstofkosten daalt naar € 21.712.761. Dit wil zeggen dat verwacht wordt dat de verwerking van pyrolysehout rendabel is bij verwerking door chemische activatie. De volledige kasstromentabel tot en met jaar 20 vindt u in bijlage 5 . Nu dient het andere NCW model nog aangepast te worden.

Voor het model met fysische activatie en WKK ligt de situatie iets anders. Voor dit verwerkingsproces vertrekken we immers van de eindproducten van pyrolyse. De kosten voor de pyrolysestap moeten we daarom nog doorrekenen in de analyse bovenop de grondstofkosten. Hiervoor baseren we ons op de productiekosten voor pyrolyse die we reeds in het vorige hoofdstuk berekend hebben in de kostenanalyse voor chemisch geactiveerde kool. Uit het economisch model kan een jaarlijkse pyrolysekost afgeleid worden van € 2.983.032,93. Deze kost voegen we toe aan de jaarlijkse werkingskosten bovenop de grondstofkost van biomassa van € 1.048.520. We berekenen het model met de rendementen die we verwachten bij een pyrolysetemperatuur van 250°C om de economische analyse te optimaliseren. De tabel is hierna weergegeven:

Tabel 48: Berekening NCW fysische activatie en WKK met inbegrip van grondstofkost pyrolysechar

MET grondstofkost	jaar 0	jaar 1	jaar 2	jaar 3
Opbrengsten AK		€ 9.004.690	€ 9.004.690	€ 9.004.690
Opbrengsten WKK		€ 2.726.494	€ 2.726.494	€ 2.726.494
TOT opbrengsten		€ 11.731.184	€ 11.731.184	€ 11.731.184
investeringskosten AK	€ 7.646.087	€ 0	€ 0	€ 0
investeringskosten WKK	€ 1.486.129	€ 0	€ 0	€ 0
werkingskosten AK		€ 1.656.929	€ 1.656.929	€ 1.656.929
werkingskosten WKK		€ 572.924	€ 572.924	€ 572.924
besparing elektriciteitskosten		€ -115.260	€ -115.260	€ -115.260
grondstofkosten		€ 4.031.553	€ 4.031.553	€ 4.031.553
TOT kosten		€ 6.146.147	€ 6.146.147	€ 6.146.147
Future Cashflow $(1-t)*(O-K)$ + $(T*D)$	€ -9.132.217	€ 5.585.038	€ 5.585.038	€ 3.711.940
present cashflow <i>discontovoet</i>	€ -9.132.217	€ 5.123.888 9%	€ 4.700.814	€ 2.866.299
gecumuleerde CF	€ -9.132.217	€ -4.008.329	€ 692.485	€ 3.558.784
NCW	€ 27.321.685			

We zien dat de NCW in dit geval daalt tot € 27.321.685. De volledige kasstromentabel voor de gehele levensduur van 20 jaar vindt u in bijlage 6. Op basis hiervan kunnen we dus stellen dat het interessanter is om gekoppeld fysische activatie en chemische activatie uit te voeren dan de biomassa chemisch te activeren. Deze stelling moet echter wel wat genuanceerd worden. De verkoopprijs van de chemisch geactiveerde kool is immers relatief pessimistisch ingeschat. Door de brede range aan potentiële verkoopwaardes van chemisch geactiveerde kool zou het immers best mogelijk kunnen zijn dat chemische activatie uiteindelijk toch meer

opbrengt dan pyrolyse en fysische activatie gekoppeld aan WKK. Om te voorzien in deze en andere omstandigheden voeren we in het volgende punt een sensitiviteitsanalyse uit op een aantal cruciale parameters binnen de economische modellen. Aan de hand van de gevoeligste parameters voeren we een aantal scenarioanalyses uit om te anticiperen op bepaalde marktomstandigheden die zich zouden kunnen voordoen op deze variabelen in het model.

9.2 Intern rendement

Buiten de NCW hadden we nog een tweede maatstaf gezien die kan gebruikt worden om een investering te beoordelen. Dit is het intern rendement of de IRR. De waarde die dit rendement aanneemt is het verwachte jaarlijkse rendement op het geïnvesteerde kapitaal. Deze kan met een functie in Excel berekend worden maar kan ook manueel met een doelzoekfunctie gebeuren. Men zoekt dan de discontovoet die men moet gebruiken om een $NCW = 0$ te bekomen. Voor de investering in een installatie voor fysische activatie gekoppeld aan WKK verwachten we een return van 52,10% op jaarbasis. Dit is een zeer positief gegeven omdat het rendement op het geïnvesteerde kapitaal enorm hoog is.

Voor Chemische activatie vinden we daarentegen een intern rendement van 52,38%. De beide rendementen zijn dus nagenoeg identiek. Omdat de rente op het geleende kapitaal reeds in de discontovoet zit, is de investering in fysische activatie en WKK interessanter omdat deze wel een hogere NCW heeft ondanks een licht lager intern rendement. We moeten immers geen kapitaalkost meer in rekening brengen en met de hoogste NCW heeft de investeerder na de termijn van 20 jaar meer geld ontvangen dan met een hoger rendement. We gaan er dan wel vanuit dat er onbeperkt kapitaal kan geleend worden bij banken. We verkiezen bijgevolg door de quasi gelijke rendementen, een beoordeling op basis van NCW.

9.3 Sensitiviteitsanalyse

Via het programma Crystal Ball dat kan ingevoegd worden in Excel, voeren we een sensitiviteitsanalyse uit. Hiertoe selecteren we de meest onzekere variabelen uit de analyse. Hierbij ligt de focus op variabelen met een grote range aan mogelijke waarden en geschatte variabelen omdat verwacht kan worden dat op deze getallen de grootste foutmarges zitten. Er wordt steeds gebruik gemaakt van een driehoeksverdeling op de variabelen met de basiscase als meest waarschijnlijke waarde, tenzij anders vermeld. De analyse wordt vanaf nu uitgevoerd op basis van pyrolyse op 250°C tenzij anders vermeld.

In de eerste plaats moet rekening gehouden worden met de grote onzekerheid die in de verwachte verkoopprijzen vervat zit. Deze prijzen zouden vrij variabel kunnen zijn en dit is buiten de geproduceerde hoeveelheid, de enige variabele die mee de opbrengsten bepaalt.

Dit is vooral zo voor de verkoopprijs van chemisch geactiveerde kool waar in principe een interval van € 2500 tot € 15.000 zou kunnen gebruikt worden. Voor fysisch geactiveerde kool speelt dit minder. We nemen door de stabiele commerciële kwaliteit slechts een interval van € 100 aan beide zijden van de verkoopprijs. De geproduceerde output is eveneens belangrijk. We laten deze variabele echter achterwege in de sensitiviteitsanalyse omdat we verwachten dat deze de variabiliteit van de andere variabelen zal onderdrukken.

In de tweede plaats is de exacte energie-inhoud van de pyrolyseolie onduidelijk. Onderzoek houdt de range van de HHV op 15-19 GJ/ton. Door de grote output echter kan verwacht worden dat kleine verschillen in deze HHV een relatief grote impact kunnen hebben op de rendabiliteit. Eens te meer omdat dit effect heeft op de analyse gedurende de totale levensduur van 20 jaar. In de WKK stellen we eveneens een interval op voor de verkoopprijs van groenestroomcertificaten met de gemiddelde marktwaarde van € 103/certificaat als basiswaarde en € 100 en € 105 als onder- en bovengrens. Dit naar aanleiding van het hoge aantal verkregen certificaten.

Verder kunnen we de vaste operationele kosten gebruiken als buffer voor over- of onderschatting van de kosten. Als basiswaarde leggen we deze variabele via gegevens uit de literatuur vast op 7%. We voorzien echter een marge door een range te nemen van 6% tot 10% zodat we vooral anticiperen op onverwachte kosten in plaats van onverwachte meevallers.

Activatie is ook behoorlijk energie-intensief. De prijs van € 0,25 zou gezien de huidige marktomstandigheden aan de lage kant kunnen zijn. We anticiperen bijgevolg op een prijsstijging van aardgas door een uniforme range in te bouwen van € 0,25 – € 0,5 per m³ aardgas.

Verder vergroten we het bereik van de kost voor pyrolyse die gebruikt wordt in de grondstofkost voor de fysische activatie en WKK enerzijds en in de productiekost voor chemische activatie anderzijds. Omdat deze kost ook elk productiejaar speelt nemen we deze op met een marge van 10% naar boven en naar beneden.

Ten slotte worden de investeringskosten van reactor en scrubber van een marge van 10 % voorzien. Aangezien deze kosten éénmalig zijn, valt het te verwachten dat de variatie in NCW door deze investeringskosten relatief klein is. We hebben nu negen variabelen geïdentificeerd waarvan verwacht kan worden dat ze enige variatie in NCW kunnen veroorzaken. Zeven variabelen hiervan hebben invloed op de NCW van pyrolyse gevolgd door fysische activatie en WKK. Gezien de alternatieve kostenberekening voor chemische activatie zonder eigen kostencomponenten, zijn daar slechts drie variabelen die de NCW kunnen beïnvloeden. Dit zijn de verkoopprijs van chemisch geactiveerde kool, kosten van

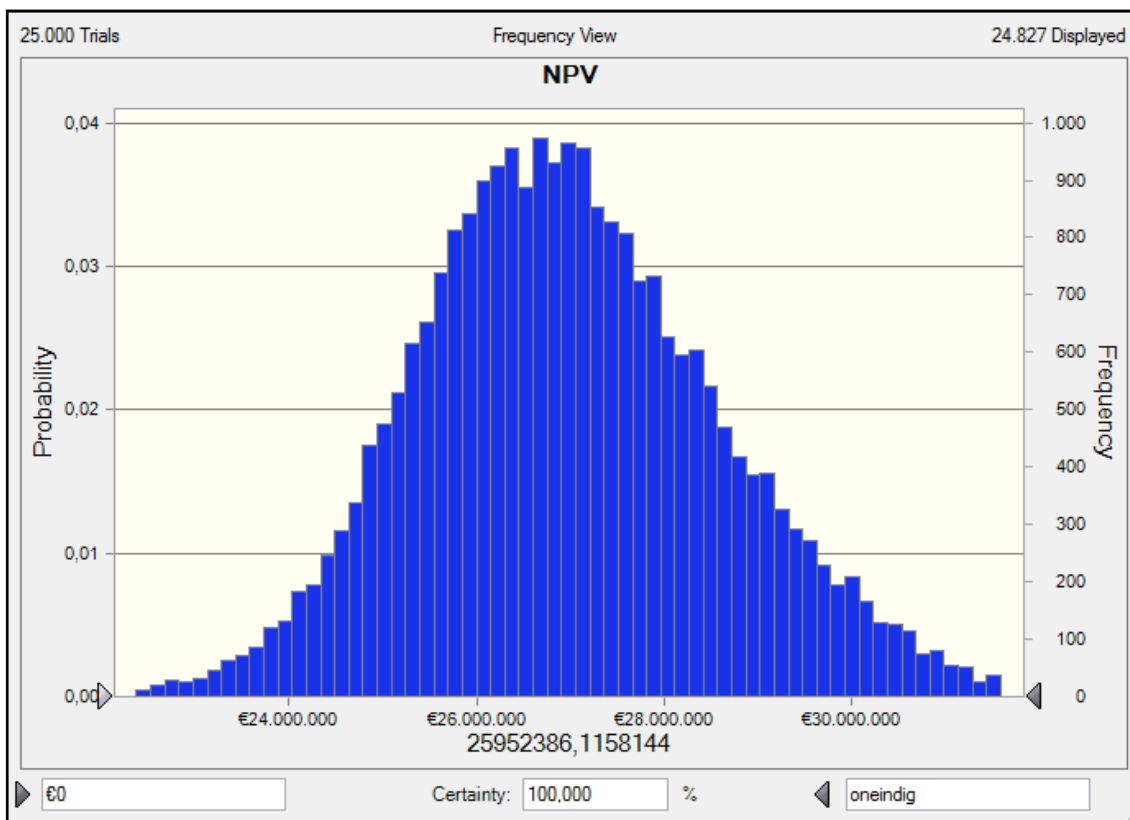
pyrolyse en de investeringskosten voor een pyrolyse reactor. Een overzicht van de gecreëerde intervallen vindt u in onderstaande tabel.

Tabel 49: Oplijsting variabelen en ranges voor Monte Carlo Analyse

Variabele	ondergrens	meest waarschijnlijk	bovengrens
Verkoopprijs AK fysisch	1900	2000	2100
HHV bio-olie	15	16,25	19
VOK	6%	7%	10%
Verkoopprijs AK chemisch	2500	3000	4000
Gasprijs	0,25	0,5	0,5
Reactor	- 10%	4.851.137,63	+ 10%
Scrubber	- 10%	2.794.949,86	+ 10%
Kosten pyrolyse	- 10%	2.983.032,93	+ 10%
Prijs GSC	100	103	105

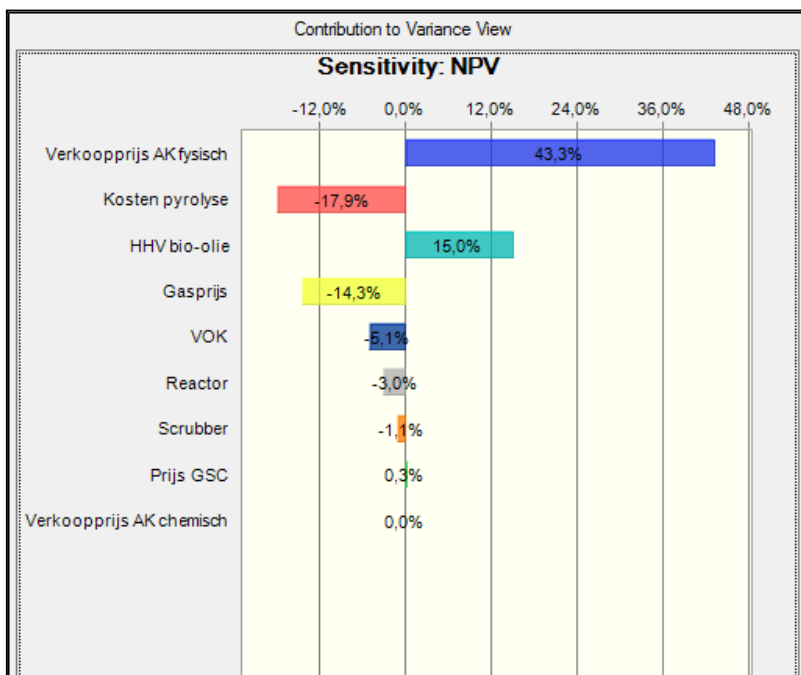
Als meer dan 99% van de simulaties een positieve NCW hebben, kan geconcludeerd worden dat het een interessante investering is. Een analyse wordt uitgevoerd met 25000 simulaties om een mooi egale grafiek te bekomen. Hieronder vindt u de verdeling van deze simulaties.

Figuur 6: Verdeling uit Monte Carlo-analyse van NCW fysieke activatie met WKK



Wat dadelijk opvalt is dat de verdeling een mooie Gauss-curve vertoont. Dit is een teken dat de bekomen resultaten mooi normaal verdeeld zijn. Ook is de verdeling tamelijk compact, dit duidt op een vrij consistent resultaat met resultaten voor de NCW, grofweg geschat, tussen de 22 en de 32 miljoen euro. Er is ook geen enkele negatieve waarde. We verwachten dus een zeer positieve NCW zelfs indien de kosten en opbrengsten te positief zouden zijn geschat in de basiscase. Naar aanleiding van deze resultaten zijn we uiteraard nieuwsgierig naar de oorzaak van de variantie die toch is opgetreden. Met andere woorden, in welke mate zijn de gekozen variabelen verantwoordelijk voor de afwijking van de NCW. De resultaten van de gevoeligheid van de verschillende variabelen staan in onderstaande figuur weergegeven.

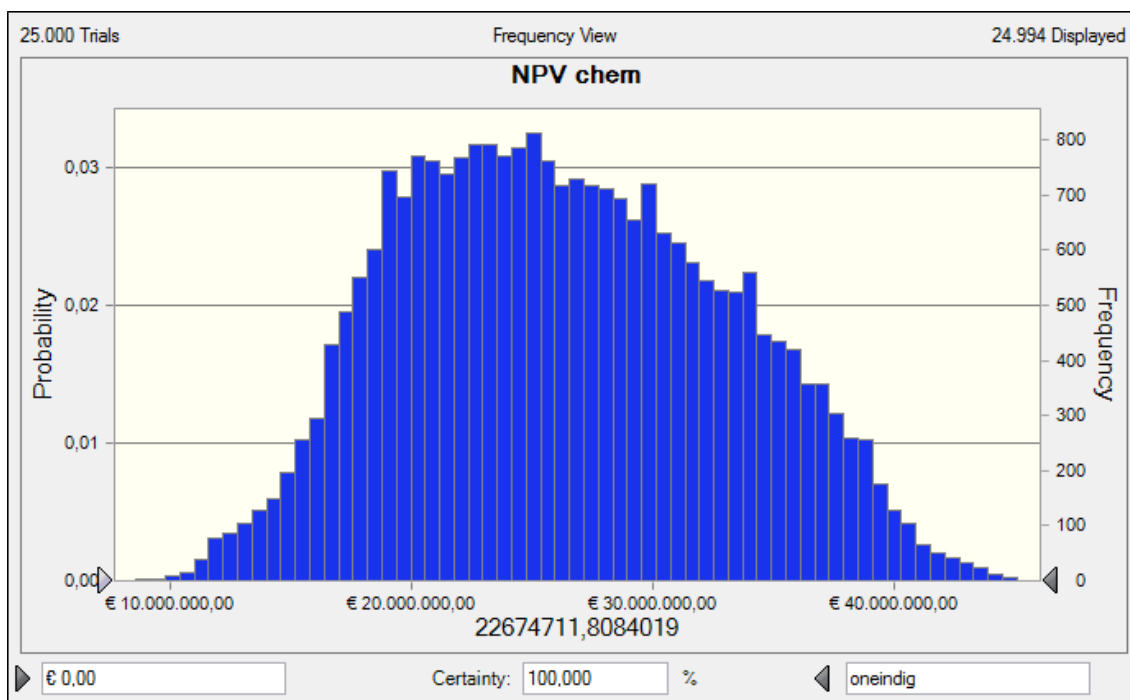
Figuur 7: Bijdrage van diverse variabelen aan de variabiliteit van de Monte Carlo-analyse



Er blijkt een duidelijk verschil te bestaan in de sensitiviteit van de variabelen onderling. Niet erg verrassend is dat de verkoopprijs van de Actieve kool de belangrijkste variabele is, ondanks het vrij kleine interval dat we voor de verkoopprijs voorzien hadden. Vervolgens zijn er drie variabelen die het resultaat in min of meer gelijke mate beïnvloeden. Dit zijn de pyrolysekosten, de HHV van pyrolyseolie en de gasprijs. Ten slotte hebben de vaste operationele kosten nog een kleine negatieve invloed op de NCW. De investeringskosten hebben zoals verwacht werd slechts een kleine invloed op het resultaat. Dit ligt zoals eerder gezegd aan het éénmalige karakter van deze kosten. De prijs van GSC is zelfs helemaal niet van invloed op het resultaat, allicht is de range waarin deze marktprijs zich situeert klein genoeg om consistente resultaten te bekomen.

Met de voorgestelde ranges werd eveneens een Monte Carlo analyse uitgevoerd op de NCW van chemische activatie. We hebben de totale productiekost van chemisch geactiveerde kool nog als een extra variabele toegevoegd. Dit komt door de manier waarop de kostprijs voor chemische activatie berekend is in dit onderzoek. Deze kost is immers gebaseerd op de verhouding met de kostprijs van fysisch geactiveerde kool. In plaats van de meer gebruikelijke marge van 10% aan beide kanten nemen we hiervoor een foutenmarge van 20% aan beide kanten. Zo zijn we zekerder dat het uiteindelijke resultaat bij de realiteit zal aanleunen. De verdeling van de 25.000 runs zijn weergegeven in onderstaande figuur.

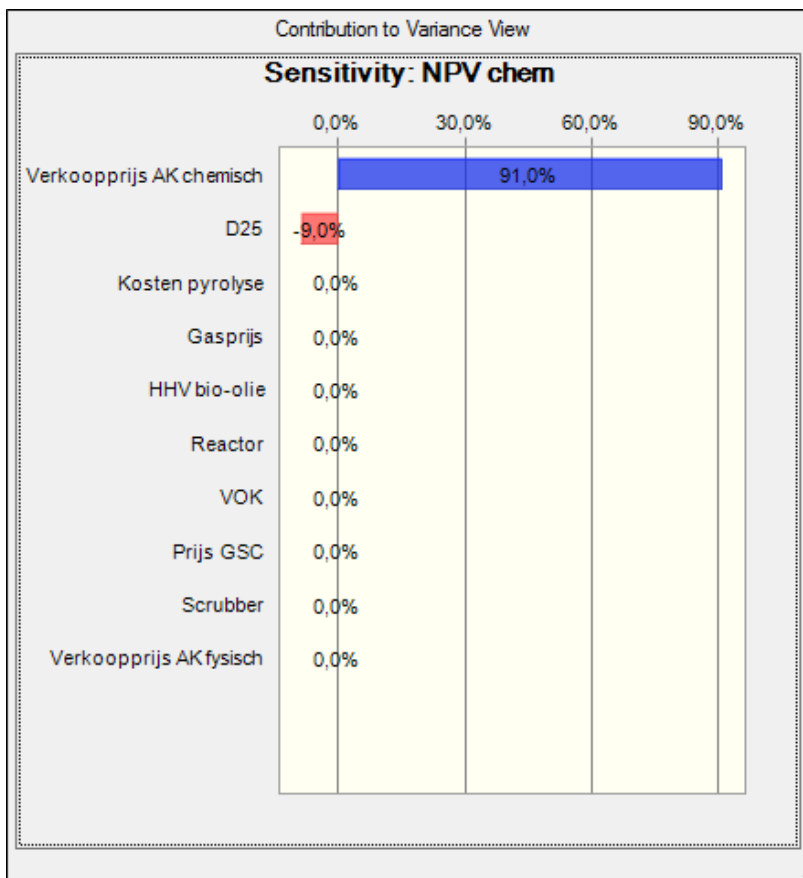
Figuur 8: Verdeling uit Monte Carlo-analyse van NCW chemisch geactiveerde kool



We zien op deze grafiek dat de gemiddelde waarde van een gelijke grootteorde is dan bij de grafiek voor fysische activatie en WKK. De verdeling is echter veel grilliger en minder compact. We kijken eerst ook even naar de grafiek met de gevoeligheden van de variabelen afzonderlijk.

In onderstaande grafiek zien we duidelijk dat de onzekerheid met betrekking tot de verkoopprijs van dit type actieve kool een zeer belangrijke invloed heeft op de variatie in NCW. Dit ondanks dat we zelfs maar een klein deel van de totale range in beschouwing hebben genomen omdat de variatie van andere variabelen waarschijnlijk zelfs niet meer zichtbaar zou zijn in het geval we wel de volledige range zouden genomen hebben. Met de relatief kleine range die we gekozen hebben voor de verkoopprijs blijkt dat deze variabele meer dan 90% van de variatie in NCW verklaart. De overige 9% is dan te weten aan de vrij ruime marge die we genomen hebben op de totale productiekosten van chemisch geactiveerde kool.

Figuur 9: Bijdrage van diverse variabelen aan de variabiliteit van de Monte Carlo Analyse van chemischgeactiveerde kool.



In het algemeen kan dus gesteld worden dat operationele opbrengsten en kosten een veel grotere invloed uitoefenen op de uiteindelijke rendabiliteit dan de investeringskosten. We gaan om de analyse te beëindigen nog enkele variabelen aanpassen aan bepaalde marktsituaties die zouden kunnen voorkomen en waarvan we verwachten dat ze een behoorlijke invloed uitoefenen op het resultaat. Dit doen we aan de hand van scenario-analyses.

9.4 Scenarioanalyse

Alvorens conclusies te formuleren bekijken we nog enkele scenario's waarvan het niet ondenkbaar is dat ze zouden kunnen voorvallen maar die moeilijker te vatten zijn in een sensitiviteitsanalyse. Voor enkele situaties bekijken we wat er gebeurt onder de assumpties die telkens genomen worden.

9.4.1 Hoeveel landbouwers moeten in het project stappen?

Beginnen doen we met de variabele die zonder twijfel het belangrijkste is in de hele analyse. Dit is de aanvoer van biomassa door landbouwers die mee in het fyto-remediatieproject stappen. Tot nog toe zijn we er bij de analyse van uitgegaan dat elke landbouwer wil overschakelen op fyto-remediatieteelten. De kans bestaat echter dat een bepaald percentage landbouwers wil verderdoen met de huidige veeteelt en veevoederteelt. Indien er minder landbouwers in het project stappen, verdwijnen er dus onvermijdelijk bepaalde schaalvoordelen door de lagere instroom van biomassa. Welk percentage van de landbouwers moet er nu eigenlijk instappen om een NCW van € 0 te bekomen?

Via de functie 'doelzoeken' in Excel zoeken we hoeveel ton biomassa jaarlijks nodig is om een NCW van 0 euro te bekomen. Het resultaat van deze zoekactie geeft een jaarlijkse massa van 5794 ton fyto-remediatiehout. Dit wil zeggen dat een kleine 28% van de landbouwers slechts moet deelnemen om de verwerking rendabel te laten verlopen. Er moet dan natuurlijk wel de bemerking gemaakt worden dat ook slechts 28% van de te remediëren gronden aangepakt worden.

9.4.2 Welke prijs kunnen we aan de landbouwers geven per ton wilgenhout indien iedereen instapt in het project?

De hoge NCW stelt ons in staat een hogere prijs te geven aan de landbouwer om zo te stimuleren dat zoveel mogelijk landbouwers instappen. Als we er nu van uitgaan dat door een hogere verkoopprijs, elke landbouwer de intentie heeft om over te schakelen op fyto-remediatieteelten, kunnen we bepalen welke prijs we in dat geval aan de landbouwers kunnen geven per ton wilgenhout. Deze berekening voeren we analoog uit aan het vorige scenario met behulp van de doelzoeker in Excel. Het resultaat is verrassend hoog indien elke landbouwer instapt. De landbouwer mag dan rekenen op een verkoopprijs van € 262,88 per ton droge stof. De productiekost die becijferd is door Voets & Bloemen, (2010) bedraagt echter slechts 47 euro per ton droge stof. Deze meer dan behoorlijke winstmarge voor de landbouwer lijkt een sterke stimulans om elke landbouwer die in aanmerking komt voor fyto-remediatieteelten te laten instappen in het project.

9.4.3 Welke verkoopprijs van chemische actieve kool zorgt voor een break-even met fysische activatie/WKK?

We hebben reeds meermaals de grote range van verkoopprijzen van chemisch geactiveerde kool besproken. Er heerst dus grote onzekerheid omtrent de exacte verkoopwaarde van deze actieve kool. Omdat deze variabele een grote invloed heeft op de rendabiliteit van het chemisch activatieproces, lijkt het een interessante oefening om eens na te gaan wat de verkoopprijs van deze chemisch geactiveerde kool zou moeten zijn om een NCW te krijgen die even groot is als voor fysische activatie en WKK. We zoeken als het ware de trade-off verkoopprijs vanaf wanneer we zouden moeten overschakelen van fysische activatie/WKK naar chemische activatie.

Deze berekening verloopt eveneens op basis van een doelzoeker die deze keer de verkoopprijs gaat berekenen voor chemisch geactiveerde kool zodat de NCW van beide verwerkingstechnieken gelijk is. Deze verkoopprijs is € 3258,8 en ligt niet zover van de 3000 euro die verondersteld wordt in de basiscase. Dit is echter niet zo verwonderlijk aangezien de netto contante waardes op zich niet zo heel sterk verschillen in de basiscase, terwijl de verkoopprijs, zeker bij chemisch geactiveerde kool, een zeer gevoelige variabele is. Als de verkoopprijs onder deze waarde zou liggen is het vanuit economisch standpunt beter om pyrolyse uit te voeren en char en olie te verwerken. Is de verkoopwaarde echter hoger dan deze 3258,8 euro, dan zou moeten geopteerd worden voor chemische activatie van de biomassa.

9.5 Aanbevelingen

Tot slot kunnen we uit de gevoerde analyses enkele aanbevelingen doen. Er werd reeds vroeg in het onderzoek opgemerkt dat buiten de louter economische analyse er niet mag vergeten worden dat elke oplossing steeds een ecologisch aspect met zich meedraagt, zowel in positieve als in negatieve zin. Daarom maken we als laatste punt enkele bedenkingen die duidelijk maken waarop moet gelet worden voor het afwegen van de mogelijke alternatieven. Als sluitstuk van het onderzoek, geven we nog enkele punten mee die aanleiding kunnen geven tot verder onderzoek.

9.5.1 Economisch

De economische analyse toonde ons dat zowel de optie chemisch activeren als de optie fysische activatie gekoppeld aan WKK een positieve NCW hebben. Zelfs indien de variabelen te positief zouden zijn ingeschat, geeft de sensitiviteitsanalyse ook voor de meest negatieve scenario's een positieve NCW. De beide mogelijkheden zijn dus interessante investeringen ter verwerking van de pyrolysechar en biomassa. Zeker wanneer we gaan vergelijken met de

hoge kost die moest betaald worden om van de char af te geraken indien deze als afval bestempeld wordt.

Wel moet opgemerkt worden dat de verkoopprijs van zowel fysisch als chemisch geactiveerde char een zeer belangrijke rol speelt in de investeringsbeslissing. Deze kost is moeilijk in te schatten en bepaalt de hoogte van de NCW en de trade-off tussen fysische en chemische activatie. Aan de hand van een zo realistisch mogelijke prijsschatting kunnen we stellen dat de trade-off tussen fysische en chemische activatie op een verkoopprijs van ongeveer € 3260 per ton chemisch geactiveerde kool ligt als we de potentiële verkoopprijs van de fysische actieve kool als vast beschouwen op € 2000/ton.

9.5.2 Ecologisch

Uit de aanbevelingen van prof. Jan Yperman bleek eerder al dat activeren over het algemeen een ecologisch meer verantwoorde oplossing zou zijn dan de biomassa of char in te zetten als hernieuwbare brandstof. Hiervoor worden uiteraard ook geen fossiele brandstoffen gebruikt, maar de koolstof die gedurende de groei door de wilgenbomen is gevangen en vastgezet komt op deze manier terug vrij in de atmosfeer in de vorm van CO₂. We kunnen hier dus spreken van een 'nuloperatie' voor CO₂ in de atmosfeer.

Omdat dit broeikasgas niet echt wenselijk is in deze tijden van klimaatverandering, is activatie een aantrekkelijke optie. Er wordt immers een substantieel deel van de gevangen koolstof in een vaste structuur gehouden na verwerking. Hierdoor creëert men een netto daling van CO₂ in de atmosfeer. Afhankelijk van de maatschappelijke kost van een extra eenheid CO₂ in de atmosfeer, kan bepaald worden in welke mate men rekening zou moeten houden met deze ecologische parameter

9.5.3 Aanbevelingen voor verder onderzoek

De stand van het onderzoek lijkt na dit verkennend onderzoek een solide basis naar een rendabel pyrolyseproces van fyto-remediatiegewassen. Enkele punten zijn tijdens dit onderzoek echter wat aan de kant blijven liggen of waren aan de technische kant om in een economische thesis volledig uit te spitten. Onder deze noemer vallen onder andere de verwerking van het scrubberresidu met stabilisatie van de zware metalen en een grondige technische analyse van actieve kool voor een zo accuraat mogelijk schatting van de potentiële verkoopprijs.

Verder verdient het misschien de aanbeveling om, ondanks de stijgende vraag naar actieve kool, via een marktstudie na te gaan of de aangeboden hoeveelheid actieve kool aan de

marktwensen voldoet. Als blijkt dat maar de helft van de mogelijke productie zou kunnen verkocht worden, moet bekeken worden of verkoop dan nog zinvol is.

Als laatste punt zou het interessant zijn om de maatschappelijke kosten en baten van de verschillende opties eens in kaart te brengen. Zo kan een zo goed mogelijke afweging gemaakt worden tussen enerzijds economische en anderzijds ecologische belangen. De economische belangen zitten dan vervat in de private kosten en baten terwijl de ecologische impact tot uiting komt in de gemeenschappelijke kosten en baten. Indien deze extra kasstromen opgenomen worden in de kasstromentabellen van zowel chemische activatie als fysische activatie gekoppeld aan WKK, krijgen we een totaalbeeld van de impact van een bepaalde verwerkingstechniek.

10 Referentielijst

Anas Nahil, M. & Williams, P. T. (2012). Pore characteristics of activated carbons from the phosphoric acid chemical activation of cotton stalks. *Biomass and Bioenergy*, 37, 142-149.

Baker, S. L. (2000). *Perils of the Internal Rate of Return*. Geraadpleegd op 6 maart 2012, via <http://hspm.sph.sc.edu/COURSES/ECON/Invest/invest.html>.

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 & Sustainable Energy Reviews*, 6, 181-247.

Bridgwater, A. V. (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. [Proceedings Paper]. *Chemical Engineering Journal*, 91(2-3), 87-102.

Bridgwater, A.V. (2011) Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 30, 1-17.

Cagnon, B., Py, X., Guillot, A., Stoeckli, F. & Chambat, G. (2009) Contributions of hemicellulose, cellulose and lignin to the mass and the porous properties of chars and steam activated carbons from various lignocellulosic precursors. *Bioresource Technology*, 100, 292-298.

Carleer Robert, UHasselt, via mondelinge communicatie.

Cogen Vlaanderen. 2006. Basishandboek warmtekrachtkoppeling. Opgevraagd op 10 april, 2012, via http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/wkk_basishandboek-cogen.pdf

CREG. Prijsevolutie Aardgas. Geraadpleegd via: http://www.creg.info/pdf/Tarifs-/G/evolprixg_nl.pdf

Desotec (website). Geraadpleegd via: http://www.desotec.com/NL/actieve_kool/p14/de_chemische_structuur_van_actieve_kool).

Faes, B. (2011). Haalbaarheid van warmtekrachtkoppeling op pyrolyse-olie in de Noorderkempen.

FOD Economie. Vademecum voor de ondernemer. Opgevraagd op 10 december, 2011 via: <http://economie.fgov.be/nl/ondernemingen/vademecum/>

Gasterra. 2008. Opbouw van gasprijzen: Hoe en waarom? Geraadpleegd op 6 januari, 2012, via: http://www.reduses.nl/index.php/download_file/-/view/92/

Girods, P., Dufour, A., Fierro, V., Rogaume, Y., Rogaume, C. Zoulalian, A. & Celzard, A. (2009). Activated carbons prepared from wood particleboard wastes: Characterisation and phenol adsorption capacities. *Journal of Hazardous Materials*, 166, 491-501.

Gitman, L. J., (2004). *Principes van financieel management*. Pearson Benelux

Hu, S.H. (2005). Stabilization of heavy metals in municipal solid waste incineration ash using mixed ferrous/ferric sulfate solution. *Journal of Hazardous Materials*, B123, 158-164.

Ioannidou, O. & Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production – A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 11, 1966-2005

Islam, M. N. & Ani, F. N. Techno-economics of rice husk pyrolysis, conversion with catalytic treatment to produce liquid fuel. *Bioresource Technology*, 73, 67-75.

Jung, C.H., Matsuto, T., Tanaka, N., Okada T. (2004) Metal distribution in incineration residues of municipal solid waste (MSW) in Japan. *Waste Management*, 24, 381-391

Kegels Jan, Departementshoofd Milieu, Umicore Hoboken, via mondelinge communicatie

Koopmans, G.F., Römkens P.F.A.M., Fokkema, M.J., Song, J., Luo, Y.M., Japenga, J. & Zhao, F.J. (2008). Feasibility of phytoextraction to remediate cadmium and zinc contaminated soils. *Environmental Pollution*, 156, 905-914

Kuppens, T., Cornelissen, T., Carleer, R., Yperman, J., Schreurs, S., Jans, M. & Thewys, T. (2010). Economic Assessment of flash co-pyrolysis of short rotation coppice and biopolymer waste streams. *Journal of Environmental Management*, 91, 2736-2747.

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

Lievens, C., Carleer, R., Cornelissen, T., & Yperman, J. (2009). Fast pyrolysis of heavy metal contaminated willow: Influence of the plant part. *Fuel*, 88(8), 1417-1425.

Lima, I. M., McAloon, A. & Boateng, A. A. (2008). Activated carbon from broiler litter: Process description and cost of production. *Biomass and Bioenergy*, 32, 568-572.

Lopez, G., Olazar, M., Artetxe, M., Amutio, M., Elordi, G. & Bilbao, J. (2009). Steam activation of pyrolytic tyre char at different temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85, 539-543

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

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

Molina-Sabio, M. & Rodriguez-Reinoso, F. (2004) Role of chemical activation in the development of carbon porosity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 241, 15-25.

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

OVAM. online te raadplegen via: http://www.ovam.be/jahia/Jahia/cache/bypass-/pid/176?appid=39739_29&appparams=http%3A%2F%2Fwww.ovam.be%2FovamPublicationsWeb_myjahiasite%2FPublicaties&resetAppSession=true#field_39739.

Ould-Idriss, A., Stitou, M., Cuerda-Correa, E.M., Fernández-González, C., Macías-García, A., Alexandre-Franco, M.F. & Gómez-Serrano, V. (2011) Preparation of activated carbons from olive-tree wood revisited. I. Chemical activation with H₃PO₄. *Fuel Processing Technology*, 92, 261-265

Peters, Timmerhaus en West (2004). *Plant design and economics for chemical engineers*. New York, McGrawHill

Poggio, A. & Grieco, E. (2010). Influence of flue gas cleaning system on the energetic efficiency and on the economic performance of a WTE plant. *Waste Management*, 30, 1355-1361.

Pöykiö, R., Nurmesniemi, H. & Keiski R. L., 2010. Heavy metals in flue gas cleaning residue. *Environmental Chemistry Letters*, 8, 295-300.

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

Schröder, E., Thomauske, K., Weber, C., Hornung, A. & Tumiatti, V. (2007). Experiments on the generation of activated carbon from biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 79, 106-111.

Sedman, R. M. & Esparza, J. M. (1991). Evaluation of the public health risks associated with semivolatile metal and dioxin emissions from hazardous waste incinerators. *Environmental Health Perspective*, 94, 181-187.

Sentorun-Shalaby, C., Ucak-Astarlioglu, M.G., Artok, L. & Sarici, C. (2006). Preparation and characterization of activated carbons by one-step steam pyrolysis/activation from apricot stones. *Microporous and Mesoporous Materials*, 88, 126-134.

Solum, M.S., Pugmire, R.J., Jagtoyen, M. & Derbyshire, F. (1995). Evolution of carbon structure in chemically activated wood. *Carbon*, 33, 1247-1254.

Stals, M. (2011). Pyrolysis of heavy metal contaminated biomass: characterization of obtained pyrolysis oils and study of derived activated carbon.

Stals, M., Carleer, R., Reggers, G., Schreurs, S. & Yperman, J. (2010). 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. (2010). 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.

Stavropoulos, G.G. & Zabaniotou, A.A. (2009). Minimizing activated carbons production cost. *Fuel Processing Technology*, 90, 952-957.

Stolarski, J. M., Szczukowski, S., Tworkowski, J., Wróblewska, H. & Krzyznaniak, M. (2011). Short rotation willow coppice biomass as an industrial and energy feedstock. *Industrial Crops and Products*, 33, 217-223.

Timur, S., Cem Kantarli, I., Onenca, S. & Yanik, J. (2010). Characterization and application of activated carbon produced from oak cups pulp. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89, 129-136.

Tlustoš, P., Száková, J., Vysloužilová, M., Pavlíková, D., Weger, J. & Javorská, H. (2007). Variation in the uptake of Arsenic, Cadmium, Lead, and Zinc by different species of willows *Salix* spp. grown in contaminated soils. *Central European Journal of Biology*, 2, 254-275

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. H., & Prins, W. (2010). Fast pyrolysis technology development. *Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofpr*, 4(2), 178-208.

Voets, T. & Bloemen, A. (2010). Vergelijking van vergassing en pyrolyse voor de omzetting van omloophout in warmte en elektriciteit via kosten-batenanalyse.

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*, 30, 1-13.

Yang, J. & Qiu, K. (2011). Development of high surface area mesoporous activated carbons from herb residues. *Chemical Engineering Journal*, 167, 148-154.

Yoder, J., Galinato, S., Granatstein, D., & Garcia-Pérez, M. (2011). Economic tradeoff between biochar and bio-oil production via pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 30, 1-12.

Youcai, Z., Lijie, S. & Guojian, L. (2002). Chemical stabilization of MSW incinerator fly ashes. *Journal of Hazardous Materials*, B95, 47-63.

Yperman Jan, UHasselt, via mondelinge communicatie

Zhao, Y. & Stanforth, R. (2000). Production of Zn powder by alkaline treatment of smithsonite Zn-Pb-ores. *Hydrometallurgy*, 56, 237-249.

11 Bijlagen

11.1 Bijlage 1

ZONDER grondstofkost	jaar 0	jaar 1	jaar 2
opbrengsten		€ 4.823.192	€ 4.823.192
investeringskosten installatie	€ 3.198.722	€ 0	€ 0
investeringskosten scrubber	€ 1.921.735	€ 0	€ 0
personeelskosten		€ 150.884	€ 150.884
vaste operationele kosten		€ 358.432	€ 358.432
energiekosten		€ 301.948	€ 301.948
koelwater		€ 82.694	€ 82.694
stikstof		€ 96.464	€ 96.464
onderhoudskosten gasreiniging		€ 10.997	€ 10.997
TOT kosten		€ 1.001.418	€ 1.001.418
Future Cashflow (1-t) * (O-K) + (T*Afschrijving)	€ -5.120.457	€ 3.821.774	€ 3.821.774
present cashflow	€ -5.120.457	€ 3.506.215	€ 3.216.711
discontovoet		9%	
gecumuleerde CF (jaar 1 tot n)	€ -5.120.457	€ -1.614.242	€ 1.602.469
NPV	€ 20.594.351		
IRR	65,79%		

jaar 3	jaar 4	jaar 5	jaar 6	jaar 7	jaar 8
€ 4.823.192	€ 4.823.192	€ 4.823.192	€ 4.823.192	€ 4.823.192	€ 4.823.192
€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
€ 150.884	€ 150.884	€ 150.884	€ 150.884	€ 150.884	€ 150.884
€ 358.432	€ 358.432	€ 358.432	€ 358.432	€ 358.432	€ 358.432
€ 301.948	€ 301.948	€ 301.948	€ 301.948	€ 301.948	€ 301.948
€ 82.694	€ 82.694	€ 82.694	€ 82.694	€ 82.694	€ 82.694
€ 96.464	€ 96.464	€ 96.464	€ 96.464	€ 96.464	€ 96.464
€ 10.997	€ 10.997	€ 10.997	€ 10.997	€ 10.997	€ 10.997
€ 1.001.418	€ 1.001.418	€ 1.001.418	€ 1.001.418	€ 1.001.418	€ 1.001.418
€ 2.577.115	€ 2.577.115	€ 2.577.115	€ 2.577.115	€ 2.577.115	€ 2.577.115
€ 1.990.006	€ 1.825.693	€ 1.674.948	€ 1.536.650	€ 1.409.770	€ 1.293.367
€ 3.592.475	€ 5.418.168	€ 7.093.116	€ 8.629.766	€ 10.039.536	€ 11.332.903

jaar	jaar	jaar	jaar	jaar	jaar
9	10	11	12	13	14
€ 4.823.192	€ 4.823.192	€ 4.823.192	€ 4.823.192	€ 4.823.192	€ 4.823.192
€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
€ 150.884	€ 150.884	€ 150.884	€ 150.884	€ 150.884	€ 150.884
€ 358.432	€ 358.432	€ 358.432	€ 358.432	€ 358.432	€ 358.432
€ 301.948	€ 301.948	€ 301.948	€ 301.948	€ 301.948	€ 301.948
€ 82.694	€ 82.694	€ 82.694	€ 82.694	€ 82.694	€ 82.694
€ 96.464	€ 96.464	€ 96.464	€ 96.464	€ 96.464	€ 96.464
€ 10.997	€ 10.997	€ 10.997	€ 10.997	€ 10.997	€ 10.997
€ 1.001.418	€ 1.001.418	€ 1.001.418	€ 1.001.418	€ 1.001.418	€ 1.001.418
€ 2.577.115	€ 2.577.115	€ 2.577.115	€ 2.577.115	€ 2.577.115	€ 2.577.115
€ 1.186.575	€ 1.088.601	€ 998.717	€ 916.254	€ 840.600	€ 771.193
€ 12.519.479	€ 13.608.080	€ 14.606.797	€ 15.523.051	€ 16.363.651	€ 17.134.844

jaar	jaar	jaar	jaar	jaar	jaar
15	16	17	18	19	20
€ 4.823.192	€ 4.823.192	€ 4.823.192	€ 4.823.192	€ 4.823.192	€ 4.823.192
€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
€ 150.884	€ 150.884	€ 150.884	€ 150.884	€ 150.884	€ 150.884
€ 358.432	€ 358.432	€ 358.432	€ 358.432	€ 358.432	€ 358.432
€ 301.948	€ 301.948	€ 301.948	€ 301.948	€ 301.948	€ 301.948
€ 82.694	€ 82.694	€ 82.694	€ 82.694	€ 82.694	€ 82.694
€ 96.464	€ 96.464	€ 96.464	€ 96.464	€ 96.464	€ 96.464
€ 10.997	€ 10.997	€ 10.997	€ 10.997	€ 10.997	€ 10.997
€ 1.001.418	€ 1.001.418	€ 1.001.418	€ 1.001.418	€ 1.001.418	€ 1.001.418
€ 2.577.115	€ 2.577.115	€ 2.577.115	€ 2.577.115	€ 2.577.115	€ 2.577.115
€ 707.516	€ 649.097	€ 595.502	€ 546.332	€ 501.222	€ 459.837
€ 17.842.360	€ 18.491.457	€ 19.086.960	€ 19.633.292	€ 20.134.514	€ 20.594.351

11.2 Bijlage 2

Energie-input T/jaar	bio- olierendement n	elektrisch vermogen kWe	elektrisch rendement %	thermisch rendement %	investering		investering DeNoX (emissiesnor men) €	onderhouds- en uitbatings- kost €/MWh	onderhouds- en uitbatingsko- st €/MWh
					€/kWe	€			
0,45479255	0,13%	5	27,62%	52%	1,681	8,407	403	66,3	21,9
0,8599514	0,25%	10	29,22%	51%	1,552	15,515	807	59,5	20,3
1,63090835	0,48%	20	30,81%	49%	1,422	28,432	1,613	53,5	18,8
3,81623401	1,12%	50	32,92%	47%	1,250	62,494	4,033	46,4	17,0
7,27989462	2,14%	100	34,51%	45%	1,120	111,997	8,067	41,7	15,7
13,9169129	4,10%	200	36,11%	44%	990	198,012	16,133	37,5	14,5
20,349764	5,99%	300	37,04%	43%	914	274,221	24,200	35,2	13,9
26,6568146	7,85%	400	37,70%	42%	860	344,061	32,267	33,7	13,5
32,8734982	9,68%	500	38,21%	42%	818	409,165	40,333	32,5	13,1
39,020009	11,49%	600	38,63%	41%	784	470,496	48,400	31,6	12,9
45,1093611	13,28%	700	38,99%	41%	755	528,689	56,467	30,9	12,6
51,1506188	15,06%	800	39,29%	41%	730	584,195	64,533	30,3	12,5
57,1504452	16,82%	900	39,57%	40%	708	637,352	72,600	29,7	12,3
63,1139371	18,58%	1000	39,81%	40%	688	688,422	80,667	29,2	12,2
77,8882324	22,93%	1250	40,32%	40%	647	808,252	100,833	28,2	11,9
92,5038379	27,23%	1500	40,74%	39%	612	918,646	110,000	27,5	11,6
106,990055	31,49%	1750	41,09%	39%	600	1,050,000	134,750	26,8	11,4
121,367313	35,72%	2000	41,40%	39%	600	1,200,000	154,000	26,3	11,3
135,650641	39,93%	2250	41,67%	38%	600	1,350,000	173,250	25,8	11,1
149,851545	44,11%	2500	41,92%	38%	600	1,500,000	192,500	25,4	11,0
163,979103	48,27%	2750	42,13%	38%	600	1,650,000	211,750	25,0	10,9
178,040655	52,40%	3000	42,33%	38%	600	1,800,000	231,000	24,7	10,8
205,988969	60,63%	3500	42,69%	37%	600	2,100,000	269,500	24,1	10,6
233,734391	68,80%	4000	43,00%	37%	600	2,400,000	308,000	23,6	10,4

11.3 Bijlage 3

berekening # WKC	aQ										RPEB PEB	31,00 21.879,42	prijs per WKC: €31	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
jaren:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Per maand	1.823,29		
maanden:														
1	1.823	1.823	1.823	1.823	1.812	1.670	1.529	1.388	1.247	1.106				
2	1.823	1.823	1.823	1.823	1.800	1.659	1.517	1.376	1.235	1.094				
3	1.823	1.823	1.823	1.823	1.788	1.647	1.506	1.364	1.223	1.082				
4	1.823	1.823	1.823	1.823	1.776	1.635	1.494	1.353	1.212	1.070				
5	1.823	1.823	1.823	1.823	1.764	1.623	1.482	1.341	1.200	1.059				
6	1.823	1.823	1.823	1.823	1.753	1.612	1.470	1.329	1.188	1.047				
7	1.823	1.823	1.823	1.823	1.741	1.600	1.459	1.317	1.176	1.035				
8	1.823	1.823	1.823	1.823	1.729	1.588	1.447	1.306	1.164	1.023				
9	1.823	1.823	1.823	1.823	1.717	1.576	1.435	1.294	1.153	1.012				
10	1.823	1.823	1.823	1.823	1.706	1.564	1.423	1.282	1.141	1.000				
11	1.823	1.823	1.823	1.823	1.694	1.553	1.412	1.270	1.129	988				
12	1.823	1.823	1.823	1.823	1.682	1.541	1.400	1.259	1.117	976				
jaartotaal	21.879	21.879	21.879	21.879	20.962	19.268	17.574	15.880	14.186	12.491				
waarde	€678.262,05	€678.262,05	€678.262,05	€678.262,05	€649.815,77	€597.299,56	€544.783,35	€492.267,14	€439.750,93	€387.234,72				

11.4 Bijlage 4

ZONDER grondstofkost	jaar 0	jaar 1	jaar 2
opbrengsten		8.147.000,40	8.147.000,40
initiële investering	-7.181.145,25		
TOT kosten		4.282.795,05	4.282.795,05
Future Cashflow (1-t)*(O-K)+(T*Afschrijving)	-7.181.145,25	3.864.205,35	3.864.205,35
Netto Cashflow	-7.181.145,25	3.545.142,52	3.252.424,33
discontovoet		9%	
NPV	-€ 7.181.145	-3.636.003	-383.578
NPV	€ 18.898.995		
IRR	47,78%		

jaar 3	jaar 4	jaar 5	jaar 6	jaar 7	jaar 8
8.147.000,40	8.147.000,40	8.147.000,40	8.147.000,40	8.147.000,40	8.147.000,40
4.282.795,05	4.282.795,05	4.282.795,05	4.282.795,05	4.282.795,05	4.282.795,05
3.864.205,35	2.470.528,69	2.470.528,69	2.470.528,69	2.470.528,69	2.470.528,69
2.983.875,54	1.750.184,81	1.605.674,14	1.473.095,54	1.351.463,80	1.239.875,04
2.600.297	4.350.482	5.956.156	7.429.252	8.780.715	10.020.590

jaar	jaar	jaar	jaar	jaar	jaar
9	10	11	12	13	14
8.147.000,40	8.147.000,40	8.147.000,40	8.147.000,40	8.147.000,40	8.147.000,40
4.282.795,05	4.282.795,05	4.282.795,05	4.282.795,05	4.282.795,05	4.282.795,05
2.470.528,69	2.470.528,69	2.470.528,69	2.470.528,69	2.470.528,69	2.470.528,69
1.137.500,04	1.043.578,02	957.411,02	878.358,74	805.833,70	739.296,98
11.158.091	12.201.669	13.159.080	14.037.438	14.843.272	15.582.569

jaar	jaar	jaar	jaar	jaar	jaar
15	16	17	18	19	20
8.147.000,40	8.147.000,40	8.147.000,40	8.147.000,40	8.147.000,40	8.147.000,40
4.282.795,05	4.282.795,05	4.282.795,05	4.282.795,05	4.282.795,05	4.282.795,05
2.470.528,69	2.470.528,69	2.470.528,69	2.470.528,69	2.470.528,69	2.470.528,69
678.254,11	622.251,47	570.872,91	523.736,62	480.492,31	440.818,63
16.260.823	16.883.075	17.453.947	17.977.684	18.458.176	18.898.995

11.5 Bijlage 5

MET grondstofkost	jaar 0	jaar 1	jaar 2
opbrengsten		€ 9.776.400	€ 9.776.400
initiële investering	€ -7.181.145		
werkingskosten activatie		€ 4.282.795	€ 4.282.795
grondstofkosten		€ 1.048.520	€ 1.048.520
TOT kosten		€ 5.331.315	€ 5.331.315
Future Cashflow $(1-t)*(O-K)+(T*Afschrijving)$	€ -7.181.145	€ 4.445.085	€ 4.445.085
Netto Cashflow	€ -7.181.145	€ 4.078.060	€ 3.741.339
discontovoet		9%	
gecumuleerde cashflow	€ -7.181.145	€ -3.103.085	€ 638.254
NCW	€ 21.712.761		
IRR	52,38%		

jaar 3	jaar 4	jaar 5	jaar 6	jaar 7	jaar 8
€ 9.776.400	€ 9.776.400	€ 9.776.400	€ 9.776.400	€ 9.776.400	€ 9.776.400
€ 4.282.795	€ 4.282.795	€ 4.282.795	€ 4.282.795	€ 4.282.795	€ 4.282.795
€ 1.048.520	€ 1.048.520	€ 1.048.520	€ 1.048.520	€ 1.048.520	€ 1.048.520
€ 5.331.315	€ 5.331.315	€ 5.331.315	€ 5.331.315	€ 5.331.315	€ 5.331.315
€ 2.859.718	€ 2.859.718	€ 2.859.718	€ 2.859.718	€ 2.859.718	€ 2.859.718
€ 2.208.227	€ 2.025.897	€ 1.858.621	€ 1.705.157	€ 1.564.364	€ 1.435.196
€ 2.846.482	€ 4.872.378	€ 6.730.999	€ 8.436.155	€ 10.000.519	€ 11.435.715

jaar	jaar	jaar	jaar	jaar	jaar
9	10	11	12	13	14
€ 9.776.400	€ 9.776.400	€ 9.776.400	€ 9.776.400	€ 9.776.400	€ 9.776.400
€ 4.282.795	€ 4.282.795	€ 4.282.795	€ 4.282.795	€ 4.282.795	€ 4.282.795
€ 1.048.520	€ 1.048.520	€ 1.048.520	€ 1.048.520	€ 1.048.520	€ 1.048.520
€ 5.331.315	€ 5.331.315	€ 5.331.315	€ 5.331.315	€ 5.331.315	€ 5.331.315
€ 2.859.718	€ 2.859.718	€ 2.859.718	€ 2.859.718	€ 2.859.718	€ 2.859.718
€ 1.316.694	€ 1.207.976	€ 1.108.235	€ 1.016.729	€ 932.779	€ 855.761
€ 12.752.409	€ 13.960.385	€ 15.068.620	€ 16.085.349	€ 17.018.128	€ 17.873.889

jaar	jaar	jaar	jaar	jaar	jaar
15	16	17	18	19	20
€ 9.776.400	€ 9.776.400	€ 9.776.400	€ 9.776.400	€ 9.776.400	€ 9.776.400
€ 4.282.795	€ 4.282.795	€ 4.282.795	€ 4.282.795	€ 4.282.795	€ 4.282.795
€ 1.048.520	€ 1.048.520	€ 1.048.520	€ 1.048.520	€ 1.048.520	€ 1.048.520
€ 5.331.315	€ 5.331.315	€ 5.331.315	€ 5.331.315	€ 5.331.315	€ 5.331.315
€ 2.859.718	€ 2.859.718	€ 2.859.718	€ 2.859.718	€ 2.859.718	€ 2.859.718
€ 785.101	€ 720.277	€ 660.804	€ 606.242	€ 556.186	€ 510.262
€ 18.658.990	€ 19.379.267	€ 20.040.071	€ 20.646.313	€ 21.202.499	€ 21.712.761

11.6 Bijlage 6

MET grondstofkost	jaar 0	jaar 1	jaar 2
Opbrengsten AK		€ 9.004.690	€ 9.004.690
Opbrengsten WKK		€ 2.726.494	€ 2.726.494
opbrengsten		€ 11.731.184	€ 11.731.184
investeringskosten AK	€ 7.646.087	€ 0	€ 0
investeringskosten WKK	€ 1.486.129	€ 0	€ 0
werkingskosten AK		€ 1.656.929	€ 1.656.929
werkingskosten WKK		€ 572.924	€ 572.924
besparing elektriciteitskosten		€ -115.260	€ -115.260
grondstofkosten		€ 4.031.553	€ 4.031.553
TOT kosten		€ 6.146.147	€ 6.146.147
Future Cashflow $(1-t)*(O-K)+(T*Afschrijving)$	€ -9.132.217	€ 5.585.038	€ 5.585.038
present cashflow	€ -9.132.217	€ 5.123.888	€ 4.700.814
discontovoet		9%	
gecumuleerde CF (jaar 1 tot n)	€ -9.132.217	€ -4.008.329	€ 692.485
NPV	€ 27.321.685		
IRR	52,1077%		

jaar 3	jaar 4	jaar 5	jaar 6	jaar 7	jaar 8
€ 9.004.690	€ 9.004.690	€ 9.004.690	€ 9.004.690	€ 9.004.690	€ 9.004.690
€ 2.726.494	€ 2.726.494	€ 2.706.249	€ 2.668.873	€ 2.631.497	€ 2.594.122
€ 11.731.184	€ 11.731.184	€ 11.710.939	€ 11.673.563	€ 11.636.187	€ 11.598.811
€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
€ 1.656.929	€ 1.656.929	€ 1.656.929	€ 1.656.929	€ 1.656.929	€ 1.656.929
€ 572.924	€ 572.924	€ 572.924	€ 572.924	€ 572.924	€ 572.924
€ -115.260	€ -115.260	€ -115.260	€ -115.260	€ -115.260	€ -115.260
€ 4.031.553	€ 4.031.553	€ 4.031.553	€ 4.031.553	€ 4.031.553	€ 4.031.553
€ 6.146.147	€ 6.146.147	€ 6.146.147	€ 6.146.147	€ 6.146.147	€ 6.146.147
€ 3.711.940	€ 3.711.940	€ 3.698.576	€ 3.673.904	€ 3.649.233	€ 3.624.561
€ 2.866.299	€ 2.629.632	€ 2.403.821	€ 2.190.629	€ 1.996.255	€ 1.819.045
€ 3.558.784	€ 6.188.416	€ 8.592.237	€ 10.782.866	€ 12.779.121	€ 14.598.166

jaar	jaar	jaar	jaar	jaar	jaar
9	10	11	12	13	14
€ 9.004.690	€ 9.004.690	€ 9.004.690	€ 9.004.690	€ 9.004.690	€ 9.004.690
€ 2.556.746	€ 2.519.370	€ 2.726.494	€ 2.726.494	€ 2.726.494	€ 2.726.494
€ 11.561.436	€ 11.524.060	€ 11.731.184	€ 11.731.184	€ 11.731.184	€ 11.731.184
€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
€ 0	€ 1.486.129	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
€ 1.656.929	€ 1.656.929	€ 1.656.929	€ 1.656.929	€ 1.656.929	€ 1.656.929
€ 572.924	€ 572.924	€ 572.924	€ 572.924	€ 572.924	€ 572.924
€ -115.260	€ -115.260	€ -115.260	€ -115.260	€ -115.260	€ -115.260
€ 4.031.553	€ 4.031.553	€ 4.031.553	€ 4.031.553	€ 4.031.553	€ 4.031.553
€ 6.146.147	€ 7.632.276	€ 6.146.147	€ 6.146.147	€ 6.146.147	€ 6.146.147
€ 3.599.889	€ 2.594.223	€ 3.711.940	€ 3.711.940	€ 3.711.940	€ 3.711.940
€ 1.657.489	€ 1.095.828	€ 1.438.499	€ 1.319.724	€ 1.210.756	€ 1.110.785
€ 16.255.655	€ 17.351.483	€ 18.789.982	€ 20.109.705	€ 21.320.461	€ 22.431.246

jaar	jaar	jaar	jaar	jaar	jaar
15	16	17	18	19	20
€ 9.004.690	€ 9.004.690	€ 9.004.690	€ 9.004.690	€ 9.004.690	€ 9.004.690
€ 2.706.249	€ 2.668.873	€ 2.631.497	€ 2.594.122	€ 2.556.746	€ 2.519.370
€ 11.710.939	€ 11.673.563	€ 11.636.187	€ 11.598.811	€ 11.561.436	€ 11.524.060
€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
€ 1.656.929	€ 1.656.929	€ 1.656.929	€ 1.656.929	€ 1.656.929	€ 1.656.929
€ 572.924	€ 572.924	€ 572.924	€ 572.924	€ 572.924	€ 572.924
€ -115.260	€ -115.260	€ -115.260	€ -115.260	€ -115.260	€ -115.260
€ 4.031.553	€ 4.031.553	€ 4.031.553	€ 4.031.553	€ 4.031.553	€ 4.031.553
€ 6.146.147	€ 6.146.147	€ 6.146.147	€ 6.146.147	€ 6.146.147	€ 6.146.147
€ 3.698.576	€ 3.673.904	€ 3.649.233	€ 3.624.561	€ 3.599.889	€ 3.575.217
€ 1.015.400	€ 925.345	€ 843.240	€ 768.384	€ 700.141	€ 637.929
€ 23.446.646	€ 24.371.991	€ 25.215.231	€ 25.983.615	€ 26.683.756	€ 27.321.685

Auteursrechtelijke overeenkomst

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

Economische haalbaarheid van de productie van actieve kool uit biomassa

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen: handelsingenieur-technologie-, innovatie- en milieumanagement**

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,

Gilles, Michiel

Datum: **1/06/2012**