

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

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

2 0 1 0
2 0 1 1

Masterproef

*Valorisatie van biomassa uit fyto-remediatie. Het
juridisch statuut en identificatie van extra
verwerkingskosten*

Promotor :
Prof. dr. Theo THEWYS

Klaas Vanderlinden

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

universiteit
▶▶ hasselt

UNIVERSITEIT VAN DE TOEKOMST

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE-3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE-3500 Hasselt

universiteit
▶▶ hasselt

UNIVERSITEIT VAN DE TOEKOMST

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

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

Masterproef

*Valorisatie van biomassa uit fyto-remediatie. Het
juridisch statuut en identificatie van extra
verwerkingskosten*

Promotor :
Prof. dr. Theo THEWYS

Klaas Vanderlinden

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

Woord vooraf

Met deze masterproef besluit ik mijn opleiding Handelsingenieur – Technologie, Innovatie en Milieumanagement aan de Universiteit Hasselt. In het eerste jaar van de masteropleiding werd door enkele gastcolleges mijn interesse voor fyto-remediatie gewekt. De combinatie van een zoektocht die zowel op economisch als op ecologisch vlak naar een goede en duurzame oplossing zoekt voor een echt praktijkprobleem, wakkerde mijn enthousiasme verder aan.

Ik zou dan ook graag in dit voorwoord mijn oprechte dank betuigen aan alle mensen die me met raad en daad hebben bijgestaan in het realiseren van deze masterproef. Graag zou ik mijn promotor prof. dr. Thewys willen bedanken omdat hij me de kans bood om te werken aan een thema dat mijn oprechte interesse geniet. Zonder de hulp van mijn copromotor, Eloi Schreurs, en medebegeleider, Tom Kuppens, zou deze masterproef een bijna onoverkomelijke hindernis geweest zijn. Ze begeleidden me op een vlotte, vriendelijke en begrijpelijke wijze en stonden steeds voor me klaar om teksten te verbeteren of om bijkomende informatie te verschaffen.

Ook gaat mijn dank uit naar alle mensen die me belangrijke informatie aanleverden om deze masterproef te verwezenlijken. Hierbij denk ik vooral aan Mark Stals, Tom Cornelissen en enkele mensen van de OVAM.

Tenslotte bedank ik ook mijn ouders omdat zij me de kans gaven om deze universitaire studies te volgen. Ook mijn vriendenkring die van mijn studententijd in Diepenbeek een onvergetelijke ervaring maakte, verdient speciale dank, net zoals mijn vriendin Ilse die de talloze uren geklaag over mijn masterproef met glans doorstond.

Bedankt aan allen en aan iedereen die ik vergeet!

Klaas Vanderlinden, mei 2011

Samenvatting

In de Belgisch-Nederlandse Kempen is de bodem in een gebied van ongeveer 700 km² matig vervuild met zware metalen zoals cadmium, lood en zink. Een groot deel van deze oppervlakte is landbouwgrond waarop voedergewassen en gewassen voor menselijke consumptie worden geteeld. Sommige gewassen nemen echter een bepaalde hoeveelheid metalen op waardoor er grenswaarden voor consumptie worden overschreden. De landbouwers verliezen hierdoor een deel van hun inkomen. Een van de mogelijke oplossingen voor dit praktijkprobleem is de teelt van fyto-remediërende gewassen. Deze planten nemen de metalen op uit de bodem. Ze komen echter niet terecht in het reguliere voedingscircuit en reduceren zo het risico dat de metalen verder in het milieu verspreid worden. Door middel van thermische conversietechnieken kunnen ze echter wel een alternatief inkomen genereren voor de betrokken landbouwers. Bijkomend worden de vervuilde gronden op lange termijn gesaneerd.

In hoofdstuk 2 wordt fyto-remediatie ruimer besproken. Er kan gebruik gemaakt worden van accumulatoren en hyperaccumulatoren. Het verschil schuilt in de concentratie metalen die opgenomen wordt in de biomassa. Over het algemeen hebben accumulatoren een grotere biomassaopbrengst en zijn ze dus makkelijker te valoriseren. Onder paragraaf 2.4 worden er vier gewassen besproken: korteomloophout, koolzaad, miscanthus en hennep. Voor elk van deze gewassen wordt kort de teeltechniek besproken, alsook de biomassa en metaalopname. Korteomloophout lijkt het meest geschikt voor fyto-remediatie in de Kempen gezien de haalbaarheid van de teelt en de hoge biomassaopbrengst. Ook neemt het korteomloophout een relatief grote hoeveelheid metalen op. Deze masterproef spitst zich dan ook toe op de teelt van wilg.

Bij de verdere verwerking van de met cadmium verontreinigde biomassa heeft het wettelijk statuut een belangrijke rol. Zowel juridisch als economisch gezien is er een groot verschil tussen afvalstoffen en grondstoffen. Indien de vervuilde biomassa als afval wordt beschouwd, zal een verwerker minder geneigd zijn er voor te betalen. Ook ligt de economische waarde van de restproducten dan een stuk lager. Op dit moment is het statuut van het vervuilde korteomloophout echter nog niet bepaald. In hoofdstuk 3 wordt de definitie van afval op Europees en Vlaams vlak bekeken. Uit de Europese Kaderrichtlijn 2006/12/EEG blijkt dat vooral de interpretatie van 'zich ontdoen' belangrijk is. De Vlaamse definitie van afval steunt grotendeels op de Europese. Ook wordt in dit hoofdstuk 3 dieper ingegaan op het begrip 'biomassa'.

Als besluit uit hoofdstuk 3 kunnen we stellen dat er een hoge nood is aan een duidelijke beleidsbeslissing vanuit hogere instanties zoals de OVAM en de Vlaamse overheid betreffende het statuut van de vervuilde biomassa. Als ondersteuning voor deze beslissing kan men aanhalen dat het korteomloophout in eerste instantie wordt geteeld om een alternatief inkomen te genereren voor de landbouwers. Men probeert de hoeveelheid biomassa te maximaliseren. De biomassa is dus geen 'restproduct' waarvan men zich nog op een goedkope wijze wil ontdoen, maar een doel van het fyto-remediatieproject op zich. Verder in deze masterproef wordt de assumptie gemaakt dat de vervuilde biomassa geen afval is.

In hoofdstuk 4 worden de twee thermische conversietechnieken pyrolyse en verbranding beknopt beschreven. Voor beide technieken zal in hoofdstuk 5 onderzocht worden of en welke extra kosten er optreden bij de verwerking van vervuilde biomassa in vergelijking met de verwerking van zuivere biomassa. Voor pyrolyse wordt er gekozen voor een fluid bed reactor waarbij men de char niet extern afscheidt, maar in het zandbed houdt voor interne thermische benutting. Zo concentreert men cadmium in één reststroom, namelijk het af te scheiden zandbed. Ook wordt in hoofdstuk 4 een schatting gemaakt van de prijs van één ton zuiver korteomloophout. Er wordt besloten dat een productiekost per ton van €31 tot €57 realistisch is en dat de prijs die een pyrolyst of verbrander betaalt voor één ton zuiver korteomloophout €50 bedraagt.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 5 onderzocht welke extra kosten er optreden bij de verwerking van cadmiumhoudende biomassa, in vergelijking met zuivere biomassa. Deze extra kosten worden teruggerekend naar één ton vervuilde biomassa. Vervolgens kan deze extra kost worden afgetrokken van de prijs die een verwerker betaalt voor zuivere biomassa, die in hoofdstuk 4 werd vastgesteld op €50 per ton. Uit berekeningen blijkt dat een cadmiumgehalte van 27,3 mg Cd kg⁻¹ DS in het korteomloophout verwacht mag worden. Dit cadmium zal zich bij pyrolyse en verbranding verspreiden vanuit het hout naar andere stromen.

Voor pyrolyse blijkt de investering in een extra rookgasreiniging niet nodig. Omdat het cadmium niet vervliegt bij temperaturen onder de 450°C, blijft het achter in het zandbed en in de char. Aangeraden is om de char in het zandbed te laten om het zo thermisch te benutten om het zandbed op temperatuur te houden. Omdat het zandbed slijt, dient het in een continu proces op continue basis afgevoerd en vervangen te worden. De verwerking hiervan vereist echter speciale aandacht, gezien de hoge concentratie cadmium die varieert van 267 tot 534 mg Cd kg⁻¹ zandbed.

Voor de verwerking van het zandbed werden vier scenario's onderzocht. Door de hoge concentratie cadmium bleek het te duur om dit zandbed met fysico-chemische reiniging te

zuiveren. Ook hergebruik als (niet-vormgegeven) bouwstof bleek hierdoor niet haalbaar. Het immobiliseren of storten van het zandbed bleek wel relatief betaalbaar te zijn. Voor immobilisatie impliceert dit een extra kost van €7,98 tot €19,95 per ton gepyrolyseerd vervuild korteomloophout. De extra kost voor het storten bedraagt €6,01 tot €15,37 euro per ton gepyrolyseerd vervuild korteomloophout. Andere extra kosten die men moet incalculeren, konden niet worden geïdentificeerd.

Bij verbranding ligt de temperatuur wel boven de vervliegtemperatuur van cadmium. Hierdoor komt het cadmium grotendeels in de rookgassen terecht. Elke verbrandingsinstallatie moet in de praktijk echter een rookgasreiniging installeren om te voldoen aan de emissienormen, ook indien ze enkel zuiver materiaal verbrandt. Uit verschillende bronnen blijkt dat een gewone rookgasreiniging moet voldoen om de toegenomen hoeveelheid cadmium te filteren. Elke verbrander zal dus een investering in een rookgasreiniging moeten doen. De kost hiervan mag dus niet enkel worden doorgerekend aan de leverancier van het vervuilde korteomloophout uit fyto-remediatie.

Inhoudsopgave

WOORD VOORAF	I
SAMENVATTING	II
INHOUDSOPGAVE	V
LIJST MET GEBRUIKTE AFKORTINGEN	IX
LIJST MET FIGUREN	X
LIJST MET TABELLEN	XI
1. INLEIDING	1
1.1 PROBLEEMSTELLING	1
1.2 CENTRALE ONDERZOEKSVRAAG	4
1.3 DEELVRAGEN.....	4
1.4 ONDERZOEKSOPZET	5
2. FYTOREMEDIATIE	7
2.1 WAT IS FYTOREMEDIATIE.....	7
2.2 ACCUMULATOREN EN HYPERACCUMULATOREN.....	7
2.3 VORMEN VAN FYTOREMEDIATIE	8
2.3.1 <i>Fyto-extractie</i>	9
2.3.2 <i>Fyto-attenuatie</i>	9
2.3.3 <i>Fytoremediatie in de Kempen</i>	10
2.4 INVENTARISATIE VAN GEWASSEN	10
2.4.1 <i>Korteomloophout</i>	10
2.4.1.1 Algemeen.....	10
2.4.1.2 Praktisch.....	11
2.4.1.3 Biomassaopbrengst.....	12
2.4.1.4 Absorptie.....	13
2.4.2 <i>Koolzaad</i>	14

2.4.2.1	Algemeen	14
2.4.2.2	Praktisch.....	14
2.4.2.3	Biomassaopbrengst.....	15
2.4.2.4	Absorptie.....	15
2.4.3	<i>Miscanthus</i>	15
2.4.3.1	Algemeen	15
2.4.3.2	Praktisch.....	16
2.4.3.3	Biomassaopbrengst.....	16
2.4.3.4	Absorptie.....	17
2.4.4	<i>Hennep</i>	17
2.4.4.1	Algemeen	17
2.4.4.2	Praktisch.....	18
2.4.4.3	Biomassaopbrengst.....	18
2.4.4.4	Absorptie.....	19
3.	JURIDISCH STATUUT	21
3.1	ALGEMENE DUIDING AFVAL.....	21
3.1.1	<i>Wetgeving op Europees niveau</i>	21
3.1.1.1	Definitie afval	21
3.1.1.2	EVOA	23
3.1.2	<i>Wetgeving op Vlaams niveau</i>	24
3.1.2.1	VLAREA	25
3.1.2.2	VLAREM	25
3.2	ALGEMENE DUIDING BIOMASSA	26
3.2.1	<i>Wetgeving op Europees niveau</i>	26
3.2.2	<i>Wetgeving op Vlaams niveau</i>	28
3.3	AFVALSTOF ALS GRONDSTOF	29
3.3.1	<i>Afvalstof: gevolgen</i>	29
3.3.2	<i>Afvalstof naar grondstof</i>	31
3.3.2.1	VLAREA bijlage 4.....	31
3.3.2.2	Gebruikscertificaat	31
3.3.2.3	Grondstofverklaring.....	32
3.3.2.4	End-of-Waste criteria	32
3.4	HOUTIGE BIOMASSA UIT FYTOREMEDIATIE, AFVAL OF NIET?	33

3.4.1	<i>Huidige situatie voor houtige biomassa uit fyto-remediatie</i>	33
3.4.2	<i>Argumentatie gebruik als secundaire grondstof</i>	33
4.	VERWERKING ZUIVERE BIOMASSA	37
4.1	OVERZICHT CONVERSIE-TECHNIEKEN VOOR BIOMASSA	37
4.1.1	<i>Pyrolyse</i>	37
4.1.2	<i>Verbranding</i>	39
4.2	PRIJS ZUIVER KORTEOMLOOPHOUT	39
5.	EXTRA KOSTEN BIJ VERWERKING GECONTAMINEERDE BIOMASSA	43
5.1	EIGENSCHAPPEN BIOMASSA DIE EXTRA KOST VEROORZAKEN.....	44
5.2	EXTRA KOSTEN BIJ PYROLYSE.....	49
5.2.1	<i>Extra kost rookgasreiniging</i>	49
5.2.1.1	Emissiegrenswaarden	49
5.2.1.2	Werking rookgasreiniging.....	51
5.2.1.3	Uitstoot bij pyrolyse vervuild korteomloophout.....	53
5.2.2	<i>Extra kost reiniging zandbed</i>	55
5.2.2.1	Verdeling cadmium bij pyrolyse.....	55
5.2.2.2	Scenario 1: Reinigen van het vervuilde zandbed	58
5.2.2.3	Scenario 2: Immobilisatie van het vervuilde zandbed.....	63
5.2.2.4	Scenario 3: Gebruik als (niet-vormgegeven) bouwstof	65
5.2.2.5	Scenario 4: Storten	65
5.2.3	<i>Andere</i>	70
5.3	EXTRA KOSTEN BIJ VERBRANDING	70
5.3.1	<i>Opties voor verbranding</i>	70
5.3.1.1	Afvalverbranders.....	70
5.3.1.2	Bijstook in kolencentrales	71
5.3.1.3	Biomassaverbranders.....	71
5.3.2	<i>Rookgasreiniging</i>	71
5.3.2.1	Emissiegrenswaarden	72
5.3.2.2	Werking rookgasreiniging.....	72
5.3.2.3	Uitstoot bij verbranding vervuild korteomloophout	73
5.3.2.4	Extra werkingskosten rookgasreiniging	75

VIII

5.4	SAMENVATTING EXTRA KOSTEN BIJ VERWERKING.....	76
5.4.1	<i>Samenvatting extra kost y bij pyrolyse</i>	<i>77</i>
5.4.2	<i>Samenvatting extra kost y bij verbranding</i>	<i>79</i>
5.4.3	<i>Conclusie</i>	<i>80</i>
6.	CONCLUSIES.....	81
	BRONNEN	85
	BIJLAGEN.....	97
	BIJLAGE 1: BIJLAGE 4 VLAREM.....	97
	BIJLAGE 2: AANVRAAGFORMULIER TOT GEBRUIKSCERTIFICAAT	98
	BIJLAGE 3: MASSABALANSEN.....	102

Lijst met gebruikte afkortingen

°C	: graden Celsius
BCF	: bioconcentration factor
Cd	: cadmium
Cl	: chloor
cm	: centimeter
DS	: droge stof
EoW	: End of Waste
EPA	: Environmental Protection Agency
EVOA	: Europese Verordening Overbrenging Afvalstoffen
GWh	: gigawatt uur
ha	: hectare
ILVO	: Instituut voor Landbouw- en Visserijonderzoek
INBO	: Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek
kg	: kilogram
km ²	: vierkante kilometer
KOH	: korteomloophout
m	: meter
MER	: Milieu Effecten Rapport
mg	: milligram
mm	: millimeter
MW _e	: megawatt elektrisch
Nm ³	: normaal kubieke meter
OESO	: Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling
OVAM	: Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij
Pb	: lood
ppm	: parts per million
S	: zwavel
THC	: tetrahydrocannabinol
VLAREA	: Vlaams Reglement inzake Afvalvoorkoming en -beheer
VLAREM	: Vlaams Reglement betreffende de Milieuvergunning
Zn	: zink

Lijst met figuren

Figuur 2.1: Plantschema korteomloophout

Figuur 3.1: Criteria t.b.v. beoordeling afvalstof/niet-afvalstof

Figuur 4.1: Fluid bed pyrolyse-installatie

Figuur 5.1: Schematische voorstelling reststromen bij externe afscheiding of interne benutting van de char bij fluid bed pyrolyse

Lijst met tabellen

Tabel 2.1: Metaalopname Salix Fragilis

Tabel 2.2: Cadmiumopname miscanthus

Tabel 5.1: Biomassaopbrengst en cadmiumopname Wilg

Tabel 5.2: Cadmiumgehalte één ton korteomloophout uit fyto remediatie volgens Vangronsveld et al., (2009)

Tabel 5.3: Biomassaopbrengst en metaalopname Salix Fragilis

Tabel 5.4: Cadmiumgehalte één ton KOH uit fyto remediatie volgens Stals et al. (2010)

Tabel 5.5: Metaalconcentraties wilg in vergelijking met normale planten

Tabel 5.6: Metaalconcentratie wilg in vergelijking tot normale planten

Tabel 5.7: BCF ranges

Tabel 5.8: Emissiegrenswaarde cadmium

Tabel 5.9: Vervliegtemperaturen zware metalen

Tabel 5.10: Verdeling cadmium bij pyrolyse

Tabel 5.11: Concentratie cadmium in zandbed

Tabel 5.12: Bijmenging zuivere biomassa om onder maximumconcentratie te blijven

Tabel 5.13: Totaalkost reiniging zandbed voor pyrolyse één ton vervuild KOH

Tabel 5.14: Samenvatting totale reinigingskost

Tabel 5.15: Kost immobilisatie zandbed

Tabel 5.16: Categorieën van stortplaatsen

Tabel 5.17: Stortkost categorie I. Gemiddelden van 2008.

Tabel 5.18. Extra stortkost bij pyrolyse van één ton vervuild KOH uit fyto remediatie.

Tabel 5.19: Vervliegtemperaturen zware metalen

Tabel 5.20: Gedrag cadmium bij pyrolyse en verbranding

Tabel 5.21: Extra kost en marktprijs bij de haalbare scenario's

1. Inleiding

1.1 Probleemstelling

Wereldwijd zijn er gebieden terug te vinden die lijden onder bodemverontreiniging met zware metalen. De ecologische en economische gevolgen zijn vaak ingrijpend voor de omgeving. De Belgisch-Nederlandse Kempen zijn hiervan een uitstekend voorbeeld. Hier is een gebied van ongeveer 700 km² matig vervuild met zware metalen zoals Cd (cadmium), Pb (lood) en Zn (zink). 280 km² van dit gebied ligt in België. Deze verontreiniging is tot stand gekomen door jarenlange atmosferische depositie die veroorzaakt werd door non-ferro industrie vanaf het einde van de 19^e eeuw tot midden jaren 1970. Gedurende deze jaren werd er in de Kempen zink en lood geraffineerd door middel van pyrometallurgische processen (Meers et al., 2009; Van Slycken et al., 2008).

De matige bodemverontreiniging heeft rechtstreeks slecht beperkte schadelijke gevolgen. Zo kan het opwaaien van zand het cadmium verder verspreiden of kan rechtstreeks contact met de vervuilde grond schadelijk zijn voor de bevolking. Het grote probleem schuilt er echter in dat het grootste deel van het vervuilde gebied landbouwgrond is. In de Kempen heeft één landbouwbedrijf een gemiddelde oppervlakte van 36 ha (Kuppens & Thewys, 2009). Deze gronden worden door melkveehouders gebruikt om voedergewassen te telen voor hun melkvee. Anderzijds wordt er landbouwgrond gebruikt voor de teelt van gewassen voor menselijke consumptie. Sommige van deze gewassen nemen echter een bepaalde hoeveelheid metalen op waardoor de teelten bepaalde grenswaarden overschrijden en ze niet meer geschikt zijn voor menselijke of dierlijke consumptie. Deze grenswaarden vinden we terug in Europese regelgeving ¹ (Richtlijn 2002/32/EG inzake diervoeding, Verordening 629/2008 inzake voeding voor menselijke consumptie). De metalen komen ongewild in de voedselketen terecht. Enerzijds door onmiddellijke menselijke consumptie, anderzijds indirect via het veevoeder (Thewys et al., 2010).

¹ Voor diervoeding worden volgende grenswaarden vermeld bij vochtigheid 12%: groenvoeders (40mg Pb kg⁻¹), voedermiddelen van plantaardige oorsprong (1 mg Cd kg⁻¹). Voor menselijke consumptie geldt: granen en peulvruchten (0,20 mg Pb kg⁻¹), fruit (0,10 mg Pb kg⁻¹), groenten met uitzondering van koolsoorten en bladgroenten (0,10 mg Pb kg⁻¹ en 0,050 mg Cd kg⁻¹), koolsoorten en bladgroenten (0,30 mg Pb kg⁻¹ en 0,20 mg Cd kg⁻¹), stengel- en wortelgroenten en aardappelen (0,10 mg Cd kg⁻¹).

De concentratie Cd in de Kempense bodem varieert van 0,5 tot 12 mg Cd kg⁻¹ bodem en overschrijdt hiermee de toegelaten drempelwaarde van 2 mg Cd kg⁻¹ bodem voor landbouwgebied. Zink en lood zijn meer homogeen aanwezig in de bodem en overschrijden de drempelwaardes niet (Thewys et al., 2010). De vervuiling bevindt zich vooral in de bovenste laag van de bodem (0-40cm). Dit is de wortelzone of rhizosfeer van bepaalde gewassen en zo worden deze metalen opgenomen. In de Kempen bestaat de bodem uit vrij zure zandgrond met een pH-waarde van 4 ~ 5,5. Hieruit volgt een verhoogde Cd-mobiliteit van de bodem naar het gewas, al dan niet voor menselijke of dierlijke consumptie (Meers et al., 2009).

De gevolgen zijn dus vooral voelbaar voor de landbouw. Indien men verder gaat met het telen van veevoeders en voeding voor menselijke consumptie, loopt men dus het risico om bepaalde drempelwaarden te overschrijden. Indien dit gebeurt, zijn de gewassen niet meer geschikt voor consumptie en betekent dit een inkomensverlies voor de landbouwers. Geteelde gewassen voor menselijke consumptie mogen niet meer verkocht worden en indien ze toch verder melk willen produceren moeten de landbouwers hun veevoeder extern aankopen. Dit impliceert een hogere kost dan het zelf verbouwen van dit voeder.

Indien er dus niets gebeurt, vormt dit een groot probleem voor de betrokken landbouwers en de regio. Daarom werd het project BeNeKempen opgericht waarin onderzoek verricht wordt naar hoe men deze situatie moet aanpakken (Thewys et al., 2010). Een methode van aanpak is het telen van fyto-remediërende gewassen op de landbouwgrond die gebruikt werd voor de teelt van traditionele inkomstengenererende gewassen. Op deze wijze worden er langzaam-aan zware metalen uit de bodem onttrokken. Om deze projecten rendabel te maken, moet het inkomensverlies dat de landbouwers leiden, worden goedge maakt door opbrengsten uit de fyto-remediërende planten. Als dit niet kan, zullen ze niet overtuigbaar zijn om over te stappen op deze gewassen.

Gezien de omvang van het gebied en de diffuse verdeling van de verontreiniging zijn traditionele methoden voor bodemsanering zoals afgraving geen optie wegens niet rendabel of technisch haalbaar (Meers et al., 2009).

Bij fyto-remediatie wordt de grond gebruikt voor het kweken van gewassen, die een bepaalde hoeveelheid van de vervuillende metalen uit de bodem kunnen opnemen en deze opslaan in hun biomassa (Pulford & Watson, 2003). Het is een proces waarbij planten instaan voor in

situ risico reductie van vervuilde bodems (EPA, 1998 & Meers et al., 2005). Onder fyto-remediatie vallen er verschillende technieken te onderscheiden. Zo is er een verschil tussen fyto-extractie en fyto-management. Dit wordt verder uitgediept in een volgend hoofdstuk. Een voordeel van fyto-remediatie is dat het veel goedkoper is dan traditionele bodemsanering zoals afgraving (Kumar et al., 1995; Rulkens et al., 1998). Ook is het toepasbaar op grotere oppervlakten. De lange tijdsduur die fyto-remediatie nodig heeft om de bodem terug binnen de wettelijk toegelaten normen te krijgen, is dan weer een nadeel (Thewys et al., 2010). Deze lange remediëriingsperiode zorgt voor een lange periode van inkomensverlies voor de landbouwers. Enkel indien de geproduceerde biomassa gevaloriseerd kan worden en als vervangend inkomen kan dienen voor de landbouwers, kan dit een rendabel alternatief zijn (Thewys et al., 2010).

Concreet moet er dus een alternatieve teelt gevonden worden voor de gecontamineerde landbouwgrond die enerzijds zorgt voor sanering van de bodem en anderzijds een voldoende hoog inkomen voorziet voor de betrokken landbouwers. Deze masterproef spitst zich toe op de valorisatie van de biomassa die deze gewassen opbrengen. Uiteraard moet hierbij rekening gehouden worden dat deze biomassa zware metalen bevat. Daarom kan ze niet verwerkt worden zoals 'schone' biomassa en vereist ze speciale aandacht.

Bij de verwerking van deze 'vervuilde' biomassa staat concentratie van de zware metalen centraal. Zware metalen zoals lood (Pb), zink (Zn) en cadmium (Cd) verdwijnen nooit. Ze kunnen zich enkel verspreiden waardoor hun concentratie afneemt. Bij fyto-remediatie wordt er omgekeerd gewerkt. In de bodem is er een lage concentratie aan vervuilende stoffen. Deze wordt onttrokken en opgeslagen in de biomassa. Deze wordt dan weer verder verwerkt waarbij men de metalen in een nog kleinere fractie probeert op te slaan. Het doel is dus om een manier te vinden waarop dit proces een zo hoog mogelijke economische waarde oplevert en de metalen in een zo klein mogelijke fractie worden opgeslagen.

In deze masterproef worden er twee valorisatietechnieken voor de vervuilde biomassa besproken. Zo wordt er dieper ingegaan op pyrolyse en verbranding. Dit zijn twee thermische conversietechnieken waarbij de biomassa wordt omgezet in een economisch interessant product. Uiteraard zijn er nog andere technieken zoals vergisting of vergassing mogelijk. De keuze voor pyrolyse en verbranding wordt gemaakt omdat deze op dit moment het meest interessant lijken en omdat er reeds een grote bron van informatie beschikbaar is. Ook ligt de nadruk in deze masterproef op de teelt van korteomloophout als fyto-remediërend

gewas. In hoofdstuk 2 wordt er een inventarisatie gemaakt van een aantal mogelijke gewassen. Korteomloophout blijkt hieruit het meest geschikte gewas gezien de hoge biomassaopbrengst, teelthaalbaarheid en sanerend vermogen.

De verwerking van vervuilde biomassa kan echter implicaties opwerpen die zich niet voordoen bij de verwerking van zuivere biomassa. Het aanwezig cadmium kan een invloed hebben op de thermische processen en zal zich vanuit de biomassa verplaatsen naar een andere plaats. Dit kan resulteren in extra kosten voor de verwerker. Deze zullen van invloed zijn op de prijs die men bereid is te betalen voor het korteomloophout. Er is dus speciale aandacht vereist voor de verwerking van deze vervuilde biomassa uit fyto-remediatie.

1.2 Centrale onderzoeksvraag

De centrale onderzoeksvraag van deze masterproef kunnen we als volgt formuleren:

'Hoe groot is de invloed van de opgenomen vervuiling door fyto-remediatie op de economische waarde van houtige biomassa?'

De verwerking van biomassa die voortvloeit uit fyto-remediatie vereist speciale aandacht. De aanwezige metalen zorgen ervoor dat de biomassa niet op dezelfde wijze als zuivere biomassa kan verwerkt worden. In deze masterproef wordt er nagegaan waar het verwerkingsproces van gecontamineerde biomassa afwijkt van het 'traditionele' verwerkingsproces. Deze afwijkingen impliceren extra kosten die in kaart worden gebracht.

1.3 Deelvragen

Bij deze onderzoeksvraag stellen we ook enkele deelvragen:

Deelvraag 1:

Een eerste deelvraag is hoe de biomassa die fyto-remediatie in de Kempen oplevert, juridisch gezien geklasseerd moet worden. Deze classificatie heeft economische en juridische gevolgen voor de verdere verwerking en valorisatie. Tot nu toe is er onduidelijkheid over het juiste statuut van deze biomassa. Gezien de belangrijke gevolgen is een verduidelijking van

dit statuut dus aangewezen. De deelvraag is dus: '**Wat is het juridische statuut van biomassa uit fytoremediatie?**'

Deelvraag 2:

De tweede deelvraag luidt: '**In welke mate heeft de vervuilingsgraad van de biomassa een invloed op de kosten van de verwerking?**'. Bij de verwerking van gecontamineerde biomassa moet er rekening gehouden worden met de zware metalen. Dit kan zorgen voor hogere verwerkingskosten en bijgevolg een lagere marktprijs voor de biomassa. Deze verwerkingskosten zijn extra kosten die voortkomen bij de verwerking van vervuilde biomassa en doen zich niet voor bij eenzelfde verwerking van zuivere biomassa. Er kan een vergelijking worden opgesteld met daarin de prijs van de biomassa in functie van de vervuilingsgraad. Gerelateerd aan deze deelvraag is hoe de verwerkende industrie een onderscheid kan maken tussen de prijzen voor de biomassa.

1.4 Onderzoeksopzet

Eerst en vooral wordt er inleidend geschetst wat fytoremediatie juist inhoudt. Dit behelst ook een korte bespreking van het verschil tussen fyto-attenuatie of fytomanagement en fyto-extractie. Hierbij wordt ook het verschil tussen hyperaccumulatoren en gewone accumulatoren aangehaald. Daarna volgt een inventarisatie van een aantal gewassen die geschikt zijn voor fytoremediatie. Hierbij gaat er speciale aandacht naar de biomassaopbrengst en de opnamecapaciteit van de planten. Dit deel is voor het grootste deel een literatuurstudie die de huidige stand van zaken samenvat.

Voor men een inschatting kan maken van de extra verwerkingskosten, dient het duidelijk te zijn of de vervuilde biomassa nu afval is of niet. Verwacht wordt dat dit belangrijke implicaties heeft voor de economische waarde van de biomassa. Om hierover een uitspraak te doen, moet eerst gezocht worden naar het huidige statuut van deze biomassa. Indien dit vandaag niet duidelijk is, zal er worden nagegaan welk statuut verwacht kan worden voor de biomassa. Zowel de definitie van afval en biomassa moet worden bekeken en dit op Europees en Vlaams niveau. Deze afvaldefinities zitten vervat in wetgeving, die geldt op beide niveaus. De kenmerken van de vuile biomassa dienen dan getoetst te worden aan deze wetgeving. Eens dit gebeurd is, kan een advies worden uitgesproken over de vervuilde

biomassa. Indien er onduidelijkheid blijft, kan er vanaf dit punt gekozen worden voor een bepaald scenario.

Het onderzoek in deze masterproef beperkt zich verder tot pyrolyse en verbranding als thermische conversietechniek. Beide technieken worden ook beknopt besproken. Bij het bepalen van de extra kosten die ontstaan bij de verwerking van vervuilde biomassa moet er eerst onderzocht worden welke factoren deze extra kosten kunnen veroorzaken. Daarom moet er eerst onderzocht worden hoeveel metalen er juist in het hout zitten. Dit zal waarschijnlijk niet met zekerheid te bepalen zijn aangezien er op dit moment in de Kempen slechts op proefveldschaal gewerkt wordt. Hiervan zijn er echter wel gegevens beschikbaar waaruit de hoeveelheid vervuiling in de biomassa op een benaderende wijze kan worden geschat. Ook is het nuttig om te weten hoeveel van deze metalen vrij komen tijdens de verwerking en op welke plaats. Deze informatie zal vooral vanuit de literatuur komen en aanvullend worden er wetenschappers met relevante kennis hierover geraadpleegd. Dan moet er worden nagegaan of de aanwezigheid van de metalen een invloed heeft op het verwerkingsproces en of er secundaire reacties op treden. Indien dit het geval is, moet de kost hiervan worden geschat en dient deze gespreid te worden over de hoeveelheid vervuilde biomassa. Het is van uiterst belang dat kosten, die ook gelden voor zuivere houtige biomassa, niet bij de *extra* kosten worden gerekend. Om meer te weten te komen over de het ontstaan van extra kosten zal zowel literatuur als praktijkkennis van reeds geïnstalleerde pyrolyse- en verbrandingsinstallaties een belangrijke bron van informatie zijn.

Ten slotte kan een besluit gevormd worden over de extra kosten die optreden bij pyrolyse of verbranding van vervuilde biomassa. Indien deze te hoog zijn, kan er besloten worden dat verwerking op deze wijze niet opportuun is. Er zal uiteindelijk gekozen worden voor de optie die de minste extra kosten impliceert met een maximalisatie van de uiteindelijke baten.

2. Fytoremediatie

2.1 Wat is fytoremediatie

In deze masterproef bekijken we in detail enkele aspecten van fytoremediatie. Dit is een breed begrip waaronder meerdere remediëringstechnieken te onderscheiden zijn. Bij fytoremediatie worden vervuilde bodems in situ gereinigd met behulp van planten. In de literatuur zijn er talrijke definities terug te vinden. Zo benoemden Garbisu & Alkorta (2001) het als een techniek die gebruik maakt van planten voor het verwijderen of onschadelijk maken van pollutanten uit het milieu. Pulford & Watson (2003) stellen dat bij fytoremediatie de grond gebruikt wordt voor het kweken van gewassen, die een bepaalde hoeveelheid van de vervuilende metalen uit de bodem kunnen opnemen en deze opslaan in hun biomassa. Fytoremediatie kan echter alleen worden toegepast op matig vervuilde bodems en werkt slechts tot een gemiddelde bodemdiepte van 50 cm. Indien men kiest voor korteomloophout kan de bodem wel dieper gezuiverd worden (Vangronsveld et al., 2009).

Indien men opteert voor fytoremediatie moet er een afweging gebeuren tussen het grote voordeel, zijnde lage kosten, en het grote nadeel, zijnde de lange remediatieperiode. Ook is een volledig zuivere bodem niet haalbaar. Dit is echter van minder belang aangezien vervuilde bodems maar tot een bepaalde graad gereinigd dienen te worden (Vangronsveld et al., 2009). Indien een grote oppervlakte slechts matig vervuild is, zijn traditionele bodemsaneringstechnieken geen optie (Meers et al., 2009). Sanering door fytoremediatie is ook goedkoper dan traditionele remediatietechnieken (Vangronsveld et al., 2009).

2.2 Accumulatoren en hyperaccumulatoren

Een goede keuze van gewas is belangrijk bij fytoremediatie. Een ideale plant voor het opnemen van zware metalen uit de bodem voldoet aan de volgende eigenschappen (Vangronsveld et al., 2009):

- tolerantie voor de concentraties zware metalen
- snelle groei en goede opname van metalen

- accumulatie van de metalen in de bovengrondse delen van de plant
- makkelijk te oogsten

Voor de gewassen wordt er een onderscheid gemaakt tussen hyperaccumulatoren en accumulatoren (of niet-hyperaccumulatoren). Op dit moment zijn er meer dan 400 plantensoorten uit minstens 45 plantenfamilies bekend die metalen in aanzienlijke concentraties kunnen opnemen en concentreren in hun biomassa (Reeves & Baker, 2000).

Hyperaccumulatoren zijn planten die in hun biomassa een hoge concentratie van metalen kunnen opslaan. Zij hebben echter een beperkte biomassaopbrengst. De meeste hyperaccumulatoren zijn in staat om één soort pollutant aan de bodem te onttrekken, maar er bestaan ook soorten die verschillende pollutanten tegelijk kunnen opnemen (Vangronsveld et al., 2009).

Onder niet-hyperaccumulatoren vallen gewassen die een lagere concentratie metalen opnemen in hun biomassa. Vaak zijn dit planten met een hogere biomassa dan gewone accumulatoren. Hierdoor kan het zijn dat een niet-hyperaccumulator meer metalen opneemt dan een gewone accumulator. Door de hogere biomassaopbrengst is de concentratie van metalen in de plant echter lager dan bij de hyperaccumulator. Het onderscheid tussen accumulatoren en hyperaccumulator wordt dus gemaakt op basis van de *concentratie* metalen in de biomassa.

Om te bepalen of een gewas al dan niet een hyperaccumulator is, bestaan er grenswaarden. Deze worden voorgeschreven door Baker & Brooks (1989) en Reeves & Baker (2000). Voor cadmium (Cd) bedraagt de grenswaarde bijvoorbeeld 100 mg kg^{-1} droge stof.

2.3 Vormen van fyto remediatie

Fyto remediatie is een algemeen begrip waaronder men verschillende methoden voor bodemsanering kan onderbrengen. Deze worden meer uitgebreid besproken door Vangronsveld et al. (2009). Pulford & Watson (2003) identificeren 5 subgroepen van fyto remediatie zijnde

Fytodegradatie: bij deze techniek worden gewassen ingezet die door middel van microben organische verontreinigingen gedeeltelijk afbreken.

Rhizofiltratie: hier nemen de wortels van bepaalde gewassen metalen op en wordt zo de bodem gezuiverd.

Fytostabilisatie: bij deze techniek worden verontreinigingen vastgelegd of geïmmobiliseerd in de bodem door middel van bepaalde gewassen of chemische additieven.

Fytovolatilisatie: bij deze vorm van fyto-remediatie nemen bepaalde gewassen verontreinigingen op en komen deze door verdamping uit de planten in de atmosfeer terecht.

Fyto-extractie: bij deze vorm van fyto-remediatie verwijderen planten verontreinigingen uit de bodem en slaan ze deze op in de oogstbare delen van de plant.

Voor deze masterproef is fyto-extractie de te bestuderen subgroep. Hierin is er echter nog een verschil waar te nemen tussen pure fyto-extractie en het gematigdere fyto-attenuatie. Dit verschil is zeker het vermelden waard.

2.3.1 Fyto-extractie

Bij fyto-extractie primeert de opname van de gewassen boven de opbrengst van biomassa. Een snelle sanering van de bodem gaat voor op een hoge biomassaopbrengst. Daarom opteert men dan ook vaak hyperaccumulatoren. De werkwijze bij fyto-extractie kan worden geschetst in drie belangrijke stappen (Vangronsveld et al., 2009):

1. teelt van de desbetreffende plant op de gecontamineerde bodem
2. oogsten van de biomassa die polluenten bevat
3. post-oogst behandelingen om het volume van de biomassa te verkleinen om het dan te kunnen storten als gevaarlijke afvalstroom of om de metalen er uit te halen en te valoriseren

2.3.2 Fyto-attenuatie

Een andere vorm van fyto-remediatie is fyto-attenuatie of fyto-management. Nu staat niet de opnamecapaciteit van de plant centraal, maar de biomassaopbrengst. Het doel van fyto-attenuatie is risicoreductie en het genereren van een inkomen voor de landbouwer. Het grote nadeel is een veel langere remediatieperiode (Meers et al., 2009). Bij fyto-attenuatie wordt er meestal gebruik gemaakt van gewone accumulatoren of niet-hyperaccumulatoren.

2.3.3 Fyto-remediatie in de Kempen

Op dit moment lijkt fyto-attenuatie of fyto-management met behulp van niet-hyperaccumulatoren de meest belovende optie in de Kempen. Risicoreductie en het genereren van een alternatief inkomen voor de landbouwer wordt verkozen boven een snelle sanering van de gecontamineerde bodem (Meers et al., 2009). Gewassen met een hoge biomassaopbrengst die een lage concentratie metalen bevat, zijn meer geschikt voor valorisatie dan de beperkte, sterk gecontamineerde biomassaopbrengst van hyperaccumulatoren.

In deze masterproef gaat er verder alleen aandacht uit naar gewone accumulatoren. Hyperaccumulatoren lijken niet aangewezen voor toepassing in de Kempen en hebben te maken met allerhande praktische moeilijkheden. Zo zijn er nieuwe, onbekende landbouwtechnieken vereist voor een goed teeltverloop. Ook de beschikbaarheid van zaden blijkt beperkt te zijn (Persoonlijk communicatie, Schreurs E.).

2.4 Inventarisatie van gewassen

2.4.1 Korteomloophout

2.4.1.1 *Algemeen*

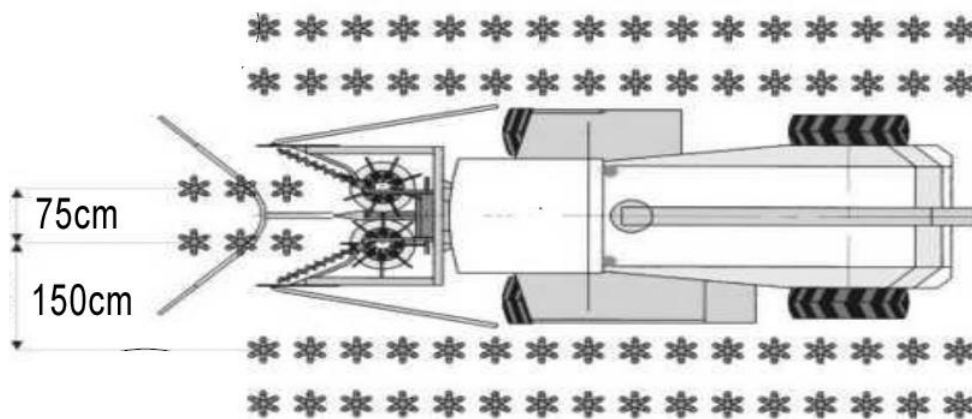
Onder korteomloophout (KOH) verstaan we dichte aanplantingen met snelgroeiende boomsoorten zoals wilg of populier. Deze worden één keer aangeplant en kunnen nadien meerdere keren geoogst worden. In het Bosdecreet, uitgegeven door het Vlaams Agentschap voor Natuur en Bos, wordt het gedefinieerd als de teelt van snelgroeiende houtachtige gewassen waarbij de bovengrondse biomassa periodiek tot maximaal acht jaar na de aanplanting of de vorige oogst in zijn totaliteit wordt geoogst. In 2006 werd korteomloophout in een wijziging van dit Bosdecreet uitdrukkelijk uit de bossfeer gehaald.

Bijgevolg valt de teelt dus niet meer onder het Bosdecreet maar is het een gewone landbouwteelt. Belangrijk hierbij is wel dat de teelt enkel gebeurt buiten 'ruimtelijk kwetsbare gebieden' zoals natuurgebieden, parkgebieden, agrarische gebieden met bijzondere waarde, enzovoort.

Kortoomloophout is een niet-hyperaccumulator en heeft een hoge biomassaopbrengst en is daarom geschikt voor fytomanagement in de Kempen. De teelt staat in Vlaanderen echter nog niet op punt maar er zijn al proefvelden in onder andere Lommel, Lochristi en Rumbeke.

2.4.1.2 Praktisch

Het planten van kortoomloophout kan gebeuren met bestaande preiplanters en vereist dus niet noodzakelijk een nieuwe investering. Het gebruik van 'stepplanters' levert echter betere resultaten maar vereist wel een investering. Aangezien de stronken na het oogsten blijven zitten, mogen ze niet beschadigd worden bij het oogsten. Daarom dient men rekening te houden met de beschikbare oogstmachines. Een voorbeeld wordt gegeven in onderstaand plantschema. Op de kopakkers moet er ook plaats voorzien worden voor het keren van de oogstmachine waardoor er afhankelijk van de vorm van het perceel ook plantoppervlakte verloren gaat. Dit verlies kan eventueel opgevangen worden door aanplanting met andere al dan niet fyto-remediërende gewassen.



Kopakker 12 m vrijlaten!

Figuur 2.1: Plantschema kortoomloophout (Meiresonne, 2010)

De eerste oogst kan gebeuren na vier jaar. Hierna kan men ongeveer om de drie jaar de nieuwe scheuten oogsten. Eén aanplanting kan dienst doen voor ongeveer 6 à 7 oogstcycli. Na een periode van bijna 20 jaar moeten de oude stronken verwijderd worden en kan er opnieuw worden aangeplant.

Het oogsten van korteomloophout kan op twee manieren. Eén optie is om de stammetjes op het veld af te snijden en af te voeren. De stammetjes worden dan gedroogd en later verhakseld. Een tweede optie is om de stammetjes onmiddellijk te verhakselen met een maïshakselaar met aangepaste oogstkop. De snippers worden dan achteraf gedroogd. Deze oogstkoppen zijn echter nog niet vlot ter beschikking in Vlaanderen. De transportkosten hiervoor kunnen het oogsten dus duur maken (Meiresonne, 2010; Verdonckt, 2010; Meers, 2010).

Indien men aanplanting en oogst buiten beschouwing laat, is de teelt van korteomloophout arbeidsextensief. Enkel in de eerste jaar na aanplanting moet het perceel onkruidvrij gehouden worden. Daarna overstijgt het gewas de onkruidgroei en verdwijnt deze door een gebrek aan licht. Ook na de oogst moet men kort het onkruid onderdrukken. Deze onkruidbestrijding kan mechanisch of chemisch gebeuren. Bijkomende bemesting is na verloop van tijd wel vereist. Verder is er weinig arbeid nodig tijdens het groeiproces, bijgevolg blijven de kosten dus beperkt.

Na de oogst moeten de houtsnippers ongeveer 6 maanden drogen voor ze verwerkt worden. Dit kan enkel door thermische conversietechnieken zoals verbranding, vergassing of (flash)pyrolyse. Vergisting van korteomloophout is niet mogelijk (Thewys & Kuppens, 2008).

2.4.1.3 *Biomassaopbrengst*

korteomloophout heeft doorgaans een opbrengst van 10 ton DS ha⁻¹ per jaar. Het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek is optimistischer en spreekt van een opbrengst rond de 12 ton DS ha⁻¹ per jaar. Uit experimenten op het proefveld op de Balendijk te Lommel blijkt echter dat er op de zanderige en met zware metalen verontreinigde bodem een lagere opbrengst gerealiseerd wordt van 10,4 ton DS ha⁻¹ per jaar. Deze bestaat dan uit 8 ton DS ha⁻¹ twijgen en 2,4 ton DS ha⁻¹ bladeren (Vangronsveld et al., 2009). Er dient opgemerkt te worden dat

kortoomloophout slechts om de 3 jaar wordt geoogst. Bij een oogst verwacht men dus een opbrengst van 26,4 ton².

2.4.1.4 Absorptie

Kortoomloophout is een niet-hyperaccumulator. De concentratie van metalen in de biomassa is dus relatief laag. Uit monsters van de biomassa die gekweekt werd op het proefveld op de Balendijk blijkt dat de cadmiumopname van wilg 0,34 kg ha⁻¹ jaar⁻¹ is. Indien men uitgaat van een lineaire opname gedurende de remediatieperiode, zou het ongeveer 67 jaar duren eer de grond gesaneerd is (Vangronsveld et al., 2009).

De biomassaopbrengst en opnamecapaciteit van het kortoomloophout varieert ook per soort. Uit onderzoek op de testsite blijkt dat 'Zwarte Driebast' de hoogste biomassaopbrengst heeft gevolgd door 'Loden' en 'Belders'. De klonen 'Loden' en 'Tora' bleken dan weer de hoogste concentraties metalen op te nemen. Bijgevolg besluit men dat de klonen 'Loden', 'Zwarte Driebast' en 'Tora' het best worden ingezet voor de sanering van met cadmium vervuilde bodems (Vangronsveld et al., 2009). Stals et al. (2010a) duidt er op dat vooral *Salix Fragilis* (Kraakwilg) geschikt is voor de remediëring van cadmium en zink. Ook moet men bij de keuze van de kloon rekening houden met resistentie tegen bepaalde ziektes en plagen. Het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek benadrukt de nood aan aangepaste klonen voor Vlaanderen (Meiresonne, 2010).

De concentratie van opgenomen metalen is niet homogeen verdeeld in de plant. Voor de geoogste wilg uit het testveld werd gevonden dat de bladeren 60 mg Cd kg⁻¹ DS bevatten. De twijgen bevatten slechts 24 mg kg⁻¹ DS cadmium. Procentueel gezien bestaat de biomassa voor 23% of 2,4 ton uit bladeren en voor 77% of 8 ton uit twijgen (Vangronsveld et al., 2009). Daarom is het belangrijk om kortoomloophout dat instaat voor fyto-remediatie te oogsten voor de herfst. Anders kan men de bladeren niet mee oogsten en komen deze terug in de bodem terecht. Kortoomloophout dat niet instaat voor fyto-remediatie wordt echter in de winter geoogst, zonder de bladeren. Deze zijn dan afgevallen en dienen als bron van nutriënten (INBO, 2010). Stals et al. (2010a) vond onderstaande concentraties metalen uit stalen *Salix Fragilis* gekweekt in Balen. Deze lijken echter vrij optimistisch.

² Men oogst voor de bladeren afvallen. Er wordt dus 2,4 ton bladeren geoogst (opbrengst van één jaar) en 24 ton twijgen (opbrengst van 3 jaar).

	Cd-opname	Zn-opname	Pb-opname
Salix Fragilis bladeren	80,0 mg kg ⁻¹ DS	4,63 x 10 ³ mg kg ⁻¹ DS	14,4 mg kg ⁻¹ DS
Salix Fragilis twijgen	40,9 mg kg ⁻¹ DS	822 mg kg ⁻¹ DS	26,3 mg kg ⁻¹ DS

Tabel 2.1: Metaalopname Salix Fragilis (Stals et al., 2010a)

2.4.2 Koolzaad

2.4.2.1 Algemeen

Koolzaad behoort samen met een aantal andere koolsoorten tot de familie van de Brassicaceae. Er bestaat een verschil tussen winter- en zomerkoolzaad. In België verbouwt men hoofdzakelijk winterkoolzaad gezien het gematigd klimaat met overwegend zachte winters. Winterkoolzaad heeft ook een hogere opbrengst dan zomerkoolzaad. De teelt van koolzaad is in vergelijking met de traditionele teelten relatief onbekend in de Belgische landbouwsector. In vergelijking met andere alternatieve teelten zoals korteomloophout of miscanthus scoort ze qua bekendheid wel beduidend hoger (Vleeschouwers, 2010). Daarom zal de aanvaarding door de landbouwers makkelijker verlopen dan voor tot nog toe onbekende teelten zoals korteomloophout of miscanthus.

De zaden bevatten 42% olie die er door middel van een koude en warme persing na de oogst wordt uitgehaald. Deze olie kan gebruikt worden voor voedingsdoeleinden of als technische grondstof. Wat rest van de plant is het koolzaadschroot of de 'koolzaadkoek'. Dit schroot kan gebruikt worden als veevoeder of als biomassa voor de opwekking van groene energie (Lamont & Lambrechts, 2005).

Indien men koolzaad inzet voor fyto-management kan men de olie en het schroot uiteraard niet gebruiken voor voedingsdoeleinden omdat deze gecontamineerd zijn met zware metalen. Daarom wordt er gezocht naar andere valorisatiemogelijkheden. De olie kan men bijvoorbeeld gebruiken als biobrandstof voor een WKK. De koolzaadkoek kan men vergisten of pyrolyseren.

2.4.2.2 Praktisch

Winterkoolzaad dient gezaaid te worden tussen half augustus en half september. Per hectare is ongeveer 4 tot 5 kg zaigoed nodig. Zowel het klaarleggen van de akker als het zaaien

kan gebeuren met bestaande landbouwmachines en vereisen dus geen extra investering. Koolzaad wordt bij voorkeur geteeld op gronden met een pH-waarde vanaf 6,5. In Vlaanderen oogst men koolzaad doorgaans in de eerste helft van juli. Het oliegehalte neemt toe met het rijpen van de zaden maar deze stijging is uiteraard niet onbeperkt. Koolzaad kan best geteeld worden in een rotatiecyclus van 3 à 4 jaar (Lamont & Lambrechts, 2005).

2.4.2.3 *Biomassaopbrengst*

Uit een studie van de Vlaamse Gemeenschap blijkt dat men gemiddeld een oogstopbrengst van 4 tot 6 ton DS per hectare mag verwachten bij de teelt van winterkoolzaad. Uit gegevens van een veldonderzoek in Lommel blijkt een biomassaopbrengst van 8 ton per hectare (Vangronsveld et al., 2009).

2.4.2.4 *Absorptie*

Door zijn relatief hoge biomassaopbrengst en laag extractievermogen kunnen we stellen dat koolzaad een niet-hyperaccumulator is. Onderzoek op de proefvelden in Lommel toont aan dat de bekomen biomassa 6 mg Cd per kilogram droge stof bevat. Indien we optimistisch rekenen met een biomassaopbrengst van 8 ton ha⁻¹, zien we dus dat er per hectare een cadmiumopname is van 0,048kg ha⁻¹ per oogst. Als men uitgaat van een lineaire extractiehoeveelheid, duurt het 234 jaar om de vervuilde gronden in de Kempen te saneren (Vangronsveld et al., 2009). Koolzaad dient echter in een rotatie van 3 jaar gekweekt te worden waardoor de totale saneringstijd nog veel langer duurt. Koolzaad heeft een zinkopname van 1,215 mg per kilogram droge stof (Grispen et al., 2006). De loodopname bedraagt 2,4 mg per kilogram droge stof (Meers et al., 2005).

2.4.3 Miscanthus

2.4.3.1 *Algemeen*

Miscanthus is een meerjarige grasachtige van Aziatische afkomst. De plant bestaat uit houtachtig materiaal en kan 3 tot 4 meter hoog worden (Lewandowski et al., 2000). Het is een onbekend gewas voor de Vlaamse landbouwsector. Een onderzoek van de Boerenbond wijst uit 95% van de aangeschreven landbouwers geen kennis heeft over miscanthus (Vleeschouwers, 2010). Toch is er een interessant toekomstperspectief. Miscanthus kan na een eenmalige aanplant gedurende 15 tot 20 jaar jaarlijks opnieuw geoogst worden. Enkel in het eerste jaar zijn er problemen met onkruid. In volgende jaren wordt dit echter volledig

onderdrukt door de dichte begroeiing van het gewas. Naast de arbeid- en kapitaalextensieve teelt is de mogelijkheid tot het aanplanten en oogsten met bestaande landbouwmachines een groot voordeel. Nadelen zijn de beperkte teeltkennis en de lange termijninvestering.

Het ILVO (Instituut voor Landbouw- en Visserijonderzoek beschikt over een proefveld in Wetteren waar men sinds enkele jaren onderzoek doet naar miscanthus.

2.4.3.2 *Praktisch*

Miscanthus wordt eenmalig aangeplant en kan dan gedurende een periode van 15 tot 20 jaar jaarlijks worden geoogst. Het gewas dient niet gezaaid te worden maar geplant met rhizomen (2 per m²). Dit dient bij voorkeur te gebeuren in het voorjaar bij een bodemtemperatuur vanaf 10 tot 12°C. De aanplant kan gebeuren met bestaande aardappel- of kolenplanters. Miscanthus heeft ook weinig bodemvereisten en kan geteeld worden op de zandgrond van de Kempen. Het gewas vereist geen tot weinig bemesting. In het eerste jaar is er een trage groei en kan men last hebben van onkruid. In de volgende jaren verdwijnt dit probleem door de snelle groei van het gewas (Landbouwleven, 2010)

De oogst gebeurt met bestaande landbouwmachines en vereist dus geen extra investering. De biomassa kan ofwel op het veld verhakseld worden met een traditionele maïshakselaar of in zijn geheel gemaaid worden om ze dan in balen te persen. Indien men een lage vochtigheid van de biomassa wenst, oogst men best in het voorjaar. Het gewas droogt dan in de koude wintermaanden (Energieteelten als bron van biomassa voor bio-energie productie, ILVO, z.d.) Vanuit het standpunt van fyto-management is het echter interessanter om te oogsten in het najaar net voor de plant haar bladeren verliest, gezien deze ook een deel van de opgenomen metalen zullen bevatten.

2.4.3.3 *Biomassaopbrengst*

De biomassaopbrengst van miscanthus is beduidend lager in het eerste jaar na de aanplant. Op de proefvelden van het ILVO werd in 2007 bij de eerste oogst een opbrengst van 3,2 ton DS ha⁻¹ genoteerd. De tweede oogst had een beduidend hogere opbrengst van 15,43 ton DS ha⁻¹. Bij de derde oogst in 2009 bedroeg de opbrengst 25 ton DS ha⁻¹. Men verwacht dat men deze opbrengst kan aanhouden tot het einde van de levensduur van het gewas ("Energieteelten als bron van biomassa voor bio-energie productie.", z.d; Muylle, z.d.).

Dit zijn opbrengsten die gelden bij een oogst in het voorjaar. Indien men miscanthus wilt inzetten als fyto-remediërend gewas, dient men echter te oogsten in het najaar, voor de plant haar bladeren verliest. De biomassaopbrengst zal dan 25% hoger, dit is echter grotendeels te wijten aan een hogere vochtigheidsgraad ("Energieteelten als bron van biomassa voor bio-energie productie.", z.d).

Zware metalen in de bodem blijken uit onderzoek van Hsu & Chou (1992) geen grote invloed te hebben op de groei of opbrengst van miscanthus.

2.4.3.4 Absorptie

In een onderzoek van Arduini et al. (2006) onderzoekt men de groei en metaalabsorptie van miscanthus op cadmiumhoudende bodems. Op laboratoriumschaal werd bij een hydroponisch experiment miscanthus gekweekt op bodems met een variërende cadmiumconcentratie. De resultaten worden in onderstaande tabel weergegeven.

Cadmium in bodem (mg l⁻¹)	Cadmiumopname plant
0,75	24,9 mg kg ⁻¹
1,50	38,8 mg kg ⁻¹
2,25	52,5 mg kg ⁻¹
3,00	79,8 mg kg ⁻¹

Tabel 2.2: Cadmiumopname miscanthus (Arduini, 2006)

Er dient opgemerkt te worden dat dit resultaten zijn uit een hydroponisch experiment. Bij deze experimenten ligt de opname altijd beduidend hoger dan de opname die men in praktijkexperimenten behaalt. De resultaten van Arduini et al. (2006) lijken dus te optimistisch.

2.4.4 Hennep

2.4.4.1 Algemeen

Hennep (*Cannabis sativa* L.) is een plant die behoort tot de Cannabaceae. Door haar fyto-remediërend vermogen en hoge biomassaopbrengst komt ze in aanmerking voor fyto-remediatie. De term 'industriële hennep' wordt gebruikt om de hennep teelt te

omschrijven die doelt op de productie van grondstoffen zoals vezels en olie (Dancaert et al., 2006). In Europa mogen er 20 specifieke rassen geteeld worden. Deze rassen hebben een laag THC-gehalte en zijn dus niet geschikt om als drugs gebruikt te worden. In totaal wordt er ongeveer 16 000 ha industriële hennep geteeld in Europa waarvan het grootste deel (9000 ha) in Frankrijk. Ook in België zijn er al landbouwers bezig met de teelt. Een voorbeeld hier van is MolGreen: zij zijn gespecialiseerd in het bewerken van hennep tot vezels en koude persing van de oliehoudende zaden.

Hennep wordt geteeld voor twee halffabricaten: vezels en olie. De zaden worden geperst en deze olie kan worden gebruikt bij de productie van verf, zeep, inkt, cosmetica,... . De olie wordt ook gebruikt in de voedingsindustrie maar door de opname van zware metalen is dit irrelevant als de plant wordt ingezet in een fyto-remediatie-project. De stam van de plant levert vezels op die kunnen gebruikt worden als grondstof voor papier, kleding of zelfs in de auto-industrie.

2.4.4.2 *Praktisch*

De teelt van hennep is haalbaar in de Kempen. De plant vereist een droge grond. Vooral in de eerste weken zijn de jongen planten gevoelig voor wateroverlast. Ook mag de zuurtegraad van de bodem niet te laag zijn. Een pH-waarde groter dan 6 is ideaal. De droge zandgrond met een pH-waarde van 4 tot 5,5 in de Kempen kan dus een goede voedingsbodem zijn indien de pH-waarde verhoogd kan worden (Meers et al., 2009). Dit kan bijvoorbeeld door kalk toe te voegen aan de grond. Hennep is ook een zeer goede onkruidonderdrukker en is weinig gevoelig voor ziekten. Chemische sproeimiddelen zijn dus niet nodig en zo is hennep meteen een milieuvriendelijk alternatief (Dancaert et al., 2006).

2.4.4.3 *Biomassaopbrengst*

Voor de geproduceerde biomassa moet er worden nagegaan of de vervuilde vezels en zaden gebruikt kunnen worden voor de traditionele verwerkingsmethoden. Indien de concentraties metalen laag genoeg zijn, kunnen ze op dezelfde wijze verwerkt worden als niet-vervuilde hennep. Vergisting van de plant in zijn geheel is een mogelijke valorisatiemethode indien de biomassa niet als grondstof mag gebruikt worden door te hoge concentraties zware metalen.

Het document 'Inleiding tot de biologische teelt van hennep' van Dancaert et al. bevat ook een beknopte economische analyse van hennep-teelt. De gemiddelde zaadopbrengst is 1,2 ton ha⁻¹. Hier kan men ongeveer 400 liter olie uit persen. De stro-opbrengst is vrij

heterogeen en hangt sterk af van de zaaidichtheid. Gemiddeld wordt 8 ton ha⁻¹ geogst. De verkoopprijs van het geogste zaad en stro is respectievelijk €857 en €100 per ton. De teelt van hennep zou volgens de studie €277,44 ha⁻¹ kosten. Dit cijfer lijkt echter niet realistisch aangezien enkele belangrijke kosten buiten beschouwing worden gelaten. In een uitgebreidere kostprijs- berekening van hennep teelt in de Franse Champagnestreek komt men tot een kost per hectare van €851,85.

2.4.4.4 *Absorptie*

In een studie van Linger et al. (2002) werd het remediërend potentieel van hennep nagegaan. Gedurende één cyclus van vier maanden kan de plant 126g Cd ha⁻¹ opnemen. De hoogste concentraties werden teruggevonden in de bladeren en de zaden. In de stam, die gebruikt wordt voor vezelproductie, zijn de concentraties beduidend lager. De aanwezigheid van zware metalen bleek ook geen invloed te hebben op de vezelsterkte.

3. Juridisch statuut

Indien men een waarde wil toekennen aan vervuild korteomloophout uit fyto-remediatie is het van belang dat het wettelijke statuut van deze biomassastroom duidelijk is. Zowel juridisch als economisch gezien is er een groot verschil tussen afvalstoffen of grondstoffen. Op dit moment is het statuut van het vuile korteomloophout echter nog niet bepaald. Men moet dus veelal uitgaan van veronderstellingen bij de prijsbepaling. In dit hoofdstuk wordt er eerst een synthese gemaakt van de Europese en Vlaamse afval- en biomassadefinitie. Vervolgens worden de mogelijkheden voor vervuilde biomassa opgesomd en volgt er argumentatie waarom de biomassa niet het juridisch statuut van afval dient te krijgen.

3.1 Algemene duiding afval

3.1.1 Wetgeving op Europees niveau

Wetgeving op Europees niveau zit vervat in de Richtlijn 75/442/EEG van de Raad van 15 juli 1975 betreffende afvalstoffen. Deze tekst wordt ook wel de 'Kaderrichtlijn betreffende afvalstoffen genoemd'. In 2006 werd een verdere uitwerking van de eerstgenoemde richtlijn gerealiseerd in de Kaderrichtlijn afval 2006/12/EEG. De bedoeling van deze Kaderrichtlijn is het creëren van een Europees kader dat het ontstaan van afval moet beperken en de verwerking ervan moet optimaliseren. In 2008 werd er op Europees niveau een nieuw akkoord gesloten over een nieuwe Kaderrichtlijn afvalstoffen, 2008/98/EG. De lidstaten kregen tijd tot december 2010 om deze richtlijn om te zetten in nationale wetgeving.

3.1.1.1 Definitie afval

In de Europese Kaderrichtlijn 2006/12/EEG wordt afval gedefinieerd als 'elke stof of elk voorwerp behorende tot de in bijlage I genoemde categorieën waarvan de houder zich ontdoet, voornemens is zich te ontdoen of zich moet ontdoen.'

In de genoemde bijlage I van dezelfde richtlijn vinden we onder titel Q15 de afdeling 'Verontreinigde materialen, stoffen of producten die afkomstig zijn van bodemsaneringsactiviteiten.' Er dient wel opgemerkt te worden dat door het opnemen van

titel Q16, 'alle stoffen, materialen of producten die niet onder de hierboven vermelde categorieën vallen', de lijst niet als limitatief kan beschouwd worden. Elke stof kan dus in principe een afvalstof zijn.

Of de biomassa die ontstaat bij fyto-remediatieprojecten dus als afval moet beschouwd worden, hangt dus af van de interpretatie van 'zich ontdoen'. Deze term wordt echter niet gedefinieerd in het Europees recht. Indien er onduidelijkheid bestaat, dringt een juridische uitspraak aan de hand van beschikbare jurisprudentie zich op. Elke argumentatie om iets wel of niet als een afvalstof te beschouwen, moet immers vertrekken van het concept 'zich ontdoen'.

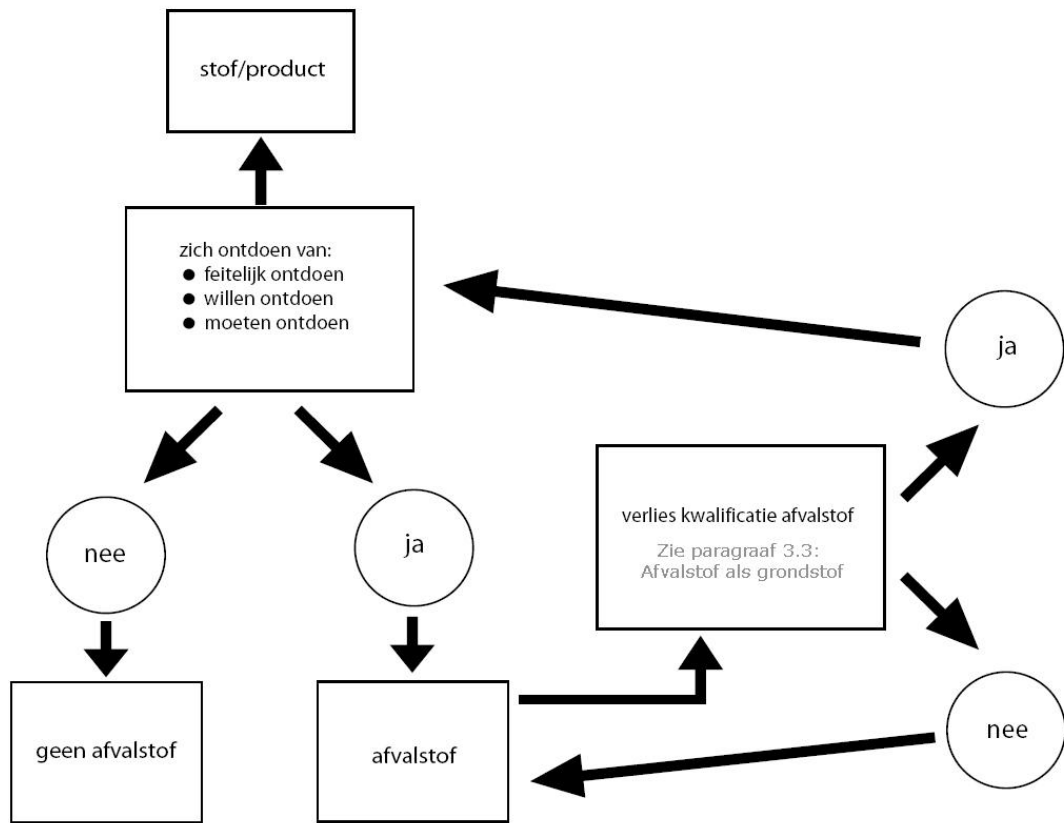
In opdracht van SenterNovem³ werd in Nederland het document 'Afval of biomassa, een juridische onderbouwing' uitgegeven. Hierin wordt gesteld dat het voor de vraag 'afvalstof of niet' geen belang heeft of een materiaal een economische waarde heeft, bijvoorbeeld als brandstof. Ook verontreinigingen zijn niet van doorslaggevende aard. Wat wel doorslaggevend is:

- of de houder van de stof de intentie heeft om zich er van te ontdoen.
- of de stof beschouwd kan worden als een product of materiaal dat niet als zodanig voor die toepassing was bedoeld.

Men vermeldt in dit document dat bij de vraag 'Afval of biomassa' er altijd sprake is van een grijs gebied waarbij zekerheid enkel door een rechterlijke uitspraak kan volgen.

Schematisch kan men de Europese afvalstoffen definitie dus als volgt weergeven:

³ Nederlands overheidsorgaan in verband met stimulering duurzame energieproductie



Figuur 3.1: Criteria t.b.v. beoordeling afvalstof/niet-afvalstof
(Senternovem, 2005)

Centraal staat dus de interpretatie van het begrip 'zich ontdoet, voornemens is zich te ontdoen of zich moet ontdoen'. Indien men hier niet aan voldoet, is er geen sprake van een afvalstof. Indien wel, spreekt men van een afvalstof.

Er dient opgemerkt te worden dat deze schematische figuur een vereenvoudigde weergave is. In werkelijkheid zijn er naast de interpretatie van 'zich ontdoen' meerdere criteria die bepalen of iets al dan niet een afvalstof is. Ook gaat men er in deze figuur van uit dat er op deze vraag altijd één duidelijk antwoord is, namelijk 'ja' of 'nee'. Hier tussen ligt echter een grijze zone waarin rechterlijke interpretatie vereist is.

De kwalificatie als afvalstof kan echter teniet gedaan worden. Dit wordt aangehaald in paragraaf 3.3.

3.1.1.2 EVOA

Indien men met vervuilde afvalstoffen bezig is, kan het ook raadzaam zijn om de Europese Verordening Overbrenging Afvalstoffen (EVOA) te bekijken. Hierin staan de procedures die gevolgd moeten worden bij grensoverschrijdend transport van afval. Afhankelijk van de aard van de afvalstof zijn hier vergunningen voor nodig. De EVOA verdeelt afvalstoffen over drie verschillende categorieën. Er is een groene lijst, oranje lijst en een categorie afvalstoffen waarvoor een uitvoerverbod geldt.

Op de groene lijst staan de afvalstoffen die niet gevaarlijk zijn en waarvan de overbrenging het minste risico inhoudt. Deze is terug te vinden in bijlage III van de EVOA. De oranje lijst bevat gevaarlijke afvalstoffen of afvalstoffen waarvan de overbrenging meer risico inhoudt en is te vinden in bijlage IV. Voor deze categorie is een voorafgaande schriftelijke kennisgeving en toestemming vereist. Voor de derde categorie afvalstoffen geldt een uitvoerverbod naar niet-OESO-landen. Deze lijst vinden we terug in bijlage V (De Picker, 2007).

In bijlage V, die afvalstoffen oplijst waarvoor een uitvoerverbod geldt, is vooral categorie A1020 interessant. Deze wordt in de verordening nr. 1013/2006 omschreven als:

"afvalstoffen die een van de volgende stoffen als bestanddeel of verontreiniging bevatten, uitgezonderd metalen in massieve vorm:

- *antimoon; antimoonverbindingen*
- *beryllium; berylliumverbindingen*
- *cadmium; cadmiumverbindingen*
- *lood; loodverbindingen*
- *selenium; seleniumverbindingen*
- *tellurium; telluriumverbindingen"*

3.1.2 Wetgeving op Vlaams niveau

Op Vlaams niveau wordt het afvalbeleid bepaald door de Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij (OVAM). Zij bepaalt binnen de door Europa begrensde richtlijnen het beleid in Vlaanderen betreffende de preventie en het beheer van afval. De bevoegdheden van de OVAM worden grondig omschreven in het Afvalstoffen- en Bodemsaneringsdecreet. Van belang voor deze masterproef is dat de OVAM ook beschikt over de bevoegdheid van

materialenbeleid. Hierdoor kan men betere beslissingen maken op het vlak van zowel zuinig gebruik van grondstoffen als voorkomen van afvalstoffen. De OVAM kan door deze bevoegdheid uitspraken doen over de kwalificatie afvalstof/niet-afvalstof.

De definitie van afval uit het Vlaamse afvalstoffendecreet werd integraal overgenomen uit de Europese Kaderrichtlijn 2006/12/EEG:

'elke stof of elk voorwerp behorende tot de in bijlage I genoemde categorieën waarvan de houder zich ontdoet, voornemens is zich te ontdoen of zich moet ontdoen.'

In paragraaf 3.1.1.1 werd al vermeld dat de genoemde bijlage I een niet-limitatieve lijst bevat met onder titel Q15 de afdeling 'Verontreinigde materialen, stoffen of producten die afkomstig zijn van bodemsaneringsactiviteiten.'

Op Vlaams niveau zijn er twee reglementen opgesteld die van groot belang zijn voor deze masterproef. Dit zijn het Vlaams reglement voor Afvalvoorkoming (VLAREA) en het Vlaams reglement betreffende de milieuvergunning (VLAREM). In deze documenten wordt Vlaamse regelgeving vastgelegd over zowel industrieel als huishoudelijk afval. Het VLAREM is verder in deze masterproef van groot belang aangezien ze definities geeft voor (afval)verbranding en emissiegrenswaarden bevat voor pyrolyse- en verbrandingsinstallaties.

3.1.2.1 VLAREA

VLAREA staat voor het 'Vlaams reglement voor Afvalvoorkoming- en beheer.' Dit document dat sinds 1 juni 1988 van kracht was, werd grondig gewijzigd op 5 december 2003 en bevat bijna alle uitvoeringsbesluiten bij het Afvalstoffendecreet. Het bevat nuttige informatie over zowel huishoudelijk als industrieel afval en de behandeling hiervan.

3.1.2.2 VLAREM

VLAREM staat voor het 'Vlaams reglement betreffende de milieuvergunning'. Het hoofddoel is schetsen van een wettelijk kader om milieuhinder door privépersonen, bedrijven, handelszaken,... zo goed mogelijk te beperken.

Het document bestaat uit twee delen, titel I en titel II. De eerste titel omvat een lijst van hinderlijke inrichtingen. Deze worden ingedeeld in drie klassen⁴ en bepaalt hoe de vergunningsprocedure dient te verlopen. In de tweede titel zijn de milieuvorwaarden opgenomen die van toepassing zijn op de in titel I ingedeelde inrichtingen (website Departement Leefmilieu, Natuur en Energie).

3.2 Algemene duiding biomassa

Aangezien er onduidelijkheid heerst rond het juiste statuut van de biomassa die door fyto-remediatie in de Kempen wordt opgewekt, is het nuttig om naast het begrip afval ook het begrip 'biomassa' van nader bij te bekijken.

Biomassa wordt gebruikt als overkoepelende verzamelterm voor uiteenlopende materialen en stoffen van kortcyclische organische oorsprong, zowel plantaardig als dierlijk, die onder andere ingezet kunnen worden voor energieopwekking. Veel van deze materialen en stoffen zijn reststromen van andere industrieën. Dit opende de discussie over afvalstoffen en bijproducten (Senternovem, 2005).

3.2.1 Wetgeving op Europees niveau

Er zijn op Europees niveau verscheidene definities te vinden voor het begrip biomassa. We vermelden er hier drie. Een eerste vinden we terug in de **Richtlijn Hernieuwbare Energie 2009/28/EG**:

'Biomassa is de biologisch afbreekbare fractie van producten, afvalstoffen en residuen van biologische oorsprong uit de landbouw (met inbegrip van plantaardige en dierlijke stoffen), de bosbouw en aanverwante bedrijfstakken, met inbegrip van de visserij en de aquacultuur, alsmede de biologisch afbreekbare fractie van industrieel en huishoudelijk afval.'

Deze definitie is vrij ruim. Een zwak punt ervan is dat men er vanuit gaat dat biomassa altijd biologisch afbreekbaar is en dat materialen die geen biomassa zijn dat niet zijn. Dit is

⁴ Hinderlijke inrichtingen in klasse 1 en 2 zijn vergunningsplichtig, inrichtingen van klasse 3 hebben enkel meldingsplicht.

meestal zo, maar in specifieke gevallen kunnen er afwijkingen optreden (Senternovem, 2005).

Een tweede definitie voor biomassa komt uit de **Richtlijn voor grote stookinstallaties 2001/80/EG**:

'Producten die geheel of gedeeltelijk bestaan uit plantaardig landbouw- of bosbouw materiaal dat gebruikt kan worden als brandstof om de energetische inhoud ervan te benutten, alsmede de volgende als brandstof gebruikte afvalstoffen:

- *plantaardig afval uit land- en bosbouw;*
- *plantaardige afval van de levensmiddelenindustrie, indien de opgewekte warmte wordt teruggewonnen;*
- *vezelachtig afval afkomstig van de productie van ruwe pulp en van de productie van papier uit pulp, indien het op de plaats van productie wordt meeverbrand en de opgewekte warmte wordt teruggewonnen;*
- *kurkafval;*
- *houtafval, met uitzondering van houtafval dat ten gevolge van een behandeling met houtbeschermingsmiddelen of door het aanbrengen van een beschermingslaag gehalogeneerde organische verbindingen dan wel zware metalen kan bevatten, wat in het bijzonder het geval is voor houtafval afkomstig van bouw- en sloopafval'*

Producten uit de land- of bosbouw die (gedeeltelijk) bestaan uit plantaardig materiaal en die men kan gebruiken voor als hernieuwbare energiebron zijn dus afval. Voorbeelden hiervan zijn de teelt van energiemais of koolzaad voor vergisting. Verder wordt in deze definitie een opsomming gegeven van bepaalde afvalstromen die men ook als biomassa mag beschouwen. Bij de productie van kurken blijven er bijvoorbeeld onbruikbare restjes kurk over. Dit is een afvalstof voor het producerende bedrijf. Gezien het echter plantaardig is en het als brandstof kan gebruikt worden, mogen we het volgens deze definitie beschouwen als biomassa. De lijst van afvalstromen die ook als biomassa mag beschouwd worden, is echter limitatief. Afvalstoffen uit de industrie of huishoudens die niet vernoemd worden in de definitie mogen niet beschouwd worden als afvalstof, ook al zijn ze biologisch afbreekbaar (Senternovem, 2005).

De meest ruime definitie van het begrip biomassa wordt gegeven door de **Beschikking van de Commissie van 29/01/2004** tot vaststelling van richtsnoeren voor de bewaking en rapportage van de emissies van broeikasgassen overeenkomstig de richtlijn 2003/87/EG:

Niet-gefossiliseerd en biologisch afbreekbaar organisch materiaal dat afkomstig is van planten, dieren en micro-organismen. Hieronder vallen onder andere ook producten, bijproducten, reststoffen en afvalstoffen afkomstig van landbouw, bosbouw en verwante bedrijfstakken alsmede de niet-gefossiliseerde en biologisch afbreekbare organische fracties van industriële en huishoudelijke afvalstoffen. Onder biomassa vallen ook gassen en vloeistoffen die zijn gewonnen bij de ontbinding van niet-gefossiliseerd en biologisch afbreekbaar organisch materiaal. Bij verbranding ten behoeve van energieopwekking wordt biomassa aangeduid als biobrandstof.

3.2.2 Wetgeving op Vlaams niveau

In de Vlaamse wetgeving bestaat er zowel in de energie- als milieuwetgeving een definitie voor het begrip biomassa.

In de **energiewetgeving** wordt in het Besluit van de Vlaamse Regering van 5 maart 2004 inzake de bevordering van elektriciteitsopwekking uit de hernieuwbare energiebronnen de definitie overgenomen zoals die wordt vermeld in de Europese Richtlijn Hernieuwbare energie 2009/28/EG. Deze werd al in de vorige paragraaf vermeld.

In de **milieuwetgeving** is er in het VLAREM II de volgende definitie gegeven voor biomassa:

'Producten, bestaande uit plantaardige materialen of delen daarvan van landbouw of bosbouw, die kunnen worden gebruikt om de energie-inhoud terug te winnen, alsmede biomassa-afval'.

Biomassa-afval wordt op zijn beurt in datzelfde VLAREM II omschreven als

'Eén of meer van de volgende afvalstoffen⁵, die kunnen gebruikt worden om energie terug te winnen.'

Uit deze definitie blijkt dus duidelijk dat ook een afvalstof biomassa kan zijn. Deze afvalstof moet dan wel biologisch afbreekbaar zijn en vallen onder de opsomming die gegeven wordt in de onderstaande voetnoot. Afvalstoffen die hieraan voldoen worden omschreven als biomassa-afval. We merken op dat deze definitie analoog is aan de definitie die op Europees vlak gegeven wordt in de Richtlijn voor grote stookinstallaties 2001/80/EG.

3.3 Afvalstof als grondstof

Meer dan ooit streeft men vandaag naar een *Cradle to Cradle* structuur bij het gebruiken van materialen. Hierbij worden materialen opnieuw hergebruikt nadat ze in hun vorige functie zijn afgeschreven. Zoals beschreven in het boek *'Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things'* (2002) van William McDonough en Michael Braungart kan een afvalstof die nutteloos lijkt nieuw 'voedsel' zijn voor een ander product of proces.

In dit deel bekijken we de gevolgen van het statuut 'afval'. Ook worden er verschillende methoden aangehaald waarop een afvalstof kan stoppen om een afvalstof te zijn. Of, met andere woorden, hoe men van *Cradle to Waste* naar *Cradle to Cradle* kan overgaan.

3.3.1 Afvalstof: gevolgen

Indien men biomassastromen produceert, is het in sommige gevallen vanuit economisch standpunt belangrijk dat deze stromen niet als afvalstof worden aanzien. Dit is het geval bij

⁵ - plantaardig afval uit land- en bosbouw;
 - plantaardig afval van de levensmiddelenindustrie, indien de opgewekte warmte wordt teruggenomen;
 - vezelachtig afval afkomstig van de productie van ruwe pulp en van de productie van papier uit pulp; indien het op de plaats van productie wordt meeverbrand en de opgewekte warmte wordt teruggewonnen;
 - kurkafval;
 - houtafval, met uitzondering van houtmateriaal dat als gevolg van een behandeling met houtbeschermingsmiddelen of van het aanbrengen van een beschermingslaag, gehalogeneerde organische verbindingen dan wel zware metalen kan bevatten, met inbegrip van met name dergelijk houtafval dat afkomstig is van constructie- en sloopafval. Onbehandeld houtafval, namelijk natuurlijk houtafval, schors inbegrepen, dat alleen een mechanische behandeling heeft ondergaan, wordt eveneens onder dit streepje geplaatst.

de productie van biomassa bij fyto-remediatie. Het hoofddoel is het genereren van een alternatief inkomen voor de landbouwer. Dit kan uiteraard enkel indien de geteelde biomassa een positieve economische waarde heeft. In andere gevallen kan het net nuttig zijn voor een bepaalde biomassa-stroom indien ze als afvalstof beschouwd wordt.

Gezien dit economisch belang is het nodig dat er op voorhand wordt vastgesteld of de biomassa die geproduceerd zal worden al dan niet een afvalstof is. Indien een biomassa-stroom toch als afval beschouwd wordt, heeft dit een drastische impact op de economische waarde van de biomassa.

Zo zijn er andere wettelijke regels van toepassing voor biomassa die als afval aanzien worden. Zo zijn er onder andere:

- strengere eisen ten aanzien van de acceptatie van het product;
- andere emissie-eisen;
- strengere eisen voor import en export;
- wel of geen MER-plicht⁶

Deze extra verplichtingen zullen een impact hebben op de prijs die verwerkers bereid zijn te betalen voor de biomassa. Zij hebben immers extra kosten die ze zullen doorrekenen. Naast de extra verplichtingen die hierboven zijn opgesomd, is er nog een belangrijk principe waarmee men dient rekening te houden. De OVAM hanteert het algemeen geldend principe dat stelt dat indien men afval verwerkt, de producten die hier uit voortvloeien ook afval zijn. Afval is en blijft dus afval en het is niet eenvoudig om van het statuut afval te veranderen naar het statuut grondstof. Indien men echter probeert de valorisatie van vervuilde biomassa te maximaliseren, is dit van cruciaal belang.

Indien men uitgaat van het 'afval blijft afval'-principe, zal de OVAM pyrolyse-olie afkomstig van afval blijven beschouwen als een afvalproduct. Dit heeft een zware impact op de prijs die verwerkers bereid zijn te betalen voor de pyrolyse-olie. Indien een verwerker de olie wil verbranden, ook al is het voor energetische benutting en niet voor verwijdering, moet hij beschikken over een vergunning voor afvalverbranding. Het aanschaffen van deze

⁶ MER-plicht: Een MER is een milieueffectenrapport. Hierin moet worden gerapporteerd over de mogelijke impact van een bepaald project op het milieu. Indien men afval verwerkt is, is men verplicht een MER op te stellen. Volgens bijlage II van het Besluit van de Vlaamse regering houdende vaststelling van de categorieën van projecten onderworpen aan milieueffectenrapportage (2004) kunnen energiebedrijven met een warmtevermogen van 100 tot 300 megawatt een gemotiveerd verzoek tot ontheffing van de MER-plicht indienen.

vergunning impliceert een extra kost voor de verwerker en hij zal deze kost ook doorrekenen in de prijs die hij bereid is te betalen voor de pyrolyse-olie. Dit scenario gaat er ook van uit dat zij die afval willen verbranden, bereid zijn om te betalen voor hun aangenomen afvalstromen. Dit is weinig waarschijnlijk aangezien afvalverbranders normaal zelf betaald worden voor de verwerking van afval (Persoonlijke Communicatie, Cornelissen T.).

Indien de houtige biomassa uit fyto-remediatie dus als afval beschouwd wordt, zal de economische waarde van de producten die er uit voortvloeien bijzonder laag zijn. Het is dus van cruciaal belang dat deze biomassa niet als afval wordt aanzien, aangezien het vinden van een vervangend inkomen voor de landbouwers een prioriteit is.

3.3.2 Afvalstof naar grondstof

Het 'afval blijft afval'-principe dient gerespecteerd te worden. Toch is het niet onmogelijk om het statuut van afval te verliezen. Een afvalstof kan op een bepaald omslagpunt komen waar het overgaat in een nieuwe grondstof of product. Dit is mogelijk via de VLAREA, een grondstofverklaring bij de OVAM of de Europese EoW-criteria⁷.

3.3.2.1 VLAREA bijlage 4

In bijlage 4 van het VLAREA staat een limitatieve opsomming van afvalstoffen die mogen ingezet worden als secundaire grondstof. Ze dienen dan wel te voldoen aan een aantal criteria betreffende samenstelling en gebruik die in diezelfde bijlage 4 vermeld zijn. Deze bijlage wordt in deze masterproef opgenomen als bijlage 1.

3.3.2.2 Gebruikscertificaat

Indien een afvalstroom niet vermeld is in de voorgenoemde bijlage 4 van het VLAREA maar men ze toch als secundaire grondstof wil aanwenden, kan men gebruik maken van gebruikscertificaten. Deze gebruikscertificaten kan men indienen bij de OVAM voor een beperkte lijst van afvalstoffen waarvoor criteria zijn uitgewerkt waaraan ze moeten voldoen om niet langer als afvalstof beschouwd te worden. Deze criteria gaan over de samenstelling en wijze van gebruik van de secundaire grondstof.

⁷ End-of-Waste-criteria

De OVAM stelde onder andere criteria op voor het gebruik van secundaire grondstoffen als meststof of bodemverbeterend middel, bouwstof, bodem, koolstofbron in afvalwaterzuiveringsinstallaties, vormgegeven bouwstof en diervoeders.

In bijlage 2 is het aanvraagformulier tot een gebruikscertificaat terug te vinden.

3.3.2.3 *Grondstofverklaring*

Indien er geen criteria zijn opgesteld waaraan een afvalstof moet voldoen als men ze wil aanwenden als secundaire grondstof, moet men terugvallen op de algemene afvaldefinitie zoals die gegeven wordt in het Vlaamse Afvalstoffendecreet. Indien er onduidelijkheid heerst over de indeling van een bepaalde stof, kan men een grondstofverklaring aanvragen bij de OVAM. Zij interpreteren dan de afvaldefinitie voor elke specifieke aanvraag en bepalen dan of het materiaal als afval of als secundaire grondstof beschouwd wordt. Voor vervuilde houtige biomassa uit fyto-remediatie lijkt dit de beste optie.

3.3.2.4 *End-of-Waste criteria*

Ook op Europees niveau wordt er gewerkt aan methoden om voor bepaalde afvalstromen een uitweg te voorzien uit het 'afval blijft afval'-principe. Er kunnen voor specifieke afvalstromen End-of-Waste criteria worden opgesteld. Deze afvalstromen worden dan bruikbaar als secundaire grondstof. Voor het opstellen van deze criteria dient de afvalstroom wel te voldoen aan een aantal voorwaarden (End of Waste criteria, 2008):

- *the substance or object is commonly used for specific purposes;*
- *a market or demand exists for such a substance or object;*
- *the substance or object fulfils the technical requirements for the specific purposes and meets the existing legislation and standards applicable to products;*
- *the use of the substance or object will not lead to overall adverse environmental or human health impacts.*

De Kaderrichtlijn 2008/98/EG bepaalt de voorwaarden die gelden bij het opstellen van deze End-of-Waste criteria. Op dit ogenblik wordt er op Europees vlak werk gemaakt van criteria voor metaalschroot, koper, glas en papier. Er zijn plannen om criteria op te stellen voor biomassa en compost. Deze zouden interessant zijn voor de gecontamineerde biomassa uit fyto-remediatie, maar zijn nu dus nog niet beschikbaar (Persoonlijke communicatie, Aerts Y.).

3.4 Houtige biomassa uit fyto-remediatie, afval of niet?

3.4.1 Huidige situatie voor houtige biomassa uit fyto-remediatie

Aangezien er op dit moment nog altijd op een experimenteel proefveldniveau wordt gewerkt in de Kempen zijn er hier nog geen grote fysieke stromen van vervuilde houtige biomassa beschikbaar. Hierdoor is er ook bij de OVAM geen eenduidigheid over het statuut van de gecontamineerde houtige biomassa afkomstig uit de Kempen.

Er heerst dus nog altijd onduidelijkheid of biomassa uit fyto-remediatie als afvalstof moet beschouwd worden of niet. Zoals reeds gesteld heeft dit echter belangrijke economische gevolgen en is het dus van cruciaal belang dat er vanuit hogere instanties (OVAM, Vlaamse overheid) een duidelijke beleidstekst komt. Enkel dan kan men uitgaan van zekerheden en kan men kiezen voor één van de twee scenario's (houtige biomassa als afval of als secundaire grondstof).

3.4.2 Argumentatie gebruik als secundaire grondstof

Het indienen van een aanvraag tot grondstofverklaring bij de OVAM lijkt aangewezen. Indien deze wordt aanvaard, kan de houtige biomassa uit fyto-remediatie beschouwd worden als grondstof. Enkel dan kan men deze biomassa verder verwerken op een economisch interessante manier.

Het grondig interpreteren van de Europese afvaldefinitie is nodig voor een grondstofverklaring wordt uitgegeven. Daarbij is vooral de interpretatie van '...zich ontdoet, voornemens is zich te ontdoen of zich moet ontdoen...' belangrijk.

Indien we teruggaan naar de essentie van de probleemstelling in de Kempen is niet het saneren van de bodem, maar het genereren van een oogst die een vervangend inkomen van opleveren voor de landbouwers het doel. Om het risico op overschrijding van bepaalde voedselnormen te vermijden, kan men opteren voor korteomloophout. Gezien deze teelt bijkomend ook zorgt voor een trage sanering van de bodem, kan hij gekaderd worden in een fyto-remediatieproject. Dit is echter niet het hoofddoel van de teelt. Korteomloophout is een

gewone accumulator met een hoge biomassaopbrengst. Men kiest specifiek voor deze teelt omdat de hoge biomassaopbrengst primeert over het opnamevermogen van zware metalen. De intentie van de teelt is dus de biomassaopbrengst en niet zozeer het saneren van de bodem.

De biomassa is dus geen 'restproduct' waarvan men zich nog op een goedkope wijze *wil ontdoen*, maar een *doel* van het fyto-remediatieproject op zich. Indien men zou kiezen voor fyto-extractie met hyperaccumulatoren is een snelle sanering wel het doel. De lagere hoeveelheid sterk vervuilde biomassa is dan duidelijk een restproduct waarvan men zich wilt ontdoen en heeft geen economische waarde. Bij fyto-extractie met hyperaccumulatoren dient men zich dus wel te ontdoen van deze reststroom en zou men wel kunnen spreken over afval.

Verder zijn er in het document 'Wat zijn afvalstoffen?' van de OVAM de volgende lijsten terug te vinden:

Aanwijzingen dat een materiaal geen afvalstof is, zijn o.m.

- Het hergebruik van het materiaal voor het oorspronkelijke doel is zeker, eventueel na een kleine herstelling of eenvoudige behandeling
- Het materiaal is qua aard, samenstelling en impact op mens en milieu vergelijkbaar of beter dan de primaire grondstof die zij met zekerheid zal vervangen
- Het materiaal is doelbewust geproduceerd met bepaalde eigenschappen.
- Het materiaal komt vrij als een nevenstroom bij de productie van een ander product. De producent had dit product ook kunnen produceren zonder deze nevenstroom te produceren, maar heeft er bewust voor gekozen dit niet te doen
- Verder rechtstreeks gebruik van het materiaal is zeker, in zijn totaliteit en zonder speciale voorbehandeling. Er bestaat bijvoorbeeld een langetermijncontract tussen de houder van het materiaal en de latere gebruikers dat dit zeker gebruik ondersteunt
- Het materiaal heeft een volledig recyclage- of ander verwerkingsproces doorlopen

Aanwijzingen dat een materiaal wel een afvalstof is, zijn o.m.

- Het materiaal moet nog verdere bewerkingen ondergaan vooraleer het geschikt is om te worden ingezet ter vervanging van een primaire grondstof
- Er is een mogelijkheid dat het materiaal niet bruikbaar is
- Het materiaal heeft een negatieve economische waarde
- De producent doet inspanningen om de productie van het materiaal te verminderen
- De houder weigert de nodige verplichtingen, b.v. inzake REACH, na te komen die de indeling van een materiaal als grondstof/product met zich meebrengen
- De indeling van een materiaal als grondstof/product brengt een lager niveau van milieubescherming met zich mee
- Er is geen markt voor het betrokken materiaal
- Het materiaal moet worden opgeslagen voor een potentieel, maar niet zeker gebruik

Verder vermeldt dit document dat het mogelijk is dat er voor een materie zowel elementen uit de eerste lijst als uit de tweede lijst gelden. Niet alle elementen wegen ook even zwaar door. Daarom dat deze elementen in hun geheel moeten bekeken worden om een juiste context te kunnen scheppen vooraleer men een beslissing neemt.

Uit de eerste lijst kunnen we voor houtige biomassa uit fyto-remediatie stellen dat het hergebruik van het materiaal zeker is. Men kiest namelijk bewust voor korteomloophout om dit later te valoriseren. De biomassa wordt ook zoals reeds gesteld *doelbewust* geproduceerd. Het verder hergebruik van de houtige biomassa kan ook verzekerd worden eens er gekozen is op welke wijze de verdere verwerking zal gebeuren. Om zekerheid te brengen, kunnen er dan contracten gesloten worden met pyrolyse- of verbrandingsinstallaties. Ook qua aard, samenstelling en impact op mens en milieu kan de biomassa vergelijkbaar of zelfs beter zijn dan het primaire product dat het vervangt. In het geval van verbranding voor energie-opwekking is het gebruik van biomassa een duurzamere grondstof dan steenkool. Biomassa is immers een hernieuwbare energiebron en wordt aanzien als CO₂ neutraal. Dit in tegenstelling tot de primaire grondstof steenkool die ze zal vervangen.

Uit de tweede lijst merken we op dat het materiaal geen ingrijpende bewerkingen moet ondergaan alvorens het gebruikt kan worden. Ook doet de producent grote inspanningen om de productie van het materiaal te maximaliseren. De biomassa wordt doelbewust

geproduceerd om een vervangend inkomen te genereren voor de landbouwers. Dit economisch perspectief streeft duidelijk een positieve economische waarde na.

Anderzijds vinden we in de Europese Verordening Overbrenging Afvalstoffen (EVOA) wel terug dat afvalstoffen die cadmium als bestanddeel of verontreiniging bevatten, op de rode lijst worden geplaatst. Voor deze lijst van afvalstoffen geldt een algemeen uitvoerverbod. Dit is toch een indicatie dat met cadmium verontreinigde biomassa wel als afval kan aanzien worden.

Het document 'Afval of biomassa' van Senternovem vermeldt ook:

Vooraf de vraag wat de intentie is van de leverancier van biomassa, is hierbij van belang. Het is dus niet belangrijk wat de ontvanger van een biomassa voornemens is te doen met de biomassa. De vraag is of de leverancier een bewust gecreëerde biomassa op de markt brengt waarbij bewust is rekening gehouden met de kwaliteitseisen van de ontvangende installatie. Wanneer dit niet zo is dan zal al snel sprake zijn van een afvalstof.

De biomassa wordt bewust gecreëerd en zal alleen gepyrolyseerd of verbrand worden indien ze voldoet aan de kwaliteitseisen van de installatie. Dit duidt er op dat men de biomassa kan gebruiken als grondstof.

Gezien de interpretatie van de Europese afvaldefinitie met het concept van fyto-attenuatie in het achterhoofd en de elementen die de OVAM zelf gebruikt om te bepalen of een stof al dan niet afval is, moet het mogelijk zijn om een grondstofverklaring te verkrijgen voor houtige biomassa uit fyto-remediatie. Enkel dan kan er zekerheid geschapen worden over de economische toekomst van fyto-remediatie in de Kempen.

Verder in deze masterproef wordt de assumptie gemaakt dat de vervuilde biomassa *geen afval* is.

4. Verwerking zuivere biomassa

4.1 Overzicht conversietechnieken voor biomassa

In deze masterproef wordt er gezocht naar extra kosten die ontstaan bij de pyrolyse en verbranding van houtige biomassa uit fyto-remediatie. Pyrolyse en verbranding zijn twee thermische conversietechnieken waarbij de biomassa kan worden omgezet in nuttige producten zoals olie, elektriciteit en warmte. In deze paragraaf worden deze twee processen kort en bondig beschreven.

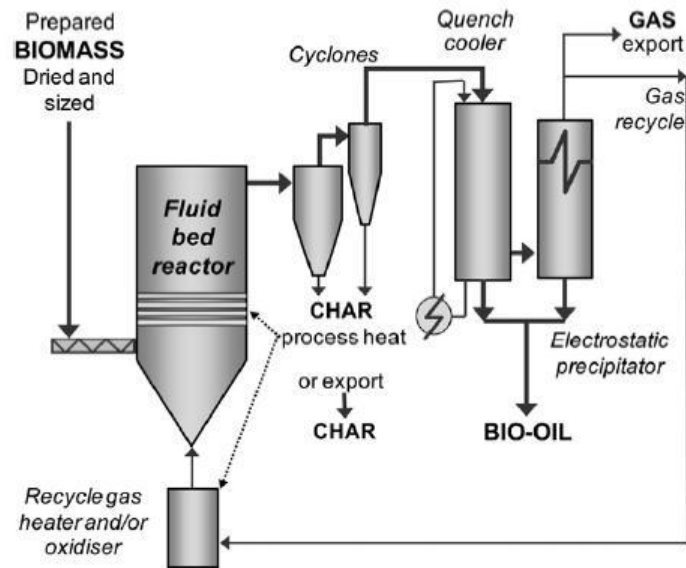
4.1.1 Pyrolyse

Pyrolyse is een thermische conversietechniek waarbij (bio)massa gedurende een korte tijd verhit wordt in afwezigheid van zuurstof. Dit impliceert dat er geen echte verbranding plaats vindt maar dat de moleculen thermisch gekraakt worden (Bridgwater, 2011; Thewys & Kuppens, 2008). Bij flash-pyrolyse is deze periode van verhitting beperkt tot enkele seconden en dus zeer kort. De gebruikte temperatuur bij flash-pyrolyse ligt typisch rond de 500°C (Bridgwater, 2011; Stals et al., 2010b). Door de snelle verhitting wordt de biomassa omgezet in gas en char. Dit gas condenseert na afkoeling gedeeltelijk en vormt zo pyrolyse-olie. Deze olie kan vervolgens met een verbrandingsmotor worden omgezet in elektrische energie en warmte.

De verhouding tussen de geproduceerde hoeveelheden gas, olie en char zijn afhankelijk van de gebruikte temperatuur en de verblijftijd van de biomassa in de reactor. Bij lagere temperaturen en een langere verblijftijd wordt meer char gevormd. Bij hogere temperaturen en kortere verblijftijden is dit minder (Stals et al., 2010b; Bridgwater, 2011). In paragraaf 5.2.1.3 blijkt dat voor pyrolyse van vervuild korteomloophout uit fyto-remediatie een temperatuur van 450°C optimaal is. Bij de pyrolyse van korteomloophout ontstaat dan 41% pyrolyse-olie, 21% char en 38% gas.

Er zijn verschillende types van pyrolyse-installaties beschikbaar. Bridgwater (2011) maakte recentelijk een overzichtelijke stand van zake op van de beschikbare technologieën. Er zijn

verschillende soorten reactoren beschikbaar. Fluid bed pyrolyse is één van de belangrijkste en meest toegepaste vormen van flash-pyrolyse. Dit type reactor is relatief simpel in constructie, heeft een zeer efficiënte warmteoverdracht en de temperatuur is gemakkelijk te controleren (Bridgwater, 2011). De werking van een fluid bed installatie wordt schematisch voorgesteld in afbeelding 4.1.



Figuur 4.1: Fluid bed pyrolyse installatie (Bridgwater, 2011)

De aanvoer van biomassa moet bestaan uit een homogene stroom van kleine partikels van 2 tot 3 mm groot. In de reactor komt deze stroom dan samen met een zandbed dat zorgt voor de snelle verhitting en kalking van de biomassa. In deze reactor wordt er biogas en char gevormd. Het biogas wordt vervolgens afgevoerd naar de quencher waar het wordt afgekoeld en kostbare pyrolyse-olie vormt. De char komt terecht in het zandbed. Men kan ervoor kiezen om de char in het zandbed te laten zitten en te gebruiken voor energetische benutting. Zo draagt de char bij tot het in stand houden van de temperatuur van het zandbed. Het is echter ook mogelijk in bepaalde installaties om de char extern af te voeren. Dit gebeurt door cyclonen. Indien men dit doet, dient men een alternatieve verwarmingsbron voor het zandbed aan te wenden.

4.1.2 Verbranding

Verbranding is een thermische conversietechniek waarbij een stof verhit wordt bij aanwezigheid van zuurstof. Dit gebeurt in verbrandingsinstallaties. Houtige biomassa kan ook verbrand worden. Bij verbranding is het doel het opwekken van elektriciteit. Indien men biomassa verbrandt, kan dit een milieuvriendelijker alternatief zijn dan steenkool. Biomassaverbranding wordt door Keller et al. (2005) aanzien als een economisch en ecologisch acceptabele en praktisch haalbare conversietechniek voor biomassa.

Bij verbranding ligt de temperatuur beduidend hoger dan bij pyrolyse. Zo worden er temperaturen tussen de 800 en 1000 °C gehaald in de verbrandingsketel (Ljung & Nordin, 1997; Keller et al., 2005). Hierbij wordt de biomassa afgebroken tot bodemassen en ontstaan er rookgassen. Deze rookgassen leveren warmte waarmee stoom wordt geproduceerd. Deze stoom wordt gebruikt om een stoomturbine aan te drijven die via een generator elektriciteit produceert. Het totale elektrische rendement ligt, afhankelijk van de schaalgrootte, tussen de 15 en de 35% (Biomassa verbrandingsinstallaties, z.d.).

Voor de verbranding van biomassa uit fyto-remediatie zijn er verschillende opties. Enkele hiervan zijn de bijstook in afvalverbrandingsinstallaties, de bijstook in kolencentrales of verbranding in een biomassaverbrandingsinstallatie. Deze mogelijkheden worden verder besproken in paragraaf 5.3.1.

4.2 Prijs zuiver korteomloophout

Indien men korteomloophout teelt als energiegewas op zuivere bodems, geldt een marktprijs in de range van €92 tot €100 per ton droge stof voor gedroogd en versnipperd korteomloophout ⁸ (De Somviele et al., 2009). Deze marktprijs is echter voor gedroogd en versnipperd korteomloophout dat klaar is voor verdere verwerking.

Het is echter aangeraden om een schatting van de kostprijs te zoeken van de biomassa zoals die van het veld komt. In de literatuur zijn gegevens terug te vinden over de kostprijs van de

⁸ De marktprijs van zuiver korteomloophout is nog niet stabiel, omdat de teelt nog in een experimenteel stadium zit. Het INBO veronderstelde in 2006 een marktprijs van €50 ton⁻¹ DS en verwacht een lichte stijging in prijs. Enerpedia vermeldt een marktprijs van €75 ton⁻¹ DS eind 2008.

teelt van korteomloophout per ha. Zo bepaalt het document 'Kansen, mogelijkheden en toekomst voor de populierenteelt en korteomloophout in Vlaanderen' van het INBO een productie prijs per ton korteomloophout van €45. Verwacht wordt dat de kosten voor oogsten en ontstronken zal zakken als korteomloophout meer ingang vindt in Vlaanderen.

Styles et al. (2008) maakten een gelijke kostprijsberekening voor de teelt van korteomloophout in Ierland. Gebaseerd op kostenramingen uit de literatuur vonden zij een productiekost per ton van €31 tot €46. Ze vonden ook dat kost voor drogen en opslaan van de houtchips gemiddeld €701 ha⁻¹ bedraagt, bij een biomassaopbrengst van 12 tot 20 ton ha⁻¹.

Bauen et al. (2010) besluiten bij een gemiddelde productiekost van 50,08 pond per ton ovengedroogde stof. Omgerekend met de huidige wisselkoers⁹ is dit €56,46 per ovengedroogde ton houtige biomassa.

Voets et al. (2011) vond in de literatuur terug dat het drogen van de biomassa in een range van €7 tot €12 per ton ligt. De prijs voor het vermalen tot chips van de biomassa ligt in een range van €2 tot €20 per ton. Versnipperen in plaats van vermalen zou 50% goedkoper zijn. Ze besluiten dat zowel de kost voor het drogen als de kost voor het vermalen van de biomassa €10 per ton bedraagt. De kost voor het chippen wordt verondersteld om €5 per ton te bedragen.

Op basis van deze gegevens veronderstellen we dat de productieprijs van één ton korteomloophout binnen de range [€31 - €57] valt. Indien de landbouwer het hout aan deze prijs zou verkopen, maakt hij echter geen winst. Enkel indien de marktprijs hoger ligt dat de productieprijs is winst maken mogelijk. De landbouwer kan echter niet zelf de prijs bepalen. Hij is als individuele producent van het korteomloophout geen prijszetter en zal de geproduceerde biomassa enkel kunnen verkopen aan een vastgestelde marktprijs.

In Voets et al. (2011) wordt aangenomen dat de aankoopprijs die een verwerker betaalt voor één ton gedroogde en versnipperde biomassa uit korteomloophout €50 per ton bedraagt. Deze aankoopprijs dekt ook de transportkost en kosten voor voorbehandeling.

⁹ 1,00 GBP = €1,12730

In het verdere verloop van deze masterproef nemen we de aankoopprijs van €50 per ton uit Voets et al. aan. Deze lijkt realistisch indien we ze vergelijken met de range voor de productiekost per ton van [€31 - €57]. Enkel voor de minder optimistische schattingen van de productiekost levert de prijs van €50 per ton geen winst op voor de verkoper. Deze €50 per ton is dus de prijs die een verwerker betaalt voor één ton gedroogd, versnipperd en zuiver korteomloophout.

In hoofdstuk 5 van deze masterproef wordt er gezocht naar kosten die ontstaan bij verbranding en pyrolyse van vervuilde houtige biomassa uit fyto-remediatie. Dit zijn extra kosten voor de verwerker. Deze worden doorgerekend in de prijs die hij betaalt aan de producent en impliceren dus een lagere aankoopprijs.

5. Extra kosten bij verwerking gecontamineerde biomassa

In deze masterproef is het de bedoeling om in de mate van het mogelijke de extra kosten te identificeren die ontstaan bij de verwerking van vervuilde biomassa. Daarna worden deze extra kosten doorgerekend in de prijs die een verwerker bereid is te betalen voor één ton vervuilde biomassa.

In dit hoofdstuk worden de extra kosten in kaart gebracht die ontstaan bij de thermische verwerking van houtige biomassa uit fyto-remediatie. In vergelijking met zuivere biomassa bevat deze biomassa concentraties zware metalen. Hierdoor kunnen er implicaties optreden die extra verwerkingskosten veroorzaken. Deze extra kosten dienen doorgerekend te worden in de prijs die de verwerker zal willen betalen voor de biomassa.

$$\left[\text{Totale verwerkingskost biomassa uit fyto-remediatie} = \mathbf{x} + \mathbf{y} \right]$$

waarbij \mathbf{x} de verwerkingskost in euro per ton voor zuivere biomassa voorstelt,
 waarbij \mathbf{y} de extra kost in euro per ton voorstelt die optreedt bij de verwerking van
 'vuil' KOH

In de bovenstaande vergelijking gaan we dus op zoek naar \mathbf{y} , de extra verwerkingskost. De totale verwerkingskost voor de vervuilde biomassa uit fyto-remediatie bestaat dus uit $\mathbf{x} + \mathbf{y}$, waarbij \mathbf{x} voor deze masterproef als onbekend wordt beschouwd. Indien \mathbf{y} uiteindelijk gekend is kan ze worden ingevuld in de onderstaande vergelijking:

$$\left[\text{Aankoopprijs vervuilde biomassa uit fyto-remediatie} = \mathbf{z} - \mathbf{y} \right]$$

*waarbij **z** de aankoopprijs in euro per ton voor zuivere biomassa voorstelt,
 waarbij **y** de extra kost in euro per ton voorstelt die optreedt bij de verwerking van
 'vuil' KOH*

De extra kost **y** wordt afgetrokken van de aankoopprijs **z** die een verwerker bereid is te betalen voor één ton zuiver korteomloophout. De verwerker zal minder willen betalen voor vervuild korteomloophout omdat de vervuiling voor hem hogere verwerkingskosten veroorzaakt. Indien er dus extra kosten optreden, zal de prijs die een verwerker bereid is te betalen voor één ton vervuild korteomloophout uit fyto-remediatie dus logischerwijs lager liggen dan de prijs van één ton zuivere biomassa.

In dit hoofdstuk wordt in paragraaf 5.1 eerst onderzocht welke vervuilende stoffen er in de houtige biomassa uit fyto-remediatie aanwezig zijn en in welke hoeveelheid. Vervolgens gaat er in paragraaf 5.2 heel wat aandacht uit naar het ontstaan van extra kosten bij verwerking door middel van pyrolyse. Er wordt dieper ingegaan op de installatie die in hoofdstuk 4 werd besproken. Ook de extra kosten die ontstaan bij verbranding worden geïdentificeerd in paragraaf 5.3. Vervolgens wordt dit hoofdstuk samengevat in paragraaf 5.4 en kunnen er conclusies worden getrokken.

5.1 Eigenschappen biomassa die extra kost veroorzaken

Allereerst is het nuttig om na te gaan welke stoffen er aanwezig zijn in vervuild KOH uit fyto-remediatie en in welke mate. Door de fyto-remedierende eigenschappen van korteomloophout zijn er sporen terug te vinden van zware metalen zoals cadmium (Cd), zink (Zn) en lood (Pb). Om de totale hoeveelheid cadmium per ton droge stof te bepalen, wordt er gebruik gemaakt van twee gevalsstudies uit de Kempen, met verschillende cijfers.

Zoals blijkt uit experimenten op het proefveld op de Balendijk heeft korteomloophout een totale oogstopbrengst van 26,4 ton DS ha⁻¹ indien men driejaarlijks oogst. Hiervan zijn 2,4 ton bladeren en 24 ton twijgen¹⁰. Eén ton geoogst korteomloophout bestaat dus gemiddeld gezien voor 9% uit bladeren en 91% uit twijgen. Uit hetzelfde onderzoek blijkt dat bladeren en twijgen respectievelijk 60 en 24 mg Cd kg⁻¹ DS bevatten (Vangronsveld et al., 2009).

¹⁰ Indien men om de drie jaar oogst, bevat één oogst 3 x 8 ton twijgen en 1x 2,4 ton bladeren, aangezien deze afvallen in de eerste twee jaren. De totale oogst bedraagt dus 26,4 ton DS ha⁻¹. Er wordt dus voor de winter geoogst zodat ook de bladeren verder verwerkt worden in het pyrolyse of verbrandingsproces.

	Biomassaopbrengst	Cd-opname
Wilg bladeren	2,4 ton DS ha ⁻¹	60 mg kg ⁻¹ DS
Wilg twijgen	8 ton DS ha ⁻¹	24 mg kg ⁻¹ DS

Tabel 5.1: Biomassaopbrengst en cadmiumopname Wilg (Vangronsveld et al., 2009)

De totale hoeveelheid cadmium in één ton kunnen we voor deze gevalstudie dan als volgt berekenen:

Twijgen:	24 ton x 1000 kg x 24 mg Cd kg ⁻¹ DS = 576 000 mg Cd
Bladeren:	2,4 ton x 1000 kg x 60 mg Cd kg ⁻¹ DS = 144 000 mg Cd
Totale cadmiumopname per oogst	= 576 000 mg + 144 000 mg = 720 000 mg
Totale cadmiumopname per ton	= 720 000mg / 26,4 ton = 27 272,73 mg
Het geoogst KOH bevat dus gemiddeld	0,0273 kg Cd ton⁻¹ DS
	of 27,3 mg Cd kg⁻¹ DS

Tabel 5.2: Cadmiumgehalte één ton kortoomloophout uit fytoremediatie volgens Vangronsveld et al., (2009)

In totaal bevat één ton vervuild kortoomloophout uit fytoremediatie dus 0,0273 kg cadmium. Dit komt overeen met de opname van 0,34 kg Cd ha⁻¹ jaar⁻¹. Deze waarde moet men vermenigvuldigen met drie en er dan de cadmiumopname van twee keer 2,4 ton bladeren van af trekken¹¹ om de totale cadmiumopname van 0,721 kg Cd ha⁻¹ oogst⁻¹ te bekomen.

In een artikel van Stals et al. (2010a) worden stalen van *Salix fragilis* gebruikt, afkomstig van hetzelfde proefveld op de Balendijk in Lommel. Deze stalen bevatten de volgende concentraties metalen:

¹¹ (0,34 kg Cd ha⁻¹ jaar⁻¹ x 3) = 1,02 kg Cd ha⁻¹ oogst⁻¹. Dit min de opname van bladeren die afvallen (2 x 2,4 ton x 60mg Cd kg⁻¹ = 0,288 kg Cd) geeft 0,732 kg Cd ha⁻¹ oogst⁻¹. Dit komt bij benadering overeen met 26,4 ton x 0,0273 kg Cd ton⁻¹ = 0,721 kg Cd ha⁻¹ oogst⁻¹.

	Cd-opname	Zn-opname	Pb-opname
Salix Fragilis bladeren	80,0 mg kg ⁻¹ DS	4,63 x 10 ³ mg kg ⁻¹ DS	14,4 mg kg ⁻¹ DS
Salix Fragilis twijgen	40,9 mg kg ⁻¹ DS	822 mg kg ⁻¹ DS	26,3 mg kg ⁻¹ DS

Tabel 5.3: Biomassaopbrengst en metaalopname Salix Fragilis (Stals et al., 2010a)

Met deze gegevens kunnen we het volgende berekenen:

Twijgen:	24 ton x 1000 kg x 40,9 mg Cd kg ⁻¹ DS = 981 600 mg Cd
Bladeren:	2,4 ton x 1000 kg x 80 mg Cd kg ⁻¹ DS = 192 000 mg Cd
Totale cadmiumopname per oogst=	981 600 mg + 192 000 mg = 1 173 600 mg
Totale cadmiumopname per ton =	1 173 600mg / 26,4 ton = 44 454,55 mg
Het geoogst KOH bevat dus gemiddeld	0,0445 kg Cd ton⁻¹ DS
	of 44,5 mg Cd kg⁻¹ DS

Tabel 5.4: Cadmiumgehalte één ton korteomloophout uit fyto-remediatie volgens Stals et al., (2010a)

Per oogst wordt er dus volgens deze gegevens 1 173 600 mg (= 1,17 kg) Cd ha⁻¹ opgehaald. Aangezien de biomassaopbrengst 26,4 ton ha⁻¹ oogst⁻¹ is, bevat één ton vervuild korteomloophout dus gemiddeld 0,0445 kg cadmium.

Het artikel van Stals et al. (2010a) vermeldt ook cijfers voor de zink- en loodopname. Deze zijn echter minder belangrijk. Dit kunnen we deels afleiden uit de onderstaande tabellen.

Element	Concentratie twijgen	Concentratie bladeren	Concentratie gemiddeld ¹²	Normaal gehalte in planten ¹³	Toxische grens planten ¹⁴
Cd	40,9	80	44,419	0,05-0,2	5-30
Zn	822	4663	1167,69	27-150	100-400
Pb	26,3	14,4	25,229	5-10	30-300

Tabel 5.5: Metaalconcentraties wilg in vergelijking met normale planten (Stals et al., 2010). Concentraties in mg kg⁻¹ DS

Element	Concentratie gemiddeld	Aantal keer minimum-waarde normaal gehalte	Aantal keer maximum-waarde normaal gehalte
Cd	44,419 mg kg ⁻¹ DS	888,38 x	222,095 x
Zn	1167,69 mg kg ⁻¹ DS	43,24 x	7,785 x
Pb	25,229 mg kg ⁻¹ DS	5,04 x	2,523 x

Tabel 5.6: Metaalconcentratie wilg in vergelijking tot normale planten

In tabel 5.6 is berekend hoeveel keer hoger de concentratie metalen in 'vuil' korteomloophout is in vergelijking met de normale concentratie in 'gewone' planten¹⁵. Alle planten bevatten een bepaalde concentratie aan zware metalen. Voor cadmium zit dit in een range van 0,05 – 0,2 mg kg⁻¹ DS met een toxische grens voor de plant vanaf 5 – 30 mg kg⁻¹ DS. *Salix Fragilis* kan een concentratie aan die bijna 900 keer hoger dan bij 'gewone' planten. De concentraties zink en lood zijn respectievelijk 'slechts' ~43 en ~5 keer hoger.

¹² Eén kg KOH zoals die geoogst wordt, bestaat uit 91% twijgen en 9% bladeren. Deze kolom bevat de gemiddelde concentratie metaal aanwezig in één kg geoogst hout, gerekend met de gegevens uit Stals et al. (2010)

¹³ Deze kolom geeft het gehalte dat een 'normale' plant die op een 'zuivere' bodem groeit bevat

¹⁴ Deze kolom geeft de toxische grens voor 'normale' planten. Indien een plant deze grens overschrijdt, zal ze afsterven

¹⁵ Alle gewassen kunnen een lage concentratie aan zware metalen opnemen voor de plant afsterft. Voor sommige gewassen, meestal accumulatoren of hyperaccumulatoren, ligt de toxische grens echter veel hoger. Onder 'gewone' planten worden normale plantensoorten verstaan. Deze kunnen slechts lage concentraties zware metalen aan en worden dus normaliter niet ingezet bij fyto-remediatie.

Het cadmiumgehalte dat volgt uit het artikel van Stals et al. (2010) ligt hoger dan het cadmiumgehalte dat we vinden met de cijfers van Vangronsveld et al. (2009). Deze opnamehoeveelheden lijken echter erg optimistisch. Dickinson & Pulford (2005) maakten een analyse van zeven veldstudies tussen 1994 en 2003. Aangezien er grote verschillen waren in de cadmiumhoeveelheden in de bodems van de verschillende testsites, maakten ze gebruik van 'bioconcentration factors' (BCF's). De BCF is de metaalconcentratie in de plant in mg kg^{-1} gedeeld door de metaalconcentratie in de bodem in mg kg^{-1} . Zo bekomt men een maatstaf die het vergelijken van metaalopname door bepaalde gewassen op verschillende bodems mogelijk maakt. Voor wilg lagen de BCF's van de verschillende veldstudies in de volgende ranges:

	BCF range minimum	BCF range maximum
Salix twijgen	0,05	16,8
Salix loof	0,17	27,9

Tabel 5.7: BCF ranges (Dickinson & Pulford, 2005)

Deze ranges zijn echter vrij ruim, mede door de opname van gegevens uit Klang-Westin & Eriksson (2003). Indien we dit experiment uitsluiten is de maximum BCF voor twijgen en bladeren respectievelijk 1,3 en 2,5.

De BCF kan ook berekend worden voor de opnamehoeveelheden die Stals et al. (2010a) vermeldt. Op het proefveld op de Balendijk in Lommel, waar de stalen uit Stals et al. (2010) werden geoogst, bedraagt de gemiddelde cadmiumconcentratie in de bodem 5 mg kg^{-1} bodem (Vangronsveld et al., 2009). De BCF voor de twijgen bedraagt dus $40,9 \text{ mg kg}^{-1} / 5 \text{ mg kg}^{-1} = 8,18$. De BCF voor de bladeren bedraagt $80 \text{ mg kg}^{-1} / 5 \text{ mg kg}^{-1} = 16$. Deze cijfers liggen beduidend hoger dan de BCF-waarden die gevonden werden in de veldstudies besproken door Dickinson & Pulford (2005). De BCF-waarden van de gegevens van Vangronsveld et al. (2009) zijn 12 en 4,8 voor respectievelijk de bladeren en de twijgen.

Gezien de gegevens van Vangronsveld et al. (2009) realistischer lijken in vergelijking met andere veldstudies die het opnamevermogen van wilg onderzoeken, wordt er verder in deze masterproef met deze concentraties gerekend.

Verder in deze masterproef gaan we er dus van uit dat de cadmiumconcentratie in de vervuilde houtige biomassa $27,3 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ DS}$ bedraagt. Men dient er van bewust te zijn

dat dit echter een resultaat is uit één veldexperiment. Het is dus realistisch om aan te nemen dat deze waarde een gemiddelde is van een bepaalde range aan resultaten.

De zware metalen die zich in de biomassa bevinden, zullen bij thermische verwerking door middel van verbranding of pyrolyse nooit verdwijnen. Ze zullen gedurende het proces herverdeeld worden over rookgassen, char, asresten en andere nevenproducten. De verwerking van vuile biomassa vereist dus extra aandacht. Indien men weet waar de zware metalen terecht komen kan worden nagegaan of dit extra kosten impliceert.

5.2 Extra kosten bij pyrolyse

Indien men houtige biomassa uit fyto-remediatie pyrolyseert, kunnen er in vergelijking met de pyrolyse van zuivere biomassa extra kosten optreden. In wezen ligt het verschil tussen de vervuilde biomassa en zuivere biomassa in de opgenomen hoeveelheid cadmium. Zoals berekend in paragraaf 5.1 nemen we aan dat de cadmiumconcentratie in de vervuilde houtige biomassa 27,3 mg Cd kg⁻¹ DS bedraagt. Het cadmium kan bij pyrolyse onder andere terecht komen in de rookgassen, char, zandbed of olie. In deze paragraaf wordt er nagegaan hoe het cadmium zich gedraagt en waar dit voor extra kosten zorgt bij de pyrolyse van biomassa uit fyto-remediatie. We gaan uit van een pyrolyse-installatie met interne benutting van de char, zoals besproken in 4.1.1.

5.2.1 Extra kost rookgasreiniging

5.2.1.1 *Emissiegrenswaarden*

Indien een pyrolyse-installatie afval (mee)pyrolyseert, wordt dit op dit moment door de wetgevende overheid aanzien als afvalverbranding. Bijgevolg zijn deze installaties onderworpen aan dezelfde strenge wetgeving die ook geldt voor afvalverbrandingsinstallaties (Definitie verbrandingsinstallatie voor afval¹⁶, Vlarem II). De emissiegrenswaarden¹⁷ zijn terug te vinden in het VLAREM, titel II, onder Afdeling 5.2.3.bis voor verbranding- en

¹⁶ Verbrandingsinstallatie voor afvalstoffen: een vaste of mobiele technische eenheid of inrichting die specifiek bestemd is voor de thermische behandeling van afval, al dan niet met terugwinning van de geproduceerde verbrandingswarmte. Dit bevat onder meer de verbranding door oxidatie van afval alsmede andere thermische behandelingsprocessen zoals **pyrolyse**, vergassing en plasmaproces, voor zover de producten van de behandeling vervolgens worden verbrand.

¹⁷ Emissiegrenswaarden voor in de lucht geloosde stoffen hebben steeds betrekking op de volgende omstandigheden en bij droge gassen: een temperatuur van 273K, atmosferische druk van 101,3kPa, zuurstofgehalte van 11%. Ze worden hier uitgedrukt in mg/Nm³: het aantal milligram per kubieke meter uitstoot bij de voorgenoemde 'normaal'-omstandigheden.

meeverbrandingsinstallaties van afvalstoffen. Hieraan dient elke afvalverbrander zich te houden.

Betreffende de emissiegrenswaarden voor de uitstoot van zware metalen rekent men steeds met gemiddelden die worden bemonsterd gedurende een periode van minimaal 30 minuten tot maximaal 8 uren. De volgende grenswaarde wordt gegeven voor zware metalen:

Emissiegrenswaarden in mg/Nm³	
Zware metalen (*)	(100%)
De som van: -cadmium en cadmiumverbindingen, uitgedrukt als cadmium (Cd) -thallium en thalliumverbindingen, uitgedrukt als thallium (TI)	0,05

(*) Deze gemiddelden omvatten zowel de stofvormige als de gas- en dampvormige emissies van de zware metalen in kwestie en de verbindingen daarvan.

Tabel 5.8: Emissiegrenswaarde cadmium (VLAREM, Titel II, Afdeling 5.2.3.bis)

De emissies die een pyrolyse-installatie die afvalstoffen (mee)pyrolyseert uitstoot, mag dus wettelijk gezien maximum 0,05 mg cadmium bevatten bij normale omstandigheden, er van uitgaande dat er geen thallium of thalliumverbindingen in terug te vinden zijn.

Indien een pyrolyse-installatie echter alleen niet-afvalstoffen verwerkt, is het geen afvalverbrander. Het is dan een gewone stookinstallatie die aan minder strenge emissienormen moet voldoen. Deze normen zijn vervat onder Afdeling 5.43.2 (Voorwaarden met betrekking tot stookinstallaties) van het VLAREM II maar handelen echter enkel over de uitstoot van fijn stof, SO₂, NO_x, CO, fluoriden en chloriden. Er is echter geen norm voor cadmium aangezien de OVAM er vanuit gaat dat in een gewone verbrandingsinstallatie enkel genormeerde stromen worden verwerkt. Zij adviseren om toch enkele metingen door te voeren indien men enkel vervuilde biomassa pyrolyseert, om het cadmiumgehalte na te gaan en indien nodig normen op te leggen.

Eerder werd verondersteld voor deze masterproef dat de vervuilde houtige biomassa uit fyto-remediatie *geen* afval is. Indien er dus een pyrolyse-installatie komt die enkel deze biomassa verwerkt, moet ze voldoen aan de minder strenge normen uit afdeling 5.43.2 van het VLAREM II, gezien het geen afvalverbranding is. Aangezien er echter geen norm voor

cadmium wordt vooropgesteld, gaan we verder in deze masterproef uit van de norm van 0,05 mg/Nm³ voor afvalverbrandingsinstallaties.

5.2.1.2 *Werking rookgasreiniging*

Naast zware metalen, waaronder cadmium, komen er in rookgassen uiteraard nog andere schadelijke stoffen vrij zoals zwaveldioxide (SO₂), stikstofdioxide (NO_x), zoutzuur (HCl), fijn stof en andere.

Deze pollutanten kunnen echter grotendeels verwijderd worden door middel van een (half)natte rookgasreiniging. In deze paragraaf wordt kort de werking van een rookgasreiniging geschetst zoals die geïnstalleerd kan worden op (afval)verbrandingsinstallaties en pyrolyse-installaties.

Bij een (half)natte reiniging van de rookgassen wordt er kalkwater en actieve kool in de rookgassen geïnjecteerd. Het kalkwater bindt zich met de aanwezige zuren. De actieve kool is een vaste substantie die zich bindt met aanwezige dioxines en zware metalen. Na de toevoeging van deze vaste stoffen worden de rookgassen in een cycloon rondgezwierd. Zo slaan ze aan tegen de wand van de cycloon en kunnen ze opgevangen worden. Op deze wijze worden dioxines, zuren en zware metalen vatbaar en verwijderbaar uit de rookgassen.

Voor de verwijdering van het aanwezige fijn stof wordt er vervolgens gebruik gemaakt van een elektro-filter. Door middel van een elektrisch veld kan men hiermee nagenoeg al het aanwezig fijn stof uit de rookgassen verwijderen.

Als het stof verwijderd is, volgt er nog een reiniging met een Denox-installatie. Hierin worden de stikstofoxiden die aanwezig zijn in de rookgassen via een katalysator omgezet in stikstof (N) en water. De gezuiverde rookgassen worden vervolgens via de schouw afgevoerd (Würdemann, 1993; MER Bionerga, 2010; 'Werking van de installatie', z.d.; Persoonlijke communicatie, Meersschaert, M.).

Er dient opgemerkt te worden dat dit een eenvoudige schets is van een rookgasreiniging. Niet elke installatie is hetzelfde maar over het algemeen komen de hier besproken stappen altijd voor. De investeringskost is dan ook variabel en hangt af van de capaciteit van de installatie.

Investeringskost

Om een inschatting te maken van de investeringskost van een rookgasreiniging dient men dus de capaciteit van de verbrandingsinstallatie te kennen. Hiervoor werden een aantal bronnen geraadpleegd.

Dhr van Stijn, zaakvoerder van Bio-Oil Holding NV schatte de initiële investeringskost van de rookgasreiniging die bij hun geïnstalleerd is op €400 000 tot €500 000 euro. Deze rookgasreiniging is geïnstalleerd op een pyrolyse-installatie met een doorstroom van 1,5 ton per uur en een vermogen van ongeveer 2 MW_e¹⁸. Het bedrijf Atimo Industrial uit Gent noemt een prijsrange van €200 000 tot €500 000 voor een rookgasreiniging die geschikt is voor een verbrandingsinstallatie van 0,5 MW_e tot 6 MW_e. Deze reiniging is bedoeld voor installatie op een houtverbrander maar is ook in staat om cadmium uit de rookgassen te filteren (Persoonlijke communicatie Degraeve, J.).

Op basis van deze gegevens kunnen we er vanuit gaan dat een pyrolyse- of verbrandingsinstallatie die zal instaan voor de verwerking van korteomloophout uit fyto-remediatie in de Kempen een rookgasreiniging nodig heeft met een investeringskost in de range [€200 000 - €500 000], dit indien we aannemen dat een installatie met een elektrisch vermogen van maximum 6 MW_e voldoende is.

De investeringskost in een rookgasreiniging kan ook in functie van de capaciteit van de verwerkende installatie worden geschreven. Dit kan met de 'six-tenths factor rule' uit Peters et al. (2004). Deze regel laat toe om een kostschatting te maken van een industriële uitrusting indien er geen kostprijzen beschikbaar zijn voor een specifieke grootte of capaciteit van deze installatie. Indien men beschikt over kostgegevens voor eenzelfde installatie met een andere capaciteit, kan men een inschatting maken van de kostprijs. Deze regel luidt als volgt:

$$\text{Kost van de installatie } a = (\text{kost van installatie } b) * X^{0,6}$$

waarbij voor installatie *a* de capaciteit gekend is maar niet de investeringskost;
 waarbij voor installatie *b* zowel de capaciteit als de investeringskost gekend is;
 waarbij *X* weergeeft hoeveel keer groter of kleiner de capaciteit van installatie *a* is in

¹⁸ Elektrisch vermogen gebaseerd op de volgende berekeningen uit Bloemen & Voets, 2009. Hierin wordt berekend dat een pyrolyse-installatie die korteomloophout pyrolyseert een elektrisch vermogen heeft van 5 MW_e bij een doorstroom van 3,81 ton DS per uur. Bij een doorstroom van 1,5 ton DS per uur is dit met de regel van drie makkelijk terug te rekenen naar een vermogen van 1,97 MW_e.

verhouding tot die van installatie b. X mag niet groter zijn dan 10; waarbij de exponent 0,6 een gemiddelde is voor een aantal verschillende soorten installaties.

Indien we bijvoorbeeld de investeringskost van een rookgasreiniging voor een installatie met een elektrisch vermogen van 10 MW_e willen schatten, kan dit met gegevens over de investeringskost van een rookgasreiniging voor een kleinere installatie met een vermogen van 2 MW_e. Indien we weten dat de investeringskost voor deze kleinere rookgasreiniging in een range van €400 000 tot €500 000 euro ligt kunnen we de investeringskost voor een installatie van 10 MW_e als volgt schatten:

$$\text{Kost van installatie van 10 MW}_e = (\text{€}400\,000) * 5^{0,6} = \text{€}1\,050\,611,12$$

$$\text{Kost van installatie van 10 MW}_e = (\text{€}500\,000) * 5^{0,6} = \text{€}1\,313\,263,90$$

Op basis van de gegevens van de installatie van 2 MW_e en de 'six-tenths factor rule' kunnen we dus aannemen dat de investeringskost voor een rookgasreiniging op een installatie van 10 MW_e in de range [€1 050 611,12 - €1 313 263,90] zal vallen.

5.2.1.3 *Uitstoot bij pyrolyse vervuild korteomloophout*

Indien de aanwezigheid van zware metalen in de biomassa tot gevolg heeft dat er emissienormen worden overschreden, dient de extra kost van de reiniging van de rookgassen doorgerekend te worden in de prijs die de verwerker betaalt. Daarom moet de vraag gesteld worden of een extra rookgasreiniging vereist is.

De optimale pyrolyse-temperatuur voor vervuild korteomloophout is 450°C (723K). Bij deze temperatuur blijven de zware metalen in de char achter en vervliegen er slechts minimale hoeveelheden¹⁹ in de pyrolyse-dampen, die later gedeeltelijk condenseren en pyrolyse-olie vormen. Indien men hogere temperaturen hanteert, blijft er minder char over maar kan cadmium vervliegen en in de pyrolyse-dampen terechtkomen (Stals et al., 2010b).

Dit wordt bevestigd door Ljung & Nordin (1997) die vermelden dat cadmium in een vluchtige fase overgaat indien men temperaturen hoger dan 700-750°C gebruikt (bij afwezigheid van S en Cl) of 600-800°C (bij aanwezigheid van S en Cl). Op deze wijze kan cadmium in de rookgassen terechtkomen. Lood kan verbindingen vormen die in de rookgassen terechtkomen vanaf 550°C bij afwezigheid van S en Cl. Bij aanwezigheid van S en Cl is dit

¹⁹ Bij een pyrolyse-temperatuur van 450°C bevat de olie een minimale, verwaarloosbare hoeveelheid Cd van 1,4 mg kg⁻¹ indien men KOH pyrolyseert met Cd-concentraties gegeven in tabel 5.3. Bij pyrolyse van twijgen en bladeren aan deze temperatuur wordt 41% olie geproduceerd. Uit één ton KOH ontstaat dus 410kg olie, met daarin dus in totaal 410 kg x 1,4 mg Cd = 0,000574 kg Cd.

700°C. Voor zink bedraagt de vervliegtemperatuur 1170°C en heeft de aanwezigheid van Cl geen significante invloed.

	Vervliegtemperatuur bij aanwezigheid S en Cl	Vervliegtemperatuur bij afwezigheid S en Cl
Cd	600-800°C	700-750°C
Pb	700°C	550°C
Zn	1170°C	1170°C

Tabel 5.9: Vervliegtemperaturen zware metalen (Ljung & Nordin, 1997)

In bijlage 3 worden de massabalansen gegeven voor pyrolyse op 350°C (623K), 450°C (723K) en 550°C (823K). Indien enkel de twijgen worden gepyrolyseerd aan 450°C ontstaat 52% pyrolyse-olie, 23% char en 25% gas. Bij fyto-remediatie is het echter raadzaam om de twijgen en bladeren samen te oogsten en verwerken. Indien men ze samen pyrolyseert aan 450°C blijkt dat de biomassa verdeeld wordt over 41% pyrolyse-olie, 21% char en 38% gas (Stals et al., 2010b).

Uit experimenten²⁰ van de onderzoeksgroep Toegepaste en Analytische Chemie blijkt dat er geen significante sporen van zware metalen in de rookgassen terug te vinden zijn indien men pyrolyseert op de optimale temperatuur van 450°C. De metingen werden uitgevoerd voor de reiniging van de rookgassen. Zelfs indien er geen rookgasreiniging zou gebeuren, blijkt dat de hoeveelheid cadmium in de rookgassen nog altijd onder de aangenomen wettelijke norm van 0,05 mg/Nm³ blijft (Persoonlijke communicatie, Stals, M.; Persoonlijke communicatie, Carleer, R.).

Uit het voorgaande blijkt dus dat de rookgassen die ontstaan bij pyrolyse van vervuilde houtige biomassa geen grote verschillen vertonen met die van pyrolyse met zuivere houtige biomassa. Een extra reiniging van de rookgassen lijkt dus niet noodzakelijk.

Verbranders dienen altijd te voldoen aan de emissienormen zoals die vermeld zijn in het VLAREM II. Indien een verbrander voldoet aan de emissienormen, is ze dus niet *verplicht* om een rookgasreiniging te installeren. Echter is in de praktijk altijd een rookgasreiniging vereist om te voldoen aan de normen. Uit een gesprek met Katleen Van den Eynden van de OVAM

²⁰ Met stalen van vervuild korteomloophout met de aanwezige concentraties zoals in tabel 5.3

bleek dat het onrealistisch is dat een verbrandingsinstallatie zonder rookgasreiniging onder de emissienormen blijft, onafhankelijk van het verbrande materiaal. Dit slaat dan niet enkel op de uitstoot van cadmium, maar ook op de uitstoot van fijn stof, SO_2 , NO_x , CO, fluoriden. Bijgevolg zal een pyrolyse-installatie dus een rookgasreiniging moeten installeren om aan de emissienormen te voldoen, onafhankelijk van de input. Ook installaties die enkel zuiver materiaal pyrolyseren, zullen dus deze investering moeten doen. Hierdoor wordt er een soort 'marge' voorzien voor cadmium bij de pyrolyse van vervuild KOH. Aangezien de concentratie metalen in de rookgassen al minimaal is, zal deze reiniging zeker volstaan om binnen de wettelijke norm te blijven (Persoonlijke communicatie, Stals, M.; Persoonlijke communicatie, Carleer, R.).

De heer van Stijn (zaakvoerder Bio-Oil Holding NV) bevestigde de installatie van een rookgasreiniging op de pyrolyse-installatie (in testfase) van zijn bedrijf. Het gaat om een natte gaswassing die NO_x , zware metalen en zwavel kan verwijderen. Deze reiniging is geïnstalleerd op een pyrolyse-installatie met een doorvoer van 1,5 ton biomassa per uur.

Gezien er dus geen significante verschillen zijn in uitstoot bij pyrolyse van vuile of zuivere biomassa en er een marge wordt gecreëerd door de rookgasreiniging die men zo goed als altijd moet installeren om aan de algemene emissienormen te voldoen, is er dus geen extra investering vereist voor de reiniging van de rookgassen bij vervuilde biomassa. Dit impliceert dus geen extra kost die moet worden doorgerekend in de prijs van vervuilde houtige biomassa.

5.2.2 Extra kost reiniging zandbed

5.2.2.1 *Verdeling cadmium bij pyrolyse*

In hoofdstuk 4 werd reeds aangehaald dat het korteomloophout rechtstreeks in contact komt met het zandbed om zo een goede warmteoverdracht te garanderen. Zoals gesteld in paragraaf 5.2.1.2 komen de metalen door de relatief lage temperatuur niet in de rookgassen terecht aangezien ze niet in een vluchtige fase komen (Ljung & Nordin, 1997). Niet alle metalen blijven echter achter in de char: een deel bindt zich ook met het zandbed zelf. Deze verhouding is volgens Mark Stals ongeveer 70/30. Indien we er van uit gaan dat één ton vervuild korteomloophout 0,0273 kg Cd bevat - zoals in paragraaf 5.1 berekend -, kunnen we uitgaan van de volgende verdeling van cadmium:

Eén ton KOH bevat 0,0273 kg Cd (Vangronsveld et al., 2009)	2,1% naar olie = 0,000574 kg Cd ²¹	
	97,9% naar zandbed = 0,026726 kg Cd	30% naar zand = 0,008018 kg Cd
		70% naar char = 0,018708 kg Cd

Tabel 5.10: Verdeling cadmium bij pyrolyse

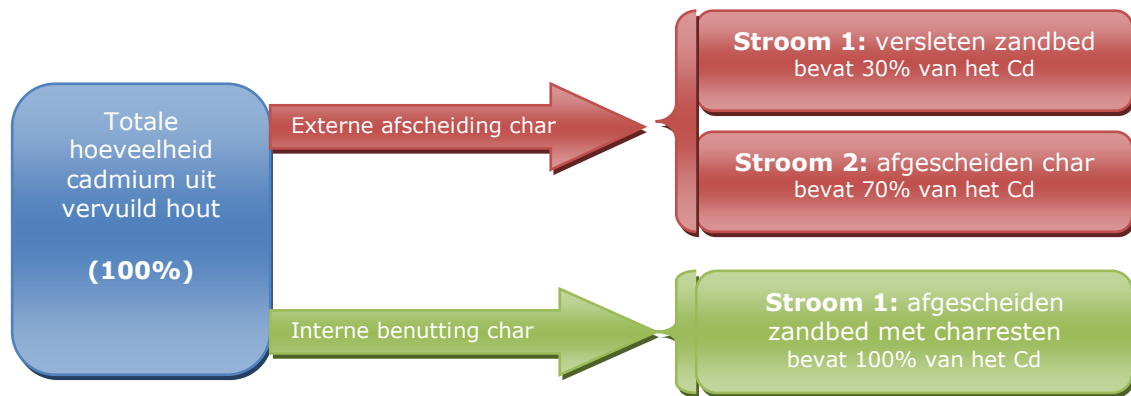
De aanwezigheid van zware metalen in het zandbed heeft volgens dhr. Mark Stals geen significante invloed op het pyrolyseproces. Dhr. Tom Cornelissen vermeldde echter dat er misschien toch secundaire reacties zouden kunnen optreden. Deze zijn tot nu toe onbekend. Ook moet men er mee rekening houden dat de metalen in een vluchtige fase kunnen komen als de temperatuur in het zandbed te hoog oploopt. Deze temperaturen worden in een pyrolyseproces onder normale omstandigheden niet gehaald aangezien men optimaal pyrolyseert aan 450°C.

Omdat het zandbed gedurende het proces slijt, dient dit ook vervangen te worden. Indien men op industriële schaal wil pyrolyseren, moet dit om de continuïteit van het proces te garanderen geleidelijk aan gebeuren. Dit is ook het geval indien men enkel zuivere stromen pyrolyseert. Er wordt dus zuiver zand toegevoegd, terwijl er geleidelijk aan 'versleten' zandbed wordt verwijderd. Bij pyrolyse van vervuilde houtige biomassa bevat dit 'versleten' zandbed nu echter cadmium. De verwerking van dit zandbed zal dus op een andere manier moeten en kan extra kosten impliceren.

Men kan er voor kiezen om de char extern af te scheiden, of intern te benutten om het zandbed op temperatuur te houden. Aangezien het cadmium verdeeld wordt over zowel het zandbed als de char, lijkt het interessanter om de char intern te benutten. Indien de char extern wordt afgescheiden, bekommen we twee vervuilde stromen: het afgevoerde zandbed en de char. Beide stromen zullen extra kosten impliceren bij verdere verwerking gezien het

²¹ Bij een pyrolyse-temperatuur van 450°C bevat de olie een minimale, verwaarloosbare hoeveelheid Cd van 1,4 mg kg⁻¹ indien men KOH pyrolyseert met Cd-concentraties gegeven in tabel 5.4. Bij pyrolyse van twijgen en bladeren aan deze temperatuur wordt 41% olie. Uit één ton KOH ontstaat dus 410kg olie, met daarin dus in totaal 410 kg x 1,4 mg Cd = 0,000574 kg Cd.

opgenomen cadmium. Indien men de char *niet* extern afscheidt maar aanwendt voor interne thermische benutting resulteert dit maar in één vervuilde stroom, namelijk het afgescheiden zandbed met daarin de asresten van de char. Deze stroom bevat dan bijgevolg wel hogere concentraties cadmium dan de twee afzonderlijke stromen die ontstaan indien men de char extern afvoert. Dit wordt schematisch voorgesteld in figuur 5.1.



Figuur 5.1. : Schematische voorstelling reststromen bij externe afscheiding of interne benutting van de char bij fluid bed pyrolyse

De kostprijs om deze vervuilde stromen verder te verwerken moet worden geminimaliseerd, dit omdat deze kost wordt doorgerekend in de prijs die de pyrolyst wil betalen voor het vervuilde korteomloophout. Indien men de char niet afscheidt maar intern benut, resulteert dit zoals gesteld in één vervuilde stroom. Deze stroom bestaat dan uit 'versleten' zand dat ongeveer 30% van het cadmium heeft opgenomen en asresten van de char, die ongeveer 70% van het cadmium bevat. De verwerking hiervan lijkt minder verschillende kosten te veroorzaken dan de verwerking van twee afzonderlijke stromen. Het zandbed bevat in beide gevallen cadmium en zal dus hoe dan ook behandeld moeten worden.

Daarom nemen we voor deze masterproef aan dat de vervuilde biomassa wordt gepyrolyseerd in een fluid bed installatie waarbij de char *niet* extern zal worden afgescheiden maar in het zandbed aanwezig blijft en gebruikt wordt voor thermische benutting.

De hoeveelheid zand die uit een pyrolyse-installatie wordt afgestoten om een bepaalde hoeveelheid massa te pyrolyseren, kan men beschouwen als een relatief vaste designfactor (Persoonlijk communicatie, Stals, M.; Persoonlijke communicatie, Vanreppelen, K.). Dhr. van Stijn, zaakvoerder van Bio-Oil Holding NV, bevestigt dit en verwacht dat er bij pyrolyse gemiddeld per ton ongeveer 50-100kg 'versleten' zandbed zal worden afgescheiden.

We veronderstellen dat de pyrolyse van één ton vervuilde houtige biomassa een 'versleten' zandbed van 50-100kg oplevert dat 0,026726 kg Cd bevat (zie tabel 5.10). Voor deze range kunnen we dan de volgende concentraties Cd in één kg 'versleten' zandbed verwachten:

Range	[50kg	75kg	100kg]
Concentratie Cd	534,52 mg Cd kg ⁻¹	356,35 mg Cd kg ⁻¹	267,26 mg Cd kg ⁻¹

Tabel 5.11: Concentratie cadmium in zandbed

Dit zandbed kan dan op verschillende manieren behandeld worden. In deze masterproef selecteren en behandelen we vier verschillende scenario's. Een eerste optie die onderzocht wordt, is het reinigen van het zandbed. De reiniging is een extra kost die doorgerekend moet worden in de prijs van de vervuilde biomassa. Analoog aan de reiniging is het mogelijk om het verontreinigd zandbed onschadelijk te maken door middel van immobilisatie. Dit wordt besproken in een tweede scenario. Onder een derde scenario wordt nagegaan of het zandbed kan voldoen om hergebruikt te worden als (niet-vormgegeven)bouwstof. Als het vervuilde zandbed binnen de normen valt, kan op deze wijze de opgenomen cadmium geïmmobiliseerd worden. Het vierde scenario dat wordt onderzocht, bekijkt of het mogelijk is en wat de kosten zijn om het vuile zandbed te storten op een stortplaats.

5.2.2.2 *Scenario 1: Reinigen van het vervuilde zandbed*

Voor het eerste scenario gaan we er van uit dat het zandbed eerst gereinigd wordt en vervolgens hergebruikt kan worden in de wegenbouw. Het reinigen van het zand gebeurt door een natte wassing en wordt ook wel 'uitloggen' of fysico-chemische reiniging genoemd. Bij fysico-chemische reiniging worden de metalen eerst met fysieke technieken geconcentreerd in een kleinere fractie²². Deze fractie wordt dan op chemische wijze behandeld om de metalen te verwijderen²³ (Dermont et al., 2008). Uiteindelijk wordt de gereinigde grond weer ontwaterd. Zware metalen kunnen met proces voor circa 90% verwijderd worden, waardoor het product na reiniging in de wegenbouw kan gebruikt worden (Goovaert et al., 2007). GRC, een bodemsaneerder met vestigingen in Kallo, Brugge en Zolder bevestigt dat zand en puin dat gereinigd wordt door middel van fysico-chemische reiniging, voldoet aan de normen voor gebruik in of als niet-vormgegeven bouwstof. Het kan dus gebruikt worden in funderingen of als grondstof voor beton of asfalt ('Hergebruik

²² Afscheiden op basis van grootte, dichtheid, drijfvermogen,...

²³ Bijvoorbeeld het wassen van de resterende fractie met een zuur water

eindproducten", z.d.). De verdere bestemming van het gereinigd zand gebeurt door de bodemsaneerder en is geen extra kost of opbrengst voor degene die grond laat reinigen.

Een belangrijke beperking is dat deze vorm van sanering enkel mogelijk is voor cadmiumconcentraties van 40 tot 50 ppm²⁴ (Persoonlijke communicatie, Govaerts, E.). Zoals in tabel 5.11 zien we dat de concentraties in het vervuilde zandbed dus veel te hoog zijn indien de pyrolyse-installatie enkel vervuilde biomassa verwerkt. Daarom is het aangewezen om de vervuilde biomassa gemengd te pyrolyseren met zuivere (bio)massa om zo de concentratie cadmium in het zandbed te verlagen. Indien men dit niet doet, is het reinigen van het vervuilde zandbed met fysico-chemische reiniging onmogelijk.

Voor de kostprijsberekening gaan we er dan ook vanuit dat de vervuilde biomassa gemengd met zuiver materiaal wordt gepyrolyseerd. De verhoudingen die nodig zijn om onder de maximumconcentratie van 40 ppm blijven worden weergegeven in tabel 5.12.

De hoeveelheid zand die moet worden afgescheiden bij de pyrolyse van één ton inputmateriaal varieert in een range van 50 tot 100 kg. Deze afscheiding is vereist aangezien het zandbed verslijt tijdens het pyrolyseproces. Dit dient ook te gebeuren bij pyrolyse van uitsluitend 'zuiver' inputmateriaal.

In tabel 5.12 zien we dat indien het zandbed per ton gepyrolyseerd materiaal 50 kg bedraagt, een biomassamix van 12,36 ton zuivere biomassa en 1 ton gecontamineerde biomassa uit fyto-remediatie vereist is om onder de maximumconcentratie cadmium van 40 ppm in het zandbed te blijven. Indien het zandbed 75 kg bedraagt, is deze ratio 7,91 : 1. Bij een zandbed van 100 kg is de ratio 5,68 : 1.

²⁴ ppm = parts per million. Eén ppm = 1 mg kg⁻¹. 40 ppm is de maximumconcentratie die gereinigd kan worden bij GRC. Sommige installaties kunnen concentraties tot 50 ppm aan, maar 40 ppm is de algemene standaard

Afgescheiden zandbed	[50 kg-	-75 kg-	-100 kg]
Concentratie bij pyrolyse zonder gemengde BM	534,52 ppm	356,35 ppm	267,26 ppm
Gewenste concentratie	40 ppm		
Factor	13,36 x te hoog	8,91 x te hoog	6,68 x te hoog
Toevoeging zuivere BM	12,36 ton	7,91 ton	5,68 ton
Hoeveelheid vuile BM	1 ton		
Totaal te pyrolyseren BM	13,36 ton	8,91 ton	6,68 ton
Geproduceerd vuil zandbed	668 kg	668,5 kg	668 kg
Aanwezig cadmium	0,0273 kg		
Concentratie zandbed bij pyrolyse gemengde BM	40,87 ppm	40,85 ppm	40,87 ppm

Tabel 5.12: Bijmenging zuivere biomassa om onder maximumconcentratie te blijven

We veronderstellen dat het zandbed naar een bodemsaneerder vervoerd wordt. Indien er verwacht wordt dat er jaarlijks ongeveer 15 000 ton vervuild korteomloophout beschikbaar is (Persoonlijke communicatie, Schreurs, E.), zou dit mits vermenging met andere biomassa een totale hoeveelheid te reinigen zand van 10 020 ton opleveren. Om de investering te doen in een reinigingsinstallatie bij een pyrolyse-installatie, is deze hoeveelheid relatief laag, gezien een vaste reinigingsinstallatie tot 100 ton per uur kan verwerken (Goovaerts et al., 2007).

De kosten van de sanering vallen in een range van €30 tot €70 per ton (Goovaerts et al., 2007). Dat we deze prijsrange ook mogen aannemen voor het zandbed dat cadmium bevat, wordt bevestigd door dhr. Jan Van Broekhoven van het bodemsaneringbedrijf Ecosol NV. Dhr. Emmanuel Govaerts van GRC Zolder verwacht echter een prijsrange van €30 tot €50 per ton. De variabiliteit in kost wordt vooral verklaard door de kost om het residu dat overblijft af te zetten. In dit residu blijft uiteindelijk het cadmium achter. Om een exacte prijs

te bepalen, dient men een staal in te dienen bij een bodemsaneringbedrijf. Op basis van deze staal wordt dan een bindende prijsofferte voor grondreiniging opgesteld. Gezien dit nog niet mogelijk is voor het vervuilde zandbed na pyrolyse van vervuilde biomassa, nemen we de ruimste gevonden prijsrange van [€30-€70] aan.

Indien het zandbed gereinigd wordt door een bodemsaneerder, zorgt deze er zelf voor dat het gereinigde zand een nieuwe bestemming krijgt. De pyrolyst dient het gereinigde zand dus niet terug te nemen. Bij betaling van een prijs uit de prijsrange van €30 tot €70 per ton doet de pyrolyst dus volledige afstand van het zand en is de bodemsaneerder verder verantwoordelijk voor de verdere verwerking ervan. Ook eventuele baten zijn bijgevolg voor de rekening van de bodemsaneerder en niet voor diegene die de bodem laat reinigen.

We maken de assumptie dat de afstand tussen de pyrolyse-installatie en het bodemsaneringbedrijf 50 km bedraagt²⁵. Als transportkost rekenen we €1,29 ton⁻¹ per kilometer²⁶.

In tabel 5.13 wordt een kostenraming gemaakt voor de reiniging van het zandbed dat verbruikt wordt bij pyrolyse van de mengeling van één ton vervuild korteomloophout gemengd met 'zuivere' biomassa. Gezien de aangenomen prijsrange van [€30-€70] per ton wordt een onderscheid gemaakt in drie scenario's.

Scenario 1 rekt met de laagste en dus meest optimistische prijs van €30 ton⁻¹ voor de reiniging van het vervuilde zandbed. Scenario 2 gaat uit van een kostprijs van €50 ton⁻¹. Scenario 3 gaat uit van de minst optimistische prijs van €70 ton⁻¹.

²⁵ Dit is een schatting van de afstand van de Kempen, waar eventueel een pyrolyse-installatie kan gebouwd worden, tot Midden-Limburg, waar een aantal bodemsaneringbedrijven gevestigd zijn.

²⁶ De transportkost van ovengedroogd korteomloophout bedraagt €0,43 ton⁻¹ km⁻¹ (Voets et al, 2011). Gezien de dichtheid van zand hoger ligt (+/- 1700 kg/m³) dan die van gedroogde houtchips (geschat op +/-600kg/m³) vermenigvuldigen we deze kost met een factor 3 en bekomen we €1,29 ton⁻¹ km⁻¹.

Vervuild zandbed	668 kg		
Reinigingskost zandbed per ton	[€30	€ 50	€70]
Reinigingskost per ton gepyrolyseerd KOH	€ 20,04	€ 33,40	€ 46,76
Transportkost per ton per kilometer	€ 1,29		
Afstand pyrolyse-saneringsbedrijf in km	50		
Transportkost zandbed per km	€ 0,86		
Totale transportkost zandbed	€ 43		
Totaalkost reiniging zandbed nodig voor pyrolyse één ton KOH	€ 63,04	€ 76,40	€ 89,76

Tabel 5.13: Totaalkost reiniging zandbed voor pyrolyse één ton vervuild KOH

Bij wijze van voorbeeld interpreteren we de tabel voor scenario 1 als volgt: De kost om één ton vervuild zandbed te reinigen bedraagt €30. Om 668 kg zandbed te reinigen, kost dit dus proportioneel gezien €20,04. De transportkost bedraagt €1,29 per ton per kilometer. Voor 688 kg is dat dus $(€1,29 / 1000\text{kg} \times 668\text{kg}) = €0,86$ per kilometer. Een transport van 50km kost dus $(50\text{km} \times €0,86 \text{ km}^{-1})$ €43. De totale kostprijs voor de reiniging van een zandbed van 668 kg bedraagt dus €63,4 onder het meest optimistische scenario.

Onder scenario 2 ontstaat een totale kost van €76,40. In het minst optimistische scenario 3 bedraagt deze kost zelfs €89,76. De extra kosten worden samengevat in tabel 5.14.

Prijrsrange reiniging	[€30	€50	€70]
Extra kost bij pyrolyse één ton KOH uit fyto remediatie	€ 63,04	€ 76,40	€ 89,76

Tabel 5.14: Samenvatting totale reinigingskost

De kost voor het reinigen van het zandbed is een extra kost die zich enkel voordoet bij de pyrolyse van houtige biomassa uit fyto remediatie. Bij pyrolyse van gewone biomassa is het niet nodig om dit zandbed te reinigen aangezien er geen significante hoeveelheden verontreiniging aanwezig zijn. Bij de voorgaande berekeningen werd de vervuilde biomassa gemengd gepyrolyseerd. De extra kost voor de reiniging van het zandbed wordt echter

alleen doorgerekend aan de leverancier van de vervuilde biomassa. Diegene die de zuivere biomassa aanlevert, heeft geen verantwoordelijkheid voor de vervuiling in het zandbed en dient dus ook geen extra kost te dragen.

Gezien de hoge extra kost kan de piste van uitbesteding van sanering dus zo goed als uitgesloten worden gezien de hoge kostprijs. Het kan overwogen worden om toch een investering te doen in een grondzuiveringsinstallatie op dezelfde site als de pyrolyse-installatie. Zo kan alvast de transportkost, die een groot deel van de totaal kost bedraagt, geëlimineerd worden. Omdat er bij fysico-chemische reiniging grote verschillen zijn in grootte, capaciteit en uitvoeringsvorm van de installatie, zijn er dus grote verschillen in de investeringsniveaus (Goovaerts et al., 2007). Een investering in een grondzuiveringsinstallatie lijkt echter niet opportuun gezien de reiniging van het zand een blijvende hoge extra kost zal zijn.

5.2.2.3 *Scenario 2: Immobilisatie van het vervuilde zandbed*

Onder het eerste scenario blijkt dat het reinigen van het zandbed zeer duur is. Dit omdat het reinigingsvermogen van fysico-chemische reiniging beperkt is tot 40 à 50 ppm cadmium. Door co-pyrolyse met zuiver materiaal kan men de concentratie in het zandbed beperken maar dit zorgt voor een grotere hoeveelheid te reinigen zandbed.

Een andere optie die mogelijk blijkt is het immobiliseren van het zandbed. Dit kan gebeuren door een bodemsaneerder zoals Bioterra NV. Immobilisatie wordt toegepast indien de concentraties vervuiling in een bodem te hoog zijn en reiniging dus technisch gezien niet mogelijk is. Indien men enkel korteomloophout uit fyto-remediatie pyrolyseert ligt de verwachte cadmiumconcentratie in het zandbed in de range [267 ppm – 534 ppm]. Dit werd eerder weergegeven in tabel 5.12. Men kan dus enkel vuile biomassa pyrolyseren en zo de hoeveelheid te reinigen zandbed minimaal houden.

Bij immobilisatie kunnen verontreinigingen zoals cadmium 'vastgelegd' worden in een bodem. Er wordt verhinderd dat het cadmium opnieuw kan vrijkomen. Dit gebeurt door de toevoeging van (chemische) bindmiddelen. Zo krijgt het zand een grotere weerstand tegen bijvoorbeeld weersinvloeden (Pijls & van Elsen, 1994). Definitieve opslag van het geïmmobiliseerde zandbed gebeurt normaliter bij de bodemsaneerder.

Bij Bioterra NV uit Opglabeeek hanteert men een prijsrange van [€95 - €135] per ton voor de immobilisatie van vervuilde bodems. Net zoals bij grondreiniging neemt de bodemsaneerder voor deze prijs de bodem integraal over. Na betaling van de prijs heeft de saneerder dus de volledige verantwoordelijkheid voor de verdere verwerking en opslag van de geïmmobiliseerde bodem (Persoonlijk communicatie, Nizet, L.; Persoonlijke communicatie, Martens, J.).

In de onderstaande tabel wordt de kost voor immobilisatie berekend die optreedt bij de pyrolyse van één ton vervuild korteomloophout. Bij pyrolyse van één ton hout wordt een zandbed van 50 tot 100 kg afgescheiden. Voor zowel de minimum als maximumwaarde wordt een kostprijs berekend. De transportkosten voor het vervuilde zandbed worden ook meegerekend. De transportkost wordt net zoals in scenario 1 verondersteld op €1,29 ton⁻¹ km⁻¹. Als afstand tussen de pyrolyse-installatie en de bodemsaneerder wordt 50 km aangenomen.

Zandbed	[50 kg]		100 kg]	
Kostprijs immobilisatie per ton	[€95	€135]	[€95	€135]
Kostprijs immobilisatie voor zandbed	€4,75	€6,75	€9,5	€13,5
Transportkost zandbed	€3,23		€6,45	
Totaalkost immobilisatie	€7,98	€9,98	€15,95	€19,95

Tabel 5.15: Kost immobilisatie zandbed

Ter illustratie veronderstellen we dat er een zandbed van 100 kg ontstaat bij de pyrolyse van één ton biomassa en dat de kostprijs voor immobilisatie €95 ton⁻¹ bedraagt. Het immobiliseren van 100 kg zand kost dan bijgevolg €9,5 euro. De transportkost voor 100 kg zand bedraagt €0,13 per km²⁷. Voor 50 km is dit dus €6,45. De totaal kost voor de immobilisatie van het zandbed dat wordt afgescheiden bij pyrolyse van één ton vervuild korteomloophout is dus €9,5 + €6,45 = €15,95.

We zien dus dat de kostprijs voor de immobilisatie van het zandbed dat wordt afgescheiden bij de pyrolyse van één ton vervuild korteomloophout in een range van [€7,98-€9,98-

²⁷ De transportkost is €1,29 ton⁻¹ km⁻¹. [€1,29 / 1000 kg] x 100 kg = €0,13 per km.

€15,95-€19,95] ligt. Dit is een extra kost die optreedt bij de pyrolyse van vervuilde biomassa aangezien immobilisatie van het zandbed niet vereist is bij pyrolyse van zuivere massa.

5.2.2.4 *Scenario 3: Gebruik als (niet-vormgegeven) bouwstof*

In dit scenario wordt er nagegaan of het mogelijk is om het vervuilde zandbed te gebruiken als niet-vormgegeven bouwstof. Indien dit mogelijk is, kan het cadmium geïmmobiliseerd worden in bijvoorbeeld funderingen, beton of asfalt. Om gebruikt te mogen worden, zijn er echter strenge normen opgelegd. Deze zijn terug te vinden in het VLAREA, Bijlage 4.2.2.

Om gebruikt te mogen worden als gewone bouwstof, mag de concentratie Cd niet hoger liggen dan 10 mg kg⁻¹ droge stof. Aangezien de cadmiumconcentratie in het vervuilde zandbed een verwachtingswaarde van 267,26 tot 534,52 mg kg⁻¹ heeft, is hergebruik als bouwstof dus resoluut uitgesloten.

Om gebruikt te mogen worden als niet-vormgegeven bouwstof, mag een stof maximum een uitloogbaarheid van 0,03 mg kg⁻¹ hebben²⁸. Dit is een zeer strenge grenswaarde. Om een precies resultaat te bekomen, is het aangewezen om een staal te nemen van het zandbed en deze te laten testen op uitloogbaarheid. Dit is echter niet mogelijk omdat vervuilde biomassa nog niet op grote schaal wordt gepyrolyseerd. Er wordt echter verwacht dat het zandbed nooit aan deze voorwaarde zal voldoen.

Het zandbed dat wordt afgescheiden indien men enkel vervuilde biomassa uit fyto-remediatie pyrolyseert, lijkt dus niet bruikbaar als (niet-vormgegeven) bouwstof.

5.2.2.5 *Scenario 4: Storten*

Storten is een definitieve oplossing voor het zandbed aangezien het cadmium op een vaste plaats wordt geïmmobiliseerd. Storting is echter de laatste optie in de filosofie van fyto-remediatie. Men dient altijd te proberen om de fractie waarin de zware metalen zich bevinden zo klein mogelijk te maken. Indien er echter geen andere – economisch verantwoorde – methoden zijn om het vervuilde zandbed verder te verwerken, kan storten overwogen worden.

Volgens het VLAREM worden vergunde stortplaatsen in drie categorieën ingedeeld naar de aard van de afvalstoffen die er gestort mogen worden.

²⁸ Indien men de stof uitloogt zoals beschreven in het VLAREA mag het residu cadmium dat in het zurig water achterblijft maximum 0,03 mg kg⁻¹ bedragen.

Stortplaatsen categorie I	Gevaarlijke afvalstoffen
Stortplaatsen categorie II	Niet-gevaarlijke, anorganische bedrijfsafvalstoffen
Stortplaatsen categorie III	Inerte afvalstoffen (steenpuin, beton, grind,...)

Tabel 5.16: Categorieën van stortplaatsen (Kuppens et al., 2010)

We nemen aan dat de houtige biomassa uit fyto-remediatie gepyrolyseerd wordt zonder vermenging met zuivere biomassa. Zo blijft de te storten fractie zandbed zo klein mogelijk. Per ton gepyrolyseerd korteomloophout blijft er een zandbed van 50 tot 100 kg over met cadmiumconcentraties zoals vermeld in tabel 5.15.

Om te bepalen in welke categorie een afvalstof hoort, dient er een staalanalyse te gebeuren van. Aan de hand van de resultaten bepaalt men onder welke categorie de afvalstof thuishoort. In het VLAREM II worden de grenswaarden gegeven waaraan een afvalstroom moet voldoen voor dat ze gestort mag worden. Onder artikel 5.2.4.1.10, Criteria voor afval dat aanvaardbaar is op stortplaatsen voor gevaarlijke afvalstoffen, vinden we terug dat het cadmiumgehalte bij uitloging slechts 5 mg kg⁻¹ mag bedragen. Dit houdt in dat, indien het zand uitgelooft wordt met een volume van 10l per kg, er maximum 5mg per kg⁻¹ mag achterblijven in het residu van het uitloogwater. Of het zandbed hieraan voldoet, is onduidelijk. Aangewezen is om een staal te nemen van het zandbed en deze staal te analyseren. Dit is op dit moment echter nog niet mogelijk. Indien een afvalstroom niet voldoet aan deze grenswaarde, kan men ze solidificeren. Dit is een technologie waarbij door middel van reagentia gevaarlijk afval kan worden omgezet in een minder schadelijke vorm. Dit zorgt dan voor een reductie van het uitlooggedrag van de afvalstroom ("Solidificatie en stabilisatie", z.d.). Voor de economische analyse maken we de assumptie dat solidificatie niet vereist is en dat het vervuilde zandbed dus gestort kan worden op een categorie I stortplaats zonder voorbehandeling (Persoonlijke communicatie, Thibau, B.).

Het Vlaams Gewest heeft vier vergunde categorie I storplaatsen waar men met het zandbed terecht kan: Indaver-Antwerpen, Indaver-Beveren, Remo in Houthalen- Helchteren en het Oost-Vlaams Milieubeheer (Kuppens et al., 2010).

Het document 'Tarieven en capaciteiten voor storten en verbranden - Actualisatie tot 2008, evolutie en prognose' van de OVAM geeft een overzicht van de gemiddelde storkosten op

categorie I en II stortplaatsen. De totale storkost bestaat uit twee grote delen. Enerzijds is er het vaste storttarief voor categorie I stortplaatsen. Dit tarief bedroeg in 2008 gemiddeld €52 per ton. Er wordt echter ook een variabele milieuheffing aangerekend. Deze is afhankelijk van de precieze vervuilingsgraad van de afvalstroom. Ook wordt er een onderscheid gemaakt tussen brandbare en niet-brandbare afvalstromen. Gezien het zandbed in de pyrolyse-installatie reeds werd verhit, gaan we er van uit dat het zandbed niet-brandbaar is. De gemiddelde milieuheffing voor afvalstromen van categorie I bedroeg in 2008 €41,24 per ton (Kuppens et al., 2010).

Totale storkost € 93,24 per ton	Vast deel: Storkost €52 per ton
	Variabel deel: Milieuheffing €41,24 per ton

Tabel 5.17: Storkost categorie I. Gemiddelden van 2008.

De totale storkost van €93,24 per ton wordt verder als schatting gebruikt voor het storten op een categorie I stortplaats. Om enige flexibiliteit in de kostprijs te behouden, wordt een prijsmarge van €15 per ton verondersteld. Zo bekomen we een prijsrange van [€78,24 ; €93,24 ; €108,24] per ton te storten materiaal²⁹.

In tabel 5.18 wordt deze kost doorgerekend naar één ton gepyrolyseerd korteomloophout. Eerst wordt er een onderscheid gemaakt in de grootte van het te storten zandbed. Zo ontstaan er twee scenario's. Voor elk scenario wordt dan de kostprijs per ton gepyrolyseerd hout uitgerekend voor het minimum, het gemiddelde en het maximum van de vooropgestelde prijsrange voor het storten van één ton vervuild zandbed op een categorie I stortplaats.

Ook wordt de transportkost weer meegerekend. Deze keer werd een afstand van 35 km gebruikt³⁰. De transportkost bedraagt €1,29 km⁻¹ en werd op dezelfde wijze berekend als in 5.2.2.2.

²⁹ [€93,24 - €15 ; €93,24 ; €93,24 + €15]

³⁰ Dit is een schatting van de afstand Lommel-Houthalen Helchteren. Hier ligt de dichtst bijzijnde categorie I stortplaats, namelijk Remo Houthalen-Helchteren.

Onder een optimistisch scenario van een klein zandbed van 50 kg valt de totale stortkost voor het zandbed, dat afgescheiden wordt bij de pyrolyse van één ton korteomloophout uit fyto-remediatie, in het interval [€6,01 - €7,51], afhankelijk van met welke prijs uit de prijsrange van stortkosten men rekent. Bij een zandbed van 100 kg valt de totale stortkost voor het zandbed in het prijsinterval [€12,37 - €15,37].

Gezien het zandbed dat afgescheiden wordt bij pyrolyse van 'zuivere' biomassa niet gestort dient te worden, kan deze stortkost beschouwd worden als een extra kost die ontstaat bij de pyrolyse van houtige biomassa uit fyto-remediatie. Indien men kiest voor het scenario waarbij het zandbed gestort wordt, moet deze dan ook worden doorgerekend in de prijs die men zal betalen voor het korteomloophout.

Vervuild zandbed	50 kg			100 kg		
Stortkost zandbed per ton	[€78,24	€ 93,24	€108,24]	[€78,24	€ 93,24	€108,24]
Stortkost zandbed per ton gepyrolyseerd KOH	€ 3,91	€ 4,66	€ 5,41	€ 7,82	€ 9,32	€ 10,82
Transportkost per ton per kilometer	€ 1,29					
Afstand pyrolyse-stortplaats in km	35					
Transportkost per ton gepyrolyseerd KOH per km	€ 0,06			€ 0,13		
Transportkost per ton gepyrolyseerd KOH totaal	€ 2,1			€ 4,55		
Totaalkost stortkost zandbed nodig voor pyrolyse één ton KOH	€ 6,01	€ 6,76	€ 7,51	€ 12,37	€ 13,87	€ 15,37

Tabel 5.18. Extra stortkost bij pyrolyse van één ton vervuild KOH uit fyto-remediatie.

5.2.3 Andere

Indien het cadmium zich gedurende het pyrolyseproces (gedeeltelijk via de char) verplaatst vanuit het te pyrolyseren materiaal naar het zandbed, impliceert enkel de verwerking van dit zandbed een extra kost. Zoals reeds vermeld, heeft de aanwezigheid van zware metalen in het zandbed volgens Mark Stals geen significante invloed op het pyrolyseproces. Dhr. Tom Cornelissen vermeldde echter dat er misschien toch secundaire reacties kunnen optreden. Deze zijn tot nu toe nog onbekend.

Aangezien de metalen slechts op verwaarloosbare wijze terechtkomen in de rookgassen, lijkt er ook geen extra werkingskost op te treden voor de reiniging van deze rookgassen.

5.3 Extra kosten bij verbranding

5.3.1 Opties voor verbranding

5.3.1.1 Afvalverbranders

Verbranding van houtige biomassa uit fyto-remediatie in afvalverbrandingsovens heeft geen economisch perspectief. Indien men de biomassa pyrolyseert produceert men pyrolyse-olie, dat een economische waarde heeft. Het is dus mogelijk om betaald te worden voor de biomassa. De traditionele afvalverbrandingsinstallaties worden echter betaald om afval te verbranden, ook al wordt de aangevoerde stroom gebruikt voor energetische benutting. Dit strookt niet met het oogmerk van fyto-remediatie in de Kempen, namelijk het genereren van een alternatief inkomen voor de landbouwers.

Naast een economische beperking is er ook een juridische beperking. Traditionele afvalverbrandingsinstallaties hebben enkel een vergunning voor het verbranden van huishoudelijk afval of bedrijfsafvalstoffen die omwille van aard of samenstelling hier aan gelijk gesteld zijn (Persoonlijke communicatie, Meersschaert, M.). Houtige biomassa uit fyto-remediatie is, zoals verondersteld in paragraaf 4.3.2 voor deze masterproef, geen afvalstof. Bijgevolg is het dus wettelijk gezien niet toegelaten om deze biomassa te verbranden in een afvalverbrandingsinstallatie.

5.3.1.2 *Bijstook in kolencentrales*

Het kan mogelijk om zijn om de houtige biomassa uit fyto-remediatie bij te stoken in de traditionele kolencentrales. Deze centrales maken gebruik van een homogene aanvoer van steenkool. Wegens het niet-duurzaam karakter van steenkool is er echter heel wat tegenkating tegen het verdere gebruik van kolencentrales die enkel steenkool verbranden. Biomassa kan een milieuvriendelijker alternatief zijn voor deze aanvoerstroombaan aangezien de houtige biomassa CO₂-neutraal is op korte termijn. Deze biomassa wordt dan bijgestookt in de kolencentrale en vervangt dus een bepaalde hoeveelheid steenkool.

5.3.1.3 *Biomassaverbranders*

Biomassa kan ook worden verbrand in installaties die enkel biomassa verbranden en hiermee elektriciteit opwekken. Deze installaties kunnen zowel biomassa als biomassa-afval verbranden. Een voorbeeld hiervan is A&S Energie NV. Zij investeerden in een biokrachtcentrale met een elektrisch vermogen van 24,6 MW die voor een jaarlijkse netto productie zorgt van 166 GWh groene stroom. Hiervoor verbrandt men niet-recycleerbaar houtafval. A&S Energie NV betaalt voor deze afvalstroom en biedt zo mogelijkheid aan de houtindustrie om deze afvalstroom te valoriseren.

Juridisch gezien is er geen probleem voor zulke installaties om vervuilde biomassa uit fyto-remediatie te verbranden. Technisch gezien is de installatie van A&S Energie NV echter niet geschikt voor de verbranding van versnipperde houtige biomassa gezien ze gedimensioneerd is om houtafval met een bepaalde stukgrootte te verwerken (Persoonlijke communicatie, Vanhinsberg, F.; Persoonlijke communicatie, Vandenbulcke, S.).

5.3.2 Rookgasreiniging

Net zoals bij pyrolyse is het belangrijk om na te gaan hoe metalen - voornamelijk cadmium - reageren bij verbranding. Er moet onderzocht worden waar de metalen naar toe gaan gedurende dit thermisch proces. Van groot belang is het dat het cadmium via de rookgassen niet opnieuw in het milieu terechtkomt. Hiertoe dient een verbrander zich te houden aan bepaalde emissiegrenswaarden. Deze kunnen enkel naleven mits het installeren van een rookgasreiniging die gedimensioneerd is op de grootte en het type van de verbrandingsinstallatie.

5.3.2.1 *Emissiegrenswaarden*

Afvalverbrandingsinstallaties zijn uiteraard verplicht om te voldoen aan de normen voor afvalverbranders. De emissiegrenswaarden zijn terug te vinden in het VLAREM, titel II, onder Afdeling 5.2.3.bis voor verbranding- en meeverbrandingsinstallaties van afvalstoffen.

Om er voor te zorgen dat de metalen en andere ongewenste stoffen³¹ die aanwezig zijn in de rookgassen in het milieu terecht komen, zijn er voor verbrandingsinstallaties emissienormen opgesteld. Deze werden reeds aangehaald in paragraaf 5.2.1.1. Voor cadmium bedraagt deze norm 0,05 mg/Nm³ bij normale omstandigheden, er van uit gaande dat er geen thallium of thalliumverbindingen in terug te vinden zijn (VLAREM, Titel II, Afdeling 5.2.3. bis).

Net zoals bij pyrolyse is een verbrandingsinstallatie, die enkel niet-afvalstoffen verwerkt, geen afvalverbrander. Het is dan een gewone stookinstallatie die aan minder strenge emissienormen moet voldoen. Deze normen zijn vervat onder Afdeling 5.43.2 (Voorwaarden met betrekking tot stookinstallaties) van het VLAREM II maar handelen echter enkel over de uitstoot van fijn stof, SO₂, NO_x, CO, fluoriden en chloriden. Er is echter geen norm voor cadmium aangezien de OVAM er vanuit gaat dat in een gewone verbrandingsinstallatie enkel genormeerde stromen worden verwerkt. Zij adviseren om toch enkele metingen door te voeren indien men enkel vervuilde biomassa pyrolyseert, om het cadmiumgehalte na te gaan en indien nodig normen op te leggen.

5.3.2.2 *Werking rookgasreiniging*

Bij hedendaagse verbrandingsinstallaties is een (half)natte rookgaswassing zoals besproken in paragraaf 5.2.1.2 de standaard voor het reinigen van de rookgassen. De werking van dit type reiniging werd dus reeds besproken. Wel dient er weer opgemerkt te worden dat het algemene principe van reiniging grotendeels gelijk blijft voor alle installaties maar dat de dimensionering sterk afhankelijk is van het verwerkingsvolume en het type verbrander.

De investeringskosten voor een rookgasreiniging voor een verbrandingsinstallatie zijn analoog aan die voor een pyrolyse-installatie en werden ook reeds besproken in paragraaf 5.2.1.2.

³¹ Onder andere HCl, Co, fijn stof, NO_x, SO₂

5.3.2.3 Uitstoot bij verbranding vervuild korteomloophout

Bij verbranding worden er hogere temperaturen bereikt dan bij pyrolyse. Bijgevolg zullen de aanwezige metalen in het hout zich anders gaan gedragen. In Ljung & Norden (1997) worden de volgende temperaturen gegeven waarbij het metaal in een vluchtige fase overgaat:

	Vervliegtemperatuur met aanwezigheid S en Cl	Vervliegtemperatuur met afwezigheid S en Cl
Cd	600-800°C	700-750°C
Pb	700°C	550°C
Zn	1170°C	1170°C

Tabel 5.19: Vervliegtemperaturen zware metalen (Ljung & Norden, 1997)

In tegenstelling tot bij pyrolyse worden er bij verbranding temperaturen gebruikt die boven de vervliegtemperatuur van de metalen ligt. Indien men houtige biomassa uit fyto-remediatie verbrandt, zullen de zware metalen dus wel deels in de rookgassen terecht komen. Dit wordt schematisch voorgesteld in tabel 5.20.

	Pyrolyse	Verbranding
Optimale temperatuur	450°C	900-1100°C
Cadmium gaat voornamelijk naar	Char	Rookgassen

Tabel 5.20: Gedrag cadmium bij pyrolyse en verbranding

We zien duidelijk dat bij pyrolyse aan 450°C geen van de aanwezige metalen in een vluchtige fase komt. Ze blijven dus achter in de char. Bij verbranding stellen we net het omgekeerde vast. De zware metalen komen in een vluchtige fase en komen zo in de rookgassen terecht. Er blijven dus weinig metalen achter in de asresten (Ljung & Norden, 1997; Persoonlijke communicatie, Stals, M.). In recent onderzoek van Liu et al. (2010) werd het gedrag van Cd bij verbranding op continue wijze gemeten. In een proefopstelling ging Cd over in een vluchtige fase vanaf 830°C. Vanaf deze temperatuur steeg de verdamping snel

tot een temperatuur van 935°C waar een piek bereikt werd. Vanaf deze temperatuur nam het verdampingsgedrag van Cd sterk af.

Een onderzoek van Zhang et al. uit 2001 verduidelijkt dat er een beperkte hoeveelheid cadmium kan achterblijven in de asfractie. In dit onderzoek werden er 38 stalen afval onderzocht die verbrand werden bij 850°C en 1000°C. Gemiddeld bevatten deze stalen 0,1 tot 15 mg Cd kg⁻¹. Na de verbranding werden de asresten onderzocht. Bij een verbranding aan 850°C bleek dat 69% van het cadmium in de rookgassen was overgegaan. Bij een verbranding aan 1000°C was dit 74%. Deze percentages hebben een standaardafwijking van respectievelijk 46 en 24%.

Uit onderzoek van Keller et al. (2005) blijkt het Cd-gehalte in Zwitsers gemeentelijk opgehaald huishoudelijk afval gemiddeld 14 mg Cd kg⁻¹ DS bedraagt. Indien we rekenen met de gegevens uit Vangronsveld et al. (2009), bevat één kg geoogst korteomloophout uit fyto-remediatie gemiddeld 27,24 mg Cd per kg³². Dit is echter niet alarmerend veel hoger dan de gemiddelde concentraties in huishoudelijk afval uit Zhang et al. (2001) en Keller et al. (2005).

Uit een persoonlijk gesprek met Maarten Meersschaert, Operations Manager bij de afvalverbrandingsinstallatie van Bionerga in Houthalen, blijkt dat de rookgasinstallatie die daar op dit moment geïnstalleerd is, ruim voldoet om cadmium uit de rookgassen te verwijderen. Uit het milieueffectenrapport bleek dat de rookgassen na reiniging slechts verwaarloosbare hoeveelheden cadmium bevatten die ruim onder de norm bleven. Een verdubbeling van het cadmiumgehalte in de aanvoer van te verbranden materiaal lijkt dus ruim binnen de capaciteiten van de geïnstalleerde rookgasreiniging te vallen. Sas-Nowosielska et al. (2004) bevestigt dat moderne technieken voor rookgasreiniging voldoen voor het effectief reinigen van rookgassen die voortkomen uit de verwerking van biomassa uit fyto-remediatie. Ook bij de biomassa-afvalverbrander A&S Energie NV verwacht men geen problemen om onder de emissiegrenswaarden te blijven bij verbranding van een materiaal met een verhoogd cadmiumgehalte (Persoonlijke communicatie, Vandenbulcke, S.).

³² ³² Eén kg geoogst korteomloophout bestaat voor 91% uit twijgen, die 24mg Cd kg⁻¹ bevatten en voor 9% uit bladeren, die 60mg Cd kg⁻¹ bevatten. Eén kg geoogst korteomloophout bevat dus gemiddeld 27,24 mg Cd kg⁻¹, indien we rekenen met de gegevens uit Vangronsveld (2009) die weergegeven worden in tabel 5.1

De rookgassen zullen bij verbranding van korteomloophout uit fyto-remediatie dus hogere concentraties zware metalen bevatten dan bij verbranding van zuiver korteomloophout, of afval. Bionerga maakt gebruik van een natte gaswassing zoals beschreven in paragraaf 5.2.1.2. Dit type van rookgasreiniging is min of meer een standaard voor (afval)verbrandingsinstallaties. Bijgevolg kunnen we besluiten dat dit type van rookgasreiniging voldoende zal zijn om geen merkbare extra uitstoot van cadmium te hebben bij de verbranding van vervuild korteomloophout uit fyto-remediatie. Eventuele verbranding of coverbranding van vervuilde houtige biomassa zou dus geen extra investering vereisen in een andere rookgasreiniging. Wel kunnen er nog extra kosten optreden bij de verwerking van de reststoffen die de rookgasreiniging afscheidt.

5.3.2.4 *Extra werkingskosten rookgasreiniging*

Een extra investering in een andere rookgasreiniging lijkt dus niet aan de orde voor de verbranding van houtige biomassa uit fyto-remediatie. Wel kunnen de werkingskosten van de reiniging hoger liggen.

In een rookgasreiniging wordt cadmium en andere zware metalen verwijderd door middel van additieven zoals bruinkool of actieve kool. Deze nemen het cadmium op en worden vervolgens door een cycloon terug uit de rookgassen verwijderd. Vervolgens wordt deze emulsie, die dus zware metalen bevat, op continue wijze afgevoerd. Deze reststof wordt beschouwd als een gevaarlijke afvalstof en wordt meestal gestort of geïmmobiliseerd door een gespecialiseerde firma. De kostprijs bedraagt ongeveer €100 per ton (Persoonlijke communicatie, Vanhinsberg, F.). De exacte kost wordt echter betaald door de verwerker op basis van staalnamen. Afhankelijk van de aanwezige stoffen kan de kostprijs hoger of lager liggen.

Indien er dus veel cadmium in de rookgassen terechtkomt, kan dit een hogere verwerkingskost impliceren. Deze is echter moeilijk te bepalen en door te rekenen in de prijs die de verbrander wenst te betalen voor het vervuilde korteomloophout. De reststof bevat niet alleen het cadmium afkomstig uit de bodems in de Kempen maar ook andere vervuilende stoffen die onvermijdelijk vrijkomen bij verbranding en moet hoe dan ook verder verwerkt worden.

5.4 Samenvatting extra kosten bij verwerking

In deze paragraaf worden zowel voor pyrolyse als verbranding de verschillende scenario's en hun bijhorende extra kostprijs samengevat. Op basis van deze samenvatting kunnen dan de verschillende verwerkingsmethoden met hun verschillende scenario's vergeleken en geïnterpreteerd worden. Uiteindelijk kan er dan onder bepaalde voorwaarden gekozen worden voor één bepaalde verwerkingstechniek, die onder assumptie van de gevonden extra kosten in deze masterproef het meest optimaal lijkt voor de verwerking van vervuild korteomloophout uit fyto-remediatie.

Zoals gesteld in het begin van dit hoofdstuk wordt er gezocht naar de prijs die de verwerker, in dit geval de pyrolyst of verbrander, wenst te betalen voor één ton vervuild korteomloophout uit fyto-remediatie. Deze prijs wordt bepaald aan de hand van de volgende vergelijking:

$$\left[\text{Aankoopprijs vervuilde biomassa uit fyto-remediatie} = z - y \right]$$

waarbij z de aankoopprijs in euro per ton voor zuivere biomassa voorstelt,
 waarbij y de extra kost in euro per ton voorstelt die optreedt bij de verwerking van
 'vuil' KOH

In hoofdstuk 4 werd in paragraaf 4.2 een schatting gemaakt van de aankoopprijs die een verwerker bereid is te betalen voor één ton zuiver, gedroogd en versnipperd korteomloophout, zijnde z . Uit de literatuur bleek dat een productieprijs binnen een range van [€31-€57] per ton aanvaardbaar is. Uit Voets et al. (2011) werd een aankoopprijs van €50 per ton overgenomen. Deze lijkt realistisch indien men produceert aan een optimistische productieprijs uit de gevonden range. We kunnen de bovenstaande vergelijking dus vereenvoudigen naar de volgende vergelijking:

$$\left[\text{Aankoopprijs vervuilde biomassa uit fyto-remediatie} = \mathbf{€50} - y \right]$$

waarbij y de extra kost in euro per ton voorstelt die optreedt bij de verwerking van 'vuil' KOH

In paragraaf 5.2 en 5.3 werden er extra kosten geïdentificeerd die optreden bij pyrolyse en verbranding van vervuilde houtige biomassa uit fyto-remediatie. Deze kosten vertegenwoordigen de y in de bovenstaande vergelijking die de aankoopprijs van de vuile biomassa bepaalt. Deze y neemt bij pyrolyse en verbranding en onder de verschillende scenario's andere waarden aan. Deze worden nu samengevat en geïnterpreteerd.

5.4.1 Samenvatting extra kost y bij pyrolyse

Zoals ondervonden in paragraaf 5.2.2.1 verplaatst het cadmium zich bij pyrolyse vanuit het korteomloophout gedeeltelijk naar het zandbed en gedeeltelijk naar de char. Bij verwerking met een fluid bed reactor zonder externe afscheiding van de char blijft er dus een vervuild zandbed met daarin asresten van de char over.

In paragraaf 5.2.3.1 werd er onderzocht of een extra rookgasreiniging vereist is bij de pyrolyse van vervuild korteomloophout. Dit bleek niet noodzakelijk aangezien er slechts minieme hoeveelheden cadmium in de rookgassen terechtkomen. Ook heeft elke pyrolyse-installatie in de praktijk een rookgasreiniging nodig om te voldoen aan een aantal emissienormen, ook de installaties die enkel zuivere materialen pyrolyseren. Er is dus geen extra rookgasreiniging nodig en dit levert dus ook geen extra kost op voor de verwerking van vervuilde biomassa uit fyto-remediatie.

Het cadmium komt dus in het zandbed terecht en uit paragraaf 5.2.3 blijkt dat de verwerking hiervan de enige extra kost is die zal optreden bij de pyrolyse van vervuilde biomassa.

De verwerking van het vervuilde zandbed impliceert wel een extra kost voor de pyrolyst aangezien het een verhoogde concentratie cadmium bevat. Indien men enkel zuiver materiaal pyrolyseert, is het zandbed onschadelijk en kan het gewoon afgevoerd worden.

Er werden vier verschillende bestemmingen voor het vuile zandbed onderzocht. Een eerste was de mogelijkheid om het zandbed over te dragen aan een bodemsaneerder die door middel van fysico-chemische reiniging het cadmium uit het zand verwijdert en vervolgens het gereinigde zand een definitieve bestemming geeft. De concentratie cadmium in het

zandbed ligt echter te hoog om reinigbaar te zijn indien men enkel vervuilde biomassa pyrolyseert. Door het vervuilde korteomloophout samen te pyrolyseren met zuiver korteomloophout, kan men echter wel een reinigbaar zandbed bekomen. De totale hoeveelheid te reinigen zandbed is dan echter zeer groot. De kostprijs voor de reiniging van dit zandbed dient echter volledig teruggerekend te worden in de prijs van het vervuilde korteomloophout. De leverancier van het zuivere hout is niet verantwoordelijk voor deze kost en dient hier dus niet voor op te draaien. De extra reinigingskost voor een zandbed dat ontstaat bij de (gemengde) pyrolyse van één ton vervuild korteomloophout zal in een range van [€63,04 - €76,40 - €89,76] liggen. Indien we deze extra kost als **y** invullen in de reeds vermelde vergelijking **€50 - y = aankoopprijs**, zien we dat de pyrolyst dus niet zal betalen voor de verwerking van het vuile korteomloophout, maar dat hij betaald zal moeten worden door de leverancier van het hout. Om één ton vervuild korteomloophout te laten pyrolyseren zal de leverancier dus [€50 - €63,04 ; €50 - €76,40 ; €50 - €89,76] = [€13,04 - €25,4 - €39,76] moeten betalen. Aangezien het genereren van een inkomen voor de landbouwer het doel is, kunnen we deze piste dus uitsluiten.

Onder een tweede scenario werd de mogelijkheid onderzocht om het vervuilde zandbed te immobiliseren. Dit kan, in tegenstelling tot fysico-chemische reiniging, wel met een zandbed dat hoge concentraties cadmium bevat. Het is dus mogelijk om enkel vervuilde houtige biomassa te pyrolyseren. Er werd berekend dat de kostprijs voor immobilisatie van het zandbed dat afgescheiden wordt bij de pyrolyse van één ton vervuild korteomloophout in een range van [€7,98 - €9,98 - €15,95 - €19,95] ligt. Wederom kunnen we voor dit scenario deze kost als **y** invullen in de bovenstaande vergelijking. We zien dan dat een pyrolyst maximum [€50 - €7,98 ; €50 - €9,98 ; €50 - €19,95] = [€42,02 - €40,02 - €30,05] zal willen betalen voor één ton vervuild korteomloophout uit fyto-remediatie. De landbouwer kan dus nog steeds een inkomen genereren, al ligt de prijs voor vervuild korteomloophout onder dit scenario 16 tot 40 % lager dan die van zuiver korteomloophout.

In een derde scenario werd onderzocht of het mogelijk is om het vervuilde zandbed te gebruiken als (niet-vormgegeven) bouwstof. Dit lijkt echter niet mogelijk.

In een vierde scenario werd gezocht naar de kostprijs om het vervuilde zandbed te storten. Dit resulteert in een verwachte extra kost van [€6,01 - €15,37] per ton gepyrolyseerd vervuild korteomloophout uit fyto-remediatie. Deze extra kost kan weer in de bovenstaande vergelijking worden ingevuld als **y**. We vinden dan dat een pyrolyst maximum [€50 - €6,01 ;

€50 - €15,37] = [€43,99 - €34,63] zal willen betalen voor één ton vervuild korteomloophout uit fyto-remediatie. Deze prijs ligt 12 tot 31% lager dan de prijs voor zuiver korteomloophout.

De extra kosten die ontstaan bij de pyrolyse van vervuild korteomloophout situeren zich dus enkel in de verdere verwerking van het zandbed. De drie haalbare scenario's worden nog eens voorgesteld in tabel 5.21.

Scenario	Omschrijving	Extra kost per ton vervuild hout	Prijs die pyrolyst maximum wil betalen
1	Fysico-chemische reiniging zandbed	[€63,04 - €89,76]	[-€13,04 - -€39,76]
2	Immobilisatie zandbed	[€7,98 - €19,95]	[€42,02 - €30,05]
4	Storten zandbed	[€6,01 - €15,37]	[€43,99 - €34,63]

Tabel 5.21: Extra kost en marktprijs bij de haalbare scenario's

We kunnen dus besluiten dat economisch gezien het storten van het vervuilde zandbed het meest interessant is. Dit is de goedkoopste optie en zorgt er dus voor dat de prijs die de leverancier van het korteomloophout ontvangt, zo hoog mogelijk blijft. De kost voor immobilisatie van het zandbed is echter niet veel groter.

Indien men dus vervuild korteomloophout uit fyto-remediatie wenst te pyrolyseren, situeren de gevonden extra kosten, in vergelijking met de pyrolyse van zuiver korteomloophout, zich enkel in de definitieve bestemming van het vervuilde zandbed. Hiervoor lijkt het storten of immobiliseren hiervan de goedkoopste en beste oplossing.

5.4.2 Samenvatting extra kost y bij verbranding

Bij het verbranden van vervuild korteomloophout uit fyto-remediatie lijken er tijdens het verbrandingsproces geen problemen op te treden die een extra kost impliceren. Het verbranden van dit hout is, indien men de juiste installatie selecteert, technisch gezien perfect mogelijk. Het aanwezige cadmium gaat grotendeels vervliegen in de rookgassen door de hoge temperatuur. Om aan de emissienormen te voldoen, dient een verbrander in de praktijk zo goed als altijd een rookgasreiniging te installeren. Uit verschillende bronnen blijkt dat deze over het algemeen voldoet om een verhoogde cadmiumconcentratie uit de

rookgassen te verwijderen. Het lijkt dus niet nodig om een extra reiniging van de rookgassen te voorzien indien met vervuild hout uit fyto-remediatie wil verbranden.

Het residu dat achterblijft in de rookgasreiniging zal wel een hogere concentratie cadmium bevatten dan bij verbranding van enkel zuivere biomassa. Dit residu wordt echter in elk geval, ook indien men zuiver materiaal verbrandt, beschouwd als een gevaarlijke afvalstof die geïmmobiliseerd of gestort wordt. Bij verbranding van cadmiumhoudende biomassa kan dit een iets hogere kost impliceren. Deze kost is echter moeilijk te bepalen en dus moeilijk door te rekenen in de prijs van het vervuild korteomloophout uit fyto-remediatie.

5.4.3 Conclusie

Bij pyrolyse kunnen we dus aannemen dat de prijs die de pyrolyst bereid is te betalen voor vervuild korteomloophout lager ligt dan de prijs die hij betaalt voor zuiver hout. Afhankelijk van het gekozen scenario en de sensitiviteit van enkele parameters wordt er verwacht dat deze prijs 12 tot 40% lager ligt. Bij verbranding konden er geen extra kosten worden geïdentificeerd die specifiek door te rekenen zijn aan de vervuilde biomassa.

Toch is het niet opportuun om te stellen dat daarom resoluut moet gekozen worden voor verbranding. Om een definitieve keuze te maken, dient men ook de baten te bekijken. Het rendement van het korteomloophout zal verschillen bij pyrolyse en verbranding. Indien men een bepaalde hoeveelheid korteomloophout beschouwt, kan de opbrengst uit de geproduceerde pyrolyse-olie bij pyrolyse bijvoorbeeld groter zijn dan de opbrengsten aan elektriciteit bij verbranding. Dit verschil in baten dient men ook te beschouwen bij het selecteren van de meest optimale verwerkingstechniek.

6. Conclusies

In dit laatste hoofdstuk worden de conclusies van deze masterproef samengevat. Door de verschillende hoofdstukken heen werd een antwoord gezocht op de centrale onderzoeksvraag. Deze zocht naar de grootte van de invloed van de opgenomen vervuiling door fytoremediatie op de economische waarde van houtige biomassa.

Uit het tweede hoofdstuk kunnen we concluderen dat korteomloophout een goede teeltkeuze is om de landbouwers in de Kempen van een alternatief inkomen te voorzien. Het gewas heeft een hoge biomassaopbrengst van 10,4 ton DS ha⁻¹ jaar⁻¹. Dit biedt de mogelijkheid om een voldoende hoog inkomen te genereren. Ook lijkt het fytoremediërende vermogen van korteomloophout vrij hoog. Jaarlijks blijkt de cadmiumopname van wilg op 0,34 kg ha⁻¹ jaar⁻¹ te liggen. De periode die nodig is om de bodem tot een aanvaardbare grens te saneren is wel zeer lang.

In hoofdstuk 3 wordt er een antwoord geformuleerd op de eerste deelvraag van deze masterproef. Het juridisch statuut van de vervuilde houtige biomassa uit fytoremediatie blijkt op dit moment nog altijd onbekend. Omdat er enkel nog maar op proefveldschaal geteeld wordt, zijn er nog geen grote fysieke stromen van het hout beschikbaar. Hierdoor is het moeilijk voor de hogere beleidsorganen om een uitspraak te doen over het juiste statuut van de houtige biomassa. Het is dus op dit ogenblik niet duidelijk of de houtige biomassa uit fytoremediatie nu afval is of niet.

Een uitspraak hierover is echter noodzakelijk. Indien de houtige biomassa beschouwd wordt als afval, zal de economische waarde bijzonder laag zijn. Aangezien het vinden van een vervangend inkomen een prioriteit is in de Kempen, is dit nefast voor de teelt. Het aanvragen van een grondstofverklaring bij de OVAM lijkt de beste optie met een goede kans op slagen. Een grondstofverklaring kan worden uitgesproken indien er onduidelijkheid heerst over de indeling van een bepaalde stof. Als argumentatie kan onder andere de Europese afvalstoffendefinitie worden aangehaald. Deze stelt dat er enkel sprake is van afval als de houder zich er van '...ontdoet, voornemens is zich te ontdoen of zich moet ontdoen...'. Bij de teelt van wilg in de Kempen primeert een hoge biomassaopbrengst boven het opnamevermogen van zware metalen. De intentie van de teelt is dus de biomassaopbrengst

en niet zozeer het saneren van de bodem. De biomassa is dus geen 'restproduct' waarvan men zich nog op een goedkope wijze *wil ontdoen*, maar een *doel* van het fyto-remediatieproject op zich. Ook kan de verdere bestemming van de houtige biomassa verzekerd worden door contracten met verdere verwerkers. Indien men kiest voor verbranding, blijkt biomassa ook qua aard, samenstelling en impact op mens en milieu een beter alternatief dan het primaire product dat het kan vervangen, in het bijzonder steenkool.

Er kan dus uit hoofdstuk 3 geconcludeerd worden dat het juridisch statuut van houtige biomassa uit fyto-remediatie op dit moment onbekend is maar dat een erkenning als grondstof mits verder onderzoek en een goede argumentatie mogelijk moet zijn.

Uit hoofdstuk 4 kan worden besloten dat de productieprijs van één ton korteomloophout binnen een range van [€31-€57] per ton valt. De aankoopprijs die een pyrolyst of verbrander betaalt voor één ton korteomloophout dat klaar is voor verdere verwerking, wordt bepaald op €50 per ton.

In het vijfde hoofdstuk wordt een antwoord gezocht op de tweede deelvraag. Eerst wordt er gezocht hoeveel cadmium er in één ton vervuild korteomloophout uit fyto-remediatie zit. Na vergelijking met verschillende bronnen blijkt een cadmiumgehalte van 27,3 mg Cd kg⁻¹ DS een realistische schatting. In het verder verloop van hoofdstuk 5 werd er gezocht naar extra kosten die optreden bij de pyrolyse en verbranding van vervuild hout.

Bij pyrolyse ligt de pyrolysetemperatuur onder de vervliegtemperatuur van cadmium. Bijgevolg komt het cadmium dus niet in de rookgassen terecht maar wordt het aan een ratio van 70/30 verdeeld over de char en het zandbed. De installatie van een extra rookgasreiniging blijkt niet nodig. Er wordt aangeraden om te kiezen voor een pyrolyse-installatie waarbij de char intern benut wordt om het zandbed op temperatuur te houden. Zo blijft het cadmium geconcentreerd in één reststroom, namelijk het af te scheiden zandbed. Dit vervuilde zand kan economisch gezien verder best gestort of geïmmobiliseerd worden. Het storten impliceert een extra kost van [€6,01- €15,37] per ton gepyrolyseerd korteomloophout uit fyto-remediatie. Immobilisatie kost [€7,98 - €19,95] per ton gepyrolyseerd korteomloophout uit fyto-remediatie. Onder negatieve scenario's lijkt deze kost echter vrij hoog.

Bij verbranding ligt de gebruikte temperatuur wel boven de vervliegtemperatuur van cadmium. Toch lijkt een extra reiniging van de rookgassen niet nodig indien men vervuilde houtige biomassa verbrandt. De rookgasreiniging die men installeert op een gewone verbrandingsinstallatie lijkt voldoende om binnen de emissiewaarden te blijven. Verdere extra kosten konden niet worden geïdentificeerd bij de verbranding van vuile houtige biomassa uit fyto-remediatie.

Bij pyrolyse zit de extra verwerkingskost dus in de verwerking van het zandbed. Bij verbranding werd er geen extra verwerkingskost gevonden. Er moet echter worden opgemerkt dat men bij de keuze voor een bepaalde verwerkingstechniek ook de baten moet meerekenen. Indien pyrolyse hogere opbrengsten genereert dan verbranding, zou dit de gemaakte extra kosten kunnen dekken. Men mag dus geen uitspraak doen over de optimale verwerkingstechniek indien de bijhorende baten niet gekend zijn.

Bijkomende opmerkingen en vragen voor verder onderzoek

(1) Aangezien miscanthus een arbeidsextensieve teelt is met een hoge biomassaopbrengst kan het ook een veelbelovend gewas zijn om een alternatief inkomen te genereren voor de landbouwers in de Kempen. Op dit moment is er echter nog niet veel (praktische) kennis over het gebruik van miscanthus als fyto-remediërend gewas. Verder onderzoek naar deze teelt kan nuttig zijn.

(2) Het aanvragen van een grondstofverklaring voor het bepalen van het definitieve juridisch statuut van korteomloophout uit fyto-remediatie is aangewezen. Dit is echter geen eenvoudige taak en zal waarschijnlijk ook bijkomend onderzoek vereisen.

(3) De marktprijs van zuiver korteomloophout blijft een relatief onzekere factor. In deze masterproef werd een prijs van €50 per ton DS aangenomen, mede ondersteund door een kostprijsrange voor de productie. Indien deze prijs varieert, zal dit ook gevolgen hebben voor keuzes die men dient te maken in de Kempen. Daarom verdient deze prijsfactor bijzondere aandacht in verder onderzoek.

(4) In deze masterproef werd er besloten om uit te gaan van een cadmiumgehalte van $0,0273 \text{ kg ton}^{-1}$ korteomloophout. Indien uit verdere proeven of praktijkervaring blijkt dat dit

cadmiumgehalte veel lager ligt, kan het zandbed eventueel wel gereinigd worden door middel van fysico-chemische reiniging.

(5) Secundaire reacties die zich voordoen door de aanwezigheid van zware metalen in het zandbed zijn tot nog toe onbekend. Indien deze zich echter toch voordoen, kan dit leiden tot extra kosten. Verder wetenschappelijk onderzoek kan deze onzekerheid uit de wereld helpen.

(6) Bij het maken van een keuze voor een definitieve verwerkingsmethode voor het vervuilde korteomloophout uit fyto-remediatie moet men ook de opbrengsten die gegenereerd worden bij pyrolyse en verbranding in acht houden. Deze masterproef spitste zich toe op de kosten. Om een goede keuze te kunnen maken zou het nuttig zijn dat ook het verschil in baten in kaart wordt gebracht.

Bronnen

- Arduini, I., Ercoli, L., Mariotti, M., Masoni, A. (2006). Response of miscanthus to toxic cadmium applications during the period of maximum growth. *Environmental and Experimental Botany*, 55, 29-40.
- Baker, A., Brooks, R. (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate heavy elements: a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1, 81-126.
- Bauen, A.W., Dunnett, A.J., Richter, G.M., Dailey, A.G., Aylott, M., Casella, E., Taylor, G. (2010). Modelling supply and demand of bioenergy from short rotation coppice and Miscanthus in the UK. *Bioresource Technology*, 101, 8132-8143.
- Beschikking van de Commissie van 29/01/2004 (2004, 29 januari). Beschikking tot vaststelling van richtsnoeren voor de bewaking en rapportage van de emissies van de broeikasgassen overeenkomstig Richtlijn 2003/87/EG.
- Besluit van de Vlaamse regering van 5 maart 2004 (2004, 5 maart). Besluit houdende de openbare dienstverplichting ter bevordering van de elektriciteitsopwekking in kwalitatieve warmtekrachtinstallaties.
- Besluit van de Vlaamse regering (2004, 10 december). Besluit van de Vlaamse Regering houdende vaststelling van de categorieën van projecten onderworpen aan milieueffectenrapportage.
- Biomassa verbrandingsinstallaties (z.d.). Geraadpleegd op 8 mei, 2011 van <http://www.tubro.nl/index.php/informatie-mainmenu-55/verbrandingsinstallatie/47-hout-en-biomassa-gestookte-verbrandingsinstallaties-en-cv-ketels.html>.
- Bloemen, A., Voets, T. (2009). Hout als energiebron: vergelijking van vergassing en pyrolyse voor de omzetting van omloophout in warmte en elektriciteit via kosten-batenanalyse. *Masterproef aan UHasselt, promotor Thewys, T.*
- Bosdecreet van Vlaams Agentschap voor Natuur en Bos (1990). Geraadpleegd op 12 januari, 2011, van <http://212.123.19.141/ALLESNL/wet/detailframe.vwp?WETID=-1&SID=0>.
- Bridgwater, A.V. (2011). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. (Article in press).
- Dancaert, F., Verbeke, P., Delanote, L., De Cubber, K. (2006). Inleiding tot de biologische teelt van hennep. Uitgave van het Interprovinciaal Proefcentrum voor de Biologische Teelt.

- De Picker, E. (2007). Handleiding voor grensoverschrijdende overbrenging van afvalstoffen. Een uitgave van OVAM
- De Somviele, B., Meiresonne, L., Verdonckt, P. (2009). Van wilg tot warmte: potenties van korteomloophout in Vlaanderen. Een uitgave van het Fonds voor Duurzaam Afval- en Energiebeheer.
- Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G., Richer-Lafèle, M. (2008). Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical Technologies and field applications. *Journal of Hazardous Materials*, 152, 1-31.
- Dickinson, N.M., Pulford, I.D. (2005). Cadmium phytoextraction using short-rotation coppice. *Salix: the evidence trail. Environmental International*, 31, 609-613.
- End of Waste criteria, Final Report (2008). Europese Commissie, Joint Research Centre.
- Energieteelten als bron van biomassa voor bio-energie productie. (z.d). Geraadpleegd op 19 januari, 2011, van <http://www.ilvo.vlaanderen.be/NL/Nieuwsgolfddecember2011/Archief/Nieuwsgolftthem anummerenergie/Productieeengebruikvanbiomassavoorenergie/Energieteeltenalsbron vanbiomassa/tabid/2373/language/nl-NL/Default.aspx>.
- Enerpedia: marktprijzen en rendabiliteit (2008). Geraadpleegd op 9 april 2011, van <http://www.enerpedia.be/nl/energiegewassen/korteomloophout/marktprijzen>.
- EPA, A Citizen's guide to Phytoremediation. (1998) Een uitgave van US Environmental Protection Agency.
- Garbisu, C., Alkorta, L. (2001). Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology*, 77, 229-236.
- Goessens, X., Staelens, B. (2010, februari). MER voor hervergunning bestaande installatie en bouw van een energiecentrale. Een uitgaven van Bionerga NV.
- Goovaerts, L., Lookman, R., Vanbroeckhoven, K., Gemoets, J., Vrancken, K. (2007). Best Beschikbare Technieken bij het uitvoeren van bodemsaneringsprojecten en bij grondreinigingscentra. Een studie van het VITO in opdracht van het Vlaams gewest.
- Grispen, V.M.J., Nelissen, H.J.M., Verkleij, J.A.C. (2006). Phytoextraction with *Brassic napus* L.: A tool for sustainable management of heavy metal contaminated soils. *Environmental Pollution*, xx, 1-7.
- Hergebruik eindproducten, GRC (z.d.). Geraadpleegd op 12 april 2011, van <http://www.grckallo.be/nl/hergebruik>.

- Hsu, F.H., Chou, C.H. (1992). Inhibitory effects of heavy metals on seed germination and seedling growth of *Miscanthus* species. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, 33, 335-342.
- Keller, C., Ludwig, C., Davoli, F., Wochele, J. (2005). Thermal treatment of metal-enriched biomass produced from heavy metal phytoextraction. *Environmental Science & Technologie*, 39, 3359-3367.
- Klang-Westin, E., Eriksson, J. (2003). Potential of *Salix* as phytoextractor for Cd on moderately contaminated soils. *Plant Soil*, 249, 127-137.
- Kumar, P.B.A.N., Dushenkov, V., Motto, H., Raskin, L. (1995). Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental Science Technologie*, 29, 1232-1238.
- Kuppens, M., Van den Eynden, K., Umans, L., Werquin, W., Thibau, B., Beeckmans, L., Smeets, K., Vangilbergen, B., Timmermans, A. (2010, januari). Tarieven en capaciteiten voor storten en verbranden – Actualisatie tot 2008, evolutie en prognose. Een uitgave van OVAM.
- Kuppens, T., Thewys, T. (2009). *Methode voor de bepaling van de prijs voor korteomloophout uit fyto-remediatie*. Unpublished paper from VVE-dag, Diepenbeek.
- Lamont, J.L., Lambrechts, Y. (2005). Koolzaad, het nieuwe goud? Teelttechniek van koolzaad. Uitgave van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Administratie Beheer en Kwaliteit Landbouwproductie.
- Landbouwleven, onbekende auteur (2010, 5 november). Kennis vergaren rond energiegewassen. *Landbouwleven*, p. 11.
- Lewandowski, I., Clifton-Brown, J.C., Scurlock, J.M.O., Huisman, W. (2000). *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy*, 19, 209-227.
- Linger, P., Müssig, J., Fischer, H., Kobert, J. (2002). Industrial hemp (*Cannabis Sativa* L.) growing on heavy metal contaminated soil: fibre quality and phytoremediation potential. *Industrial Crops and Products* (16), 33-42.
- Liu, J., Falcoz, Q., Gauthier, D., Flamant, G., Zheng, C.Z. (2010). Volatization behavior of Cd and Zn based on continuous emission measurement of flue gas from laboratory-scale coal combustion. *Chemosphere*, 80, 241-247.
- Ljung, A., Nordin, A. (1997). Theoretical feasibility for ecological biomass ash recirculation: Chemical equilibrium behavior of nutrient elements and heavy metals during combustion. *Environmental Science & Technologie*, 31, 2499-2503.
- McDonough, W., Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*.

- Meers, E. (2010, 16 december). Biomass on contaminated land: de mogelijkheden van non-food houtige teelten voor valorisatie van marginale en verontreinigde gronden. [Powerpoint-presentatie].
- Meers, E., Ruttens, A., Hopgood, M., Lesage, E., Tack, F.M.G. (2005). Potential of *Brassica rapa*, *Cannabis sativa*, *Helianthus annuus* and *Zea mays* for phytoextraction of heavy metals from calcareous dredged sediment derived soils. *Chemosphere*, 61, 561-572.
- Meers, E., Van Slycken, S., Adriaensen, K., Ruttens, A., Vangronsveld, J., Du Laing, G., Witters, N., Thewys, T., Tack, F.M.G (2009). The use of bio-energy crops (zea mays) for 'phytoattenuation' of heavy metals on moderately contaminated soils: A field experiment. *Chemosphere*, 78 (1), 35-41.
- Meiresonne, L. (2010, 16 december). Korteomloophout: juridische en technische aspecten. [Powerpoint-presentatie].
- Muylle, H. (z.d). *Miscanthus*: Teelt en opbrengst. [Powerpoint-presentatie].
- Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R.E. (2004). *Plant design and Economics for Chemical Engineers*, p242. New York: McGraw-Hill.
- Pijls, C.G.J.M., van Elsen, H.G.A. (1994). Immobilisatie van verontreinigde grond. *Chemische feitelikheden*, 9, 1-10.
- Pulford, I.D., Watson, C. (2003). Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees- a review. *Environment International*, 29, 529-540.
- Reeves, R., Baker, A. (2000). Metal accumulating plants. In: Raskin I, Ensley B (eds). *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*. Wiley, New York, pp193-229.
- Richtlijn 2001/80/EG (2001, 23 oktober). Richtlijn inzake de beperking van de emissies van bepaalde verontreinigende stoffen in de lucht door grote stookinstallaties.
- Richtlijn 2002/32/EG (2002, 7 mei). Richtlijn inzake ongewenste stoffen in diervoeding.
- Richtlijn 2006/12/EEG (2006, 5 april). Kaderrichtlijn betreffende afvalstoffen.
- Richtlijn 2008/98/EG (2008, 19 november). Richtlijn betreffende afvalstoffen en tot intrekking van een aantal richtlijnen.
- Richtlijn 2009/28/EG (2009, 23 april). Richtlijn ter bevordering van het gebruik van energie uit hernieuwbare bronnen.
- Richtlijn 75/442/EEG (1975, 15 juli). Kaderrichtlijn betreffende afvalstoffen.
- Rulkens, W.H., Tichy, R., Grotenhuis, J.T.C. (1998). Remediation of polluted soil and sediment: perspectives and failures. *Water Scientific Technologie*, 37, 27-35.

- Sas-Nowosielska, A., Kucharski, R., Malkowski, E., Pogrzeba, M., Kuperberg, J.M., Krynski, K. (2004). Phytoextraction crop disposal – an unsolved problem. *Environmental Pollution*, 128, 373-379.
- Senternovem (2005). Afvalstof of biomassa, een juridische onderbouwing. Een uitgave van TAUW in opdracht van SenterNovem.
- Solidificatie en stabilisatie (z.d.). Geraadpleegd op 14 april, van <http://www.ovmb.be/solidificatie-stabilisatie.html>.
- Stals, M., Carleer, R., Reggers, G., Schreurs, S., Yperman, J. (2010a). Flash pyrolysis of heavy metal contaminated hardwoods from phytoremediation: characterisation of biomass, pyrolysis oil and char/ash fraction. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89,22-29.
- Stals, M., Thijssen, E., Vangronsveld, J., Carleer, R., Schreurs, S., Yperman, J. (2010b). Flash pyrolysis of heavy metal contaminated biomass from phytoremediation: Influence of temperature, entrained flow and wood/leaves blended pyrolysis on the behaviour of heavy metals. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 87, 1-7.
- Styles, A., Thorne, F., Jones, M.B. (2008). Energy crops in Ireland: An economic comparison of willow and *Misanthus* production with conventional farming systems. *Biomass and Bioenergy*, 32, 407-421.
- Technische aspecten korteomloophout: Aanleg, beheer en exploitatie.(z.d). Geraadpleegd op 12 januari, 2011, van http://www.inbo.be/content/page.asp?pid=DUU_Bos_energiehout_technischeaspecten.
- Thewys, T., Kuppens, T. (2008). Economics of willow pyrolysis after phytoextraction. *International journal of phytoremediation*, 10, 561-583.
- Thewys, T., Witters, N., Van Slycken, S., Ruttens, A., Meers, E., Tack, F.M.G, Vangronsveld, J. (2010). Economic viability of Phytoremediation of a cadmium contaminated agricultural area using energy maize. Part I: Effect on the farmers income. *International journal of phytoremediation*, 12 (7), 650-662.
- Titel I van het VLAREM (1991, 6 februari). Besluit van de Vlaamse regering houdende vaststelling van het Vlaams Reglement betreffende de milieuvergunning.
- Titel II van het VLAREM (1995, 1 juni). Besluit van de Vlaamse regering houdende algemene en sectorale bepalingen inzake milieuhygiëne.
- Van Slycken, S., Meers, E., Meiresonne, L., Witters, N., Adriaensen, K., Peene, A., Dejonghe, W., Thewys, T., Vangronsveld, J., Tack, F.M.G. (2008). The use of bio-energy crops

- for phytoremediation of metal enriched soils in the Campine region. *Communication in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 73 (1), 19-20.
- Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., Ruttens, A., Thewys, T., Vassilev, A., Meers, E., Nehnevajova, E., van der Lelie, D., Mench, M. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environmental Science & Pollution Research*, 16, 765-794.
- Verdonckt, P. (2010, 16 december). ADLO project: VerKOHT! Korteomloophout voor biodiversiteit in het landbouwlandschap. [Powerpoint-presentatie].
- Verordening 1013/2006/EG (2006, 14 juni). Verordening betreffende de overbrenging van afvalstoffen.
- Verordening 629/2008 (2008, 2 juli). Verordening tot vaststelling van maximumgehalten aan bepaalde verontreinigingen in levensmiddelen.
- Vlarea- FAQ (z.d.). Geraadpleegd op 13 februari, 2011, van <http://www.ovam.be/jahia/Jahia/pid/272>.
- VLAREA (2004, maart). Vlaams reglement inzake afvalvoorkoming en -beheer (VLAREA). Een uitgave van OVAM.
- Vleeschouwers, B. (2010, 16 december). Enquête akkerbouwers en biomassateelten: hoe kijkt de boer aan tegen het telen van biomassa. [Powerpoint-presentatie].
- Voets, T., Kuppens, T., Cornelissen, T., Thewys, T. (2011). Economics of electricity and heat production by gasification or flash pyrolysis of short rotation coppice in Flanders (Belgium). *Biomass and Bioenergy*, 35, 1912-1924.
- Wat zijn afvalstoffen? (2006) Uitgave van OVAM.
- Website Departement Leefmilieu, Natuur en Energie (z.d.) Geraadpleegd op 14 februari 2011, van www.lne.be.
- Werking van de installatie (z.d.). Geraadpleegd op 10 februari 2011, van <http://www.bionerga.be/content/bionerga/site/3601>.
- Würdemann, M. (1993). Rookgasreiniging. *Chemische feitelijkheden*, 6, 1-10.
- Zhang, F.S., Yamasaki, S.I., Nanzyo, M., Kimura, K. (2001). Evaluation of cadmium and other metal losses from various municipal wastes during incineration disposal. *Environmental pollution*, 115, 253-260.

Persoonlijke communicatie :

Persoonlijke communicatie	dr. ing. Tom Cornelissen
Functie	(ex)-expert bij Bio-Oil Holding NV, Tessenderlo Doctoreerde aan UHasselt met onderzoek naar flash-pyrolyse
Vorm	Persoonlijk gesprek bij bedrijfsbezoek. Verder contact via email
Datum	Bedrijfsbezoek Bio-Oil Holding op 19 november 2010. Elektronisch contact op 16 december 2010, 5 januari 2011, 11 maart 2011, 11 april 2011.
Inhoud	De gesprekken met dhr. Cornelissen hadden vooral betrekking op de precieze werking van het pyrolyseproces en wat de gevolgen zijn van de aanwezigheid van zware metalen in de te pyrolyseren stof. De gestelde vragen handelden over waar het Cd terecht kwam bij pyrolyse en of dit nadelige gevolgen heeft. Ook de reiniging van het zandbed was een besproken topic. Op vlak van wetgeving in verband met pyrolyse-installaties was hij eveneens een goede bron.

Persoonlijke communicatie	Dhr. Yorg Aerts
Functie	Medewerker OVAM, Dienst Europa
Vorm	Email
Datum	25 maart 2011
Inhoud	Vraag met betrekking tot de voorwaarden die gelden bij het opstellen van End-of-Waste criteria op Europees vlak. Ook informatie gevraagd over de beschikbaarheid van deze criteria voor vervuild hout.

Persoonlijke communicatie	Dhr. Eloi Schreurs
Functie	Doctoraatstudent UHasselt, onderzoeksgroep Milieueconomie
Vorm	Persoonlijke gesprekken
Datum	Doorlopend in 2010-2011
Inhoud	Uiteraard voerde ik meerdere gesprekken met mijn copromotor in verband met fyto-remediatie en de verdere verwerking van de biomassa die hierbij ontstaat.

Persoonlijke communicatie	Dhr. Marinus van Stijn
Functie	General Manager Bio-Oil Holding NV
Vorm	Telefonisch contact
Datum	31 maart 2011
Inhoud	Het gesprek ging vooral over de hoeveelheid zandbed die er moet vervangen worden bij een pyrolyse-installatie waarbij de char in het zandbed terecht komt. Ook werd er gevraagd naar wat er gebeurt met dit zandbed. Een ander deel van het gesprek handelde over de geïnstalleerde rookgasreiniging op de 1,5 ton / uur pyrolyse-installatie van Bio-Oil Holding.

Persoonlijke communicatie	Dhr. Mark Stals
Functie	Doctoraatstudent UHasselt, onderzoeksgroep Toegepaste en Analytische Chemie
Vorm	Persoonlijke gesprekken, email
Datum	Persoonlijke gesprekken op 30 oktober 2010, 4 januari 2011. Email op 31 december 2010, 31 maart 2011
Inhoud	Dhr. Stals was een belangrijke bron voor deze masterproef. Via zijn laboratoriumonderzoek had hij heel wat te vertellen over de wetenschappelijke kant van mijn onderzoek. Gespreksonderwerpen handelden over de haalbaarheid van de scheiding van het zandbed en de char, hoe de metalen verwijderbaar zijn uit het zandbed, de gevolgen van de aanwezigheid van cadmium in het zandbed, waar het cadmium terecht komt bij pyrolyse, hoeveel cadmium er in de rookgassen terecht komt, of dit filterbaar is en of het onder de norm blijft, de verdeling van cadmium in het pyrolyseproces, het in vluchtige fase gaan van zware metalen, de praktische kant van het uitloggen van een vervuild zandbed, benodigde hoeveelheid zand voor pyrolyse, char als absorptiemiddel,...

Persoonlijke communicatie	Prof. dr. Robert Carleer
Functie	Professor en verantwoordelijke onderzoeksgroep Toegepaste en Analytische Chemie aan de UHasselt
Vorm	Persoonlijk gesprek

Datum	18 maart 2011
Inhoud	Het gesprek met prof. dr. Carleer had betrekking tot de pyrolyse van materiaal dat zware metalen zoals Cd bevat. De vragen handelden over de dichtheid van pyrolyse-olie, de samenstelling van het zandbed, de mogelijkheden om een vervuild zandbed te reinigen, de werking van een pyrolyse-intallatie met interne benutting van de char, de uitstoot in rookgassen bij pyrolyse van vervuilde biomassa, de huidige technologieën van rookgasreiniging en hun capaciteit, de temperaturen bij pyrolyse en emissiegrenswaarden.

Persoonlijke communicatie	Mevr. Kathleen Van den Eynden
Functie	Medewerker OVAM
Vorm	Telefonisch contact
Datum	7 april 2011
Inhoud	Het gesprek met mevr. Van den Eynden had betrekking op de verplichtingen waaraan (afval)verbranders moeten voldoen. Het bracht duidelijkheid inzake de kwestie afvalverbrander of gewone verbrander en de hieraan gebonden gevolgen. Ze verduidelijkte welke normen er gelden en hoe de OVAM hiermee omgaat.

Persoonlijke communicatie	Dhr. Maarten Meersschaert
Functie	Operations Manager Bionerga NV
Vorm	Persoonlijk gesprek
Datum	4 april 2011
Inhoud	Bij een bezoek aan de afvalverbrander Bionerga NV in Houthalen had ik een gesprek met dhr. Meersschaert. Hij verduidelijkte wat er wettelijk gezien verbrand mag worden in een afvalverbrandingsinstallatie maar ook wat de technische mogelijkheden zijn. Ook werd de algemene werking van een rookgasreiniging uitgelegd met specifieke aandacht voor het filteren van zware metalen. Uit inzage in het MER van Bionerga bleek dat de Cd-uitstoot bij verbranding van huisvuilafval ruim onder de norm bleef. Ook na consultatie van andere medewerkers van Bionerga bleek dat een verhoogde Cd-concentratie in het te verbranden materiaal niet tot problemen leidt voor een standaard rookgasreiniging.

Persoonlijke communicatie	Dhr. Kenny Vanreppelen
Functie	Doctoraatstudent UHasselt, onderzoeksgroep Toegepaste en Analytische Chemie
Vorm	Email
Datum	5 april 2011
Inhoud	Vraag over de hoeveelheid zandbed die men moet vervangen bij een fluid-bed pyrolyse-installatie. Net als Mark Stal bevestigde dhr. Vanreppelen dat dit een vaste design-factor is.

Persoonlijke communicatie	Dhr. Jan Van Broekhoven
Functie	Medewerker Ecosol NV
Vorm	Email
Datum	7 april 2011, 12 april 2011
Inhoud	Aan dhr. Van Broekhoven van de bodemsaneerder Ecosol NV, gevestigd in Hoeselt werd gevraagd naar een prijsrange voor het reinigen van een bodem die vervuild is met cadmium. Ook werd er geïnformeerd naar de definitieve bestemming van deze bodem, na reiniging.

Persoonlijke communicatie	Dhr. Bart Thibau
Functie	Medewerker OVAM
Vorm	Telefonisch contact
Datum	13 april 2011
Inhoud	Het gesprek met dhr. Thibau handelde over de mogelijkheid tot storten van bepaalde materialen. De indeling en het verschil tussen categorie I, II en III stortplaatsen werd besproken. Ook de praktische werkwijze van het storten van vervuilde afvalstoffen kwam aan bod. Dhr. Thibau stipte ook de mogelijkheid tot solidificatie aan.

Persoonlijke communicatie	Dhr. Franky Vanhinsberg
----------------------------------	-------------------------

Functie	Medewerker A&S Energie, Instrumentatie & Elektrisch Onderhoud
Vorm	Email, telefonisch contact
Datum	15 april 2011, 10 mei 2011
Inhoud	Het bedrijf A&S Energie beschikt over een verbrandingsinstallatie waarin al dan niet vervuild houtafval wordt verbrand voor energetische benutting. Aan dhr. Vanhinsberg werd de vraag gesteld of het praktisch en juridisch mogelijk is om biomassa uit fyto-remediatie te verbranden in een desbetreffende verbrandingsinrichting. Ook werd er gevraagd of men verwacht dat de huidige geïnstalleerde rookgasreiniging voldoet om een hogere concentratie cadmium uit de rookgassen te filteren. In een telefonisch contact op 10 mei 2011 werd gevraagd naar de definitieve bestemming van het restproduct dat een rookgasreiniging uitstoot.

Persoonlijke communicatie	Dhr. Steven Vandenbulcke
Functie	Medewerker A&S Energie, Plant Manager
Vorm	Email
Datum	12 april 2011
Inhoud	Het bedrijf A&S Energie beschikt over een verbrandingsinstallatie waarin al dan niet vervuild houtafval wordt verbrand voor energetische benutting. Aan dhr. Vandenbulcke werd de vraag gesteld of het praktisch en juridisch mogelijk is om biomassa uit fyto-remediatie te verbranden in een desbetreffende verbrandingsinrichting. Ook werd er gevraagd of men verwacht dat de huidige geïnstalleerde rookgasreiniging voldoet om een hogere concentratie cadmium uit de rookgassen te filteren.

Persoonlijke communicatie	Dhr. Emmanuel Govaerts
Functie	Medewerker Grond Reinigings Centrale (GRC), Verantwoordelijke afdeling Zolder
Vorm	Telefonisch contact
Datum	12 april 2011
Inhoud	Dhr. Govaerts van GRC Zolder verschaftte me heel wat nuttige info over de mogelijkheden van zandwassing. Zo bleek de maximumconcentratie van 40 tot 50 ppm een belangrijke beperkende factor. Ook gaf hij een duidelijke beschrijving van het

	proces dat het vervuilde zandbed zou ondergaan en wat er daarna met de gereinigde stof gebeurt.
--	---

Persoonlijke communicatie	Dhr. Luc Nizet
Functie	Medewerker Bioterra NV
Vorm	Email
Datum	18 april 2011
Inhoud	Aan dhr. Nizet van bodemsaneerder Bioterra NV, gevestigd in Opglabbeek, werd gevraagd naar een prijsrange voor de sanering van een bodem vervuild met cadmium. Ook werd er geïnformeerd naar de technische haalbaarheid hiervan en wat er dient te gebeuren indien de concentratie cadmium te hoog blijkt voor normale fysico-chemische grondreiniging.

Persoonlijke communicatie	Dhr. Joris Martens
Functie	Medewerker Bioterra NV, Preventieadviseur & Kwaliteitsverantwoordelijke
Vorm	Email
Datum	19 april 2011
Inhoud	Aan dhr. Martens van bodemsaneerder Bioterra NV, gevestigd in Opglabbeek, werd gevraagd naar meer uitleg over het immobiliseren van een zandbed dat te hoge concentraties cadmium bevat voor fysico-chemische reiniging.

Persoonlijke communicatie	Dhr. Johan Degraeve
Functie	Medewerker Atimo Industrial NV
Vorm	Email
Datum	9 mei 2011
Inhoud	Bij dhr. Degraeve werd geïnformeerd naar een range voor de investeringskost voor een rookgasreiniging die Atimo op zijn website aanbiedt. Deze reiniging is geschikt voor verbrandingsinstallaties van 0,5 tot 6 MW _e .

Bijlagen

Bijlage 1: Bijlage 4 VLAREM

LIJST VAN AFVALSTOFFEN DIE IN AANMERKING KOMEN VOOR GEBRUIK ALS SECUNDAIRE GRONDSTOFFEN

Afdeling 1

Gebruik in of als meststof of bodemverbeterend middel

BENAMING AFVALSTOF	HERKOMST EN OMSCHRIJVING	VOORWAARDEN INZAKE SAMENSTELLING EN/OF GEBRUIK
Schuimaarde van suikerfabrieken	suikerfabriek verkregen bij de suikerraffinage en dat hoofdzakelijk bestaat uit calciumcarbonaat, organische stof en water	artikel 4.2.1.1
Kalkas	branden van kalksteenrots asrest die als hoofdbestanddeel calcium oxide bevat en eventueel calciumhydroxide en calciumcarbonaat	artikel 4.2.1.1
Calciumsulfaat	verkregen bij de fosfor- en/of citroenzuurproductie en die gehydrateerd calciumsulfaat bevat	artikel 4.2.1.1gebruikscertificaat verplicht
Afgeogoste champignoncompost	champignonkwekerij organische voedingsbodem die overblijft na het telen van kampermoeljes	artikel 4.2.1.1
Compost van boomschors	vergunde inrichting voor de compostering van schorsafval dat vrijkomt bij het ontschorsen van bomen	artikel 4.2.1.1
Vinasse, vinasse-extract, vinassekali en chicoreivinasse	gistfabriek stroopachtig residu bekomen uit uitgagiste melasse, extract verkregen uit vinasse door toevoeging van ammoniumsulfaat of bekomen tijdens de productie van inuline	artikel 4.2.1.1
Vismeel, diermeel, verenmeel, beendermeel, wol, visperswater, stoffen van de bewerking van vellen, galaliet in poeder, hoornmeel, ledermeel, bloedmeel of andere toe te laten stoffen van dierlijke oorsprong	erkende of geregistreerde verwerkingsinrichting voor dierlijk afval, met inbegrip van bloed	artikel 4.2.1.1 gebruikscertificaat verplicht regelgeving dierlijk afval
Gedroogd cacao-, tabak en koffieafval	genotmiddelenindustrie verkregen bij de verwerking van cacao- en koffiebonen en tabak en de bereiding van theobromine uit cacao-afval onder toevoeging van kalk	artikel 4.2.1.1

Bijlage 2: Aanvraagformulier tot gebruikscertificaat

STANDAARDFORMULIER VOOR HET AANVRAGEN VAN EEN GEBRUIKSCERTIFICAAT VOOR HET GEBRUIK VAN EEN AFVALSTOF ALS SECUNDAIRE GRONDSTOF

De houder van de afvalstof wordt eraan herinnerd dat dit standaardformulier samen met de nodige bijlagen bij aangetekende brief moet verstuurd worden aan de OVAM.

VAK VOORBEHOUDEN AAN DE ADMINISTRATIE

Dossiernummer :

Opmerkingen :
.....

VAKKEN IN TE VULLEN DOOR DE AANVRAGER

1. OMSCHRIJVING

Gewenst gebruik van de afvalstof als secundaire grondstof (1) :

- in of als meststof of bodemverbeterend middel
- in of als niet-vormgegeven bouwstof
- in of als vormgegeven bouwstof
- als bodem
- als diervoeder

(1) Aankruisen wat van toepassing is.

2. ADMINISTRATIEVE GEGEVENS

2.1. IDENTITEIT VAN DE AANVRAGER

2.1.1. NATUURLIJKE PERSOON

Naam :
 Voornaam :
 Geboorteplaats en datum :
 Adres :
 Land :
 Gemeente :
 Postnummer :
 Straat :
 Nr Bus
 Tel. Privé :
 Tel. Werkzetel :
 Fax Werkzetel :
 e-mail :

2.1.2. RECHTSPERSOON

Naam rechtspersoon :
 Vorm rechtspersoon :
 Adres :
 Maatschappelijke zetel :
 Land :
 Gemeente :
 Postnummer :
 Straat :
 Nr Bus
 Tel. :
 Fax :
 e-mail :
 Exploitatietzel :
 Land :
 Gemeente :
 Postnummer :
 Straat :
 Nr Bus
 Tel. :
 Fax :
 Verantwoordelijke
 voor de aanvraag :
 Contactadres :
 :

2.2. IDENTITEIT VAN DE PRODUCENT

[enkel invullen indien de producent van de afvalstof niet de aanvrager is van het gebruikscertificaat]

2.2.1. NATUURLIJKE PERSOON

Naam :

Voor naam :

Geboorteplaats en datum :

Adres :

Land :

Gemeente :

Postnummer :

Straat :

Nr Bus

Tel. Privé :

Tel. Werkzetel :

Fax Werkzetel :

e-mail :

2.2.2. RECHTSPERSOON

Naam rechtspersoon :

Vorm rechtspersoon :

Adres :

Maatschappelijke zetel :

Land :

Gemeente :

Postnummer :

Straat :

Nr Bus

Tel. :

Fax :

Exploitatiezetel :

Land :

Gemeente :

Postnummer :

Straat :

Nr Bus

Tel. :

Fax :

Verantwoordelijke voor de productie :

2.2.3. MILIEUVERGUNNING

Kopie milieuvergunning indien de afvalstof vrijkomt bij een VLAREM-vergunningsplichtige activiteit : bijlage 1.

3. MILIEUHYGIENISCHE KARAKTERISATIE

3.1. IDENTIFICATIE VAN DE AFVALSTOF

Gebruikelijke naam :

Afvalstoffencode :

Jaarlijkse hoeveelheid :

..... ton m³

Overzicht van het productieproces met aanduiding van de stap(pen) waarbij de afvalstof vrijkomt : bijlage 2

3.2. MILIEUHYGIENISCHE KWALITEIT

De milieukwaliteit wordt bepaald aan de hand van de parameterlijst die als annex bij dit aanvraagformulier is gevoegd. De bemonstering en analyse gebeurt door een daarvoor erkend laboratorium dat voor de afvalstof een bemonsterings- en analyseverslag opstelt : bijlage 3.

Voor het geval afvalstoffen slechts een deel uitmaken van de massa van de vormgegeven bouwstof, moet een bijkomend bemonsterings- en analyseverslag van het eindproduct opgesteld worden : bijlage 4.

De analyseverslagen moeten aantonen dat de afvalstof of de V-bouwstof voldoet aan de voorwaarden voor het betrokken toepassingsgebied.

3.3. GEBRUIKSMOGELIJKHEDEN

Er wordt een opsomming gegeven van de positieve karakteristieken voor het beoogde gebruik door middel van analyserapporten : bijlage 5.

4. VERKLARING

De ondergetekende,, verklaart hierned dat de door hem (haar) verstrekte inlichtingen juist en volledig zijn.

Te de

Handtekening

Bijlage 3: Massabalansen

Table 4
Data summary of basic pyrolysis yields and properties.

Experiment type	Pyrolysis temperature (K)	Pyrolysis oil yield (%)	Char yield (%)	Gas yield (%) [*]	Water content (%)	HHV oil (MJ/kg)	HHV char (MJ/kg)
Wood only	623	40	36	24	48	13.4	25.0
No use of hot-gas filter	723	52	23	25	39	15.6	24.0
	823	43	12	45	51	14.7	26.7
Wood only	623	39	36	25	48	13.2	24.5
Use of hot-gas filter	723	49	21	30	35	15.8	24.4
	823	44	10	46	50	13.7	25.7
Wood and leaves	723	41	21	38	49	13.9	21.9
Use of hot-gas filter							

^{*} Gas calculated by difference.

Auteursrechtelijke overeenkomst

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

Valorisatie van biomassa uit fyto-remediatie. Het juridisch statuut en identificatie van extra verwerkingskosten

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

Jaar: **2011**

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,

Vanderlinden, Klaas

Datum: **1/06/2011**