

2013•2014
FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN
master in de toegepaste economische wetenschappen

Masterproef

De kosteneffectiviteit van fyto-remediatie van metalen en metalloïden: een aantal Europese gevalstudies

Promotor :
dr. Nele WITTERS

Sander Vliegen

Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste economische wetenschappen

2013•2014

FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE
WETENSCHAPPEN

master in de toegepaste economische wetenschappen

Masterproef

De kosteneffectiviteit van fyto-remediatie van metalen en metalloïden: een aantal Europese gevalstudies

Promotor :
dr. Nele WITTERS

Sander Vliegen

Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste economische wetenschappen

Woord vooraf

Als afsluiting van het masterjaar Toegepaste Economische Wetenschappen, afstudeerrichting Beleidsmanagement, heb ik een masterproef geschreven waarin onderzoek wordt gedaan naar de mate waarin fyto-remediatie een te verkiezen methode kan zijn boven de populaire, conventionele, saneringsmethodes. De voorbije jaren werd getracht om zo veel mogelijk vervuilde gronden te saneren. Dit proces wordt echter vertraagd door de vaak hoge kosten van conventionele sanering, wat deze thesis erg actueel maakt.

Het maken van deze thesis was echter onmogelijk zonder de steun van een aantal mensen, die ik hier graag wil bedanken.

Eerst en vooral wil ik mijn promotor, dr. Nele Witters, bedanken voor haar goede raad en de hoeveelheid tijd die zij voor mij heeft vrijgemaakt. Dankzij haar bijstand heb ik deze thesis tot een goed einde kunnen brengen.

Daarnaast wil ik graag de partners van het GREENLAND project bedanken voor het voorzien van de cases die in deze thesis besproken worden.

Ten slotte wil ik graag mijn naaste omgeving bedanken voor de niet aflatende steun. Ik denk vooral, maar niet alleen, aan mijn ouders en mijn vriendin, die mij steeds zijn blijven aanmoedigen doorheen de periode waarin deze masterproef geschreven werd.

Sander Vliegen

Samenvatting

De laatste twee eeuwen heeft de industrie in Europa een enorme groei gekend. Met deze vooruitgang gingen echter ook nadelen gepaard. Wijdverspreide bodemvervuiling is één van deze nadelen en dit fenomeen vormt tevens de aanleiding van deze masterproef.

In eerste instantie werd nagegaan wat de precieze situatie op vlak van bodemverontreiniging is. Dit gebeurde zowel voor de Europese Unie als voor Vlaanderen. Europese cijfers van de Europese Commissie en het European Environment Agency (2010) geven weer dat tot 3,5 miljoen sites mogelijk leiden onder bodemverontreiniging. De meeste frequente vervuilende stoffen zijn zware metalen en minerale olieën. Schattingen van de totale saneringskost, nodig om alle vervuilde gronden in de EU te saneren, lopen van 59 tot 107 miljard EUR.

Het aantal sites in Vlaanderen waar men een saneringsproject moet uitvoeren, zou volgens de Vlaamse Milieumaatschappij (2013) liggen op 11 750. De Vlaamse Overheid wil tegen 2015 op 40% van deze gronden een saneringsproject gestart hebben. In 2011 leken we goed op weg om deze doelstelling te halen. Op 36% van de gronden waar dit vereist is, werd in dit jaar reeds een bodemsaneringsproject gestart. De evolutie van het aantal bodemsaneringsprojecten is echter afgezwakt sinds 2007. Volgens de Vlaamse Milieumaatschappij is één belangrijke reden hiervoor de hoge kostprijs van de saneringen. In 2011 keurde OVAM bodemsaneringsprojecten goed met een totale geraamde kostprijs van 134 miljoen EUR. In de periode van 1997 tot 2010 bedroeg deze kost zelfs 1,451 miljard EUR, volgens de Vlaamse Milieumaatschappij. Volgens het European Environment Agency (2000) zou deze kost zelfs kunnen oplopen tot 6,9 miljard EUR in Vlaanderen.

Goedkopere saneringsmethodes zouden deze kostprijs aanzienlijk kunnen verlagen, wat ons brengt tot de focus van dit onderzoek, namelijk: fyto-remediatie, en meer specifiek, in welke mate fyto-remediatie een meer kosten-effectieve methode kan zijn dan reeds bestaande, conventionele saneringstechnieken. Een van deze conventionele saneringstechnieken is bijvoorbeeld het ontgraven van de grond om deze vervolgens te zuiveren. Een overzicht van de meest gebruikte saneringstechnieken in Vlaanderen wordt tevens gegeven in deze masterproef.

Fyto-remediatie wordt door Witters et al. (2012) gedefinieerd als 'het in situ gebruik maken van planten en hun geassocieerde micro-organismen om verontreinigde bodem en grondwater te saneren of te stabiliseren. Men kan deze techniek toepassen op zowel zware metalen, als minerale olieën en andere soorten vervuiling. Deze masterproef focust echter enkel op fyto-remediatie van zware metalen en metalloïden.

Het onderzoek op vlak van fyto-remediatie heeft zich tot nog toe vooral gefocust op de wetenschappelijke kant van de techniek. Over de economische zijde van de methode werd tot op heden weinig geschreven, ook al tonen eerste indicaties aan dat de techniek 'kosteneffectief' is.

Daarom wordt er in deze masterproef in de eerste plaats een algemeen kostenmodel opgesteld. Dit is nuttig omdat er op deze manier een vast schema ontstaat om de kosten van fyto-remediatie op te nemen. Na afwerking van dit schema werd aan enkele partners uit het GREENLAND project, een

Europees project waarin men werkt rond de stimulering van de implementatie van fyto-remediatie, gevraagd om de kosten in te vullen voor de sites waarop zij onderzoek naar fyto-remediatie voeren.

Na ontvangst van deze ingevulde kostenmodellen werden de kosten besproken. Hierbij werd er extra aandacht besteed aan enkele kostencategorieën waarvoor GREENLAND partners aangegeven hadden dat zij belangrijk zijn. Meer bepaald gaat het hier om de labokosten, kosten die te maken hebben met het afzetten van biomassa en monitorkosten.

De kosten geven echter geen totaalbeeld van fyto-remediatie. Indien enkel met deze kosten rekening werd gehouden, zou fyto-remediatie in voorkomend geval de voorkeur krijgen op conventionele sanering. De tijdsduur is ook een belangrijk element bij de keuze tussen fyto-remediatie of conventionele sanering. Fyto-remediatie van metalen en metalloïden duurt immers langer dan conventionele saneringstechnieken. Het kostenmodel wordt dus uitgebreid met de langere tijdsduur van fyto-remediatie. Dit gebeurt in de vorm van een kosteneffectiviteitsanalyse. De keuze van dit soort analyse werd gemaakt om op een objectieve manier twee methodes te kunnen vergelijken. Anders gezegd: een methode kan wel heel goedkoop zijn ten opzichte van een andere methode, maar als zij een veel langere tijdsduur heeft, is deze eerste methode misschien niet het meest kosten-effectief.

Meer concreet gaat dit model na wat de maximale waarde mag zijn van het terrein na sanering, opdat het goedkopere fyto-remediatieproject met een langere tijdsduur verkozen wordt boven de duurdere conventionele sanering met een kortere tijdsduur. De waarde die berekend wordt in dit model geeft dus, met andere woorden, het indifferentiepunt tussen fyto-remediatie en conventionele sanering aan. Indien de waarde van het terrein immers erg hoog zou zijn, zou men er liefst vroeger dan later over beschikken. Zowel verkoop- als ontwikkelingswaarde worden bekeken, en dit voor verschillende types grond (landbouwgrond, industriegrond, commercieel gebied en woonzone).

Dit wordt zeer specifiek uitgewerkt voor één van de veldstudies uit het GREENLAND project. Voor deze gevalstudie blijkt dat bij landbouwgrond fyto-remediatie het meest interessant is, gevolgd door industriegrond, commercieel gebied, en ten slotte woonzone.

Op de case worden tevens een aantal sensitiviteitsanalyses uitgevoerd. Daartoe wordt er gewerkt met drie scenario's: een optimistisch, neutraal en pessimistisch scenario. In het optimistisch scenario worden enkele belangrijke inputfactoren, zoals biomassaopbrengst en accumulatie van vervuiling, in positieve zin aangepast. In het pessimistisch scenario gebeurt dit in de omgekeerde richting.

Nadat alle private kosten en baten in rekening zijn gebracht wordt er nagegaan welke andere, externe, kosten en baten tevens van belang zijn bij de keuze van een saneringstechniek. Hiertoe wordt in de eerste plaats de multicriteria-analyse van de OVAM onderzocht. Hieruit blijkt dat er nog veel andere factoren een rol spelen bij de keuze van een saneringstechniek. Deze worden ingedeeld in vier categorieën: milieuhygiënische factoren op lokaal niveau, milieuhygiënische factoren op regionaal/globaal niveau, technische en maatschappelijke factoren, en financiële factoren. Aanvullend op deze factoren volgens de OVAM, zal er ook kort gekeken worden naar de

factoren die SURF-UK, een Europees consortium dat werkt rond duurzaamheid van bodemsanering, als belangrijk beschouwd.

Ten slotte worden er enkele conclusies gevormd als antwoord op de centrale onderzoeksvraag. Er wordt geconcludeerd dat, naarmate de kostprijs van fyto-remediatie daalt, de kostprijs van de conventionele saneringstechniek stijgt en de tijdsduur van het fyto-remediatie project korter wordt, de mate waarin fyto-remediatie te verkiezen is boven conventionele sanering groter wordt. Vervolgens zal men ook eerder kiezen voor fyto-remediatie naarmate dat de waarde van het te saneren terrein lager is. Er wordt hierna gesteld dat niet enkel deze externe kosten en baten van belang zijn, maar dat men tevens rekening dient te houden met alle andere factoren zoals de OVAM deze opnam in haar multicriteria-analyse. Om dit laatste hoofdstuk af te sluiten worden enkele suggesties voor verder onderzoek naar voor geschoven. Zo lijkt het belangrijk om de eerder besproken modellen op zo veel mogelijk sites toe te passen. Er zullen dan meer algemene conclusies getrokken kunnen worden.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	I
Samenvatting	III
Inhoudsopgave	VII
Lijst met gebruikte afkortingen	IX
Lijst van tabellen.....	XI
Lijst van figuren	XIII
1. Onderzoeksplan	1
1.1 Praktijkprobleem	1
1.1.1 De Europese Unie	1
1.1.2 Vlaanderen	4
1.2 Onderzoeksvragen	6
1.2.1 Centrale onderzoeksvraag	6
1.2.2 Deelvragen	6
2. Fytoremediatie	9
2.1 Inleiding	9
2.2 Soorten	9
2.3 Toepassing van fyto-remediatie als saneringsalternatief in Vlaanderen en de EU	10
2.4 Voordelen	11
2.5 Nadelen en beperkingen	13
3. De kosten van fyto-remediatie	15
3.1 Inleiding	15
3.2 Opbouw kostenmodel	15
3.2.1 Fysische data	15
3.2.2 Kosten van project	17
3.3 Gevalstudie: de kosten van fyto-remediatie in GREENLAND projecten.....	25
3.3.1 Labo-kosten	26
3.3.2 Kosten van voorbereiding site en aanplanting gewassen.....	26
3.3.3 Onderhoudskosten planten en terrein	26
3.3.4 Biomassa kosten en opbrengsten	27
3.3.5 Monitorkosten.....	29
3.3.6 Totale kost	29

4. De keuze voor fyto-remediatie of conventionele sanering, rekening houdende met private kosten en baten, en tijdsduur	31
4.1 Inleiding	31
4.2 Opbouw beslissingsmodel	31
4.2.1 Jaarlijkse cashflow.....	31
4.2.2 Eenmalige opbrengst	33
4.2.3 Fytostabilisatie.....	34
4.3 Toepassing GREENLAND-cases	34
4.3.1 Berekening maximale baat die terrein mag genereren.....	34
4.3.2 Sensiteivitsanalyse	36
4.3.3 Fyto-remediatie of conventionele sanering voor verschillende grondbestemmingen	38
5. De invloed van externe kosten en baten op de keuze van een saneringsvariant ...	41
5.1 Inleiding	41
5.2 Externe kosten en baten volgens OVAM.....	41
5.2.1 Milieuhygiënische factoren op lokaal niveau	41
5.2.2 Milieuhygiënische factoren op regionaal/globaal vlak.....	43
5.2.3 Technische factoren	44
5.2.4 Financiële factoren	44
5.3 De multicriteria-analyse.....	45
5.4 Externe kosten en baten volgens SURF-UK	48
6. Conclusie en aanbevelingen	51
6.1 Conclusie.....	51
6.2 Kritische reflectie.....	54
Lijst geraadpleegde werken	57
Bijlagen	59

Lijst met gebruikte afkortingen

BBO – Beschrijvend bodemonderzoek

BSP – Bodemsaneringsproject

EC – Europese Commissie

EEA – European Environment Agency

EMBO – European Molecular Biology Organization

EMIS – Energie- en milieu-informatiesysteem voor het Vlaamse Gewest

FRTR – Federal Remediation Technologies Roundtable

OBO – Oriënterend bodemonderzoek

OVAM – Openbare Vlaamse Afvalstoffen Maatschappij

SRU – Sachverständigenrat für Umweltfragen, het Duitse adviescomité voor het milieu

U.S. EPA – United States Environmental Protection Agency

VITO – Vlaamse Instelling Technologisch Onderzoek

VMM – Vlaamse Milieu Maatschappij

Lijst van tabellen

Tabel 1: Overzicht van 1) de soorten sites waarmee rekening werd gehouden bij het berekenen van het totaal aantal risicogronden en vervuilde gronden, 2) de risicogronden en 3) de vervuilde gronden per Europese staat.....	3
Tabel 2: Sites waar fyto-remediatie getest werd als saneringsalternatief	10
Tabel 3: Overzicht van de kosten ¹ van de bodemsaneringsmethodes die het vaakst werden toegepast in Vlaanderen in de periode t.e.m. 2010.....	12
Tabel 4: Algemene informatie site	15
Tabel 5: Algemene informatie vervuiling	16
Tabel 6: Algemene informatie gewassen	17
Tabel 7: Verschillende kostencategorieën van een fyto-remediatieproject	18
Tabel 8: Inputs nodig voor berekening kosten van gewassen en transportkosten	19
Tabel 9: Inputs nodig voor berekening onderhoudskosten planten en terrein	20
Tabel 10: Tussenberekening biomassa-productie en totale accumulatie	21
Tabel 11: Inputs nodig voor berekening oogstkosten	23
Tabel 12: Inputs nodig voor berekening biomassa-opbrengst.....	24
Tabel 13: Overzicht van de drie sites die besproken worden, het land waarin ze liggen, de gewassen die er gebruikt worden, het type vervuiling in de bodem en of het gaat om fyto-extractie of fytostabilisatie	25
Tabel 14: De kost van fyto-remediatie per m ³ en per ton op basis van de gevalstudies	29
Tabel 15: Overzichtstabel maximale baat van site CS 1 Freiberg, CS 7 Freiberg en Phytosed - ECH 1	36
Tabel 16: Overzichtstabel maximale baat van site CS 1 Freiberg, CS 7 Freiberg en Phytosed - ECH 1 voor het optimistisch en pessimistisch scenario	38
Tabel 17: Grondprijzen en totale potentiële opbrengst van het terrein per soort bestemming van de grond.....	39
Tabel 18: Sociale factoren volgens SURF-UK en vergelijking met OVAM factoren	48
Tabel 19: Economische factoren volgens SURF-UK en vergelijking met OVAM factoren.....	49
Tabel 20: Milieufactoren volgens SURF-UK en vergelijking met OVAM factoren.....	50
Tabel 21: Overzicht indifferentiepunten tussen conventionele sanering en fyto-extractie voor verschillende bestemmingstypes van grond voor site CS1 Freiberg	52
Tabel 22: Overzicht geselecteerde bodemtechnieken tot en met 2010 in Vlaanderen	60
Tabel 23: Kost van bodemluchtexttractie per type site	62
Tabel 24: Kosten van bodemluchtexttractie.	62
Tabel 25: Kosten van persluchtinjectie.	62
Tabel 26: Kosten in € per m ³ voor bioventing.	63
Tabel 27: Transport- en overslagkosten	65
Tabel 28: De kost van fysicochemische reiniging (Europese cijfers).	66
Tabel 29: De kost van fysicochemische reiniging (Amerikaanse cijfers).	66
Tabel 30: Kost van thermische reiniging.....	68
Tabel 31: Kosten aanbrengen bovenafdichting	68

Lijst van figuren

Figuur 1: Aantal gronden dat zich in een bepaalde saneringsfase bevindt	5
Figuur 2: Maximale eenmalige baat die site CS 1 Freiberg mag generen gegeven een kost van fytexttractie van €9 488, opdat fytoextractie rendabeler is dan conventionele sanering (duur fytoextractie: 10 jaar).....	35
Figuur 3: Normaal, optimistisch en pessimistisch scenario maximale eenmalige baat voor site CS 1 Freiberg	37
Figuur 4: Maximale eenmalige baat die site CS 1 Freiberg mag opbrengen vergeleken met de opbrengst van vijf verschillende grondtypes	40
Figuur 5: MCA volgens OVAM.....	47
Figuur 6: Onderverdeling bodemsanering	61
Figuur 7: In-situ sanering.....	61
Figuur 8: Ex-situ sanering	65
Figuur 9: Maximale jaarlijkse baat die site CS 1 Freiberg mag generen gegeven een kost van fytexttractie van €12 368, opdat fytoextractie rendabeler is dan conventionele sanering (duur fytoextractie: 10 jaar).....	70
Figuur 10: Maximale jaarlijkse baat die site CS 1 Freiberg mag generen gegeven een baat van fytostabilisatie van €€10 718, opdat fytostabilisatie rendabeler is dan conventionele sanering (duur fytostabilisatie: oneindig)	71
Figuur 11: Maximale eenmalige baat die site CS 7 Freiberg mag generen gegeven een baat van fytostabilisatie van €10 718, opdat fytostabilisatie rendabeler is dan conventionele sanering (duur fytostabilisatie: oneindig)	71
Figuur 12: Maximale jaarlijkse baat die site Phytosed – Ech1 mag generen gegeven een kost van fytostabilisatie van €395 847, opdat fytostabilisatie rendabeler is dan conventionele sanering (duur fytostabilisatie: oneindig)	72
Figuur 13: Maximale eenmalige baat die site Phytosed – Ech1 mag generen gegeven een kost van fytostabilisatie van €294 702, opdat fytostabilisatie rendabeler is dan conventionele sanering (duur fytostabilisatie: oneindig)	73
Figuur 14: Sensitiviteitsanalyse biomassa CS1 Freiberg	74
Figuur 15: Sensitiviteitsanalyse accumulatie CS1 Freiberg	74
Figuur 16: Sensitiviteitsanalyse monitorkosten CS1 Freiberg	75
Figuur 17: Sensitiviteitsanalyse transportkosten CS1 Freiberg	75
Figuur 18: Sensitiviteitsanalyse oogstkosten CS1 Freiberg.....	76
Figuur 19: Sensitiviteitsanalyse tijdsduur CS1 Freiberg (gelijke kosten normaal scenario)	76
Figuur 20: Normaal, optimistisch en pessimistisch scenario maximale eenmalige baat voor site CS 7 Freiberg	77
Figuur 21: Sensitiviteitsanalyse biomassa CS7 Freiberg	78
Figuur 22: Sensitiviteitsanalyse monitorkosten CS7 Freiberg	78
Figuur 23: Sensitiviteitsanalyse transportkosten.....	79
Figuur 24: Sensitiviteitsanalyse oogstkosten.....	79
Figuur 25: Normaal, optimistisch en pessimistisch scenario maximale eenmalige baat voor site Phytosed – Ech1	80

Figuur 26: Sensitiviteitsanalyse biomassa.....	80
Figuur 27: Sensitiviteitsanalyse monitorkosten.....	81
Figuur 28: Sensitiviteitsanalyse transportkosten.....	81
Figuur 29: Sensitiviteitsanalyse oogstkosten.....	82

1. Onderzoeksplan

Het eerste hoofdstuk van deze verhandeling bevat ten eerste een schets van het praktijkprobleem. Vervolgens zal er een centrale onderzoeksvraag gevormd worden, op basis van dit probleem. Deze centrale vraag zal vervolgens opgesplitst worden in vijf deelvragen, die later elk een hoofdstuk in dit werk zullen vormen.

1.1 Praktijkprobleem

De industriële revolutie kent haar start aan het begin van de 19^{de} eeuw, met een enorme hoeveelheid vooruitgang tot gevolg. 200 jaar later wijst onderzoek uit dat deze revolutie ook negatieve gevolgen heeft voortgebracht. Een toegenomen vervuilingsgraad is er hier zeker één van. In deze uiteenzetting zal er echter enkel aandacht besteed worden aan één welbepaalde soort vervuiling, namelijk: de wijdverspreide bodemvervuiling. Er zal een beeld geschetst worden van de situatie op vlak van bodemvervuiling in de Europese Unie enerzijds en Vlaanderen anderzijds.

1.1.1 De Europese Unie

In onderzoek stelt het European Environment Agency (EEA) (2003) dat 17% van alle gronden lijdt onder één of andere vorm van schade, zowel erosie als verontreiniging. De Europese Commissie (EC) (2002) stelt dat de zwaarst getroffen gebieden wat betreft bodemvervuiling zich bevinden rond industriegebieden, maar bij uitbreiding komt bodemvervuiling voor doorheen het hele continent. In een eerder rapport van het EEA (2000) wordt het aantal vervuilde gronden in de EU geschat op een cijfer dat tussen de 300 000 en de 1 500 000 ligt. Dit is weliswaar een groot interval, al lijkt de minimale schatting ook al een significant cijfer.

De EC en het EEA zijn er in later gezamenlijk onderzoek (2010) achter gekomen dat er in de EU reeds 500 000 vervuilde sites ontdekt zijn. De schatting die zij in dit stuk maken is evenwel dat het aantal sites waar vervuiling heeft plaatsgevonden zou kunnen oplopen tot 3 500 000. Uit dit onderzoek bleek ook dat het voornamelijk zou gaan om vervuiling bestaande uit zware metalen en uit minerale olie. Dit tweede onderzoek steunt dus de resultaten die uit eerdere onderzoeken naar voor werden geschoven.

Het eerder vernoemde verslag van de EEA (2000) geeft ook een schatting van het aantal potentieel vervuilde en de werkelijk vervuilde gronden per lidstaat van de EU (althans, lidstaten in 2000). Deze cijfers zijn terug te vinden in tabel 1. De x'en geven bovendien weer welke soorten gronden voor elke lidstaat opgenomen zijn: industriegebieden, zowel verlaten sites als operationele sites; stortplaatsen, zowel verlaten sites als operationele sites; en militaire sites.

De potentieel vervuilde sites uit tabel 1, die ook wel risicogronden genoemd worden, zijn sites waarop ooit een vervuilende activiteit werd uitgevoerd, of op dit moment uitgevoerd wordt. Zij worden ingedeeld in twee categorieën; geïdentificeerde potentieel vervuilde sites en geschatte aantal vervuilde sites. Het verschil tussen de twee is het aantal sites waarvan men nog geen inschatting heeft kunnen maken of zij potentieel vervuild zijn.

De effectief vervuilde sites bestaan eveneens uit twee categorieën. Een eerste categorie zijn wederom de geïdentificeerde vervuilde sites en de tweede categorie bestaan uit een schatting van het aantal vervuilde sites dat er zal zijn als men alle vervuilde gronden geïdentificeerd heeft.

De cijfers in tabel 1 geven geen perfect beeld weer omwille van het feit dat elk land grondvervuiling op zijn eigen manier definieert. Zo zou het ene land bijvoorbeeld een strengere norm toepassen wat betreft maximaal toelaatbare vervuilingsgraad. Zij zullen dan sneller 'vervuilde' gronden hebben.

Wat betreft de totale kost van deze saneringen haalt de EC (2002) cijfers aan die lopen van 59 tot 109 miljard EUR. D.i. het bedrag dat nodig is om alle geschatte vervuilde gronden in de EU te saneren.

Het probleem dat vervolgens ook rijst, indien men wel saneringen gaat uitvoeren, is dat deze saneringen de vervuiling vaak niet echt oplossen. Peuke en Rennenberg (2005) stellen in een rapport voor de European Molecular Biology Organization (EMBO) dat onderzoek van de Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) uitwijst dat slechts 30% van de vervuilde grond, die verwijderd wordt bij vervuilde sites, effectief gezuiverd wordt in afvalverwerkingsfabrieken. De rest wordt opgeslagen op landopslagplaatsen. Dit is als vanzelfsprekend geen oplossing voor het probleem, het stelt het probleem alleen uit naar de toekomst. Peuke en Renneberg (2005) concluderen dat er dringend nood is aan een goedkope methode om vervuilde sites definitief en effectief te zuiveren.

Tabel 1: Overzicht van 1) de soorten sites waarmee rekening werd gehouden bij het berekenen van het totaal aantal risicogronden en vervuilde gronden, 2) de risicogronden en 3) de vervuilde gronden per Europese staat

	(1)				Military sites	(2)		(3)	
	Industrial sites		Waste sites			Potentially contaminated	Contaminated sites		
	Abandoned	operating	Abandoned	Operating		identified	estimated total	identified	estimated total
Austria	x	x	x	x	x	28 000	~80 000	135	~1500
Belgium	x	x	x	x	x	7 728	14 000	8020	n.i. ¹
Denmark	x	x	x		x	37 000	~40 000	3673	~14 000
Finland	x	x	x	x	x	10 396	25 000	1200	n.i.
France	x	x	x	x	x	n.i.	700 000-800 000	896	n.i.
Germany	x	x	x		x	202 880	~240 000	n.i.	n.i.
Greece						n.i.	n.i.	n.i.	n.i.
Iceland			x			n.i.	300-400	2	n.i.
Ireland	x	x	x	x		n.i.	~2 000	n.i.	n.i.
Italy	x	x	x	x		8 873	n.i.	1251	n.i.
Luxemb.			x	x		616	n.i.	175	n.i.
Netherl.	x	x	x	x	x	n.i.	110 000-120 000	n.i.	n.i.
Norway	x	x	x	x	x	2 121	n.i.	n.i.	n.i.
Portugal						n.i.	n.i.	n.i.	n.i.
Spain	x	x	x	x		4 902	n.i.	370	n.i.
Sweden	x	x	x	x	x	7 000	n.i.	2000	n.i.
Switzerl.	x	x	x	x	x	35 000	50 000	~3500	n.i.
UK						n.i.	~100 000	n.i.	~10 000

Bron: European environment agency (2000)

¹ n.i.: no information

1.1.2 Vlaanderen

Het EEA (2000) legt het aantal geïdentificeerde risicogronden in Vlaanderen vast op 5 528 (tegenover 2 200 in Wallonië). Ze leggen het aantal totaal geschatte risicogronden, dit wil zeggen geïdentificeerde risicogronden en risicogronden die nog niet geïdentificeerd zijn, op 9 000 (tegenover 5 000 voor Wallonië). Ditzelfde onderzoek stelt ook dat er 7 870 (150 voor Wallonië) vervuilde gronden reeds geïdentificeerd zijn. Er wordt geen schatting gemaakt van het totale aantal gronden dat effectief vervuild is.

De VMM schat in het milieurapport Vlaanderen (2013), het aantal risicogronden in Vlaanderen op 85 000. Dit cijfer ligt veel hoger dan het cijfer dat eerder gegeven werd door het EEA. Het verschil zou verklaard kunnen worden door enerzijds een strenger beslissingscriterium toe te passen wat betreft risicogronde; meer sectoren zouden bijvoorbeeld opgenomen kunnen zijn als potentieel vervuilende sectoren, wat het aantal sites waar potentieel risicovolle activiteiten worden uitgevoerd automatisch verhoogt. Daarnaast kan er ook simpelweg een completer beeld gevormd zijn van het totaal aantal risicogronden, het VMM rapport is immers elf jaar later geschreven.

Het totale aantal gronden waarvoor een bodemsaneringsproject (BSP) nodig is, wordt door de VMM (2013) vastgelegd op 11 750. Men kan echter niet zomaar beslissen dat een BSP nodig is. Om tot deze beslissing te komen, dient men verschillende saneringsfasen te doorlopen, te beginnen met een oriënterend bodemonderzoek (OBO). De OVAM stelt dat een OBO bestaat uit staalafnames ter hoogte van de risicozones en niet risicozones, om op deze manier een beeld te krijgen van de gehele site. Indien er verontreiniging aanwezig is, dient men een beschrijvend bodemonderzoek (BBO) uit te voeren. In dit BBO brengt men de vervuiling op de site driedimensionaal in kaart en beslist men of een sanering noodzakelijk is. Indien dit zo is kan men uiteindelijk overgaan tot een BSP. Dit bodemsaneringsproject wordt door de OVAM gedefinieerd als zijnde het rapport waarin men vaststelt op welke manier de bodemsanering moet worden uitgevoerd, door een vergelijking te maken van de alternatieven, en welke nazorg vervolgens nodig is.

Deze 11 750 gronden waarvoor een BSP nodig is, zijn echter slechts een klein deel van de 85 000 risicogronden in Vlaanderen. De andere 73 250 gronden, waarvoor volgens de VMM geen BSP nodig is, zijn waarschijnlijk gronden waarop potentieel risicovolle activiteiten zijn uitgevoerd, maar waar men geen concentratie aan vervuiling heeft gevonden, of zal vinden, die hoger is dan de wettelijk vastgestelde norm.

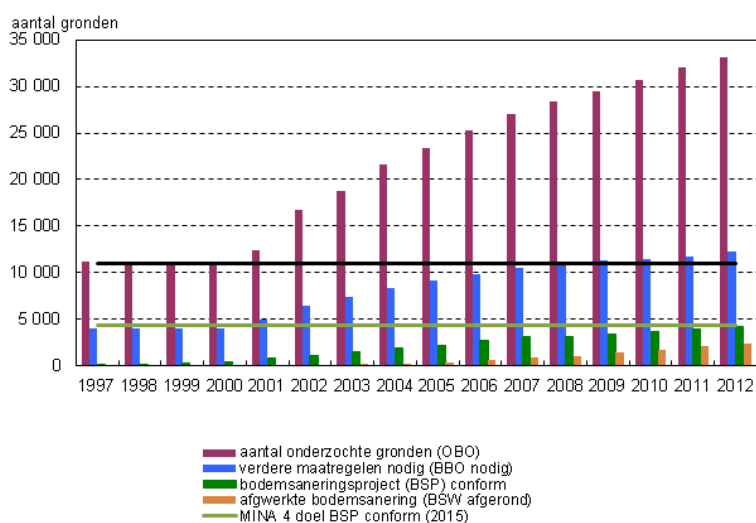
Het cijfer van de VMM (2013) lijkt het cijfer (7 870 vervuilde gronden) uit het eerdere onderzoek van de EEA (2000) te bevestigen. Het cijfer ligt hoger, wat er op zou kunnen duiden dat er op de elf jaar die verstreken zijn sinds het rapport van de EEA stelselmatig meer vervuilde gronden zijn ontdekt. Dit lijkt een logische evolutie doorheen de tijd.

De doelstelling die gesteld wordt in het milieubeleidsplan 4 van de Vlaamse Overheid (Vlaamse Overheid, 2011), dat loopt van 2011 tot 2015, is dat tegen 2015 op 40% van de 11 750 gronden waarvoor, volgens het VMM, een noodzaak tot sanering is, een bodemsaneringsproject gestart wordt. Tegen 2036 zou op 100% van deze gronden een BSP moeten gestart zijn. Uit cijfers van het milieurapport Vlaanderen (Vlaamse Milieu Maatschappij, 2013) blijkt dat men goed op weg is om

deze doelstelling in Vlaanderen te halen. In 2011 bedroeg het percentage sites waar reeds een sanering gestart werd 36%.

Toch zitten we nog niet in de ideale situatie. Uit cijfers van OVAM, gepubliceerd in het milieuraapport Vlaanderen (2013), blijkt dat de evolutie van het aantal gestarte bodemsaneringsprojecten is afgevlakt sinds 2007. Dit blijkt duidelijk uit figuur 1. Deze figuur geeft weer hoeveel projecten er zich in elke saneringsfase bevinden. Hier ziet men dat de categorie 'bodemsaneringsproject (BSP) conform' relatief snel groeit van 2000 tot 2007 maar dat ze vanaf dan eerder traag verder groeit. 'Bodemsaneringproject conform' houdt in dat de OVAM zijn goedkeuring heeft verleend om voor een bepaalde site een bepaalde saneringstechniek te gebruiken.

Figuur 1: Aantal gronden dat zich in een bepaalde saneringsfase bevindt



Bron: OVAM voor VMM (2013)

De VMM (2013) verklaart deze evolutie aan de hand van twee factoren. Ten eerste stellen zij dat de milieu-investeringen gedaald zijn sinds 2007, het jaar waarin de economische crisis begon. De uitgaven voor saneringen zijn immers erg groot en men zal minder geneigd zijn om ze uit te voeren in tijden van weinig economische vooruitgang. Ten tweede zou dit volgens de VMM ook veroorzaakt zijn door de keuze van de vorige legislatuur om prioriteit te geven aan saneringen bij de overdracht van de grond.

De hoge uitgaven die gepaard gaan met saneringen kunnen het best geïllustreerd worden aan de hand van concrete cijfers. Voor alle bodemsaneringsprojecten die OVAM in 2011 goedkeurde, bedroeg de totale geraamde kostprijs 134 miljoen euro. De totale kost voor de periode van 1997 tot 2010 kwam zelfs neer op een bedrag van 1,451 miljard euro (Vlaamse Milieu Maatschappij, 2013), een aanzienlijk bedrag. Daarnaast schat het EEA (2000) dat de totale kost om alle gronden te saneren waar een bodemsaneringsproject nodig is op 6,9 miljard voor Vlaanderen. Goedkopere saneringsmethodes zouden niet enkel deze kostprijs kunnen verlagen, maar ook kunnen bijdragen aan een groter aantal saneringsprojecten.

1.2 Onderzoeksvragen

1.2.1 Centrale onderzoeksvraag

Het eerder besproken praktijkprobleem leidt tot volgende centrale onderzoeksvraag

“Onder welke omstandigheden is fytoremediatie, waaronder we in deze masterproef enkel fytoextractie en fytostabilisatie verstaan, van metalen en metalloïden een te verkiezen methode om de bodem te saneren over de reeds bestaande, conventionele, bodemsaneringsmethodes, op basis van een kosten-effectiviteitsanalyse?”

1.2.2 Deelvragen

De centrale onderzoeksvraag wordt opgedeeld in enkele deelvragen:

1. Wat is fytoremediatie?

De eerste deelvraag dient als inleidend hoofdstuk. Er wordt ten eerste een definitie gegeven van fytoremediatie. Vervolgens zullen de verschillende ondersoorten van fytoremediatie besproken worden. Merk wel op dat hier kort alle ondersoorten van fytoremediatie worden aangehaald, maar dat er in de rest van het werk enkel sprake zal zijn van fytoextractie en fytostabilisatie. Hierna zal kort bekeken worden op welke basis fytoremediatie in het verleden reeds werd toegepast als saneringsalternatief. Daarna zullen de voordelen van bodemsanering met fytoremediatie besproken worden, om vervolgens te eindigen met de nadelen en beperkingen van de techniek.

2. Wat zijn de kosten van fytoremediatie?

In dit hoofdstuk wordt een algemeen kostenmodel voorgesteld, waarin alle mogelijke kosten van een fytoremediatieproject zijn vervat. Om een beeld te scheppen van alle mogelijke kosten wordt er gestart vanuit een bestaande case waarvoor reeds een kosten-overzicht werd gemaakt.

De site in kwestie is een voormalig militair domein gelegen te Brustem (deelgemeente van Sint-Truiden, Limburg) waar men een conventionele sanering heeft toegepast om minerale olie te verwijderen uit de bodem. In een studie is Compennolle (2012) vervolgens nagegaan wat het gekost zou hebben om deze site te reinigen met fytoremediatie.

Vervolgens zullen er enkele partners van het GREENLAND project worden gevraagd om dit kostenmodel in te vullen. Het GREENLAND project is een Europees project waarbij verschillende universiteiten betrokken zijn en waarbinnen men onderzoek verricht naar fytoremediatie. Het gaat hier dus om buitenlandse sites, aangezien de toepassing van fytoremediatie in België te beperkt is.

Nadat het algemeen kostenmodel is voorgesteld en de gegevens verzameld zijn, kan er gekeken worden hoeveel de kosten van een fytoremediatieproject zijn. Tijdens het analyseren van de kosten zal er extra aandacht besteed worden aan de voorafgaande onderzoekskosten van een fytoremediatieproject, de monitorkosten en de kosten die samengaan met het afzetten van biomassa. De extra aandacht voor deze kosten komt er na opmerkingen van de partners van het GREENLAND project. Zij gaven deze kosten aan als zijnde belangrijk voor fytoremediatie.

3. Wat is de invloed van de potentieel langere tijdsspanne van fyto-remediatie in vergelijking met conventionele saneringsmethodes?

Algemeen gesteld is de tijdsspanne van fyto-remediatie van metalen en metalloïden langer dan de tijdsspanne van de meeste conventionele saneringstechnieken. Het is dan ook belangrijk om de tijdsduur van het project en de bestemming van het te saneren terrein te betrekken bij het kiezen van een saneringstechniek.

Heel specifiek wordt nagegaan wat de jaarlijkse opbrengst, respectievelijke de eenmalige opbrengst die een site kan genereren minimaal moet zijn, opdat men eerder voor een conventionele sanering kiest, dan wel voor fyto-remediatie, rekening houdende met de langere tijdsduur van fyto-remediatie.

Dit model kan toegepast worden op zowel fyto-extractie als fyto-stabilisatie. Voor fyto-stabilisatie wordt de levensduur van het fyto-remediatieproject geacht oneindig te zijn.

Zodra dit model is afgewerkt, zal het worden toegepast op de cases waarvan in de vorige deelvraag de kosten werden besproken. Eerst zal een basisscenario worden uitgewerkt. Hiervoor worden de gegevens gebruikt die ook reeds aan bod kwamen in het vorige hoofdstuk. Na dit basisscenario zullen er sensitiviteitsanalyses worden toegepast op een aantal belangrijke factoren, zoals de biomassa opbrengst, de metaalextractie, de transportkosten van biomassa, de tijdsduur van het project en de monitorkosten.

4. Welke externe kosten en baten zijn van belang bij de keuze tussen fyto-remediatie of een andere saneringsmethode?

Dit hoofdstuk tracht verder te gaan dan louter een financieel beslissingscriterium toe te passen. Er wordt gekeken wat nog andere factoren zijn die een rol spelen bij de beslissing om fyto-remediatie of een andere sanering toe te passen, hoe men deze een score kan geven, en wat het gewicht is van deze factoren. Dit gebeurt aan de hand van een multicriteria-analyse van de OVAM, waarin rekening wordt gehouden met het BATNEEC principe (Best Available Technology Not Entailing Excessive Costs). Welke deze verschillende factoren zijn wordt uitgebreid besproken in het hoofdstuk zelf.

Nadat de multicriteria-analyse volgens OVAM besproken is, zullen kort de factoren worden aangehaald die spelen bij de keuze van een saneringstechniek volgens SURF-UK. Dit is een Europees consortium dat zijn factoren vooral vanuit duurzaamheidsoogpunt heeft vastgelegd.

5. Conclusie en aanbevelingen

In het laatste hoofdstuk van de verhandeling wordt een algemene conclusie geschreven. Op basis van deze conclusie worden er enkele aanbevelingen gedaan waar men rekening mee moet houden bij de uitwerking van een saneringsproject. Ten slotte worden er nog aanbevelingen voor verder onderzoek geformuleerd.

2. Fytoremediatie

2.1 Inleiding

Witters et al. (2012) definiëren fytoextractie als zijnde “het in-situ gebruik maken van planten en hun geassocieerde micro-organismen om verontreinigde bodem en grondwater te saneren of te stabiliseren.” De techniek kan gebruikt worden om zware metalen, minerale oliën en andere soorten vervuiling op te nemen of te stabiliseren. Indien zij opgenomen worden kunnen zij ofwel omgezet worden in niet schadelijke stoffen, ofwel opgeslagen worden in de oogstbare delen van de plant.

2.2 Soorten

Fytoextractie kan onderverdeeld worden in verschillende ondersoorten, namelijk: fytoextractie, fytostabilisatie, fytodegradatie, rhizodegradatie, rhizofiltratie en rhizovolatilatie (Aspen Law & Business, 2000; Vangronsveld et al., 2009). Om een compleet overzicht van alle mogelijke ondersoorten te geven wordt hieronder elke soort apart besproken. De latere hoofdstukken in deze verhandeling zullen echter enkel handelen over fytoextractie en fytostabilisatie.

Fytoextractie

Fytoextractie, ook wel fytoaccumulatie genaamd, wordt door Salt et al. (1998) beschreven als zijnde het proces waarbij planten schadelijke stoffen, zoals zware metalen en minerale oliën, opnemen en vervolgens opslaan in hun oogstbare delen. Planten die geschikt zijn voor extractie moeten beschikken over de volgende vier eigenschappen (Vangronsveld et al., 2009): 1) tolerantie tegen de schadelijke stoffen, 2) de planten moeten snel kunnen groeien en er moet effectieve accumulatie van de schadelijke stoffen in de biomassa plaatsvinden, 3) de accumulatie van vervuiling vindt plaats in delen die zich boven de grond bevinden, en 4) de delen waarin de accumulatie zich bevindt, zijn makkelijk te oogsten.

Dit accumulatieproces kan op drie manieren plaatsvinden (Vangronsveld et al., 2009): 1) natuurlijke fytoextractie door gebruik te maken van hyperaccumulatoren. Dit zijn planten die heel snel veel vervuiling opnemen in slechts een kleine hoeveelheid biomassa; 2) natuurlijke fytoextractie gebruik makende van hoge biomassa-producerende niet-hyperaccumulatoren. Hier gebeurt het tegenovergestelde van bij de eerste soort. Men neemt relatief weinig vervuiling op in een grote hoeveelheid biomassa; en 3) chemisch geassisteerde fytoextractie, waarbij men niet-hyperaccumulatoren gebruikt, maar door toevoeging van chemische stoffen het extractieproces toch probeert te versnellen. Het enige type waarvan later in deze verhandeling sprake zal zijn, is type twee.

Men zou kunnen stellen dat men de vervuilende stoffen enkel uit de grond haalt en dat ze vervolgens nog steeds in bijvoorbeeld de assen blijven zitten indien deze verbrand worden. Dit klopt, maar het volume van de assen zou 10% zijn van het volume dat men zou bekomen indien men dezelfde grond had afgegraven (Aspen Law & Business, 2000).

Fytostabilisatie

Fytostabilisatie beoogt de huidige vervuilingshoeveelheid te behouden (Vangronsveld et al., 2009). De vervuiling wordt als het ware gedeactiveerd, wat er voor zorgt dat vervuiling zich niet verder horizontaal en verticaal kan verspreiden. Het kan er ook toe leiden dat vervuiling zich vastzet rond de wortels van de plant, wat er voor zorgt dat de vervuiling zich niet kan verspreiden naar het bodemwater (Aspen Law & Business, 2000).

Fytodegradatie en rhizodegradatie

Deze twee vormen van fyto-remediatie richten zich op het omzetten van schadelijke stoffen, meestal organische stoffen, in niet schadelijke stoffen. Fytodegradatie houdt in dat dit proces plaatsvindt in de plant, zij zet de stoffen dan om in niet schadelijke stoffen en neemt ze op om verder te groeien. Rhizodegradatie vindt plaats rond de wortels van de plant, waar bepaalde bacteriën, die eigen zijn aan de plant, er voor zorgen dat vervuiling wordt afgebroken (Aspen Law & Business, 2000; Vangronsveld et al., 2009).

Rhizofiltratie

Bij deze vorm van fyto-remediatie worden schadelijke stoffen door de wortels van de plant uit grondwater gehaald. Deze vorm lijkt veel op fyto-extractie, maar met als belangrijkste onderscheid dat zij zich er op richt om grondwater te zuiveren (Aspen Law & Business, 2000).

Rhizovolatilisatie

Rhizovolatilisatie houdt in dat planten de vervuiling opnemen en dat ze deze stof vervolgens loslaten in de atmosfeer, eventueel in omgezette vorm (Aspen Law & Business, 2000).

2.3 Toepassing van fyto-remediatie als saneringsalternatief in Vlaanderen en de EU

Uit onderzoek van Vangronsveld et al. (2012) blijkt dat in België tot nog toe fyto-remediatie vijf keer werd toegepast. Een opsomming van de verschillende sites is terug te vinden in tabel 2.

Tabel 2: Sites waar fyto-remediatie getest werd als saneringsalternatief

Locatie	Medium	Vervuiling
Ford	grondwater	BTEX
Harelbeke	grondwater	Ni
Umicore	bodem	Cd
Zeebrugge	grondwater	Minerale olie, benzeen, naphthaleen, fluorantheen, cyanide
Brustem	grondwater	Minerale olie

Bron: Vangronsveld et al. (2012)

In de voorgaande tabel valt op dat de toepassing van fyto-remediatie eerder beperkt is in België. Hetzelfde geldt voor de EU, waar fyto-remediatie eerder gericht is op onderzoek. Dit staat in contrast met de Verenigde Staten, waar de toepassing van fyto-remediatie eerder gericht is op toepassingen en ervaring opdoen (Vangronsveld et al., 2012). Om een verklaring te vinden voor een verschil tussen de EU en de VS is verder onderzoek nodig. Dit is echter niet de focus van deze verhandeling, er zal als vanzelfsprekend dus niet verder op worden ingegaan.

2.4 Voordelen

De kostprijs

Eerder onderzoek (Schnoor, 1997; Raskin & Ensley, zoals geciteerd in Witters, 2011) merkte reeds op dat fyto-remediatie erg kosteneffectief is in vergelijking met conventionele saneringsmethodes.

Tabel 3 geeft een overzicht van de kosten van de meest frequente conventionele saneringsmethodes. Onder frequente saneringsmethodes worden de technieken verstaan die sinds de start van de BSP's meer dan 5 keer werden toegepast in Vlaanderen. Een overzicht van alle gebruikte saneringstechnieken tot en met 2010, samen met een uitgebreide bespreking bespreken van de conventionele technieken en hun kosten, is terug te vinden in bijlage 1.

Later in deze thesis zal voor enkele cases worden nagegaan hoeveel de kosten van een fyto-remediatieproject bedragen.

Tabel 3: Overzicht van de kosten¹ van de bodemsaneringsmethodes die het vaakst werden toegepast in Vlaanderen in de periode t.e.m. 2010.

In situ sanering	Bodemluchtextractie	€750-1 500 exploitatiekosten, €50-100 per meter filter en €15-200 per meter drain
	Persluchtinjectie	€750-1500 per maand en €50-100 per meter filter
	Chemische oxidatie	Amerikaanse bron: \$40-240 per m ³ Nederlandse bron: €40-50 per m ³
	Bioventing	Kleine sites: \$900-100 per m ³ Grote sites: \$79-109 per m ³
	Biosparging	€12,5 tot €25
	Natuurlijke attenuatie	Geen tastbare kosten buiten monitoring
Ex situ sanering	Ongraven	€2,5-10 per m ³
	Transporteren	Zie tabel 22 voor uitgebreid overzicht
	Fysicochemische reiniging	Off-site reiniging: €30-70 On site reiniging: €30-50 + €25 000 kosten mobilisatie machine
	Biologische reiniging	€30-55 per m ³ Kan oplopen tot €100-150 per m ³ indien verbindingen moeilijk afbreekbaar zijn
	Thermische reiniging	Off-site reiniging: €65-80 On site reiniging: €40-60 + €25 000 kosten mobilisatie machine
Overige opties	Isolatie	Civieltechnische isolatie: €40-75 per m ² Kunststofmembraan: €5-15 per m ² Leeflaagconstructie: €12 per m ³
	Stabilisatie	€90 per ton
	Storting	Kunnen oplopen tot €100 per ton

¹Bronnen komen uit meerdere landen, voor meer informatie, zie bijlage 1.

Milieuvriendelijkheid

Fytoremediatie blijkt ook een milieuvriendelijkere methode te zijn dan conventionele saneringsmethodes. Dit uit zich op verschillende vlakken. Ten eerste is de methode simpelweg minder ingrijpend voor de bodem dan een conventionele variant zoals ontgraving. Planten bieden immers een niet-invasieve, zelfvoorzienende, methode om vervuiling op te ruimen. Ten tweede is het minder ingrijpend voor de omgeving, wat concreet inhoudt dat de directe omgeving van de site die gesaneerd wordt amper beïnvloed wordt door de sanering zelf. Vervolgens moet er ook minder vervuiling naar verwerkingssites gebracht worden. Ten slotte is het ook nog esthetisch gezien zeer aangenaam, wat er voor zal zorgen dat de acceptatie bij het grote publiek groter is (Paz Alberto & Sigua, 2012; United Nations, z.d.).

Energie uit biomassa & terugwinning van vervuilende stoffen

De laatste twee belangrijke voordelen ontstaan uit de output die fyto-remediatie creëert. Zo kunnen de planten die geoogst worden gebruikt worden om te verwerken in biomassa centrales, op deze manier ontstaat er energie en ontstaat er een extra opbrengst voor de eigenaars van het terrein waarop men fyto-remediatie toepast. Daarnaast kunnen ook de schadelijke stoffen die opgenomen zijn door de planten opnieuw gebruikt worden. Zij kunnen verzameld worden uit de assen van de verbrande planten, al geldt dit wel enkel voor fyto-extractie (Paz Alberto & Sigua, 2012; United Nations, z.d.). Dit zou bijvoorbeeld van toepassing kunnen zijn voor kostbare zware metalen.

2.5 Nadelen en beperkingen

Tijdsduur

De duur van het fyto-remediatieproject is vaak vele malen langer dan een mechanische saneringsmethode zoals ontgraving. Dit kan gestaafd worden op basis van concrete cijfers uit het onderzoek van Schnoor (1997). Voor een specifiek geval blijkt fyto-remediatie een tijdsduur van anderhalf tot vijf jaar te hebben, tegenover een tijdsduur van zes tot twaalf maanden voor conventionele saneringsvarianten. Paz-Alberto en Sigua (2012) en Cunningham et al. (1995) halen deze tijdsduur ook aan als een van de belangrijkste nadelen.

Mogelijke gevaren voor fauna en flora

Paz Alberto en Sigua (2012) maken sprake van mogelijke gevaren voor fauna en flora. Zij stellen dat het gevaarlijk kan zijn om niet-inheemse planten te introduceren. Deze kunnen dan de inheemse ecosystemen schaden. Bij fyto-remediatie wordt er echter op gelet om inheemse soorten te gebruiken. Deze soorten kunnen dan genetisch worden aangepast, wat welsiwaar op kritiek stuit. Vanheusden et al. (2011) halen Europese wetgeving aan die stelt dat genetisch gemodificeerde organismen (GGO's) enkel geïntroduceerd mogen worden als zij veilig zijn. Om na te gaan of de plant een impact heeft op het leefmilieu, zal men deze plant aan testen onderwerpen. Wetgeving omtrent de GGO's vermeldt ook dat men verplicht is om het bevoegde ministerie van het land te verwittigen dat men deze planten wil gebruiken. Samen met deze verwittiging moet men een technisch dossier en een risk assessment indienen. Deze wetgeving in het oog houdende, zouden de problemen ten gevolge van GGO's miniem moeten blijven.

Er bestaan volgens Paz-Alberto en Sigua (2012) wel gevaren voor de plaatselijke fauna. Dieren zouden zich kunnen voeden met de planten die gebruikt worden voor fyto-remediatie, waardoor zij zware metalen binnenkrijgen.

Technische beperkingen

Een eerste technische beperking is het klimaat (Aspen Law & Business, 2000; Vangronsveld, Witters, & Weyens, 2011). Deze moet de plantensoort ondersteunen. Daarnaast mag tijd, zoals eerder besproken, en ruimte geen beperking zijn. Vervolgens mag de vervuiling zich ook niet te diep bevinden. De plant zal dan niet in staat zijn om de vervuiling te bereiken. De vervuiling mag ook niet fyto-toxisch zijn. Indien dit wel zo is kan men toch nagaan of de plant in staat is om de hot

spots, waar de vervuiling het ergst is, te verwijderen, indien dit niet zo is, is fyto-remediatie niet mogelijk.

Een volgende beperking kan zijn dat men niet in staat is om te voorkomen dat er een transfer plaatsvindt van de vervuiling van de plant naar mens of dier. Ook te veel evapotranspiratie kan een beperking zijn als men dit op geen enkele manier kan voorkomen. Evapotranspiratie is het fenomeen waarbij de plant vervuiling in de atmosfeer uitstoot, in de cases die in deze thesis aan bod komen gaat het echter enkel over metalen en metalloïden, waardoor deze evapotranspiratie hier niet van toepassing is.

De eindconcentratie moet ook geïmmobiliseerd worden door de planten. Indien dit niet het geval is, is fyto-remediatie tevens geen optie. De laatste beperkende factor is de economische waarde van de biomassa. Indien men dient te betalen voor de afzet van biomassa, kan fyto-remediatie geen optie zijn.

3. De kosten van fytoremediatie

3.1 Inleiding

In deze eerste deelvraag wordt getracht om een algemeen model op te bouwen dat alle (private) kosten en baten van fytoremediatie opneemt. Dit zal stapsgewijs gebeuren aan de hand van enkele inputtabellen, waarmee vervolgens berekeningen kunnen gemaakt worden die leiden tot een gedetailleerd kostenoverzicht en een totale netto contante waarde van het desbetreffende project.

Vervolgens zullen ook de eerste resultaten bekeken worden. Er zal nagegaan worden of fytoremediatie kosteneffectiever is dan conventionele saneringsmethodes, alsook welke de belangrijkste kosten zijn.

3.2 Opbouw kostenmodel

3.2.1 Fysieke data

Binnen het deel fysieke data worden enkele inleidende zaken besproken, namelijk: informatie over de site, informatie over de vervuiling en informatie over de gebruikte planten.

Tabel 4 geeft een eerste reeks inputs aan.

Tabel 4: Algemene informatie site

Naam site	
Land	
Bestemmingstype van de grond	
Coördinaten site	
Afstand tot leverancier gewassen	
Afstand tot biomassa centrale	
Grootte van de site	m ²
	ha
Diepte van vervuiling	m
Dichtheid van de grond	Ton/m ³
Total gewicht bodem per ha	ton
Discontovoet	

Het *bestemmingstype van de grond* heeft betrekking op de bestemming van de grond, zoals bijvoorbeeld industriegrond.

Bij de *diepte* kunnen we opmerken dat dit de maximale diepte is tot waar de vervuiling zich bevindt, of gedetecteerd kan worden. Het *totaal gewicht bodem per ha* wordt berekend door volgende formule; *diepte van de vervuiling* x 100 x 100 x *dichtheid van de grond*.

De inputs in tabel 5 handelen over algemene vervuilinginformatie.

Tabel 5: Algemene informatie vervuiling

Stabilisatie of extractie?	
Type metaal	
Concentratie in grond	
Concentratie in vloeistof	
Start:	
Startconcentratie	mg/kg
Vervuiling in grond	kg/ha
Einde	
Eindconcentratie	mg/kg
Vervuiling in grond	kg/ha
Te verwijderen vervuiling	kg/ha

Men dient ten eerste aan te duiden of men aan fytoextractie of fytostabilisatie doet. De benodigde inputs verschillen naargelang deze keuze.

Men dient aan te geven of de vervuiling plaatsvindt in de bodem of in oplossing. De *totale vervuiling in de grond* (in kg/ha) wordt dan berekend op basis van de startconcentratie (in mg/kg) als volgt:

$$(\text{totaal gewicht per hectare (uit tabel 4)} \times \text{startconcentratie} \times 1.000) / 1.000.000.$$

De *eindconcentratie* is de wettelijke voorgeschreven concentratie voor het bepaald type grond en de totale vervuiling in de grond op het einde van het project wordt op eenzelfde manier berekend als de totale vervuiling aan de start van het project. Indien er sprake is van een stabilisatieproject, wordt deze eindconcentratie niet opgenomen als input. Men dient dan simpelweg aan te geven gedurende welke periode men wenst te stabiliseren

De *te verwijderen vervuiling* (in kg/ha) is vervolgens de hoeveelheid per hectare die gesaneerd moet worden tijdens het project, berekend door volgende formule:

$$\text{Gewenste vervuiling in de grond aan het einde van het project} - \text{vervuiling in de grond bij de start van het project}$$

Deze formule is als vanzelfsprekend tevens niet van toepassing bij fytostabilisatie.

In tabel 6 komen de inputs terug die betrekking hebben op algemene informatie omtrent de planten die gebruikt worden bij het saneringsproces.

Tabel 6: Algemene informatie gewassen

Gebruikte gewassen	
Rotatiesnelheid van de gewassen	
Gezuiverde grond per plant	m ² /plant
	ha/plant
Biomassa opbrengst	
Plantendeel n	kg DM/ha
% van totale biomassa van de plant	
Extractie in mg/kg DM per oogst per deel (extractie in mg/kg DM per jaar per deel)	
Plantendeel n	mg/kg DM

De *rotatiesnelheid* geeft weer om de hoeveel jaar er geoogst wordt. Indien er tijdens de duur van het project niet geoogst wordt, zoals bijvoorbeeld in het geval van korte-omloop hout, zal dit hier worden weergegeven met een 0.

De *biomassa opbrengst per jaar per hectare aan biomassa* (in kg/ha) laat toe de biomassaopbrengst in euro van het project te berekenen, voor bijvoorbeeld de verkoop. De opbrengst laat tevens toe te berekenen hoeveel de accumulatie per plantendeel per jaar per hectare is. Voorts is hier ook de mogelijkheid om elk plantendeel apart te definiëren en aan te geven wat het relatieve aandeel van dat deel is in de totale biomassa.

De *gezuiverde grond per plant* is de inverse van de plantdichtheid.

Extractie in mg/kg DM per oogst per plantendeel of *extractie in mg/kg DM per jaar per plantendeel* geeft weer hoeveel vervuiling er verwijderd wordt gedurende een oogst per hectare, of gedurende een jaar per hectare als er niet geoogst wordt.

3.2.2 Kosten van project

Vervolgens kan er een algemeen kostenmodel worden opgebouwd. Tabel 7 geeft weer welke kosten van toepassing zijn bij fyto-remediatie. We maken een onderscheid tussen jaar 0 en jaar 1 tot n. In jaar 0 zullen er geen kosten en opbrengsten van biomassa zijn, terwijl er in jaar 1 tot n geen voorbereidende kosten zijn. Elke kostencategorie zal hierna besproken worden.

Tabel 7: Verschillende kostencategorieën van een fytoremediatieproject

	Jaar 0	Jaar 1 tot n
Kosten voorbereidingsfase		N.V.T
<u>Licenties, vergunningen, andere formaliteiten</u>		
<u>Vorbereiding site</u>		
Ontbossen		
Egaliseren		
Asfalt verwijderen		
Kosten aanplanten gewassen		
Kosten van gewassen		
Transportkosten		
Onderhoudskosten planten		
Variabele kosten		
Vaste kosten		
Onderhoudskosten terrein		
Variabele kosten		
Vaste kosten		
Biomassa, kosten en opbrengsten	N.V.T	
Oogstkosten		
Opbrengsten biomassa (-)		
Monitorkosten		
Andere kosten		
<hr/>		
Totale kost van het jaar		
Verdisconteerde kost van het jaar		

Kosten voorbereidingsfase

Een eerste categorie kosten, zijn verbonden met de aanvang van het project. Er is ten eerste een *kost verbonden aan vergunningen*, zoals bijvoorbeeld de kostprijs van het aanvragen van een kapvergunning. Ten tweede dient men aan te geven wat er met het terrein zelf dient te gebeuren en op hoeveel m² dit dient te gebeuren, zoals bijvoorbeeld *ontbossen, egaliseren en het verwijderen van asfalt*. Als tevens de *prijs* per m² van deze handelingen gekend is, kan men de totale kostprijs berekenen.

Er kunnen tevens labokosten van toepassing zijn. Vooraleer men kan overgaan tot de sanering met fytoremediatie, dient men regelmatig een aantal voorafgaande labokosten te maken.

Deze labo-onderzoeken, waarbij de labokosten ontstaan, bestaan uit verschillende stappen. In de eerste plaats moeten er kosten worden opgenomen om de site te bezoeken. Men zal hier een staalname uitvoeren om een idee te krijgen van de bodem en het soort vervuiling. Deze staalname moet op voorhand ook voorbereid worden.

Men kan er voor kiezen om niet enkel gewassen te zetten, maar ook nog extra bacteriën toe te voegen. Deze bacteriën zorgen dan voor een snellere degradatie van de vervuiling en een betere groei van de plant. Indien men ervoor kiest om dit te doen, bestaat de volgende, en tevens langste, stap uit het ontwikkelen van bacteriën om samen met de planten te gebruiken op de site. Gelijklopend met deze stap kunnen ook reeds de nodige gewassen geplant worden op de site. Zodra beide stappen voltooid zijn, kan men overgaan tot het klaarmaken van een inoculum op basis van eerder ontwikkelde bacteriën voor de site, om dit vervolgens te inoculeren in de plant. Men dient dan ten slotte enkel nog op te volgen in welke mate de plant de vervuiling opneemt.

Kosten aanplanten gewassen

Vervolgens zijn er de kosten van de gewassen. Deze worden weergegeven in tabel 8.

Tabel 8: Inputs nodig voor berekening kosten van gewassen en transportkosten

Prijs per plant	€/plant			
Prijs van zaden	€/ha			
Plant dichtheid	planten/ha			
Prijs per plant indien zelf gezaaid	€/plant			
Transportkosten per plant	€/plant			
	Jaar 1	Jaar 2	...	Jaar n
Nieuwe gewassen bij planten				

Men dient verschillende inputs weer te geven. Ten eerste hebben we de *prijs van de planten zelf*. Indien de planten worden aangekocht en vervolgens geplant, zoals bijvoorbeeld zeer jonge bomen, dient men deze prijs aan te geven onder *prijs per plant*. Als men zelf de gewassen zaait, dient de *prijs van zaden per hectare* aangegeven te worden, samen met *het aantal planten dat hieruit groeit per hectare*. Zo wordt automatisch de prijs per plant berekend.

De *transportkosten van planten* dienen enkel te worden ingevuld indien deze niet reeds in de prijs vervat zitten. Ten slotte is er nog de mogelijkheid om weer te geven of er al dan niet *nieuwe gewassen worden bij geplant of vervangen*, omdat bijvoorbeeld een deel van de oudere gewassen afsterft of omdat men zich in een oogstjaar bevindt. Men dient dit aan te geven in een percentage van de oorspronkelijke hoeveelheid die geplant werd. Concreet wil dit ook zeggen dat als er geoogst wordt in een bepaald jaar en men opnieuw gewassen aanplant, dit percentage 100% moet zijn.

Deze inputs kunnen vervolgens gebruikt worden om de kosten van gewassen te berekenen. Dit gebeurt als volgt:

We berekenen eerst het aantal planten dat in het eerste jaar geplant wordt aan de hand van volgende formule:

$$\text{De grootte van het terrein (uit tabel 4) / gezuiverde grond per plant (uit tabel 6)}$$

Vervolgens kunnen we op basis van deze uitkomst de totale kost in jaar 0 hieraan verbonden berekenen met volgende formule:

$$\text{Aantal planten dat in het eerste jaar geplant wordt} \times \text{prijs per plant indien men planten koopt OF prijs van planten indien men zelf zaait}$$

Voor de volgende jaren gaat er een soortgelijke berekening op.

$$\text{Aantal planten dat er in het eerste jaar geplant wordt} \times \% \text{ nieuwe gewassen dat men moet bij planten} \times \text{prijs per plant indien men planten koopt OF prijs van planten indien men zelf zaait}$$

De transportkosten in tabel 7 worden berekend door soortgelijke formules als de kosten van gewassen. De *prijs per plant indien men planten koopt OF prijs van planten indien men zelf zaait* wordt dan in beide voorgaande formules vervanger door de *transportkosten per plant*.

Onderhoudskosten planten en onderhoudskosten terrein

In deze categorie, die weergegeven wordt in tabel 9, staan alle kosten die te maken hebben met onderhoud van zowel planten, als terrein.

Tabel 9: Inputs nodig voor berekening onderhoudskosten planten en terrein

	Jaar 1	Jaar 2	...	Jaar n
Kosten van plant				
Variabele kosten (in €/plant)				
Definieer variabele kost n				
Vaste kosten (in €/jaar)				
Definieer vaste kost n				
Kosten van terrein				
Variabele kosten (in €/m²)				
Definieer variabele kost n				
Vaste kosten (in €/jaar)				
Definieer vaste kost n				

Er wordt een onderscheid gemaakt tussen variabele en vaste kosten. Elke kost moet specifiek gedefinieerd worden door degene die het model invult, omwille van de talloze soorten kosten die hier mogelijk zijn.

De *variabele onderhoudskosten van planten*, respectievelijk *het terrein*, worden op de volgende manier berekend:

Het aantal variabele kosten dat gedefinieerd werd in een bepaald jaar (uit tabel 9) wordt gesommeerd en vervolgens vermenigvuldigd met het aantal planten (respectievelijk de grootte van het terrein)

De vaste kosten worden gesommeerd en overgenomen in tabel 7.

Biomassa, kosten en opbrengsten

Oogstkosten

Vooraleer er overgegaan kan worden tot de berekening van de oogstkosten, moet eerst de duur van het project berekend worden. Om deze te kunnen berekenen, dienen eerst twee tussenberekeningen uitgevoerd te worden: de totale biomassa per oogst per hectare (of de totale biomassa per jaar per hectare indien er niet geoogst wordt) en de totale accumulatie per oogst per hectare (of de totale accumulatie per jaar per hectare indien er niet geoogst wordt). Tabel 10 geeft dit weer.

De *biomassa opbrengst oogst per hectare* (of per jaar per hectare) wordt overgenomen uit tabel 6. Vervolgens wordt ook het relatieve aandeel van elk plantendeel ten opzichte van het totaal in rekening gebracht. Op deze manier wordt vervolgens de *totale biomassa per plantendeel* berekend.

Tabel 10: Tussenberekening biomassaproductie en totale accumulatie

Biomassa opbrengst	kg DM/ha
Deel n van de plant	
% van totale biomassa	
Biomassa van deel	kg DM/ha
Totale accumulatie per oogst per hectare of totale accumulatie per jaar per hectare	
Plantendeel n	mg/ha
	kg/ha
Totale accumulatie per oogst per hectare	mg/ha
of totale accumulatie per jaar per hectare	kg/ha

Nadat de *biomassa opbrengst per plantendeel* berekend is, kan de *accumulatie van vervuiling in elk plantendeel* achterhaald worden. In tabel 6 van het deel rond fysieke data moest reeds aangegeven worden hoeveel mg/kg DM elk plantendeel kon opnemen. Indien dit cijfer

vermenigvuldigd wordt met het aantal kg DM/ha uit tabel 10 komen we bij een product uit dat weergeeft hoeveel mg vervuiling er per hectare wordt opgenomen in één oogst (of in 1 jaar, indien er niet geoogst wordt tijdens de duur van het project). Deze berekening gebeurt per plantendeel. Vervolgens kan deze totale accumulatie gebruikt worden om de duur van het saneringsproject te berekenen.

Bij de berekening van de *totale duur* van het project moet rekening gehouden worden met twee scenario's. Enerzijds het normale scenario, waarin er op regelmatig tijdstippen geoogst wordt en anderzijds het scenario waarin er geen oogst plaatsvindt gedurende de hele duur van het project.

Indien er niet geoogst wordt tijdens het project, gebeurt de berekening als volgt;

Te verwijderen vervuiling (uit tabel 5)/*totale accumulatie per jaar per hectare*, in kg/ha (uit tabel 10)

Indien er wel geoogst wordt tijdens het project, geldt de volgende berekening;

Te verwijderen vervuiling/totale accumulatie per oogst per hectare x rotatiesnelheid van de gewassen (uit tabel 6)

De duur wordt steeds tot op één eenheid naar boven afgerond. Het voorgeschreven minimum moet immers zeker bereikt worden.

De *totale duur* van het project is nu bekend, maar er moet nog nagegaan worden dat er enkel oogstkosten opgenomen worden in de jaren dat er geoogst wordt. In elk jaar wordt er door een formule gecontroleerd of het jaar in kwestie nog niet jaar één ná het einde van het project bereikt heeft, er kan in dit jaar immers onmogelijk nog een oogst zijn. Vervolgens wordt er gecontroleerd of het jaar in kwestie deelbaar is door de rotatiesnelheid van de gewassen uit tabel 6. Indien dit het geval is zal er een oogst zijn tijdens het jaar, in het andere geval niet.

Nu deze twee zaken berekend werden, kunnen de oogstkosten berekend worden. Tabel 11 geeft de benodigde inputs weer.

Tabel 11: Inputs nodig voor berekening oogstkosten

Jaren per rotatie	
Aantal rotaties tijdens duur project	
Oogstkosten	
Welke type oogstmethode wordt gebruikt?	
Kosten verbonden aan oogstmachine	
Huur machine	€/oogst
Brandstofkost	€/l
Brandstofverbruik	Liters verbruikt tijdens oogst
Loon arbeiders	€/uur
Werkuren	Uren betaald tijdens oogst
Extra kosten van een verhakselaar (enkel KOH)	€
Hoelang worden de kosten gedroogd na de oogst?	dagen
Transport biomassa	Ja/nee
Extra kost hieraan verbonden	€

De opbouw van de de basisinputs van de oogstkosten werd gebaseerd op Berhongaray (2013). Men dient aan te geven *welk type oogstmethode wordt gebruikt*, om vervolgens aan te geven welke *kosten ontstaan bij het gebruik van deze methode*. Men kan vervolgens aangeven of de *gewassen gedroogd worden na het oogsten*.

Ten slotte is er nog het transport van de biomassa. Men moet eerst aangeven of men zelf verantwoordelijk is voor het vervoer van de biomassa naar de verwerkingscentrale, of dat de verwerker dit zelf doet. Vervolgens moet dan aangegeven worden of hier een extra prijs aan verbonden is.

Het totaalcijfer van de categorie oogstkosten dat terug te vinden is in tabel 7, wordt als volgt berekend: eerst wordt er, aan de hand van de tussenberekening die eerder is uitgevoerd, nagegaan of er een oogst is in het desbetreffende jaar. Indien dit niet het geval is zal deze kost altijd 0 zijn. Indien er wel een oogst is wordt de volgende berekening toegepast:

$$\text{Huur oogstmachine} + (\text{brandstofkost} \times \text{brandstofverbruik}) + (\text{loonkost} \times \text{gewerkte uren}) + \text{extra kost verhakselaar} + \text{extra transportkost}$$

Opbrengsten biomassa

Tabel 12 geeft de opbrengsten per plantendeel weer.

Tabel 12: Inputs nodig voor berekening biomassa-opbrengst

Prijs biomassa	Prijs ontvangen voor plantendeel?	Prijs
Plantendeel n	Ja/nee	€/kg DM
Verandering in prijs biomassa omwille van vervuiling	Minderwaarde door vervuiling?	
Plantendeel n	Ja/nee	€/kg DM

Men moet eerst per plantendeel dat men gedefinieerd heeft in tabel 6 aangeven of men hier een *prijs voor ontvangt*. Zo zal men bij wilgen bijvoorbeeld geen prijs ontvangen voor de bladeren, maar wel voor de stammen. Ten tweede heeft men ook nog de mogelijkheid om in tabel 12 aan te geven of de *prijs van biomassa daalt door de aanwezigheid van vervuiling*.

De formule om de opbrengsten van biomassa in tabel 7 te berekenen, is complexer dan de formule die nodig was om de oogstkosten te berekenen, dit omwille van het feit dat niet elk plantendeel verwerkt wordt als biomassa. Net zoals bij de vorige formule wordt er eerst nagegaan of er sprake is van een oogst in het betreffende jaar. De rest van de formule is dan als volgt:

Als men voor plantendeel n een prijs ontvangt, dan voert men de volgende berekening uit: (prijs voor plantendeel n – minderwaarde van plantendeel n) x biomassa van deel n (uit tabel 6). In het andere geval is de uitkomst 0.

Indien deze formule wordt uitgeteld voor elk plantendeel en de resultaten bij elkaar worden opgeteld, komt men bij een uitkomst die de totale opbrengst van de biomassa weergeeft.

Monitorkosten

Vervolgens zijn er de monitorkosten. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen 3 tranches van monitorkosten. De eerste tranche zijn de monitorkosten die gemaakt worden tijdens het remediatie-project, zoals bijvoorbeeld coördinatiekosten. De tweede tranche bestaat uit kosten die gemaakt worden na het project, zoals verdere onderzoeken naar de vervuiling. Ten slotte zijn er nog de monitorkosten uit tranche 3. Deze kosten hebben te maken met concrete nazorg van het terrein. De monitorkosten uit tranche 2 en 3 lopen nog een aantal jaren na het project door.

Men dient in elk jaar weer te geven hoeveel de monitorkosten in elke tranche zijn. Deze worden vervolgens gesommeerd en zo bekomt men de monitorkosten uit tabel 7.

Andere kosten

Ten slotte is er nog een zevende categorie kosten. Deze tabel is een restcategorie, waarin alle kosten die niet reeds aangehaald werden in een van de andere categorieën kunnen toegevoegd

worden. Men dient telkens de kost te definiëren en vervolgens weer te geven hoeveel zij bedraagt. Deze resultaten worden dan per jaar gesommeerd en opgenomen in tabel 7.

Totale en verdisconteerde kosten

De totale kosten van het jaar worden vervolgens berekend door de som te nemen van alle hiervoor berekende categorieën.

De verdiscontering gebeurt ten slotte als volgt;

Totale kost van het jaar / ((1 + discontovoet)ⁿ), waarbij n het jaar in kwestie is.

3.3 Gevalstudie: de kosten van fytoextractie in GREENLAND projecten

Het tweede onderdeel van het derde hoofdstuk tracht weer te geven wat precies de belangrijkste kosten van een fytoextractieproject zijn. Zoals reeds eerder gesteld werd er gevraagd aan partners uit het GREENLAND project om het kostenmodel dat eerder besproken werd, in te vullen. Op basis van deze gegevens worden hier enkele conclusies wat betreft belangrijkste kosten getrokken. Deze belangrijkste kosten zijn diegenen waarvan projectpartners hebben aangegeven dat men ze als belangrijk beschouwt, zoals labo-kosten, kosten van het afzetten van biomassa en monitorkosten. Daarnaast worden er tevens van de overige kostencategorieën een kort overzicht gegeven.

De sites die besproken zullen worden, zijn weergegeven in tabel 13.

Tabel 13: Overzicht van de drie sites die besproken worden, het land waarin ze liggen, de gewassen die er gebruikt worden, het type vervuiling in de bodem en of het gaat om fytoextractie of fytoextractie

Site	Land	Gewassen	Type vervuiling ¹	Extractie of stabilisatie
CS 1 Freiberg	Duitsland	KOH (wilgen en populieren)	Cd, As, Pb	Extractie
CS7 Freiberg ²	Duitsland	Winter-koolzaad en winter-tarwe	Cd, As, Pb	Stabilisatie
Phytosed - Ech1	Frankrijk	Wilgen	Cd, Zn (Cu, Ni, Cr, Pb)	Stabilisatie

¹Cd = Cadmium; As = Arsenicum; Pb = Lood; Zn = Zink; Cu = Koper; Ni = Nikkel; Cr = Chroom

²Op deze site roteert men winter-koolzaad en winter-tarwe, om dit in 1 model weer te geven, zullen om het jaar de kosten van het ene en vervolgens het andere gewas gebruikt worden. Ter illustratie: in jaar 0 zaait men koolzaad, de kosten die gemaakt worden bij het zaaien van koolzaad worden opgenomen in dit jaar; in jaar 1 zaait men tarwe, de kosten die gemaakt worden bij het zaaien van tarwe worden opgenomen in dit jaar; in jaar 2 zaait men weer koolzaad, en zo voort

3.3.1 Labo-kosten

De labokosten, die reeds werden toegelicht in het vorige deel van dit hoofdstuk, worden in geen enkele case gerapporteerd. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat de gebruikte gewassen reeds veelvuldig toegepast zijn en dat van deze gewassen dus reeds bewezen werd dat ze bepaalde metalen kunnen opnemen.

3.3.2 Kosten van voorbereiding site en aanplanting gewassen

Onder de voorbereidingskosten vallen de kosten van vergunningen, en de kosten die men maakt om de site voor te bereiden op de sanering, hieronder zou bijvoorbeeld het ontbossen van een terrein, of het egaal maken van de grond kunnen vallen. Er is slechts één site waar dit van toepassing blijkt te zijn, namelijk de site in Frankrijk. Hier is sprake van een kost die moet gemaakt worden om het terrein egaal te maken. Voor het terrein van één hectare komt dit neer op €12 274.

Na de voorbereidingswerken kunnen de gewassen aangeplant worden. Wat betreft KOH betaalde men op de site in Freiberg €0,08 voor jonge wilgen en €0,23 voor jonge populieren. Op de site in Frankrijk koopt men de bomen aan een prijs van €1,143 per wilg. Bij KOH dient men er wel rekening mee te houden dat deze plantkosten slechts eenmalig worden opgenomen, daar zij nooit volledig geoogst worden.

De sites in Freiberg waar men winter-koolzaad en winter-tarwe gebruikt, wordt tevens zelf ingezaaid. Men betaalde €60 aan zaad per hectare voor winter-koolzaad en €90 per hectare aan winter-tarwe. Deze kost wordt wel elke keer opnieuw gemaakt, daar deze gewassen volledig geoogst worden.

3.3.3 Onderhoudskosten planten en terrein

Planten

Onderhoudskosten voor planten worden weinig gerapporteerd. In het geval van de site in Frankrijk is er sprake van een kost om de bomen in te planten op het terrein na aankoop, wat neerkomt op €5 740 voor het volledige terrein (ongeveer €0,48 per boom). De site in Freiberg neemt deze kost ook op, en zij komt op eenzelfde kost van €0,48 per boom uit. Op de site in Brustem rapporteert men ook slechts één kost die betrekking heeft op de planten, deze heeft betrekking op het verwijderen van de beschermingsdraad die rond de bomen zit, enkele jaren nadat ze geplant zijn.

Terrein

Er worden enkele verschillende kosten aangehaald in de ingevulde fiches die betrekking hebben op het terrein. De meest frequente worden hier kort besproken.

Herbicide, compost en andere amendementen blijken op elke site gebruikt te worden. Er is tevens sprake van extra irrigatie op de site met KOH in Freiberg. Er worden extra ploegwerken uitgevoerd op de sites in Freiberg. Men zou kunnen stellen dat dit meer bij voorbereidingskosten hoort, maar dit lijken kosten die voor elke oogst terugkomen, terwijl de voorbereidingskosten eerder eenmalig

zijn. Ten slotte worden er nog kosten opgenomen die onder algemeen onderhoud vallen, zoals daar zijn: het verwijderen van onkruid en het aanbrengen van de herbicide en compost.

3.3.4 Biomassa kosten en opbrengsten

Oogstkosten

Een eerste belangrijke onderdeel van de kosten omtrent biomassa is de oogstkost. Uit de ontvangen modellen blijkt dat er meestal geopteerd wordt voor een 'all-inclusive' formule, wat wil zeggen, men betaalt één prijs voor de hele machine en men moet vervolgens geen andere kosten meer betalen. Een site in Freiberg, waarop men roteert tussen winter-koolzaad en winter-tarwe als gewassen, rapporteert dat de oogstkost €150 per ha bedraagt.

Op een andere site in Freiberg plant men korte-omloop-hout (KOH), met name een mix van wilgen en populieren. Hier ligt de oogstkost hoger, namelijk: €320 per ha. Dit lijkt logisch, daar bij KOH de oogst complexer verloopt als bij bijvoorbeeld winter-koolzaad. Men moet hier immers trachten zo veel mogelijk hout af te kappen, maar toch nog genoeg stam te laten staan opdat de bomen snel kunnen terug groeien (Berhongaray et al., 2013).

De site in Frankrijk, waarop voornamelijk wilgen staan, rapporteert een veel hogere oogstkost. Zij melden een bedrag van €6144 per oogst. Met nog een extra kost voor een hout versnipperaar van €28 439,37. Hierbij moet wel vermeld worden dat zij niet machinaal oogsten, maar met de hand, wat de hogere kost zou kunnen verklaren.

Transportkosten

Zodra de biomassa geoogst is, kan men er ofwel voor opteren het te laten drogen, ofwel om ze onmiddellijk te transporteren naar een verwerkingscentrale. Uit de cijfers van de site in Freiberg, waar men winter-koolzaad en winter-tarwe plant, blijkt deze kost zeer laag te zijn. Ongeveer €6 per ha voor het koolzaad (dit wil zeggen, €6 om alle biomassa die groeit op 1 hectare te vervoeren naar de centrale) tot €10 per ha voor de winter-tarwe. Deze lage kost zou verklaard kunnen worden door de nabijheid van de biomassacentrale, op vijf kilometer van de vervuilde site.

De transportkost van het KOH ligt veel hoger. Men betaald €1 560 om de biomassa van 2 ha grond te transporteren. Hier moet wel bij vermeld worden dat de totale biomassa hoger ligt per oogst, op 32400 kg per oogst voor de wilgen en populieren tegenover 10200 kg per oogst voor winter-koolzaad en 19337,5 kg voor winter-tarwe. Dit wordt echter geneutraliseerd door het feit dat KOH slechts om de 3 jaar wordt geoogst, de gemiddelde biomassa productie van wilgen en populieren ligt dan zelfs lager dan die van winter-tarwe. De verklaring voor het verschil moet dus ergens anders worden gezocht dan in het feit dat er meer biomassa wordt geproduceerd. Het zou kunnen dat de langere afstand tot een biomassaverwerker een rol speelt in de hogere kost. De site met KOH ligt op 13 km van zo een verwerkingscentrale, wat op het eerste zicht niet het enorme prijsverschil in transportkost met de andere gewassen zou kunnen verklaren.

Data van een site een Frankrijk met wilgen toont echter wederom aan dat het biomassa transport van KOH wel degelijk relatief hoog ligt. Deze site rapporteert dat de transportkost ligt €6 234. In dit geval ligt de biomassacentrale wel op 100 km van de site.

Wat betreft de transportkosten kan dus geconcludeerd worden dat het transport van KOH relatief hoog ligt en dat de afstand tot de biomassacentrale zeker een rol speelt bij deze kost.

Biomassa verkoopprijs

Wat betreft de gemiddelde opbrengst per kg biomassa blijkt dat winter-koolzaad het meeste opbrengt, €0,37 per kg. Winter-tarwe brengt €0,175 per kg op en het KOH dat op de site in Freiberg wordt geplant brengt €0,135 per kg op. De site in Frankrijk krijgt slechts €0,1 per kg. De hoge gemiddelde opbrengst van winter-koolzaad kan verklaard worden door het groot aantal toepassingen waarin het gebruikt kan worden; van koolzaadolie kan biodiesel gemaakt worden, het kan als gewone keukenolie gebruikt worden en de vezels die achterblijven na het uitpersen van de olie zijn zeer nuttig als veevoeder. KOH daarentegen heeft slechts één toepassing, het opwekken van energie.

Er worden geen minderwaarden omwille van vervuiling gerapporteerd.

Biomassa opbrengst

De biomassa opbrengst voor de site in Freiberg met KOH bedraagt 16 200 kg DM/ha (voor de hele site van 1,62 hectare is dit 26 244 kg DM). Deze opbrengst ontstaat bij elke oogst, in dit geval dus elke drie jaar. De tweede site in Freiberg toont aan dat de biomassa opbrengst van winter-koolzaad 11 900 kg DM voor de hele site (3,5 hectare) is. De biomassaopbrengst van winter-tarwe bedraagt 19 337,5 kg DM voor de hele site (3,5 hectare). De tweede site met KOH, in Frankrijk, rapporteert dat de biomassaopbrengst 39 000 kg DM bedraagt (voor een site van 1 hectare).

Metaalaccumulatie

Wat betreft KOH blijkt op de site in Freiberg de accumulatie 0,092988 kg vervuiling/ha per oogst te zijn (voor de totale site is dit 0,15064 kg vervuiling). De site met KOH in Frankrijk plant enkel wilgen, deze blijken in staat te zijn tot een hogere accumulatie dan populieren, waardoor de accumulatie per oogst neerkomt op 0,2925 kg vervuiling voor de hele site van 1 hectare.

De site in Freiberg waar men stabilisatie toepast rapporteert slechts een heel lage accumulatie, zoals dit steeds het geval is bij fytostabilisatie. Winter-tarwe is in staat om 0,0038675 kg vervuiling per hectare op te nemen (0,013536 kg vervuiling voor de hele site). Winter-koolzaad neemt iets minder vervuiling op, 0,00238 kg vervuiling per hectare (of 0,00833 kg vervuiling voor de hele site).

Droogduur en -kosten

De site in Freiberg droogt zijn KOH gedurende 30 dagen, hier wordt geen extra kost voor opgenomen. De site in Frankrijk met KOH geeft geen droogperiode weer, maar rapporteert wel een kleine kost hier aan verbonden, deze ligt tussen de €120 en €160

De site in Freiberg met winter-koolzaad en winter-tarwe geeft ook een droogkost weer voor hun graanoogst. Deze ligt op ongeveer €175 voor een hele oogst. De droogduur is niet bekend.

3.3.5 Monitorkosten

Naast de labokosten die voorafgaand aan het project plaatsvinden, dient een remediatieproject ook steeds gemonitord te worden.

De site in Freiberg met het KOH neemt tijdens elke oogst een aantal samples, van zowel de bodem als de bomen. Ze rekenen voor de bodem op een monitorkost van €200 en voor de monitorkost van de planten op een bedrag van €100 per oogst. De site in Freiberg met winter-koolzaad en winter-tarwe heeft dezelfde monitorkosten als de site met het KOH.

De site in Frankrijk rapporteert een aanzienlijk hogere monitorkost, namelijk: €3 319 per projectjaar.

3.3.6 Totale kost

Op basis van de 3 sites waarvoor er informatie verzameld werd, kan er nu een beeld gevormd worden van de gemiddelde kost van fytoremediatie per m³ en per ton. Tabel 14 geeft dit weer.

Tabel 14: De kost van fytoremediatie per m³ en per ton op basis van de gevalstudies

	CS 1 Freiberg	CS 7 Freiberg (wilgen en populieren)	Phytosed – Ech1 Frankrijk (voornamelijk wilgen)
Totale kost (baat) project in €	9 488	(10 718)	395 847
Kost (baat) per m ³ in €	1,95	(1,02)	131,95
Kost (baat) per ton in €	1,36	(0,75)	101,50

De site Phytosed-Ech1 blijkt een beduidend hogere kost te hebben dan de twee andere sites. Een belangrijke factor hierin lijkt het gebruik van een versnipperaar, waarvoor men elke oogst meer dan €28 000 blijkt te betalen. Een grotere steekproef in verder onderzoek kan duidelijk maken of de site Phytosed-Ech1 een uitschieter is.

4. De keuze voor fyto-remediatie of conventionele sanering, rekening houdende met private kosten en baten, en tijdsduur

4.1 Inleiding

Zoals reeds eerder vermeld, blijkt de tijdsspanne van een fyto-remediatieproject om metalen en metalloïden te verwijderen significant langer te zijn dan een conventioneel saneringsproject. In dit hoofdstuk wordt een uitbreiding van het model uit hoofdstuk 3 uitgewerkt, hiermee kan men nagaan of het beter is om voor een bepaalde site fyto-remediatie toe te passen of om toch voor een conventionele sanering te kiezen. Tevens zal berekend worden op welk punt men indifferent is tussen fyto-remediatie en conventionele sanering. Let wel op, de beslissing om al dan niet voor fyto-remediatie te kiezen gebeurt hier enkel rekening houdende met twee factoren, de private kosten en baten, en de tijdsduur. Zaken zoals technische haalbaarheid, risico voor de omgeving, en dergelijke, zullen dus niet in rekening worden gebracht.

Zodra dit model is opgebouwd, kan het worden toegepast op de verschillende cases die besproken werden in het vorige hoofdstuk. Op deze manier kan nagegaan worden wat de maximale jaarlijkse baat mag zijn die het terrein mag voortbrengen (of de maximale eenmalige baat indien men het terrein wenst te verkopen) opdat fyto-remediatie een beter saneringsalternatief is dan conventionele sanering.

Daarna zullen er sensitiviteitsanalyses worden uitgevoerd op een aantal belangrijke inputfactoren van het financiële model, zoals bijvoorbeeld de metaalaccumulatie en de biomassaopbrengst. Op deze manier kan worden nagegaan hoe deze factoren de tijdsduur van het project en de keuze voor fyto-remediatie of conventionele sanering beïnvloeden indien zij stijgen of dalen.

Ten slotte zal er voor één case worden nagegaan, op basis van verschillende soorten bestemmingstypes van grond, of men best fyto-remediatie, dan wel conventionele sanering toepast. Welke deze bestemmingstypes zijn, zal in dit deel verder worden toegelicht.

4.2 Opbouw beslissingsmodel

4.2.1 Jaarlijkse cashflow

Het eerste geval waarvoor we een model opbouwen, is het geval waarin we een jaarlijkse cashflow ontvangen zodra de site gesaneerd is. Dit zou bijvoorbeeld het geval kunnen zijn voor industriegrond of landbouwgrond.

Er zijn vijf inputs nodig om een beslissing te maken omtrent het al dan niet saneren met fyto-remediatie, zijnde: (1) de verdisconteerde uitgave die ontstaat indien men fyto-remediatie toepast, zoals deze berekend werd in hoofdstuk twee; (2) de uitgave die ontstaan indien men een conventionele saneringsvariant toepast; (3) de jaarlijkse baat die ontstaat wanneer de grond volledig gesaneerd is; (4) de duur van het fyto-remediatieproject; en (5) een discontovoet, zoals deze ook al gebruikt werd in hoofdstuk twee.

Om vervolgens te beslissen of men best hetzij fyto-remediatie, hetzij conventionele sanering, toepast, gebruikt men volgende formule:

Als [de kost van conventionele sanering + de netto-contante waarde van een annuïteit, lopende over een gespecificeerde duur n , voor een gespecificeerde baat B en voor een bepaalde discontovoet i] groter is dan [de verdisconteerde kost van het fyto-remediatieproject, zoals berekend in hoofdstuk 3] dan kiezen we voor conventionele sanering, anders kiezen we voor fyto-remediatie.

Deze formule maakt een belangrijke assumptie, namelijk dat een conventioneel saneringsproject afloopt in jaar 0, en dat er ook al een baat van het terrein ontvangen wordt in jaar 0. Voor fyto-remediatie ontvangt men pas een baat van het terrein in het jaar dat de sanering afloopt, jaar n . De baat die ontstaat door de verkoop van biomassa wordt reeds opgenomen in de totale verdisconteerde kost van het fyto-remediatieproject.

Indien dit geweten is, blijkt de formule vanzelfsprekend. Indien er conventioneel gesaneerd wordt, doet men een uitgave in jaar 0, en begint men vanaf dan een baat te ontvangen, deze baat is echter alleen relevant zolang de site door fyto-remediatie nog niet gezuiverd is. De totale baat wordt dus berekend als zijnde de netto-contante waarde van een annuïteit met een duur n , een baat B en een discontovoet i . Indien deze kost van conventionele sanering en de totale baat gesommeerd worden kunnen we deze som vervolgens vergelijken met de kost van fyto-remediatie. Indien zij groter is, wordt er gekozen voor conventionele sanering, want er wordt steeds gekozen voor het project met de hoogste NCW.

Men kan voorgaande formule enkel berekenen indien men weet wat de jaarlijkse baat is die de site kan genereren. Het is dus ook nuttig om te weten wat het indifferentiepunt is tussen conventionele sanering en fyto-remediatie, of anders gezegd: wat is de maximale baat die een site jaarlijkse mag voortbrengen om, rekening houdende met de langere tijdsduur van fyto-remediatie, toch nog voor fyto-remediatie als saneringsvariant te kiezen.

De redenering bij het zoeken van het indifferentiepunt, is gelijkaardig aan redenering in de vorige formule. Indien we conventioneel saneren ontstaat er een kost. Hier wordt dan vervolgens een annuïteit bijgeteld met een duur n , een baat B en een discontovoet i . Indien we dit gelijkstellen aan de kost van fyto-remediatie kunnen we de formule om de baat op het indifferentiepunt te berekenen als volgt afleiden:

Kost van het fyto-remediatieproject = kost van het conventionele saneringsproject + de netto-contante waarde van een annuïteit met tijdsduur n , baat B en discontovoet i .

Kost van het fyto-remediatieproject – kost van het conventionele saneringsproject = de netto-contante waarde van een annuïteit met tijdsduur n , baat B en discontovoet i .

Wetende dat een annuïteit wordt weergegeven door volgende formule: $B [(1 - (1 + \text{discontovoet})^{-n}) / \text{discontovoet}]$

$(\text{Kost van het fyto-remediatieproject} - \text{Kost van het conventionele saneringsproject}) \times (\text{de discontovoet} / (1 - (1 + \text{de discontovoet})^{-n})) = \text{baat B.}$

Indien men niet weet wat de precieze verwachte jaarlijkse cashflow van de site is, past men best deze tweede formule toe. Zij toont immers aan wat de baat maximaal mag zijn opdat men best fyto-remediatie toepast.

4.2.2 Eenmalige opbrengst

Het tweede geval gaat er van uit dat er een eenmalige opbrengst ontstaat op het moment dat de grond gesaneerd is. Dit zou bijvoorbeeld het geval kunnen zijn voor een woongrond die verkocht wordt voor een eenmalig bedrag.

We hebben vijf inputs nodig om een beslissing te maken omtrent het al dan niet saneren met fyto-remediatie: (1) de verdisconteerde uitgave die ontstaat indien men fyto-remediatie toepast, (2) de uitgave die ontstaat indien men een conventionele saneringsvariant toepast; (3) de eenmalige baat die ontstaat bij het afronden van het project; (4) de duur van het fyto-remediatieproject; en (5) een discontovoet.

De formule die nodig is om te beslissen of er best fyto-remediatie of conventionele sanering wordt toegepast kan als volgt worden weergegeven:

Als [kost van conventionele sanering + de waarde van het eenmalige bedrag] groter is dan [Kost van fyto-remediatie + de waarde van het eenmalige bedrag / $(1 + i)^n$] dan kiezen we voor conventionele sanering, anders kiezen we voor fyto-remediatie.

De redenering achter deze formule is gelijkaardig aan de redenering bij de formule indien er een jaarlijkse cashflow is. Indien er conventioneel gesaneerd wordt, doet men een uitgave in jaar 0 en de baat wordt ook ontvangen in jaar 0. De eenmalige baat bij conventionele sanering moet dus niet verdisconteerd worden. Vervolgens nemen we de verdisconteerde kost van het fyto-remediatieproject en tellen we hier de eenmalige baat bij op. Deze baat moet echter wel verdisconteerd worden naar jaar 0, dit gebeurt door te delen door $(1 + i)^n$. Indien beide getallen berekend zijn geldt het beslissingscriterium zoals in de voorgaande formule.

Men kan deze formule enkel toepassen indien men een precieze baat kent. Daarom wordt berekend wat het indifferentiepunt is tussen conventionele sanering en fyto-remediatie, of anders gezegd: wat is de maximale eenmalige baat opdat fyto-remediatie, rekening houdende met de langere tijdsduur, toch nog interessanter is dan conventionele sanering. De formule om de baat van het indifferentiepunt te berekenen kan als volgt worden afgeleid:

$\text{Kost van conventionele sanering} + \text{de waarde van het eenmalige bedrag} = \text{Kost van fyto-remediatie} + \text{de waarde van het eenmalige bedrag} / (1 + i)^n$

$\text{Kost van fyto-remediatie} - \text{kost van conventionele sanering} = \text{waarde van het eenmalige bedrag} - \text{waarde van het eenmalige bedrag} / (1 + i)^n$

Kost van fyto-remediatie – kost van conventionele sanering = $(1 - 1/(1+i)^n)$ waarde van het eenmalige bedrag

$(\text{Kost van fyto-remediatie} - \text{kost van conventionele sanering}) / (1 - 1/(1+i)^n) =$ waarde van het eenmalige bedrag

Indien men geen precieze verkoopwaarde kent, kiest men best voor deze tweede berekening, die een idee geeft van wat de maximale eenmalige waarde van de grond mag zijn om te kiezen voor fyto-remediatie.

4.2.3 Fytostabilisatie

Naast fytoextractie, waarbij men de duur van het fyto-remediatieproject kan weergeven in de formule, kan er ook sprake zijn van fytostabilisatie. Men dient dan de levensduur, n , in de eerder besproken formules te vervangen door oneindig (∞).

4.3 Toepassing GREENLAND-cases

In dit deel van het vierde hoofdstuk zal worden nagegaan wat de maximale baat van de site mag zijn, opdat men de sites waarvan eerder de kosten besproken werden, beter saneert met fyto-remediatie dan met conventionele sanering. In eerste instantie zullen de originele gegevens besproken worden.

Vervolgens zullen er sensitiviteitsanalyses worden uitgevoerd op een aantal belangrijke inputfactoren. Onder deze belangrijke factoren worden verstaan: het aantal kg droge massa per oogst per hectare, de extractie in mg/kg per oogst per hectare, de kosten en opbrengsten van biomassa, de monitorkosten en de tijdsduur. Deze inputfactoren werden gekozen omdat zij een direct verband hebben met de belangrijkste kosten zoals zij werden aangegeven door de projectpartners.

Ten slotte zal er voor één case worden nagegaan, op basis van verschillende soorten bestemmingstypes van grond, of men best fyto-remediatie, dan wel conventionele sanering toepast. Dewelke deze bestemmingstypes zijn, zal in dit deel worden uitgelegd.

Zoals reeds eerder vermeld, wordt er enkel rekening gehouden met private kosten en baten, en de tijdsduur van het fyto-remediatieproject. Er wordt een assumptie gemaakt dat conventionele sanering binnen het jaar wordt afgerond. De gebruikte discontovoet bedraagt steeds 4%.

De werkwijze zal voor één case worden toegelicht. Van de andere cases zal aan het einde van het hoofdstuk een overzicht worden gegeven.

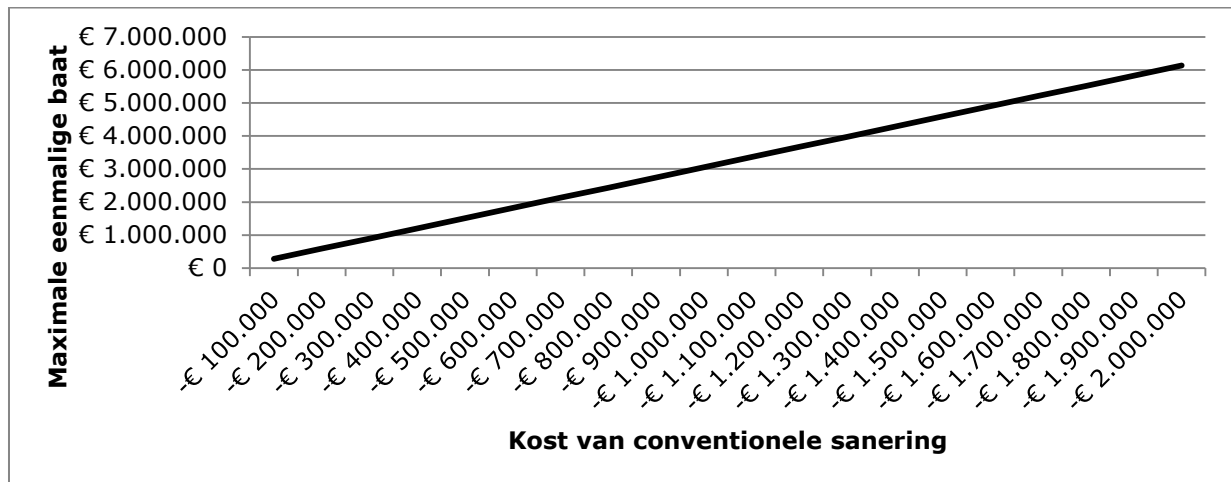
4.3.1 Berekening maximale baat die terrein mag genereren

De case die gebruikt wordt om de werkwijze toe te lichten, is de site in Freiberg waarop KOH geplant is. Uit het kostenmodel bleek dat het 10 jaar zou duren om de gewenste eindvervuiling te bereiken. Dit gebeurt aan een totale verdisconteerde kost van €9 488.

Figuur 2 geeft weer wat de maximale eenmalige baat mag zijn, opdat men fytoextractie verkiest boven conventionele sanering. De X-as toont de uitgave die men maakt indien men conventioneel

saneert. Deze zal steeds negatief zijn. De Y-as toont de maximale eenmalige baat die de site mag generen opdat fytoextractie interessanter is dan conventionele sanering. Deze maximale baat mag variëren van ongeveer €278 984 wanneer conventionele sanering €100 000 kost, tot €6,135 miljoen wanneer conventionele sanering €2 miljoen kost. Anders gezegd: indien de grond verkocht kan worden na sanering voor meer dan €278 984, in het geval dat conventionele sanering €100 000 kost, moet men conventionele sanering toepassen in plaats van fytoextractie.

Figuur 2: Maximale eenmalige baat die site CS 1 Freiberg mag generen gegeven een kost van fytoextractie van €9 488, opdat fytoextractie rendabeler is dan conventionele sanering (duur fytoextractie: 10 jaar)



Een soortgelijke berekening wordt uitgevoerd voor: de maximale jaarlijkse baat die site CS 1 Freiberg mag generen opdat fytoextractie rendabeler is dan conventionele sanering, de maximale eenmalige en jaarlijkse baat die site CS 7 Freiberg mag genereren, en de maximale eenmalige en jaarlijkse baat die site Phytosed-Ech1 mag generen. Deze zijn terug te vinden in bijlage 2. Een overzicht van de maximale baat voor de drie sites wordt weergegeven in tabel 15.

Tabel 15: Overzichtstabel maximale baat van site CS 1 Freiberg, CS 7 Freiberg en Phytosed - ECH 1

		Kost conventionele sanering			
		€100 000	€500 000	€1 000 000	€2 000 000
CS 1 Freiberg	Maximale eenmalige baat	€278 984	€1 511 893	€3 053 030	€6 135 303
Kost: €9 488					
Duur: 10 jaar	Maximale jaarlijkse baat	€11 159	€60 475	€122 121	€245 412
CS 7 Freiberg	Maximale eenmalige baat	€110 718	€510 718	€1 010 718	€2 010 718
Baat: €10 718					
Duur: oneindig	Maximale jaarlijkse baat	€4 428	€20 428	€40 428	€80 428
Phytosed – ECH1	Maximale eenmalige baat	N.V.T. ¹	€104 153	€604 153	€1 604 153
Kost: €395 847					
Duur: oneindig	Maximale jaarlijkse baat	N.V.T. ¹	€4 166	€24 166	€64 166

¹Fytostabilisatie kost meer dan conventionele sanering en kan dus geen alternatief zijn

4.3.2 Sensitiviteitsanalyse

In het vorige deel van dit hoofdstuk werd er reeds een gevalstudie uitgevoerd op de drie cases uit het GREENLAND project. In dit deel zal er worden nagegaan wat er gebeurt indien bepaalde factoren veranderen. Onder deze factoren worden verstaan: het aantal kg droge massa per oogst per hectare, de extractie in mg/kg per oogst per hectare, de kosten en opbrengsten van biomassa, de monitorkosten en de tijdsduur.

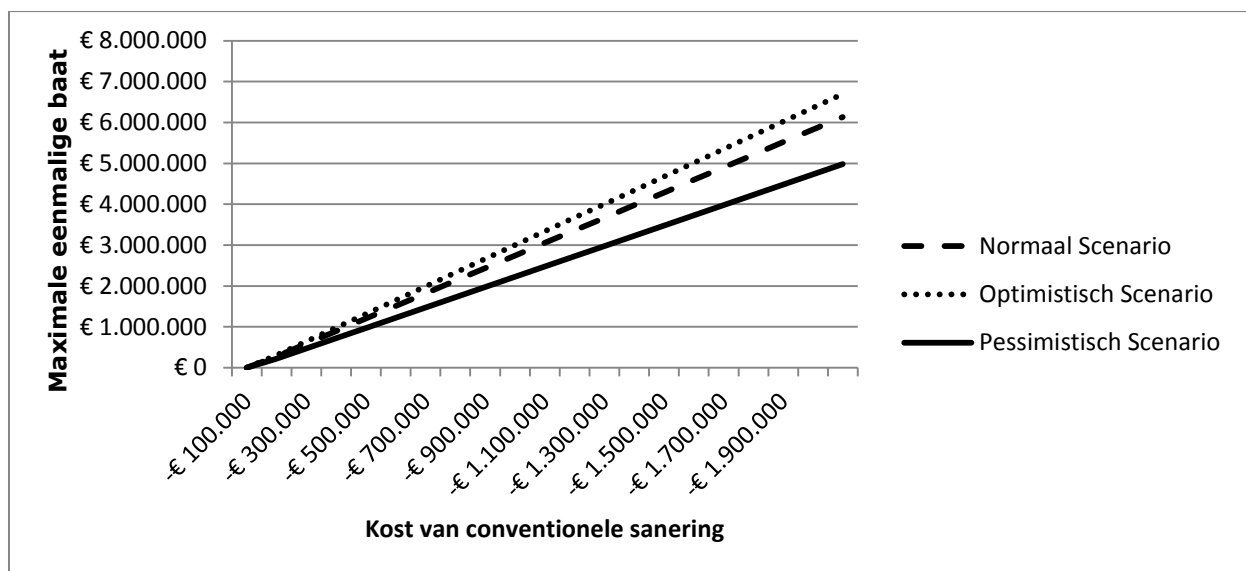
Er zal gewerkt worden met 3 scenario's voor elke case. Ten eerste is er het normale scenario zoals dit werd uitgelegd in het vorige deel van dit hoofdstuk. Daarnaast is er een optimistisch en een pessimistisch scenario. In het optimistische scenario zullen de factoren in positieve zin worden aangepast. Dit wil zeggen: het aantal kg droge massa per oogst per hectare zal stijgen, de extractie in mg/kg per oogst per hectare zal stijgen, de oogstkosten zullen gelijk blijven (dit komt neer op een lagere reële kost omdat de hoeveelheid biomassa stijgt), de biomassaopbrengsten zullen stijgen ten gevolge van de gestegen biomassa die elke oogst voortbrengt, de transportkosten van biomassa zullen gelijk blijven (dit komt neer op een lagere reële kost omdat de hoeveel biomassa stijgt), de monitorkosten zullen dalen, en ten gevolge van deze aanpassingen zal ook de tijdsduur veranderen. In het pessimistische scenario zullen deze factoren in omgekeerde richting bewegen, maar de oogstkosten en transportkosten zullen weer gelijk blijven (wat dan betekent dat dit een hogere reële kost voor een bepaalde hoeveelheid biomassa is). De stijging en daling van elke factor zal 10% bedragen.

Naast deze scenario's, kan u in bijlage 3, 4 en 5 tevens een sensitiviteitsanalyse per aparte factor terugvinden. Dit wil zeggen, een sensitiviteitsanalyse waar telkens slechts 1 factor wordt veranderd.

De sensitiviteitsanalyses worden enkel uitgevoerd voor de maximale eenmalige baat die het terrein mag voortbrengen. Sensitiviteitsanalyses voor de maximale jaarlijkse baat leveren dezelfde resultaten op.

Figuur 3 geeft drie scenario's weer voor de hoogte van de maximale eenmalige baat die site CS 1 in Freiberg mag genereren opdat fytoextractie interessanter is dan conventionele sanering. De bovenste grafiek toont het optimistische scenario. In dit geval bedraagt de totale verdisconteerde kost van het project €8 403 en wordt de duur 9 jaar, 1 jaar minder dan in het normale scenario dat eerder besproken werd. De onderste grafiek toont het pessimistische scenario. De totale verdisconteerde kost van het project bedraagt hier €10 989 en de tijdsduur wordt 13 jaar, een verlenging van de normale tijdsduur van drie jaar.

Figuur 3: Normaal, optimistisch en pessimistisch scenario maximale eenmalige baat voor site CS 1 Freiberg



Uit deze figuur blijkt dat wanneer de biomassaopbrengst stijgt, de accumulatie stijgt en de monitorkosten dalen, de kost van het project verlaagt en de duur van de sanering verkort wordt tot 9 jaar. Hierdoor wordt de maximale eenmalige baat die de site mag generen opdat fytoextractie interessanter is dan conventionele sanering hoger. Met andere woorden: men zal sneller voor fytoextractie kiezen dan in het normale scenario. In het andere geval, wanneer de biomassaopbrengst daalt, de accumulatie daalt en de monitorkosten hoger worden, zal de kost van het project hoger liggen, en de duur drie jaar langer worden. Hierdoor verlaagt de maximale eenmalige baat. Men zal dan sneller voor conventionele sanering kiezen dan in het normale scenario.

Een scenario-analyse voor de twee andere cases, en een sensitiviteitsanalyse per inputfactor voor elke van de drie cases zijn, zoals reeds eerder vermeld terug te vinden in bijlage 3, 4 en 5. Tabel 16 geeft een overzicht van de maximale eenmalige baat van de verschillende cases voor de drie scenario's. Zoals eerder vermeld wordt enkel de eenmalige baat besproken en de jaarlijkse baat achterwege gelaten, de evolutie van deze jaarlijkse baat in de verschillende scenario's komt overeen met de evolutie van de eenmalige baat in de verschillende scenario's.

Tabel 16: Overzichtstabel maximale baat van site CS 1 Freiberg, CS 7 Freiberg en Phytosed - ECH 1 voor het optimistisch en pessimistisch scenario

	Kost conventionele sanering			
	€100 000	€500 000	€1 000 000	€2 000 000
CS 1 Freiberg				
Optimistisch scenario (kost: €8 403, duur: 9 jaar)	€307 977	€1 652 907	€3 334 069	€6 696 394
Pessimistisch scenario (kost: €10 989, duur: 13 jaar)	€222 846	€1 224 284	€2 476 080	€4 979 673
CS 7 Freiberg				
Optimistisch scenario (baat: €21 157, duur: oneindig)	€121 157	€521 157	€1 021 157	€2 021 157
Pessimistisch scenario (baat: €280, duur: oneindig)	€100 280	€500 280	€1 000 280	€2 000 280
Phytosed – Ech1				
Optimistisch scenario (kost: €386 831, duur: oneindig)	N.V.T. ¹	€113 169	€613 169	€1 613 169
Pessimistisch scenario (kost: €404 863, duur: oneindig)	N.V.T. ¹	€95 137	€595 137	€1 595 137

¹Fytostabilisatie kost meer dan conventionele sanering en kan dus geen alternatief zijn

4.3.3 Fytoremediatie of conventionele sanering voor verschillende grondbestemmingen

Zoals reeds eerder vermeld zal er in dit deel worden nagegaan of men voor een bepaalde bestemming best fytoextractie of conventionele sanering toepast. Dit zal nagegaan worden voor de eerste case, die handelt over site CS1 Freiberg.

De kost die nodig is om dit terrein te saneren met behulp van fytoextractie bedraagt €9 488. Het zal 10 jaar duren om de gewenste minimumvervuiling te bereiken. De grootte van de site bedraagt 16 000m² en is gelegen in Freiberg, een stad in de Duitse deelstaat Saksen. Op dit moment is de grond bestemd als landbouwgrond. Dit wetende kan er worden nagegaan wat de verkoopprijs van de site is, afhankelijk van de bestemming van de grond. Er zal echter niet enkel gekeken worden naar de prijs van landbouwgrond.

Er zullen in totaal vijf soorten grond in beschouwing worden genomen: landbouwgrond, industriegrond, commerciële grond (bestemd voor kantoren en dergelijke), woongebied in gesloten bebouwing en woongebied in open bebouwing. Op deze manier zal kunnen worden nagegaan of de beslissing om fytoextractie of conventionele sanering toe te passen verandert naarmate de bestemming van de grond verandert.

Tabel 17 geeft weer wat de prijzen per m² zijn voor deze vijf soorten grond en wat de totale prijs van de site is, op basis van een grootte van 16 000m² en de prijs per m².

Tabel 17: Grondprijzen en totale potentiële opbrengst van het terrein per soort bestemming van de grond

	Landbouwgrond ¹	Industriegrond ²	Commerciële grond ²	Woongebied in gesloten bebouwing ²	Woongebied in open bebouwing ²
Prijs per m ²	€9	€39,93	€29,24	€200,67	€59,21
Totale prijs ³	€144 000	€638 880	€467 840	€3 210 720	€947 360

¹ bron: Ciaian et al. (2012)

² bron: Destatis (2012)

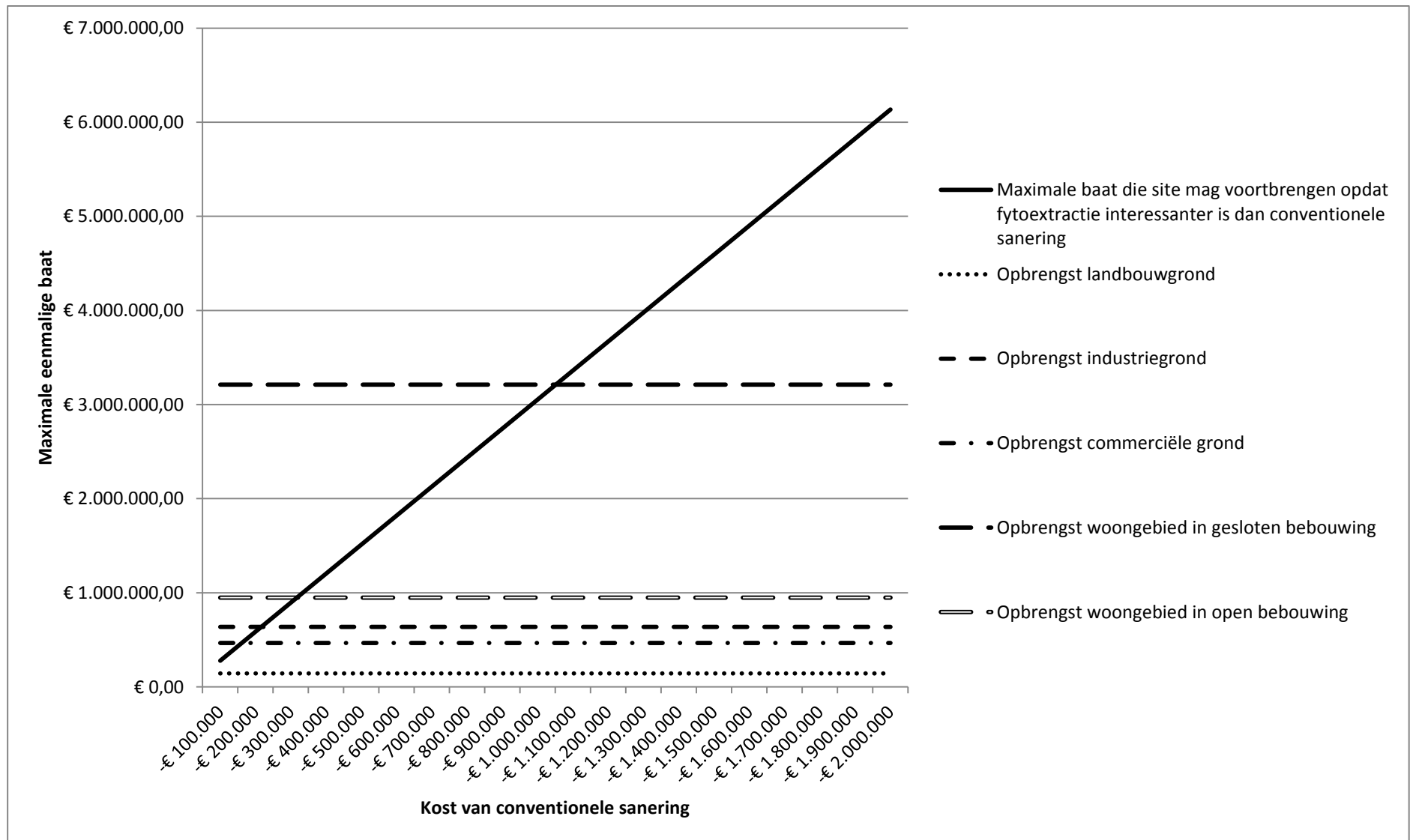
³ op basis van een site van 16 000m²

Deze opbrengsten kunnen vervolgens vergeleken worden met de maximale eenmalige baat die de site mag opbrengen opdat fytoextractie interessanter is dan conventionele sanering. Zo kan er worden nagegaan wanneer fytoextractie interessanter is dan conventionele sanering, voor de vijf verschillende grondbestemmingen. Figuur 4 geeft een overzicht van de maximale eenmalige baat die de site mag opbrengen en de prijzen van de verschillende grondtypes.

Landbouwgrond blijkt zeer interessant te zijn om te saneren met fytoextractie. Het indifferentiepunt voor conventionele sanering en fytoextractie ligt bij een prijs van fytoextractie die ongeveer €56 200 bedraagt. Bij commerciële grond geeft men iets minder snel de voorkeur aan fytoextractie, maar het blijft toch de meest interessante optie wanneer de kost van conventionele sanering meer dan €161 270 bedraagt.

Wat industriegrond betreft, geeft men de voorkeur aan fytoextractie wanneer de kost van conventionele sanering hoger oploopt dan €216 700. Woonzone in open bebouwing saneert men best met fytoextractie wanneer de kost van conventionele sanering hoger ligt dan €317 000. Woongebied in gesloten bebouwing is het minst interessant van de vijf grondtypes om te saneren met fytoextractie. Het indifferentiepunt ligt bij een kost van conventionele sanering van ongeveer €1 051 000.

Figuur 4: Maximale eenmalige baat die site CS 1 Freiberg mag opbrengen vergeleken met de opbrengst van vijf verschillende grondtypes



5. De invloed van externe kosten en baten op de keuze van een saneringsvariant

5.1 Inleiding

In hoofdstuk 4 werd het fyto-remediatiemodel uitgebreid om rekening te houden met een langere tijdsduur van een fyto-remediatieproject. Dit laatste hoofdstuk tracht de resterende factoren die van belang zijn om te beslissen welk saneringsalternatief wordt toegepast in rekening te brengen, namelijk de externe kosten en baten. Dit zal gebeuren door een verdere uitbreiding van het fyto-remediatiemodel aan de hand van een multicriteria analyse (MCA), zoals deze werd opgesteld door de OVAM.

Eerst zullen de bepalende factoren bij de keuze van een bodemsaneringstechniek, en hoe men deze een score kan geven, besproken worden. Vervolgens zullen de gewichten van elke categorie factoren besproken worden, om ten slotte te eindigen met een totaalbeeld van de MCA.

Nadat deze MCA van de OVAM besproken is, zal er kort gekeken worden naar de factoren die volgens SURF-UK belangrijk zijn. SURF-UK is een Europees consortium dat zijn factoren vooral opstelt vanuit duurzaamheidsstandpunt. Deze factoren komen niet volledig overeen met de factoren zoals OVAM ze opstelt. Ze worden echter besproken om na te gaan welke andere factoren mogelijk nog een rol zouden kunnen spelen.

5.2 Externe kosten en baten volgens OVAM

De code van goed praktijk van de OVAM (2013) geeft aan dat men met volgende vier categorieën rekening moet houden: ten eerste een categorie met milieuhygiënische factoren op lokaal vlak. Daarnaast de milieuhygiënische criteria op regionaal/globaal vlak. Ten derde de verschillende technische en maatschappelijke criteria van de beschouwde technieken en ten slotte een categorie met financiële factoren.

Verder worden voor elk van deze categorieën de factoren besproken en hoe de scores hiervoor berekend kunnen worden. Een eerste belangrijke opmerking bij de toekenning van de scores, is dat er steeds een aantal punten te verdelen zijn over de technieken voor elke factor. Dit aantal punten is gelijk aan het aantal beschouwde technieken maal vijf. Indien drie technieken beschouwd worden, moeten er dus 15 punten verdeeld worden over de drie technieken voor één factor. Dit gebeurt vervolgens voor elke factor. Een tweede belangrijke opmerking is dat de maximum score 9 bedraagt (= heel erg goed) en de minimum score 1 (= heel erg slecht).

5.2.1 Milieuhygiënische factoren op lokaal niveau

Mate behalen decretale doelstelling grond en grondwater

Deze factor houdt in dat men gaat kijken in welke mate de saneringstechniek in kwestie er in slaagt om de decretale doelstelling te behalen voor het vaste deel van de bodem. Bij het beoordelen van elke variant houdt men rekening met volgende vier aspecten: 1) Wat zijn de

gebruiks- en bestemmingsbeperkingen na de sanering? 2) In welke mate slaagt de saneringsmethode er in om de risico's weg te nemen en moet men gebruikadviezen formuleren? 3) slaagt de techniek er in om te saneren tot de bodemsaneringsnorm? 4) in welke mate kan de techniek de richtwaarden bereiken?

De bodemsaneringsnorm waarvan sprake is in het derde aspect, is de maximale norm van een bepaalde vervuiling die zich in hetzij de grond, hetzij het grondwater, mag bevinden. Een tabel met de normen voor de verschillende soorten vervuiling en de verschillende bestemmingstypes zoals deze verschenen is in het Vlarebo, is terug te vinden in bijlage 9.

De richtwaarde uit het vierde aspect gaat niet om wat de maximale wettelijke norm is, maar naar welke waarde men zich moet trachten te richten bij de sanering van de bodem. Een concentratie lager dan deze richtwaarde geeft weer dat de bodem zuiver is. Een overzicht van deze richtwaarden per vervuilingstype, zoals verschenen in het Vlarebo, is terug te vinden in bijlage 10.

Totale vuilvrachtvermindering

De totale vuilvrachtvermindering heeft betrekking op de hoeveelheid vervuiling die er uit de grond verwijderd wordt. OVAM reikt een formule aan om op een simpele wijze hier een waarde aan toe te kennen om later in de MCA te gebruiken. Als we de totale begin vuilvracht weten, en de vuilvracht na sanering, kunnen we de relatieve vuilvracht reductie berekenen. Als men twee methodes wil vergelijken ziet dit er als volgt uit:

V_t = Totale vuilvracht voor sanering

V_{1e} = Vuilvracht methode 1 na sanering

V_{2e} = Vuilvracht methode 2 na sanering

Dan kan men de relatieve vuilvracht berekenen door volgende formule:

$V_{1r} = (V_t - V_{1e}) / V_t$, eenzelfde formule geldt voor techniek 2

Vervolgens kan men deze relatieve score gebruiken om het aantal te verdelen scores (S_t) te verdelen. Zoals reeds eerder vermeld is dit aantal te verdelen scores steeds het aantal technieken dat beschouwd wordt maal vijf. Voor een MCA waarin twee technieken worden vergeleken zou S_t dus gelijk zijn aan 10. De score die dient ingevuld te worden in de MCA voor een bepaalde techniek wordt dan berekend door volgende formule:

Score in MCA voor techniek 1 = $S_t \times V_{1r} / V_{tr}$, waarbij V_{tr} de som van alle relatieve vuilvrachtverminderingen is.

Rechtstreekse emissie naar andere milieucompartimenten

Deze factor beoordeelt in welke mate de techniek hinder veroorzaakt in andere milieucompartimenten, zoals daar zijn: emissies van vervuiling naar oppervlaktewater, hydraulische emissies op riool en emissies naar de lucht. Luchtemissies worden als zeer belangrijk

gezien, zij moeten zoveel mogelijk vermeden worden, zo moeten er bijvoorbeeld periodiek luchtmetingen worden uitgevoerd.

Saneringsduur en beleidsdoelstellingen

Binnen deze factor tracht men de duur van de sanering in acht te nemen. Er zijn volgens OVAM echter wel enkele belangrijke richtlijnen bij de toekenning van de scores: alle saneringen met een duur van korter als twee jaar moeten dezelfde score hebben; alle saneringen met een duur tussen de twee en vijf jaar moeten een gelijke score krijgen, het verschil in score met de varianten die minder als twee jaar duren mag bovendien niet groter zijn dan twee; alle saneringen die een duur hebben van langer dan vijf jaar krijgen ook een gelijke score, deze score mag significant verschillen van saneringen met een duur van minder dan vijf jaar.

De saneringsduur van fyto-remediatie werd reeds berekend in hoofdstuk drie.

5.2.2 Milieuhygiënische factoren op regionaal/globaal vlak

Verbruik grondstoffen en gerecycleerde materialen

Men dient hier na te gaan in welke men grondstoffen verbruikt, zoals daar zijn: energie, bijvoorbeeld voor het ontgraven; chemicaliën, voor bijvoorbeeld de injectie van nutriënten; verbruiksgoederen, zoals actieve kool; en materiaal, bijvoorbeeld vrachtwagens voor het vervoer.

OVAM stelt een CO₂ calculator ter beschikking om de CO₂-emissies (in ton) te berekenen. Om vervolgens de scores voor elke variant te berekenen moet men volgende formules uitvoeren:

$$C1 = \text{CO}_2 \text{ productie van variant 1}$$

$$C2 = \text{CO}_2 \text{ productie van variant 2}$$

$$Ct = \text{CO}_2 \text{ productie van alle beschouwde varianten gesommeerd}$$

De score voor techniek 1 wordt dan:

$$\text{Score in MCA voor techniek 1} = St / (\text{aantal beschouwde technieken in MCA} - 1) \times (Ct - C1) / Ct$$

Uit deze formule volgt dat de techniek met de minste uitstoot de hoogste score heeft.

Productie van niet-herbruikbaar afval

De productie van afval dat men niet kan hergebruiken en wat dus moet gestort worden na de sanering kan een erg belangrijk factor zijn. Onder deze categorie valt zowel afval als vervuilde grond die gestort moet worden. De score van deze categorie wordt als volgt berekend:

$$N1 = \text{afvalproductie van variant 1}$$

$$N2 = \text{afvalproductie van variant 2}$$

$$Nt = \text{afvalproductie van alle varianten gesommeerd}$$

$$\text{Score in MCA voor techniek 1} = St / (\text{aantal beschouwde technieken in MCA} - 1) \times (Kt - K1) / Kt$$

5.2.3 Technische factoren

Afwezigheid bijkomende hinder tijdens de sanering

Deze factor mag allereerst niet overlappen met de milieuhinder die reeds bij de milieuhygiënische factoren voorkwam. Onder deze factor zou bijvoorbeeld kunnen vallen: verkeershinder door afsluiten van wegen, veiligheid van het werfpersonnel en veiligheid naar de omgeving toe, door bijvoorbeeld gevaarlijke emissies.

Beperkingen die na uitvoering van sanering zullen gelden voor het gebruik

Deze factor gaat simpelweg na in welke mate er gebruiksbeperkingen zullen zijn. Een toepasselijk voorbeeld is het aanleggen van een leeflaag (deze techniek wordt besproken in bijlage 1). Men kan dan geen te diepe graafwerken uitvoeren, omdat het risico bestaat dat er dan vervuiling vrijkomt.

Aanbrengen schade ten gevolge van sanering

Deze factor neemt enerzijds schade in rekening die zeker zal ontstaan door de sanering, zoals bijvoorbeeld het afbreken van infrastructuur. Daarnaast houdt men ook rekening met schade die potentieel kan ontstaan tijdens de sanering. Hier wordt gedacht aan trilschade, explosiegevaar en dergelijke.

Veiligheidsmaatregelen tijdens de sanering

De vierde factor van het technische luik tracht rekening te houden met allerlei veiligheidsmaatregelen, zoals het verbod voor onbevoegden om het terrein te betreden, of indien de werken dienen te gebeuren onder strenge veiligheidsvoorwaarden

5.2.4 Financiële factoren

Kosten van de sanering

Volgens OVAM moeten hier niet enkel de kosten van het project opgenomen worden, maar tevens de kosten van effectieve schade die men heeft aangebracht en eventueel een verzekering voor de potentiële schade. De berekening van de score in de MCA voor kosten van sanering wordt op eenzelfde wijze als die van de factor 'verbruik van secundaire grondstoffen' berekend:

K1 = kost van techniek 1

K2 = kost van techniek 2

Kt = kost van alle beschouwde varianten gesommeerd

De score voor techniek 1 wordt dan:

$$\text{Score in MCA voor techniek 1} = St / (\text{aantal beschouwde technieken in MCA} - 1) \times (Kt - K1) / Kt$$

Waarde van de restverontreiniging

De restverontreiniging is het deel van de verontreiniging dat na de sanering achterblijft en dus, op een later moment, nog afgegraven moet worden. Deze restverontreiniging zou bij een isolatietechniek bijvoorbeeld heel hoog kunnen oplopen, men verwijdert de vervuiling dan immers niet, maar toch kan men het terrein perfect gebruiken. Bij de berekening van de score van deze waarde van restverontreiniging maakt men een onderscheid tussen twee soorten restverontreiniging, namelijk: Ra, de hoeveelheid restverontreiniging die men moet afvoeren en storten indien men ontgraaft en Rh, de hoeveelheid restverontreiniging die men niet moet afvoeren.

Men hecht dubbel zo veel waarde aan Ra. Dit uit zich dan ook in de berekening van de score. Indien de vervuiling zich dieper dan twee meter bevindt, dan vindt men dit minder belangrijk en wordt dit door twee gedeeld. De berekening gebeurt als volgt:

$$R1 = 2Ra1 \text{ (van restverontreiniging tot een diepte van minder als 2 meter)} + Rh1 \text{ (van restverontreiniging tot een diepte van minder als 2 meter)} + Ra1 \text{ (restverontreiniging, dieper als twee meter)} + Rh1 \text{ (restverontreiniging dieper als twee meter)}/2$$

Eenzelfde formule geldt voor techniek 2.

Rt = som van alle restverontreiniging

De score wordt als volgt berekend:

$$\text{Score in MCA voor techniek 1} = St / (\text{aantal beschouwde technieken in MCA} - 1) \times (Rt - R1) / Rt$$

5.3 De multicriteria-analyse

Figuur 5 toont de uiteindelijk MCA. In deze MCA wordt er van een standaard verdeling van de gewichten uitgegaan: 33% voor de milieuhygiënische factoren op lokaal niveau, 12% voor de milieuhygiënische factoren op regionaal/globaal vlak, 22% voor de technische factoren en 33% voor de financiële factoren.

Vervolgens wordt voor elke factor het gewicht berekend, dit gebeurt door het gewicht van de categorie te delen door het aantal factoren in die categorie. Voor de categorie rond milieuhygiënische factoren op lokaal niveau betekent dit dus dat het gewicht van 33% gedeeld wordt door vijf, het aantal factoren. Per factor geldt er dus een gewicht van 6,60%.

Om het subtotaal van elke categorie, voor elke techniek, te berekenen, worden de gewichten van elke factor vermenigvuldigd met de score van elke factor. Indien men het subtotaal van elke categorie van elke techniek heeft, kan men overgaan tot de uiteindelijke berekening van de score in de MCA voor elke beschouwde techniek. Deze uiteindelijke berekening gebeurt door de scores van elke categorie te sommeren.

De techniek met de hoogste score is vervolgens de beste techniek, bij de gebruikte gewichtenset, terwijl de techniek met de laagste score de slechtste techniek is.

Het spreekt voor zich dat de gebruikte gewichtenset het resultaat van de MCA danig kan beïnvloeden. Dat wil niet zeggen dat steeds de standaardverdeling gebruikt dient te worden. In een aantal situaties kan men er voor opteren om de gewichten aan te passen.

Indien blijkt dat er ernstige risico's zijn, zoals bijvoorbeeld de aanwezigheid van vrij product van mobiele stoffen, of de aanwezigheid van geurhinder, dan kan men er voor kiezen om de milieuhygiënische factoren een hoger gewicht toe te kennen. Een zelfde redenering geldt voor het potentieel risico. Als dit risico eerder beperkt is, hoeft de sanering niet erg dringend te gebeuren, de financiële factoren kan men dan een hoger gewicht toekennen. Als er veiligheidsrisico's zijn, zoals wanneer de hoge complexiteit van de werken ervoor zorgt dat de sanering minder veilig wordt, of wanneer de omgeving hindergevoelig is, dan kan men er ten slotte ook nog voor kiezen om de technische en maatschappelijke factoren een groter gewicht toe te kennen.

Het is volgens OVAM wel steeds belangrijk dat de keuze van de gewichten weldoordacht en met een afdoende motivatie gebeurt. Indien dit niet gebeurt zou men immers de technieken zodanig kunnen aanpassen dat de techniek die de persoonlijke voorkeur geniet, als beste techniek uit de MCA komt.

Figuur 5: MCA volgens OVAM

		Gewicht van deze categorie of factor		
		Techniek 1	Techniek 2	Techniek 3
Milieuhygiënische factoren op lokaal niveau		33%		
	Niveau behalen decretale doelstellingen grond	6,60% Score 1.1	Score 2.1	Score 3.1
	Niveau behalen decretale doelstellingen grondwater	6,60% Score 1.2	Score 2.2	Score 3.2
	Totale vuilvrachtvermindering	6,60% Score 1.3	Score 2.3	Score 3.3
	Rechtstreekse emissie naar andere milieucompartimenten	6,60% Score 1.4	Score 2.4	Score 3.4
	Saneringsduur en beleidsdoelstellingen	6,60% Score 1.5	Score 2.5	Score 3.5
	subtotaal van de categorie	6,60% x score van techniek 1 op elke factor van deze categorie	6,60% x score van techniek 2 op elke factor van deze categorie	6,60% x score van techniek 3 op elke factor van deze categorie
Milieuhygiënische factoren op regionaal/globaal niveau		12%		
	verbruik grondstoffen en gerecycleerde materialen	6,00% Score 1.6	Score 2.6	Score 3.6
	productie van niet-herbruikbaar afval	6,00% Score 1.7	Score 2.7	Score 3.7
	subtotaal van de categorie	6,00% x score van techniek 1 op elke factor van deze categorie	6,00% x score van techniek 2 op elke factor van deze categorie	6,00% x score van techniek 3 op elke factor van deze categorie
technische en maatschappelijke factoren		22%		
	hinder en overlast tijdens sanering	5,50% Score 1.8	Score 2.8	Score 3.8
	gebruiksbeperkingen na sanering	5,50% Score 1.9	Score 2.9	Score 3.9
	aanbrengen schade ten gevolge van sanering	5,50% Score 1.10	Score 2.10	Score 3.10
	veiligheidsmaatregelen tijdens sanering	5,50% Score 1.11	Score 2.11	Score 3.11
	subtotaal van de categorie	5,50% x score van techniek 1 op elke factor van deze categorie	5,50% x score van techniek 2 op elke factor van deze categorie	5,50% x score van techniek 3 op elke factor van deze categorie
Financieel		33%		
	kosten sanering	16,50% Score 1.12	Score 2.12	Score 3.12
	waarde van de restverontreiniging	16,50% Score 1.13	Score 2.13	Score 3.13
	subtotaal van de categorie	16,50% x score van techniek 1 op elke factor van deze categorie	16,50% x score van techniek 2 op elke factor van deze categorie	16,50% x score van techniek 3 op elke factor van deze categorie

	Score techniek 1 = som van alle subtotaal	Score techniek 2 = som van alle subtotaal	Score techniek 3 = som van alle subtotaal
Totaal	100% techniek 1	techniek 2	techniek 3

5.4 Externe kosten en baten volgens SURF-UK

Naast de OVAM deed ook SURF-UK veel onderzoek naar factoren die relevant zijn bij de keuze van een bodemsaneringstechniek. In dit deel zullen deze factoren kort besproken worden, al zullen zij geen deel uit maken van de multicriteria-analyse.

SURF-UK (2011) deelt de relevante factoren tevens in volgens de aard van de factor. Ze gebruiken hiertoe drie categorieën: sociale factoren, economische factoren en milieufactoren.

Sociale factoren

Binnen deze categorie vallen veelal factoren die betrekking hebben op de maatschappij en de naaste omgeving (zonder rekening te houden met milieu-effecten in de naaste omgeving). Tabel 18 geeft elke factor weer, gevolgd door een korte uitleg.

Tabel 18: Sociale factoren volgens SURF-UK en vergelijking met OVAM factoren

Factor	Inhoud
Menselijke gezondheid en veiligheid	Deze factoren kwamen ook reeds terug in de MCA van de OVAM. Men zal hier rekening houden met de mate waarin de sanering het risico voor de menselijke omgeving kan voorkomen en in welke de veiligheid van de werkmensen en de buurtbewoners tijdens de sanering wordt gegarandeerd.
Ethiek en gelijkheid	Belangrijke zaken die beschouwd worden binnen deze factoren zijn bijvoorbeeld of de vervuiler opdraait voor de sanering, of er bepaalde groepen buitenproportioneel veel last hebben van de sanering en of de bedrijven die betrokken zijn bij de sanering ethisch te werk gaan.
Buurt en lokale omgeving	Deze factor werd tevens reeds kort aangehaald door de OVAM. Men houdt hier vooral rekening met hinder omwille van stof, trillingen en dergelijke.
Gemeenschap en betrokkenheid van de gemeenschap	In deze factor tracht men na te gaan wat de invloed van de sanering op de lokale gemeenschap is. Dit zou bijvoorbeeld kunnen inhouden dat men nagaat in welke mate de gemeenschap op de hoogte is van de sanering.
Onzekerheid	Binnen deze laatste factor van de eerste categorie tracht men rekening te houden met de onzekerheid die een bepaalde sanering met zich meebrengt en in welke mate deze aangepast kan worden.

Economische factoren

Deze categorie tracht alle economische effecten in kaart te brengen. Men tracht dit zo volledig mogelijk te doen door geen enkel mogelijk effect uit te sluiten. De verschillende factoren zijn terug te vinden in tabel 19.

Tabel 19: Economische factoren volgens SURF-UK en vergelijking met OVAM factoren

Factor	Inhoud
Directe economische kosten en opbrengsten	Deze factor heeft betrekking op de kosten zoals zij tevens reeds werden opgenomen door de OVAM.
Indirecte economische kosten en opbrengsten	In deze factor tracht men rekening te houden met kosten en opbrengsten die niet onmiddellijk bestaan. Zo zal men bijvoorbeeld rekening houden met veranderingen in de waarde van de grond doordat er saneringen moeten worden uitgevoerd.
Werkgelegenheid & verhoogde kennis	De factor spreekt voor zich, men zal binnen deze factor rekening houden met de stijgende werkgelegenheid die de sanering met zich meebrengt, en de nieuwe kennis die men opdoet doordat men allerlei problemen moet oplossen tijdens de sanering.
Geïnduceerde kosten en baten	In deze factor tracht men vooral rekening te houden met de investeringsopportuniteiten die ontstaan nadat de site gesaneerd is.
Levensduur project en de flexibiliteit van saneringstechniek	Binnen deze factor tracht men simpelweg rekening te houden met de duur van de sanering enerzijds en de mogelijkheid om de sanering af te stemmen op een veranderende situatie anderzijds.

Milieufactoren

Deze laatste categorie tracht rekening te houden met alle factoren die te maken hebben met het milieu. Tabel 20 geeft een korte beschrijving van deze factoren.

Tabel 20: Milieufactoren volgens SURF-UK en vergelijking met OVAM factoren

Factor	Inhoud
Luchtemissies	De factor spreekt voor zich en kwam ook reeds voor in de MCA van OVAM. Men tracht rekening te houden met alle mogelijke vervuilende deeltjes die in de lucht terecht kunnen komen.
Staat van bodem en grond	In deze factor tracht men rekening te houden met de bodem die verandert indien er een sanering plaatsvindt. Dit kan een verbetering, maar tevens een verslechtering zijn.
Grondwater en oppervlaktewater	De derde factor neemt het water in rekening. Men tracht specifiek rekening te houden met waarvoor men het water nog kan gebruiken, of het zijn biologische functie nog kan vervullen en zo voort.
Ecologie	Deze factor tracht na te gaan wat het effect van de sanering is op zaken zoals de fauna en de flora.
Natuurlijke grondstoffen en afval	Ook deze factor kwam reeds voor in de MCA van OVAM. Men zal nagaan hoeveel natuurlijke grondstoffen men verbruikt en hoeveel afval er geproduceerd wordt tijdens de sanering.

Verschillende van deze factoren werden reeds besproken door de OVAM, terwijl andere achterwege werden gelaten. De eerder besproken MCA houdt enkel rekening met de factoren van de OVAM. Deze keuze werd gemaakt in het tijdsbestek van dit onderzoek.

6. Conclusie en aanbevelingen

6.1 Conclusie

Zoals eerder vermeld, tracht deze masterproef een antwoord te geven op de vraag: "In welke mate kan fyto-remediatie een meer rendabele methode zijn om te saneren dan de reeds bestaande, conventionele, bodemsaneringsmethodes?"

De situatie op vlak van bodemvervuiling blijkt in de EU en Vlaanderen nog steeds een groot probleem te zijn. In Vlaanderen was men was reeds goed op weg om de doelstelling in het milieubeleidsrapport 4, waarin gesteld werd dat tegen 2015 op 40% van de gronden waar een sanering nodig was, een BSP gestart zou moeten zijn, te behalen. Tegen 2036 zou op 100% van deze gronden een BSP gestart moeten zijn. In 2011 was dit reeds voor 36% gebeurd en 40% leek dus niet meer veraf. Onder invloed van de financiële crisis en de hoge prijs van bodemsanering vond er echter een afvlakking van het aantal nieuwe gestarte BSP's plaats.

Fyto-remediatie zou mogelijk een oplossing kunnen bieden. In de eerste plaats werd nagegaan wat fyto-remediatie precies inhoudt. Vervolgens werd er een kostenmodel opgebouwd, om zo volgens een vast schema alle kosten in te geven gedurende de levensduur van een fyto-remediatieproject en ten slotte een prijs te bekomen, zodat men fyto-remediatie kan vergelijken met conventionele technieken. Tabel 14 uit hoofdstuk drie wordt hier nogmaals herhaald.

Tabel 14: De kost van fyto-remediatie per m³ en per ton op basis van de gevalstudies

	CS 1 Freiberg	CS 7 Freiberg (wilgen en populieren)	Phytosed – Ech1 Frankrijk (voornamelijk wilgen)
Totale kost (baat) project in €	9 488	(10 718)	395 847
Kost (baat) per m ³ in €	1,95	(1,02)	131,95
Kost (baat) per ton in €	1,36	(0,75)	101,50

Fyto-remediatie blijkt in twee gevallen een duidelijke kosteneffectiviteit te hebben ten opzichte van conventionele saneringsmethodes, waarvan de kostprijs in de inleiding reeds werd weergegeven en een verdere uitleg is terug te vinden in bijlage 1. In het geval van Phytosed – Ech1 is het verschil in kosten met conventionele sanering niet duidelijk. De reden van de hoge kost van fytostabilisatie op deze site is niet duidelijk, al zouden de relatief hoge kosten en de relatief lage biomassa prijs aan de basis hiervan kunnen liggen.

Dit kostenvoordeel wordt echter deels teniet gedaan door de langere tijdsduur van fyto-remediatie. Om hier rekening mee te houden werd het kostenmodel uit hoofdstuk 3 verder uitgebreid met een kosten-effectiviteitsanalyse. Deze uitbreiding houdt rekening met de kost van het

fytoextractieproject, de duur van het fytoextractieproject en de prijs van conventionele sanering. Op deze manier wordt de maximale baat berekend die een site jaarlijkse mag opbrengen, of die de site eenmalig mag opbrengen, opdat de voorkeur wordt gegeven aan fytoextractie boven conventionele sanering. Deze maximale baat werd voor één case vergeleken met de mogelijke opbrengsten die verschillende soorten grondtypes kunnen voortbrengen.

Tabel 21 geeft een overzicht van de indifferentiepunten tussen fytoextractie en conventionele sanering voor de site CS1 Freiberg. Met andere woorden: indien de kost van de conventionele sanering lager ligt dan dit indifferentiepunt, wordt de lagere kostprijs van fytoextractie teniet gedaan door de langere tijdsduur van fytoextractie, en zal men dus de voorkeur geven aan conventionele sanering.

Tabel 21: Overzicht indifferentiepunten tussen conventionele sanering en fytoextractie voor verschillende bestemmingstypes van grond voor site CS1 Freiberg

Bestemming grond	Landbouw	Industrie	Commercieel	Woonzone (open bebouwing)	Woonzone (gesloten bebouwing)
Indifferentiepunt	€56 200	€161 270	€216 700	€317 000	€1 051 000

Maar dit zijn niet de enige criteria die van belang zijn bij de keuze voor een bepaalde saneringsvariant. Naast deze private kosten en baten, moeten ook de maatschappelijke kosten en baten worden opgenomen. In het laatste hoofdstuk werd nagegaan wat de andere factoren waren die een rol spelen bij de keuze van een saneringstechniek. Samengevat is dit het overzicht van deze factoren zoals de OVAM ze identificeerde:

1. Milieuhygiënische factoren op lokaal niveau
 1. Niveau behalen decretale doelstellingen grond
 2. Niveau behalen decretale doelstellingen grondwater
 3. Totale vuilvrachtvermindering
 4. Rechtstreekse emissie naar andere milieucompartimenten
 5. Saneringsduur en beleidsdoelstellingen
2. Milieuhygiënische factoren op regionaal/globaal niveau
 1. Verbruik grondstoffen en gerecycleerde materialen
 2. Productie van niet herbruikbaar afval
3. Technische en maatschappelijke factoren
 1. Hinder en overlast tijdens sanering
 2. Gebruiksbeperkingen na sanering
 3. Aanbrengen van schade tijdens sanering
 4. Veiligheidsmaatregelen
4. Financiële factoren
 1. Kosten van sanering
 2. Waarde van de restverontreiniging

Als antwoord op de centrale onderzoeksvraag, kan dus het volgende gesteld worden: fyto-remediatie kan zeker een te verkiezen saneringsmethode zijn boven reeds bestaande conventionele saneringsmethodes. Er zijn echter te veel factoren om rekening mee te houden om een algemeen besluit te kunnen vormen over de mate waarin fyto-remediatie rendabeler is dan conventionele saneringsmethodes.

De kost van het fyto-remediatieproject zelf is een eerste zeer belangrijke factor. Naarmate dat deze kost daalt, of zelfs volledig verdwijnt en een baat wordt (omdat de geproduceerde biomassa bijvoorbeeld veel opbrengt), wordt de mate waarin fyto-remediatie te verkiezen is boven conventionele saneringsmethodes groter.

Daarnaast is de kost van conventionele sanering een tweede belangrijke factor. Deze kost moet minstens even hoog zijn als de kost van fyto-remediatie. Indien ze kleiner is dan de kost van fyto-remediatie, zal conventionele sanering steeds interessanter zijn dan fyto-remediatie, althans indien men enkel rekening houdt met private kosten en baten, en tijdsduur. Naarmate dat de kost van conventionele sanering stijgt, wordt de mate waarin fyto-remediatie te verkiezen is boven conventionele saneringsmethodes groter.

Een derde belangrijke factor is de tijdsduur van fyto-remediatie. Zolang een bepaalde site niet gesaneerd is, kan de site in kwestie immers niet gebruikt worden voor de doeleinden waarvoor zij normaal gebruikt zou kunnen worden. Naarmate dat de tijdsduur langer wordt, zal de mate waarin fyto-remediatie te verkiezen is boven conventionele sanering kleiner zijn.

De bestemming van de grond is tevens belangrijk. Voor bepaalde grondtypes kan fyto-remediatie interessanter zijn dan voor anderen. Landbouwgrond is in het algemeen goedkoper dan industriegrond, en industriegrond is in het algemeen goedkoper dan woongrond. Voor landbouwgrond zal de mate waarin fyto-remediatie te verkiezen is boven conventionele sanering dus groter zijn dan de mate waarin fyto-remediatie te verkiezen is boven conventionele sanering voor industriegrond. Een zelfde vergelijking is waar wanneer men industriegrond met woongrond vergelijkt. Naarmate dat de grond minder waard is, wordt de mate waarin fyto-remediatie te verkiezen is boven conventionele saneringsmethodes groter.

Maar deze vier zaken zijn niet de enigste doorslaggevende factoren. Indien een beslissing werd genomen uitsluitend op basis van deze factoren, zouden de externe, of maatschappelijke, kosten en baten genegeerd worden. De multicriteria-analyse, zoals zij eerder besproken werd, houdt wel rekening met deze factoren. Aangezien het in rekening brengen van al deze factoren niet het doel is van deze masterproef, zal hier niet uitgebreid op in worden gegaan. Het volstaat om te weten dat men rekening dient te houden met een aantal verschillende andere factoren, en dat naarmate de score van fyto-remediatie op deze factoren groter wordt dan de score van andere, conventionele methodes, fyto-remediatie interessanter wordt.

6.2 Kritische reflectie

Er kwamen slechts schaarse reacties vanuit het Greenland-project om data af te leveren. Verder onderzoek tracht best om deze steekproef te vergroten. Op deze manier kunnen de conclusies die eerder getrokken werden, gecontroleerd en veralgemeend worden. Enkele zaken die zeker onderzocht moeten worden in verder onderzoek zijn de volgende:

De transportkosten van biomassa

Klopt de conclusie die op basis van enkele sites getrokken werd dat het vervoer van KOH veel duurder is als dat van andere gewassen zoals koolzaad en tarwe? Dit kan enkel worden nagegaan indien de steekproef aanzienlijk vergroot wordt. Er kan dan tevens worden nagegaan wat de correlatie is tussen de afstand tot de biomassa centrale en de kostprijs van dit vervoer. Deze correlatie zou berekend kunnen worden voor KOH enerzijds en kleinere gewassen anderzijds.

De kost van het drogen van de oogst en de invloed hiervan op de prijs van biomassa

Er kon reeds geconcludeerd worden dat men er af en toe voor koos om biomassa te laten drogen na het oogsten. Meer data zou kunnen aantonen hoeveel deze kost is per week dat men de gewassen laat drogen. Een grotere dataset zou tevens kunnen nagaan of er een hogere prijs voor de biomassa wordt ontvangen als men langer droogt.

De invloed van een versnipperaar op de prijs van biomassa

Er werd slechts eenmalig melding gemaakt van het gebruik van een versnipperaar om biomassa te versnipperen tot kleine houtstukken. Verder onderzoek kan nagaan wat de invloed van zo een versnipperaar is op de prijs van biomassa. Hieruit kan men dan vervolgens concluderen wat de prijs van de versnipperaar moet zijn, en het verschil in de prijs van de biomassa, opdat de keuze om te versnipperen een rendabele beslissing is.

Planten en vervuiling waarvoor best geen fytoremediatie wordt toegepast

Het zou mogelijk kunnen zijn dat voor bepaalde soorten vervuiling de kost van fytoremediatie veel hoger ligt dan voor andere soorten vervuiling. Verder onderzoek kan nagaan of deze stelling waar is en indien dit zo is, voor welke soorten vervuiling men best wel fytoremediatie toepast en voor welke soorten men best geen fytoremediatie toepast.

Een dergelijk principe geldt ook voor planten. Men zou kunnen nagaan welke planten slechts traag vervuiling opnemen en dus zorgen voor een langere duur van het fytoremediatieproject. Zoals reeds bleek uit deze verhandeling kan de tijdsduur van het project de beslissing om met fytoremediatie te saneren immers danig beïnvloeden.

Uitbreiding multicriteria-analyse

De multicriteria-analyse die besproken werd, zoals zij werd opgesteld door de OVAM, zou mogelijk uitgebreid kunnen worden. Vooral de economische minderwaarden die zich voordoen lijken interessant om rekening mee te houden. Neem bijvoorbeeld een huis dat een groot deel van zijn

waarde verliest omdat er op de grond zelf, of in de nabije omgeving, een stabilisatie werd uitgevoerd. Deze kost kan zo hoog oplopen dat het zeker interessant kan zijn om dit verder na te gaan.

Lijst geraadpleegde werken

- Aspen Law & Business. (2000). Deciding Whether Phytoremediation Is an Applicable Technology. *Hazardous Waste Consultant*, 18(3), 1.5.
- Berhongaray, G., El Kasmioui, O., & Ceulemans, R. (2013). Comparative analysis of harvesting machines on an operational high-density short rotation woody crop (SRWC) culture: One-process versus two-process harvest operation. *Biomass and Bioenergy*, 58(0), 333-342. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.07.003>
- Ciaian, P., Kanés, d. A., Swinnen, J., Van Herck, K., & Vranken, L. (2012). *Comparative analysis of factor markets for agriculture across member states*. Brussels.
- Compernelle, T. (2012). *The cost effectiveness of gentle remediation strategies considering technical uncertainty and reversibility*. Universiteit Hasselt.
- Cunningham, S. D., Berti, W. R., & Huang, J. W. (1995). Phytoremediation of contaminated soils. *Trends in Biotechnology*, 13(9), 393-397. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-7799\(00\)88987-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-7799(00)88987-8)
- Destatis. (2012). *Purchase values of building land and agricultural properties*.
- EMIS. *Concept Bodemluchtextractie*.
- EMIS. Techniek: Landfarming. from <http://emis.vito.be/techniekfiche/techniek-landfarming>
- Environmental Protection Agency. (1997). *EPA reports on in situ treatment*. (1043786X). Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=9710054372&site=ehost-live>.
- European Commission. (2002). *Towards a Thematic Strategy for Soil protection*.
- European Commission, & European Environment Agency. (2010). *The european environment, state and outlook 2010, SOIL*. Luxemburg.
- European Environment Agency. (2000). *Management of contaminated sites in Western Europe*.
- European Environment Agency. (2003). *Europe's Environment: The Third Assessment*.
- Federal Remediation Technologies Roundtable. Bioventing. from http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_1.html
- Federal Remediation Technologies Roundtable. Pyrolysis. from <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-25.html>
- Federal Remediation Technologies Roundtable. Soil Vapor Extraction. from <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-7.html>
- Federal Remediation Technologies Roundtable. Soil Washing. from <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-19.html>
- Goovaerts, L., Lookman, R., Vanbroekhoven, K., Gemoets, J., & Vrancken, K. (2007). Beste Beschikbare Technieken (BBT) bij het uitvoeren van bodemsaneringsprojecten en bij grondreinigingscentra.
- OVAM. Het Bodemsaneringsproject. from <http://www.ovam.be/wat-bsp>
- OVAM. Wanneer bodemonderzoek nodig ? , from <http://www.ovam.be/wanneer-bodemonderzoek-nodig>

- OVAM. (2013). Code van goede praktijk: BATNEEC-afweging van bodemsaneringsprojecten met CO2-calculator.
- Paz Alberto, A. M., & Sigua, G. C. (2012). Phytoremediation: A Green Technology to Remove Environmental Pollutants. *American Journal of Climate Change*.
- Peuke, A. D., & Rennenberg, H. (2005). Phytoremediation. *EMBO Reports*, 6(6), 497-501.
- Salt, D. E., Smith, R. D., & Raskin, I. (1998). PHYTOREMEDIATION. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49(1), 643-668.
- Schnoor, J. (1997). Phytoremediation.
- SURF-UK. (2011). Annex 1: The SuRF-UK Indicator Set For Sustainable Remediation Assessment
- United Nations. (z.d.). *Phytotechnologies*.
- Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., Ruttens, A., . . . Mench, M. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(7), 765-794.
- Vangronsveld, J., Weyens, N., & Witters, N. (2012). PHYTOREMEDIATION: A green and cost-effective technology for remediation of soil and groundwater contaminated with organics.
- Vangronsveld, J., Witters, N., & Weyens, N. (2011). Beslissingsboom fyto-remediatie.
- Vanheusden, B., Hoppenbrouwers, M., & Witters, N. (2011). LEGAL AND ECONOMIC ASPECTS OF CROPS SELECTION FOR PHYTOREMEDIATION PURPOSES AND THE PRODUCTION OF BIOFUEL.
- Vlaamse Milieu Maatschappij. (2013). *Milieurapport Vlaanderen, verontreinigde gronden per saneringsfase*.
<http://www.milieurapport.be/nl/feitencijfers/milieuthemas/bodem/bodemverontreiniging/verontreinigde-gronden-per-saneringsfase/>.
- Vlaamse Overheid. (2011). *MINA 4*.
- Witters, N., Weyens, N., Vangronsveld, J., Janssen, J., & Van Slycken, S. (2012). Grond voor discussie: fyto-remediatie als alternatief voor conventionele saneringstechnologieën

Bijlagen

Bijlage 1: De conventionele saneringstechnieken, uitleg en kostprijs.....	60
Bijlage 2: Maximale eenmalige en jaarlijkse baten voor sites	70
Bijlage 3: Sensitiviteitsanalyses CS1 Freiberg	74
Bijlage 4: Sensitiviteitsanalyses CS7 Freiberg	77
Bijlage 5: Sensitiviteitsanalyse Phytosed – Ech1.....	80
Bijlage 6: Gegevens site CS1 Freiberg.....	83
Bijlage 7: Gegevens site Freiberg CS7.....	85
Bijlage 8: Gegevens site Phytosed – Ech1 Frankrijk	89
Bijlage 9: Bodemsaneringsnormen	91
Bijlage 10: Richtwaarden voor bodemkwaliteit	93

Bijlage 1: De conventionele saneringstechnieken, uitleg en kostprijs

Inleiding

Nadat in het vorige hoofdstuk een antwoord werd gegeven op de vraag wat nu precies de kostprijs van fyto-remediatie is, wordt er in dit hoofdstuk een overzicht gegeven van de kostprijs van conventionele saneringsmethodes. Tabel 22 geeft weer hoe vaak voor elke saneringstechniek een conformiteitsattest werd afgeleverd door OVAM voor sanering in Vlaanderen.

Tabel 22: Overzicht geselecteerde bodemtechnieken tot en met 2010 in Vlaanderen

	Technologie	Aantal sites
Bodemsanering (ex-situ sanering)	Off-site reiniging	2713
	On site reiniging	31
	Storten	64
Grondwatersanering	Lozen/verwerking	2581
	Reïnfiltratie	42
In situ sanering	Bodemluchtexttractie	578
	Persluchtinjectie	139
	Bioventing/biosparging	48
	Reactief scherm	8
	Natuurlijke attenuatie	435
	Fyto-remediatie	4
	Bioprecipitatie	3
	Immobilisatie/neutralisatie	10
	Chemische oxidatie	30
	Stoominjectie	2
	Bio surfactant	3
	Grondwater recirculatiebron	2
	Co-solvent flushing	1
Isolatie	Civieltechnische	56
	Geohydrologische	16

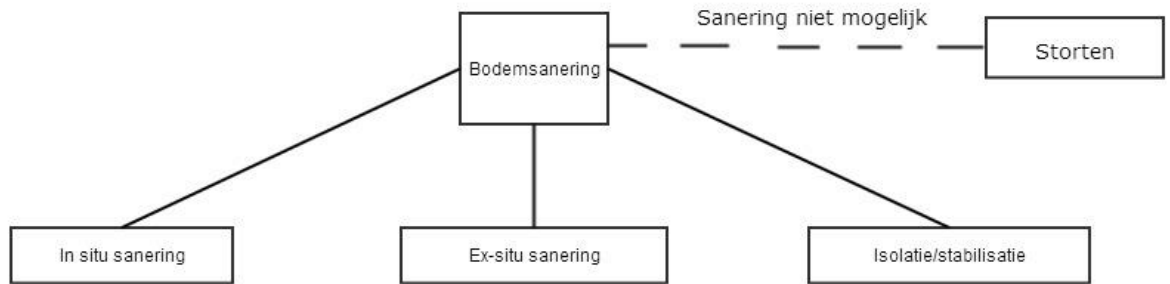
Bron: OVAM (2010) in Vangronsveld et al. (2012)

Uit de tabel blijkt dat ontgraving van de grond het meest wordt toegepast, met vervolgens een reiniging buiten de site in 2713 gevallen. In 31 gevallen wordt de site ontgraven en vervolgens gezuiverd op de site. Tot en met 2010 blijken er ook 64 gevallen te zijn waar sanering niet meer mogelijk was en de grond dus op een stortplaats geplaatst werd.

Er kan ook in situ gesaneerd worden. Hier wordt de grond dus niet ontgraven zoals de in situ reiniging in de vorige paragraaf. Bodemluchtexttractie blijkt de meest toegepaste techniek te zijn, met 578 sites.

Figuur 6 geeft een overzicht van de onderverdeling van bodemsanering.

Figuur 6: Onderverdeling bodemsanering

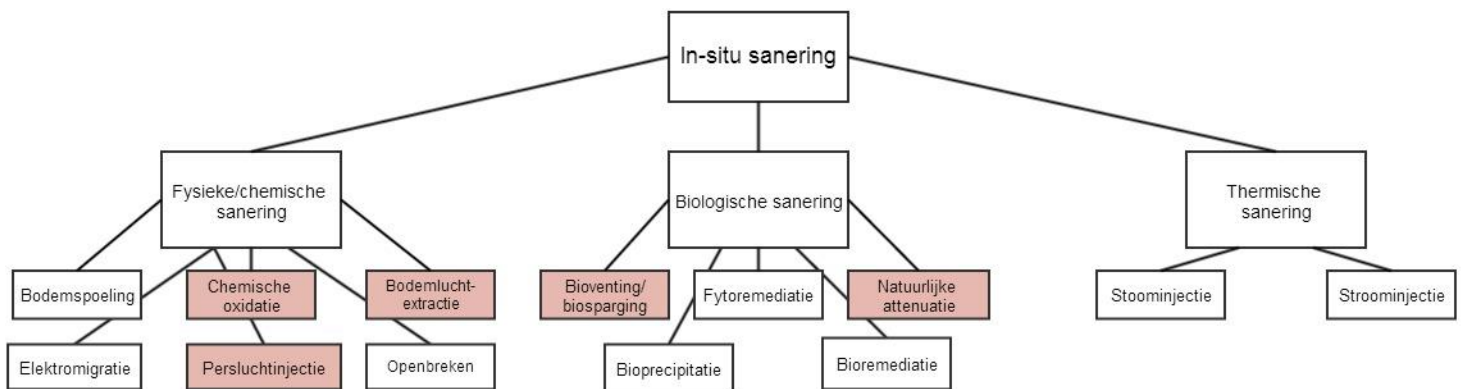


In de rest van dit hoofdstuk zullen de meest frequente saneringsmethodes kort worden toegelicht per ondersoort van bodemsanering. Hiervan zal tevens de kostprijs weergegeven worden. Merk op dat er enkel bodemsanering besproken wordt, alle grondwatertechnieken, zoals reactieve schermen en geohydrologische beheersing zullen niet ter sprake komen in dit hoofdstuk.

In-situ sanering

Het EPA (1997) stelt het volgende: in situ sanering houdt in dat er bepaalde processen worden toegepast op de grond om vervuiling af te breken, te verwijderen of te stabiliseren, zonder het gros van de bodemgrond te verwijderen. Er zijn drie soorten in-situ sanering. Elk van deze soorten bestaat uit een aantal saneringstechnieken. Een totaalbeeld wordt weergegeven in figuur 7.

Figuur 7: In-situ sanering



De saneringsmethodes die in tabel 22 vijf of meer keer voorkomen zullen besproken worden en de kostprijs zal weergegeven worden. Dit zijn de grijsgekleurde technieken. De resterende technieken zullen heel kort gedefinieerd worden.

Bodemluchtextractie

Bodemluchtextractie houdt volgens Goovaerts et al. (2007) in dat vluchtige verbindingen uit de bodem verwijderd worden door het afzuigen van de bodemlucht. Zodra deze vluchtige verbindingen afgezogen zijn, zal het evenwicht in de bodem zich opnieuw herstellen, waardoor de concentratie

die in de bodem zelf zit vermindert. De afgezogen bodemlucht kan vervolgens gereinigd worden. Deze techniek kan worden toegepast op vluchtige stoffen.

Volgens Schnoor bedraagt de kostprijs van deze methode \$250-500 per m³. Onderzoek van de Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR) maakte een onderscheid tussen grote en kleine sites, en lage en hoge complexiteit van de site. De resultaten van dit onderzoek vindt u terug in tabel 23.

Tabel 23: Kost van bodemluchtexttractie per type site

	Kleine site		Grote site	
	Weinig complex	Erg complex	Weinig complex	Erg complex
Kost per m ³	\$1 275	\$1 485	\$405	\$975

Bron: Federal Remediation Technologies Roundtable

Goovaerts et al. maken ook een schatting van de kost van bodemluchtexttractie, zonder behandeling van de lucht. Deze wordt weergegeven in tabel 24.

Tabel 24: Kosten van bodemluchtexttractie.

Specificatie kost	Kost
Exploitatiekosten basisuitvoering: max 500m ³ per uur en 200 millibar onderdruk	€750-1 500 per maand
Filters	€50-100 per meter filter
Drainers	€15-200 per meter drain

Bron: Goovaerts et al. (2007)

Persluchtinjectie

Bij het proces van persluchtinjectie wordt er lucht onder druk in de bodem geïnjecteerd (Goovaerts et al., 2007). Deze injectie gebeurt in de verzadigde zone van de grond, waardoor de vervuiling door de poriën van de bodem naar boven stijgt naar de onverzadigde zone van de grond. Hier kan ze vervolgens worden opgenomen door gebruik te maken van bodemluchtexttractie. Persluchtinjectie kan dus niet op zich gebruikt worden.

De kosten worden weergegeven in tabel 25. Deze kosten komen extra bovenop de kosten van bodemluchtexttractie.

Tabel 25: Kosten van persluchtinjectie.

Specificatie kost	Kost
Exploitatiekosten basisuitvoering: max 50m ³ per uur en 2 bar overdruk	€750-1500 per maand
Filters	€50-100 per meter

Bron: Goovaerts et al. (2007)

Chemische oxidatie

Goovaerts et al. (2007) definiëren chemische oxidatie als zijnde het proces waarbij de vervuiling wordt vernietigd in de grond door middel van een oxidatiemiddel dat geïnjecteerd wordt in de grond. De techniek kan worden toegepast op de meeste organische polluenten.

De kostprijs van deze techniek varieert sterk. Goovaerts et al. halen Amerikaans onderzoek aan waar een kostprijs tussen de \$40-240 per m³ ligt. Zij maken ook sprake van cijfers van een Nederlandse leverancier, die de kostprijs schat op gemiddeld €40-50 per m³. Er moeten, vooraleer deze techniek kan toegepast worden, wel vooronderzoeken worden uitgevoerd. Deze kosten liggen gemiddeld tussen de €2000 en €5000.

Bioventing

Bioventing is een eerste soort biologische sanering. Deze techniek houdt in dat men lucht in de grond gaat injecteren om de biodegradatie van de vervuiling te stimuleren (Goovaerts et al., 2007). Bioventing moet net als persluchtinjectie steeds in combinatie met bodemluchtextractie worden uitgevoerd.

De kosten volgens de FRTR van dit proces worden in tabel 26 weergegeven.

Tabel 26: Kosten in € per m³ voor bioventing.

	Kleine site		Grote site	
	Weinig complex	Erg complex	Weinig complex	Erg complex
Kost per m ³	\$928	\$970	\$79	\$109

Bron: Federal Remediation Technologies Roundtable

Biosparging

De techniek van biosparging is erg gelijkaardig aan bioventing. Men gaat hier echter lucht injecteren onder de grondwaterspiegel (Goovaerts et al., 2007). Zo wordt wederom de biologische afbraak gestimuleerd. Biosparging moet wederom in combinatie met bodemluchtextractie worden toegepast.

De uitvoeringskosten van biosparging volgens Goovaerts et al., exclusief extractie en zuivering van de lucht, bedragen €12,5 tot €25 per m³. Men dient hier ook nog de kosten bij te tellen voor het installeren van luchtinjectiefilters (€250-500), de installatie van een luchtinjectiesysteem (€5 000-10 000) en van de haalbaarheidsproef (€12 500-20 000).

Natuurlijke attenuatie

Natuurlijke attenuatie houdt in dat men de vervuilingsgraad in de bodem gaat laten degraderen door natuurlijke processen (Goovaerts et al., 2007). Deze saneringstechniek zal wel van dichtbij gemonitord moeten worden.

De kosten van natuurlijke attenuatie zijn moeilijk in te schatten. Kosten die door Goovaerts et al. worden aangehaald zijn: de kost van het voorafgaande haalbaarheidsonderzoek, de kost van de langdurige monitoring en de mogelijke financiële kost die ontstaat wanneer het terrein zijn waarde verliest als natuurlijke attenuatie niet succesvol is.

Overige technieken (Goovaerts et al., 2007)

Bodemspoeling bestaat uit vier soorten: infiltratie van water, co-solvent flushing, biosurfactantflushing en grondwater recirculatiebronnen. Infiltratie van water houdt in dat water in de grond wordt gepompt om droogteschade door oppompen van water te voorkomen en om de grond effectiever te doorspoelen bij pump & treat methodes. Co-solvent flushing houdt in dat men alcohol toevoegt aan water, dit vervolgens in de grond pompt, om op deze manier sneller de vervuiling op te nemen. Biosurfactantflushing houdt in dat men detergents aan water toevoegen die er voor zorgen dat vervuiling gemakkelijker loskomt uit de bodem en sneller opgenomen worden door het grondwater

Elektromigratie houdt in dat er anodes en kathodes in de grond worden gebracht, bepaalde vervuiling wordt zo aangetrokken.

Openbreken is een verbeteringstechnologie die men toepast samen met een andere technologie. Het houdt in dat men extra gaten gaat maken in de grond om zo de effectiviteit van veel in-situ methodes te verbeteren.

Bioremediatie en bioprecipitatie zijn beiden technieken die inhouden dat er additieven zoals bacteriën aan water worden toegevoegd om biologische afbraak te stimuleren.

Stoominjectie betekent dat er stoom in de grond wordt geïnjecteerd, dit zal er voor zorgen dat de bodem opwarmt, wat de vervuilende stoffen vluchtiger maakt waardoor ze gemakkelijker kunnen worden opgenomen door bodemluchtexttractie

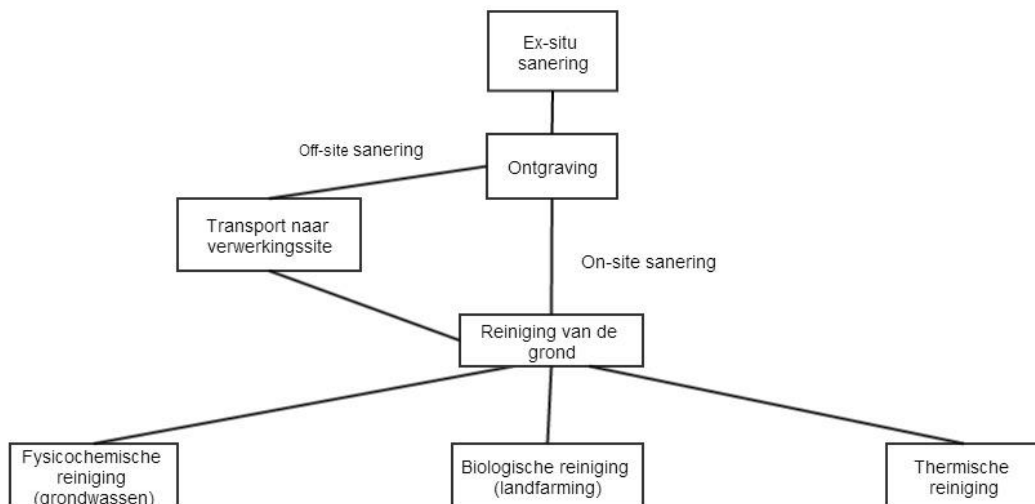
Stroominjectie werkt volgens hetzelfde principe als stoominjectie, maar in dit geval wordt er een elektrisch veld opgezet in de bodem om warmte te generen.

Ex-situ sanering

Zoals reeds eerder vermeld kan er naast in-situ sanering, waarbij het grootste deel van de grond niet verwijderd wordt, ook bodemsanering in de vorm van ex-situ sanering plaatsvinden. De grond zal dan eerst ontgraven moeten worden. Deze afgegraven grond wordt vervolgens op een externe locatie (off-site sanering), of op de site zelf gesaneerd (on-site sanering). Bij de bespreking van de technieken om ontgraven grond te reinigen zal er geen onderscheid worden gemaakt tussen off-

site sanering en on-site sanering, daar bij beiden soorten dezelfde technieken worden toegepast. Figuur 8 geeft een overzicht van dit proces. Merk op dat volgens Goovaerts et al. (2007) fysicochemische reiniging enkel on-site wordt toegepast voor hoeveelheden groter dan 15 000 ton.

Figuur 8: Ex-situ sanering



Ontgraving

Vooraleer men kan overgaan tot de zuivering van de bodem, moet deze eerst uitgegraven worden. De gemiddelde kost om bodem uit te graven bedraagt €2,5 tot €10 per m³ (Goovaerts et al., 2007).

Transport en overslag

Indien men off-site wenst te saneren moet men de vervuilde bodem afvoeren naar een verwerkingsplaats. Van der Gun (zoals geciteerd in Goovaerts et al., 2007) onderscheidt enkele belangrijke kosten waarvan sprake is bij het transport en overslag van afgegraven bodem. Tabel 27 geeft deze kosten weer. Merk op dat hier wederom een kost €2,5 tot €10 per m³ wordt opgenomen om de vrachtwagen te laden. Dit is geen dubbeltelling met de cijfers van ontgraving, er worden volgens Goovaerts et al. immers twee graafmachines gebruikt, één machine om de grond te ontgraven en te storten op een bepaalde plaats en één machine om de gestorte grond vervolgens op de vrachtwagen te plaatsen. Uit deze tabel blijkt ook dat de inrichting van een wasplaats op de saneringslocatie noodzakelijk is. Deze wasplaats zorgt er voor dat de reiniging van de vrachtwagens na het vervoer op een gecontroleerde manier gebeurt.

Tabel 27: Transport- en overslagkosten

Specificatie kost	Kost
Laden uit opslagplaats met hydraulische graafmachine/shovel	€2,5-10 per m ³
Transport per vrachtwagen	€0,07-0,17 per ton/km
Lossen op eindbestemming	€0,15-0,50 per ton
Inrichting wasplaats op saneringslocatie	€7 500-10 000 (eenmalige kost)

 Bron: Van der Gun (zoals geciteerd in Goovaerts et al., 2007)

Fysicochemische reiniging (grondwassen)

De eerste stap in het fysicochemische reinigingsproces (Goovaerts et al., 2007) is het toevoegen van water aan de vervuilde bodem, om deze vervolgens intens te roeren tot men een slurry bekomt. Hierna zal men de organische delen en de fijne (minerale) delen van elkaar scheiden. Dit gebeurt op basis van deeltjesgrote en dichtheid. De afgescheiden delen worden vervolgens steekvast gemaakt, veelal door het gebruik van zeefbandpersen (dit zijn twee loopbanden vlak boven elkaar, waarbij de bovenste een echte loopband is en de onderste uit een filter bestaat, op deze manier kan het water uit de afgescheiden delen worden geperst).

Aan het ander deel van de afgegraven grond, d.w.z. de grond waarvan een gedeelte werd afgescheiden zoals uitgelegd in de vorige paragraaf, kan men vervolgens chemicaliën worden toegevoegd aan het water dat aan de bodem wordt toegevoegd. Dit zal er voor zorgen dat de verontreinigingen in de afgegraven grond beter oplosbaar zijn in het water.

De laatste stap is het ontwateren van de grond en het reinigen van het proceswater in een aparte installatie.

Deze saneringsvariant kan worden toegepast voor bodems met een beperkt gehalte fijne minerale delen (Goovaerts et al., 2007). Men kan dit proces voor vrijwel alle soorten vervuiling gebruiken. Een volledige reiniging van de grond is vaak wel niet mogelijk. Zo kan er bij metalen ongeveer 90% van de totale vervuiling verwijderd worden.

De kost van deze methode wordt weergegeven in tabel 28. Merk op dat het mogelijk is om on-site te reinigen vanaf 15 000 ton vervuilde grond. Er moet dan echter wel een extra kost worden opgenomen voor de mobilisatie en demobilisatie van de installatie.

Tabel 28: De kost van fysicochemische reiniging (Europese cijfers).

	Kosten (per ton)	Kosten mobilisatie/demobilisatie
Reiniging off-site	€30-70	
Reiniging on-site vanaf 15 000 ton	€30-50	€25 000

Bron: Goovaerts et al. (2007)

Het FRTR haalt tevens kostendata voor grondwassen aan. Deze kosten zijn terug te vinden in tabel 29. Het FRTR maakt een onderscheid tussen kleine en grote sites.

Tabel 29: De kost van fysicochemische reiniging (Amerikaanse cijfers).

	Kleine site	Grote site
Kost per m ³ grond	\$187	\$70
Kost per ton grond ¹	Circa \$110	Circa \$40

Bron: FRTR

¹ eigen omrekening op basis van een totaal volume aan grond van respectievelijk 13 000 voor de kleine site en 260 000 voor de grote site.

Biologische reiniging (landfarming)

Landfarming, ook wel biobedden genaamd, kan zowel on-site als off-site worden toegepast om afbreekbare verbinding te zuiveren (EMIS). Men gaat enkele parameters beïnvloeden om dit afbraakproces optimaal te laten verlopen. De belangrijkste van deze parameters is het zuurstofgehalte in de grond, dat hoog gehouden moet worden. Daarnaast kan men ook de structuur van de grond, het gehalte aan nutriënten, het vochtgehalte, de temperatuur en het aantal bacteriën beïnvloeden.

De techniek kan worden toegepast op grond met een goede doorlaatbaarheid (Goovaerts et al., 2007). Klei- en leemgronden zullen moeilijker zijn om te behandelen, al is dit niet onmogelijk indien men structuurverbeteraar toevoegt. Men kan deze reinigingsmethode enkel toepassen op biologisch afbreekbare producten, zoals benzine en dieselolieachtige vervuiling. Zwaardere olieproducten kunnen niet effectief gereinigd worden door gebruik te maken van biologische reiniging.

De kost is afhankelijk van de afbreekbaarheid van de pollutanten. Het verwijderen van gemakkelijk afbreekbare vervuiling kost volgens EMIS ongeveer €30-55 per m³ grond. Voor intensieve reiniging van verbindingen die moeilijker afbreekbaar zijn kan deze kost evenwel oplopen tot €100-150 per m³ grond.

Thermische reiniging

Thermische reiniging houdt in dat de grond verhit wordt, meestal in een roterend trommelsysteem (Goovaerts et al., 2007). De verontreiniging vervluchtigt dan of er vindt pyrolyse plaats. Pyrolyse houdt volgens het FRTR in dat organische vervuiling opgedeeld wordt in gassen, kleine hoeveelheden vloeistof en vast residu, het gas heeft dan verdere behandeling nodig.

Zodra er gassen ontstaan, hetzij door directe vervluchtiging, hetzij door pyrolyse, worden deze naar een gasbehandelingssysteem geleid om verwerkt te worden. De verontreinigingen worden hier geoxideerd. De grond die achterbleef na de vervluchtiging van de verontreiniging wordt ten slotte ook nog afgekoeld met water om stofvorming te voorkomen.

Thermische reiniging kan tot een vochtpercentage van de grond van 35-40% (Goovaerts et al., 2007). Een hoger percentage zou de energiekosten te hoog doen oplopen. Enkele organische verontreiniging kan met deze methode verwijderd worden. Men kan tot 99% van de verontreiniging uit de grond verwijderen.

De kosten van thermische reiniging zijn hoger dan de twee voorgaande reinigingsmethodes. De grote investeringen en het hoge energieverbruik liggen aan de basis hiervan. Tabel 30 geeft de kost van thermische reiniging weer. Net zoals bij fysicochemische reiniging is het mogelijk om on-site te reinigen vanaf 15 000 ton grond. Er komt dan wel wederom een mobilisatie- en demobilisatie kost bij.

Tabel 30: Kost van thermische reiniging.

	Kosten (per ton)	Kosten mobilisatie/demobilisatie
Reiniging off-site	€65-80	
Reiniging on-site (vanaf 15 000 ton)	€40-60	€25 000

Bron: (Goovaerts et al., 2007)

Isolatie, stabilisatie en storting

Men kan er voor kiezen om geen poging te doen om de vervuiling te verwijderen. Indien men dit kiest zijn er enkele opties, die hier besproken worden.

Civieltechnische beheersing

Civieltechnische beheersing tracht te voorkomen dat men in contact komt met de verontreinigde grond en dat er neerslag infiltreert in de grond of verontreiniging verdampt uit de grond. Concreet houdt dit dus in dat men de vervuiling enkel wil isoleren. Er zijn drie soorten technieken die men kan toepassen om horizontale bovenafdichtingen aan te leggen.

De eerste mogelijkheid is om de grond langs boven af te dichten met civieltechnische constructiematerialen zoals beton of asfalt. Ten tweede kan men kunststofmembranen plaatsen en hier schone grond bovenop plaatsen. Op deze manier kan de bovenste, schone, grondlaag niet vervuild geraken. Ten derde kan men een leeflaagconstructie aanleggen. Dit is een laag van circa één meter zuivere grond die bovenop de vervuiling wordt geplaatst. De dikte van deze laag zal dan voorkomen dat men, bij normaal gebruik van de grond, in contact komt met de vervuiling

De kosten van deze drie technieken worden weergegeven in tabel 31.

Tabel 31: Kosten aanbrengen bovenafdichting

Soort afdichtende laag	kosten
Aanleggen van asfalt of betonnen afdichting	€40-75 per m ²
Aanleggen van kunststofmembraan	€5-15 per m ²
Aanleggen van schone laag grond	€12 per m ³

Bron: Van der Gun et al. (2000) en Organisatie voor Bodemsaneerders (2004) (zoals geciteerd in Goovaerts et al., 2007)

Immobilisatie/neutralisatie

Naast het ter plaatse isoleren van vervuiling, kan men er ook voor kiezen om het te immobiliseren, ook wel neutraliseren genaamd. Dit kan zowel in-situ, als op een externe lozingslocatie. Goovaerts et al. (2007) definiëren immobilisatie als de techniek waarbij de chemische en fysische eigenschappen van vervuiling worden veranderd, om zo te zorgen dat de vervuiling in een stabiele structuur komt vast te liggen. Men kan organische of anorganische bindmiddelen toevoegen, deze zullen de structuur van de bodem wijzigen. Op deze manier zal er geen migratie van de vervuiling meer mogelijk zijn.

De kostprijs wordt door Schnoor geschat op \$90-200 per m³. Het FRTR schat de kost voor ondiepe vervuiling op \$50-80 per m³ en de kost voor diepere vervuiling op \$190-330 per m³. Goovaerts et al. schatten de kost van immobilisatie op €90 per ton.

Storting

Indien geen enkel van voorgaande technieken mogelijk is kan men er voor kiezen om de grond uit te graven en vervolgens te storten. De grond wordt dan op een bergingsplaats geïsoleerd zodat de vervuiling op geen enkele mogelijke manier zich nog kan verspreiden. Hiertoe heeft de stortplaats een boven- en onderafdichting.

De kosten van het storten van verontreinigen, die bovenop de kosten van ontgraving en transport moeten worden geteld kunnen oplopen tot €100 per ton grond.

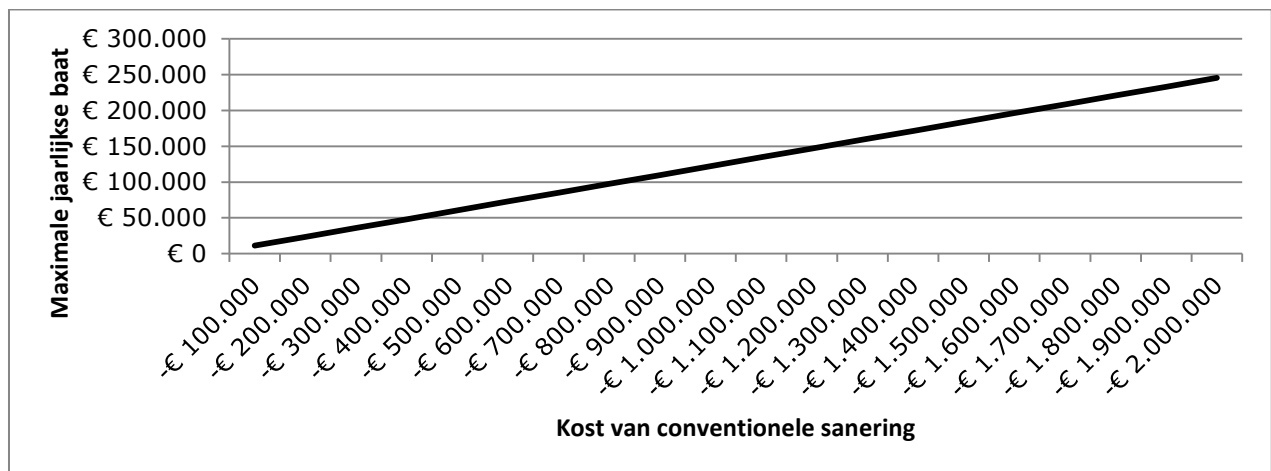
Bijlage 2: Maximale eenmalige en jaarlijkse baten voor sites

CS 1 Freiberg: jaarlijkse baat

Figuur 9 geeft weer wat de maximale jaarlijkse baat mag zijn die de site in Freiberg mag genereren opdat men beter fytoextractie toepast dan conventionele sanering, bij een kost van fytoextractie van €12 368. De X-as toont de uitgave die men maakt indien men conventioneel saneert, deze zal steeds negatief zijn. De Y-as toont de maximale jaarlijkse baat die de site mag genereren opdat fytoextractie interessanter is dan conventionele sanering. Uit de figuur blijkt dat fytoextractie steeds interessanter wordt naarmate de kost van conventionele sanering duurder wordt.

Zo mag de site maximaal jaarlijks € 11 159 opbrengen opdat fytoextractie interessanter is dan conventionele sanering, wanneer deze conventionele sanering €100 000 kost. Wanneer de kost van conventionele sanering oploopt tot €2 miljoen is deze maximale baat €245 412. Concreet betekent dit dat, wanneer conventionele sanering €100 000 kost, en men na sanering meer dan €11 160 per jaar kan verdienen door het gebruik van de site, men best conventioneel saneert in plaats van fytoextractie toe te passen. Grafisch gezien past men op elk punt dat boven de grafiek beter conventionele sanering toe dan fytoextractie.

Figuur 9: Maximale jaarlijkse baat die site CS 1 Freiberg mag genereren gegeven een kost van fytoextractie van €12 368, opdat fytoextractie rendabeler is dan conventionele sanering (duur fytoextractie: 10 jaar)



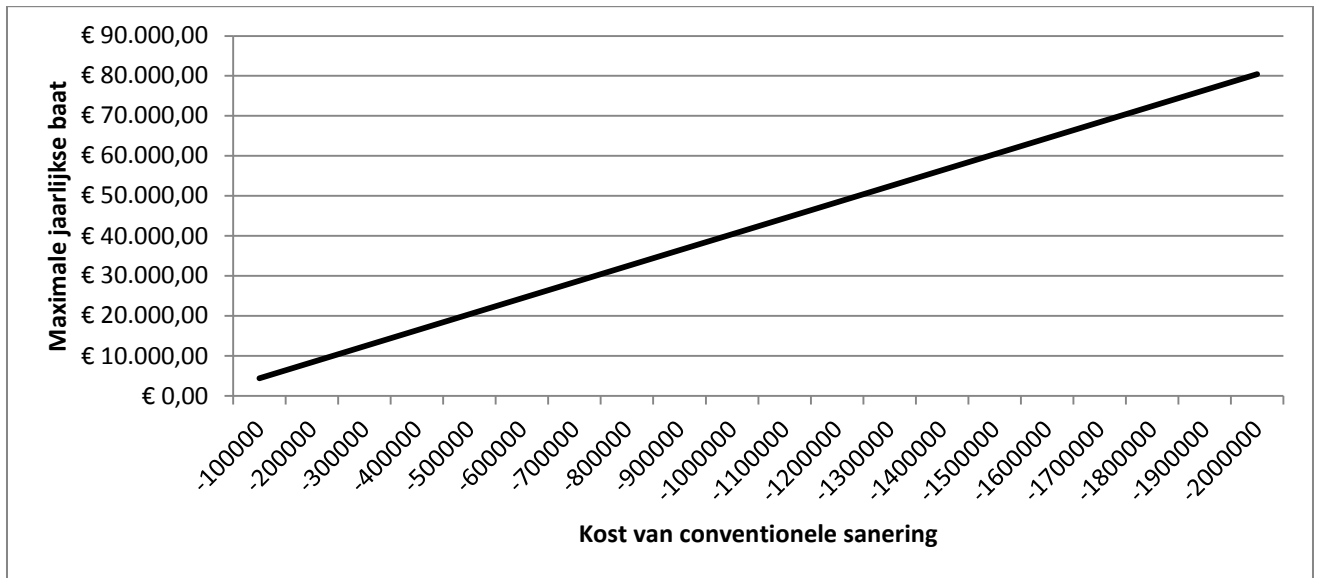
CS 7 Freiberg: jaarlijkse baat

Zoals reeds eerder vermeld, wordt de duur van fytostabilisatie als oneindig beschouwd. Deze site brengt geen kost voort, maar een baat van €10 718. Dit is omwille van de hoge opbrengst aan biomassa die zij genereert. Toch bestaat de mogelijkheid dat conventionele sanering interessanter is dan stabilisatie, omdat men bij stabilisatie niet meer over de grond zal kunnen beschikken, terwijl dit na een conventionele sanering wel het geval is.

Figuur 10 toont aan dat de maximale jaarlijkse baat waarbij men beter fytostabilisatie toepast dan conventionele sanering fluctueert van €4 429 (wanneer de conventionele sanering €100 000 kost) tot €80 429 (wanneer conventionele sanering €2 miljoen kost). Concreet betekent dit dat, wanneer

deze site meer dan €4 429 kan opbrengen per jaar, en de conventionele sanering €100 000 kost, men best conventioneel saneert. Rekening houdende met een site die 3,5 hectare groot is, lijkt de kans dat men conventioneel dient te saneren eerder groot.

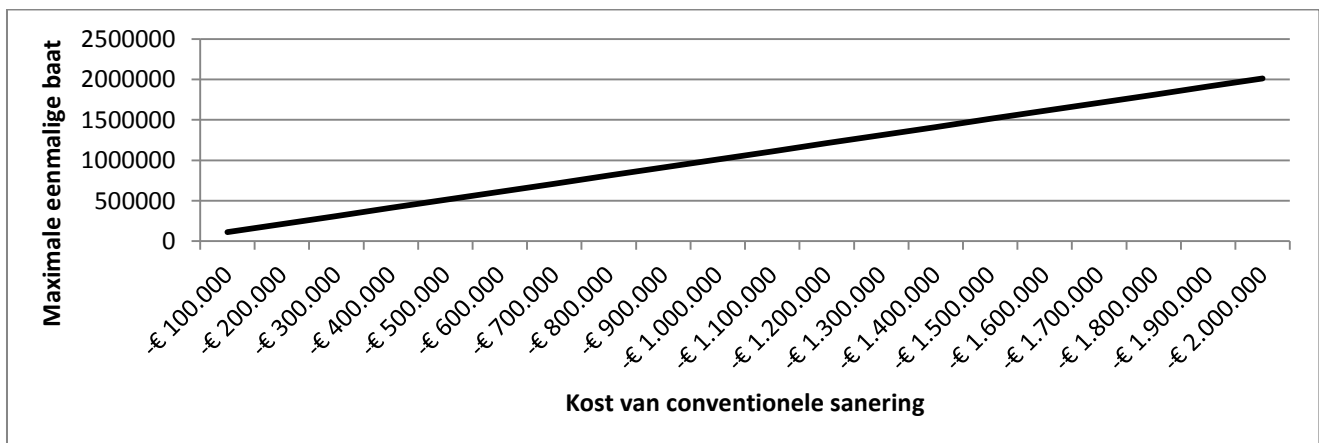
Figuur 10: Maximale jaarlijkse baat die site CS 1 Freiberg mag generen gegeven een baat van fyto-stabilisatie van €10 718, opdat fyto-stabilisatie rendabeler is dan conventionele sanering (duur fyto-stabilisatie: oneindig)



CS 7 Freiberg: eenmalige baat

Figuur 11 geeft de maximale eenmalige baat weer die de site mag generen na sanering opdat fyto-stabilisatie beter is dan conventionele sanering. Deze varieert van ongeveer €110 708 wanneer de conventionele sanering €100 000 kost, tot € 2 010 708 wanneer de conventionele sanering €2 miljoen kost. Dit wil zeggen dat wanneer de site niet verkocht kan worden voor meer dan €110 708 wanneer de conventionele sanering €100 000 kost, men best fyto-stabilisatie toepast.

Figuur 11: Maximale eenmalige baat die site CS 7 Freiberg mag generen gegeven een baat van fyto-stabilisatie van €10 718, opdat fyto-stabilisatie rendabeler is dan conventionele sanering (duur fyto-stabilisatie: oneindig)



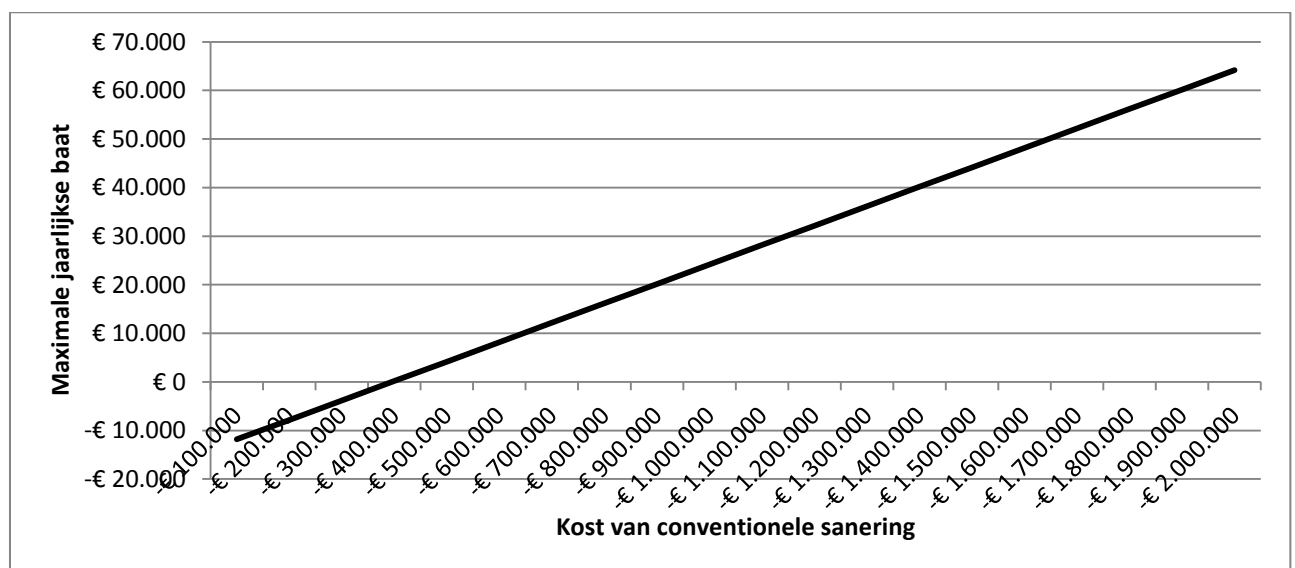
Phytosed – Ech1: jaarlijkse baat

De derde en laatste case die bestudeerd wordt is de site Phytosed – Ech1 in Frankrijk. Men heeft hier KOH staan, meer bepaald wilgen. Deze worden gebruikt om de vervuiling te stabiliseren.

De levensduur van het project is als dusdanig oneindig. De kost van fytostabilisatie bedraagt in totaal €395 847. Figuur 12 geeft grafisch de maximale baat weer die de site jaarlijks mag voortbrengen opdat fytostabilisatie interessanter is dan conventionele sanering.

Indien de kost van fytostabilisatie hoger ligt dan deze van conventionele sanering, zoals dit het geval is in een deel van de onderstaande grafiek, is conventionele sanering steeds meer rendabel dan fytostabilisatie. Pas vanaf een kost van €395 847 voor conventionele sanering, komt fytostabilisatie in aanmerking. Zo mag de maximale jaarlijkse baat ongeveer €166 zijn opdat fytostabilisatie een beter alternatief is dan conventionele sanering, wanneer conventionele sanering €400 000 kost. Deze jaarlijkse baat wordt steeds hoger naarmate dat de kost van conventionele sanering hoger wordt. Zo is deze baat €64 166 wanneer de kost van conventionele sanering €2 miljoen bedraagt.

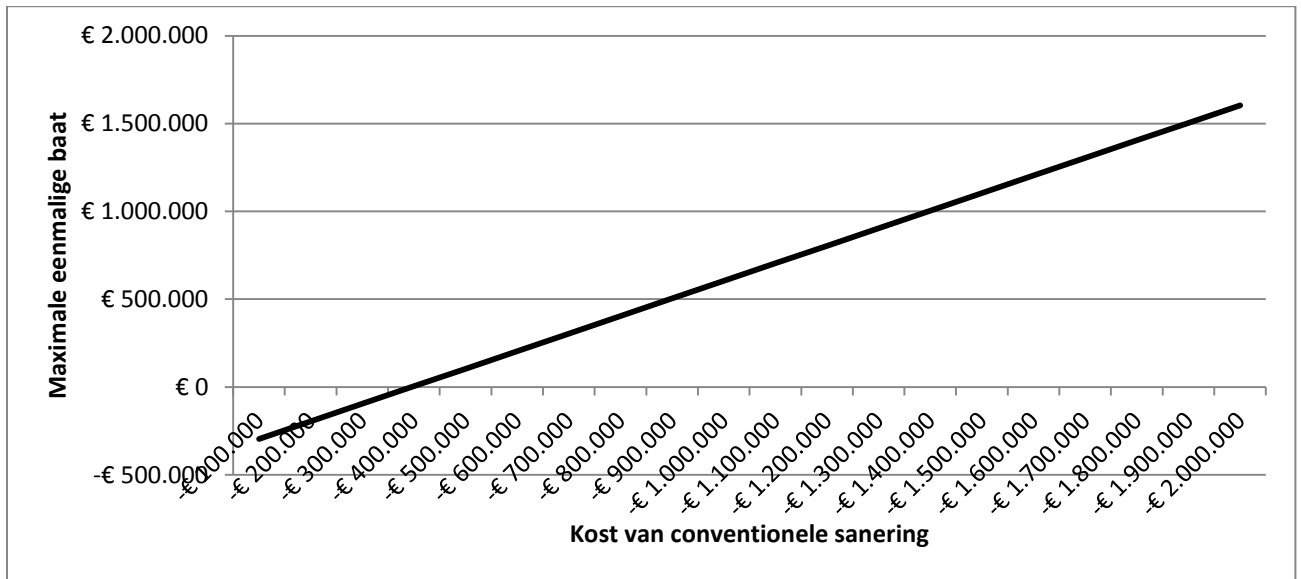
Figuur 12: Maximale jaarlijkse baat die site Phytosed – Ech1 mag generen gegeven een kost van fytostabilisatie van €395 847, opdat fytostabilisatie rendabeler is dan conventionele sanering (duur fytostabilisatie: oneindig)



Phytosed – Ech1: eenmalige baat

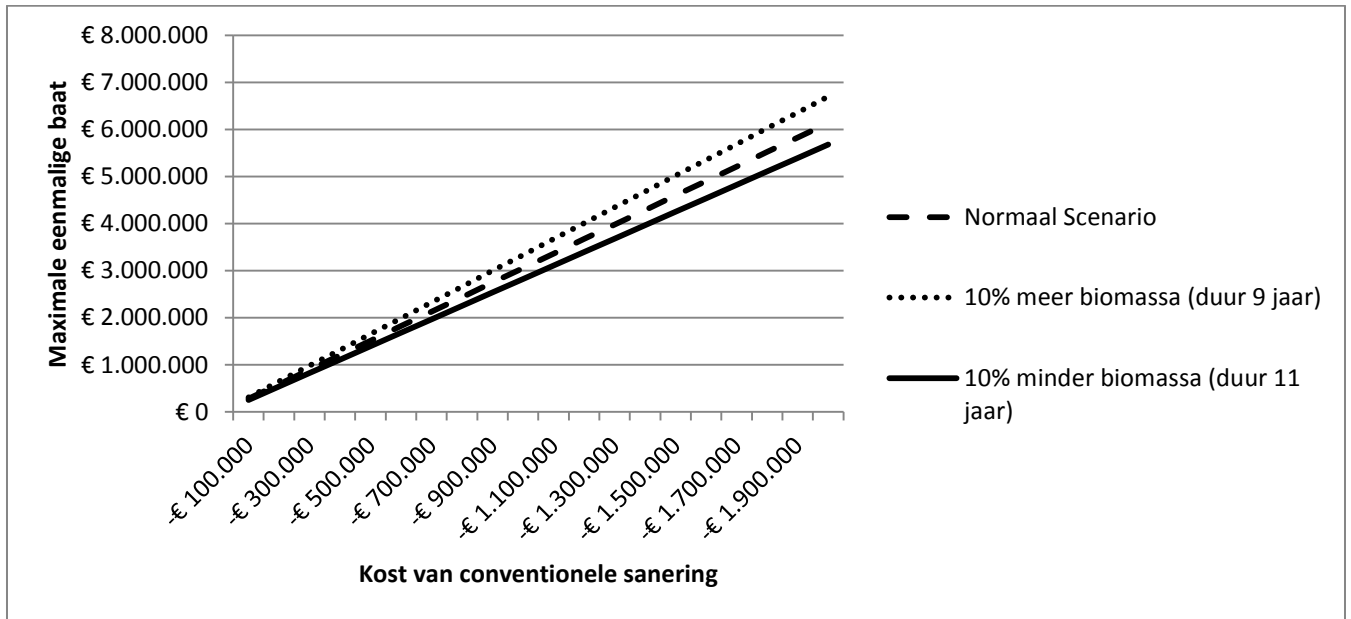
Figuur 13 geeft de maximale eenmalige baat weer die de site mag generen opdat men beter fytostabilisatie toepast dan conventionele sanering. Net zoals in de vorige paragraaf, is conventionele sanering steeds beter dan fytostabilisatie, indien de kostprijs van conventionele sanering lager is. Vanaf een kost van conventionele sanering van €395 847 kan men dus fytostabilisatie overwegen. Zo mag de maximale eenmalige baat bij een kost van conventionele sanering van €400 000 bijvoorbeeld ongeveer €4 153 zijn. Deze maximale baat wordt steeds hoger naarmate de prijs van conventionele sanering stijgt. Wanneer conventionele sanering €2 miljoen kost, is de maximale eenmalige baat € 1 604 153

Figuur 13: Maximale eenmalige baat die site Phytosed – Ech1 mag generen gegeven een kost van fytostabilisatie van €294 702, opdat fytostabilisatie rendabeler is dan conventionele sanering (duur fytostabilisatie: oneindig)

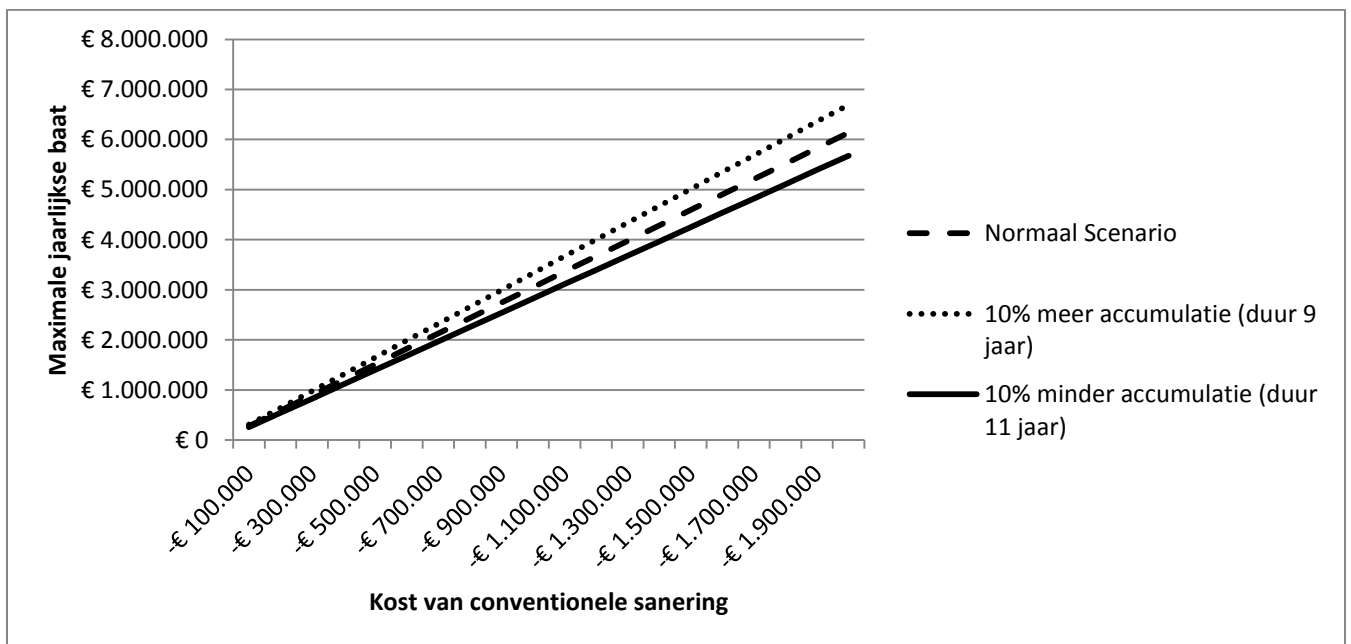


Bijlage 3: Sensitiviteitsanalyses CS1 Freiberg

Figuur 14: Sensitiviteitsanalyse biomassa CS1 Freiberg

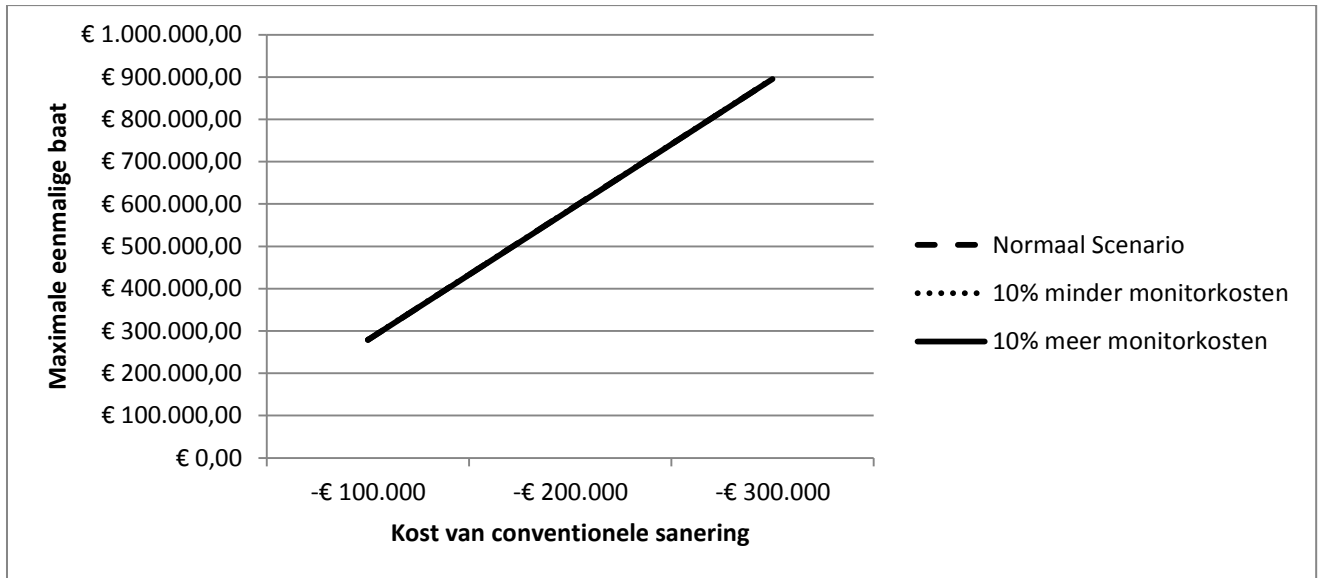


Figuur 15: Sensitiviteitsanalyse accumulatie CS1 Freiberg



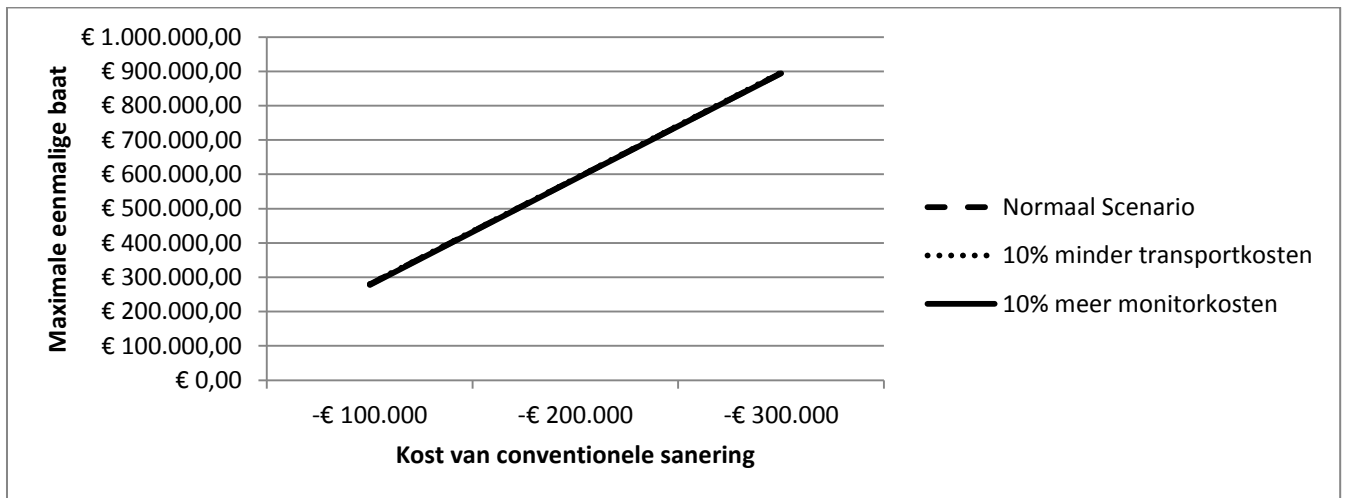
Figuur 16: Sensitiviteitsanalyse monitorkosten CS1 Freiberg

Weinig verschil, zelfs op kleine schaal



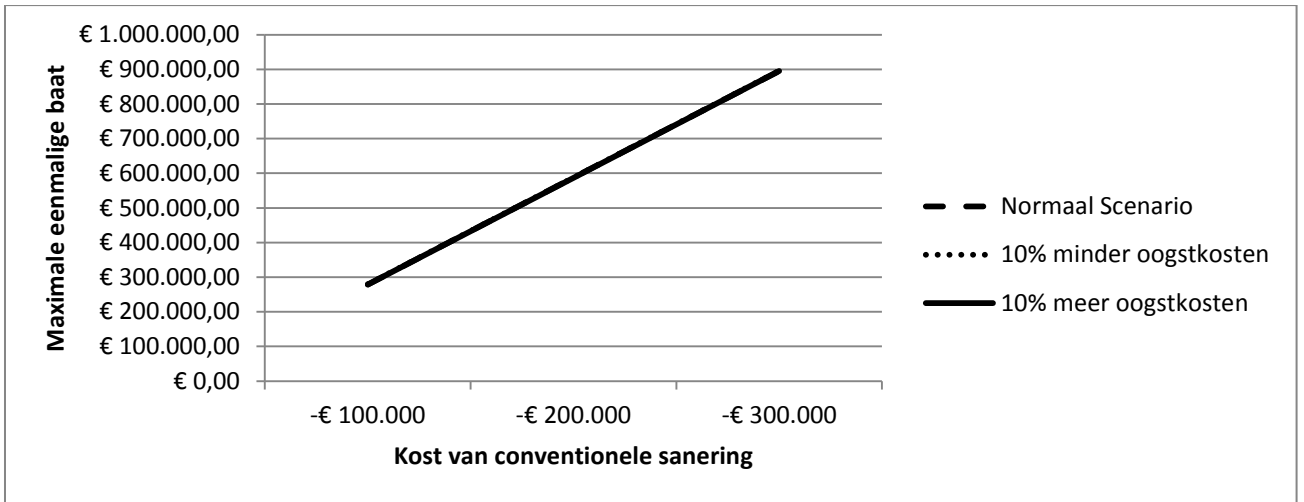
Figuur 17: Sensitiviteitsanalyse transportkosten CS1 Freiberg

Weinig verschil, zelfs op kleine schaal

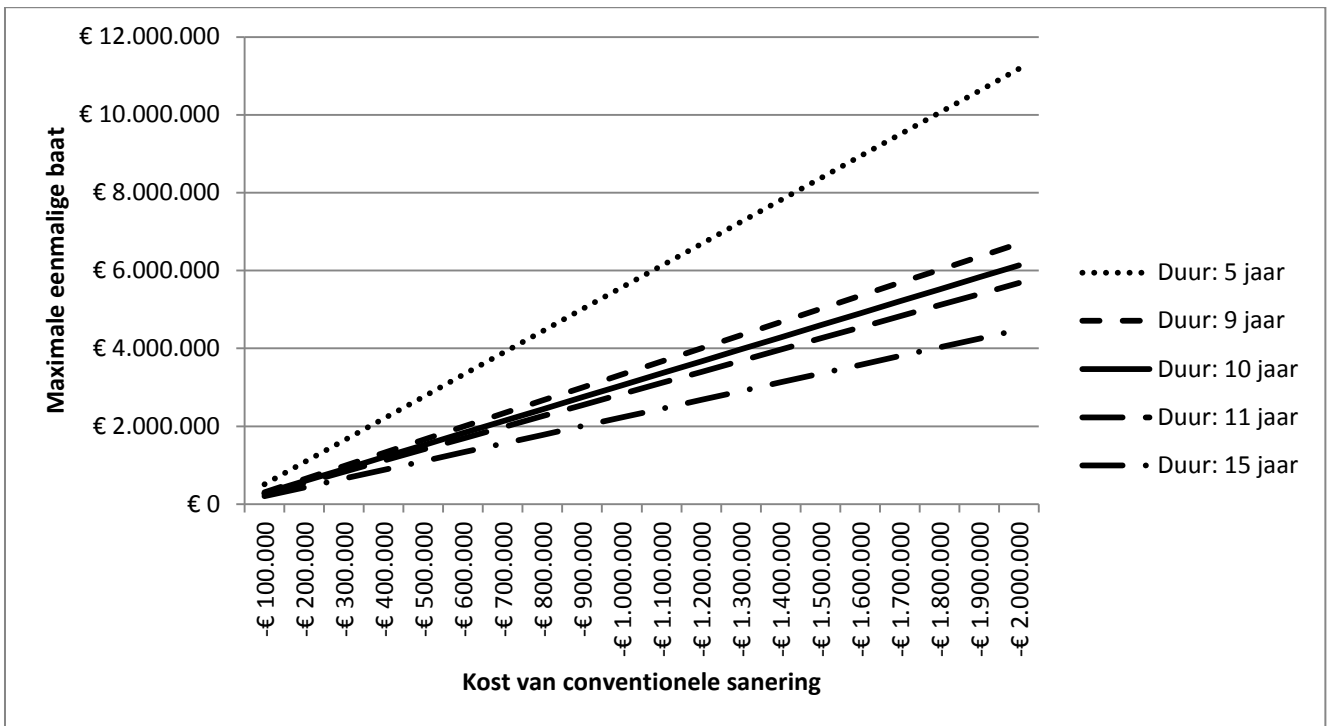


Figuur 18: Sensitiviteitsanalyse oogstkosten CS1 Freiberg

Weinig verschil, zelfs op kleine schaal



Figuur 19: Sensitiviteitsanalyse tijdsduur CS1 Freiberg (gelijke kosten normaal scenario)



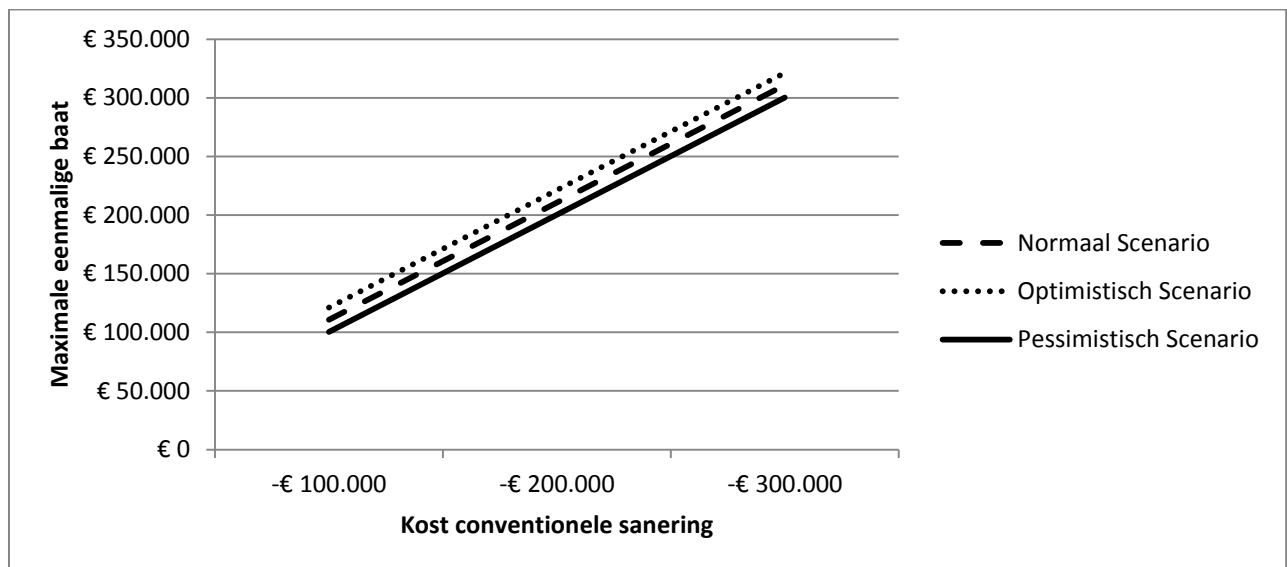
Bijlage 4: Sensitiviteitsanalyses CS7 Freiberg

Scenario-analyse

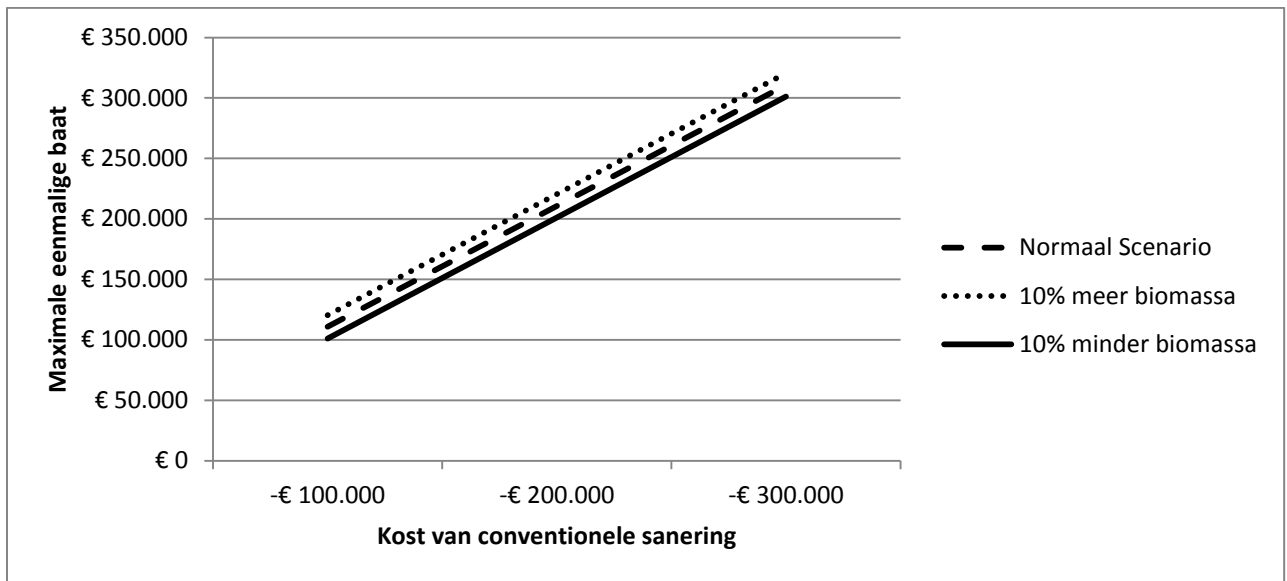
Figuur 20 toont drie scenario's voor de site in Freiberg waar men stabilisatie toepast door middel van winter-koolzaad en winter-tarwe. Deze twee gewassen worden afwisselend elk jaar geplant. Om deze sensitiviteitsanalyse uit te voeren zullen er dus, net zoals in het vorige deel van dit hoofdstuk, elk jaar afwisselend de kost van het ene en dan het andere gewas genomen worden. In het normale scenario bedroeg de verdisconteerde baat die de site genereert €10 718, de levensduur is oneindig. Het optimistische scenario heeft een hogere verdisconteerde baat tijdens de sanering, namelijk: €21 157. De levensduur blijft echter wel oneindig. Ook in het pessimistische scenario blijft de levensduur van het project oneindig, de verdisconteerde baat bedraagt €280.

Figuur 20 toont de maximale eenmalige baat die de site mag generen na sanering, opdat men beter stabilisatie toepast dan een conventionele sanering, gegeven een bepaalde baat die het terrein opbrengt tijdens de sanering. Het optimistische scenario heeft een hogere maximale eenmalige baat dan het normale scenario. De maximale eenmalige baat op zijn beurt is hoger dan het pessimistische scenario. Deze verschillen in maximale eenmalige baat zijn echter klein.

Figuur 20: Normaal, optimistisch en pessimistisch scenario maximale eenmalige baat voor site CS 7 Freiberg



Figuur 21: Sensitiviteitsanalyse biomassa CS7 Freiberg

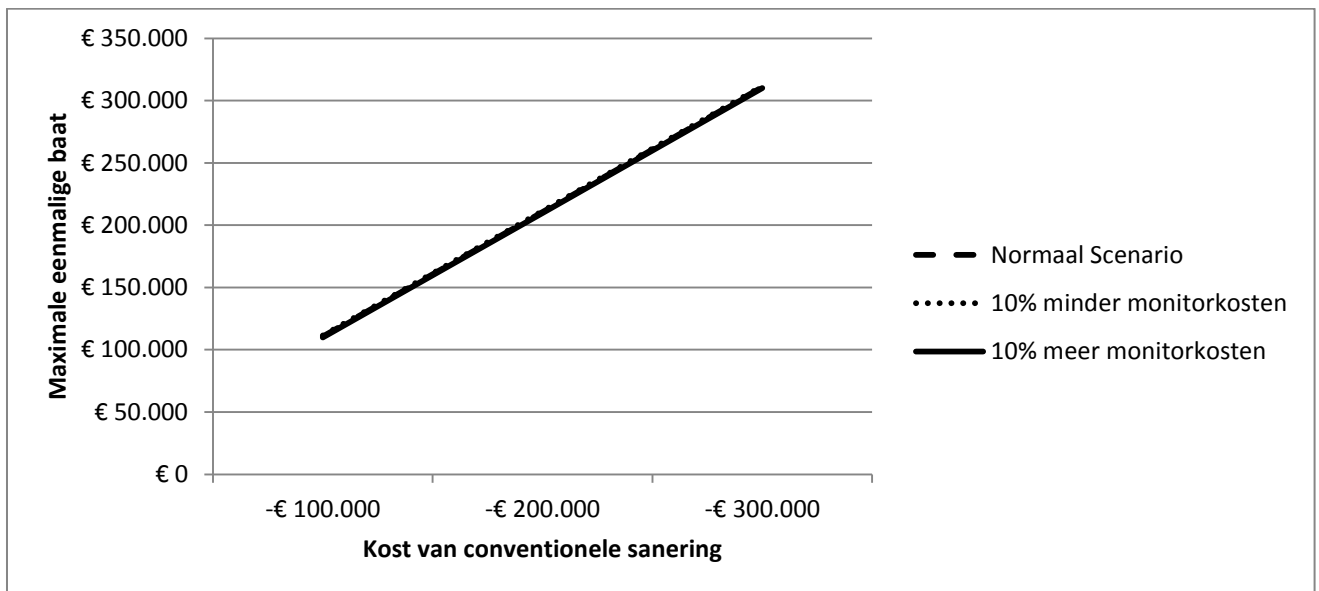


Sensitiviteitsanalyse accumulatie

Aangezien in dit geval sprake is van stabilisatie is deze sensitiviteit niet relevant. De duur blijft oneindig en de kosten zullen dus niet veranderen.

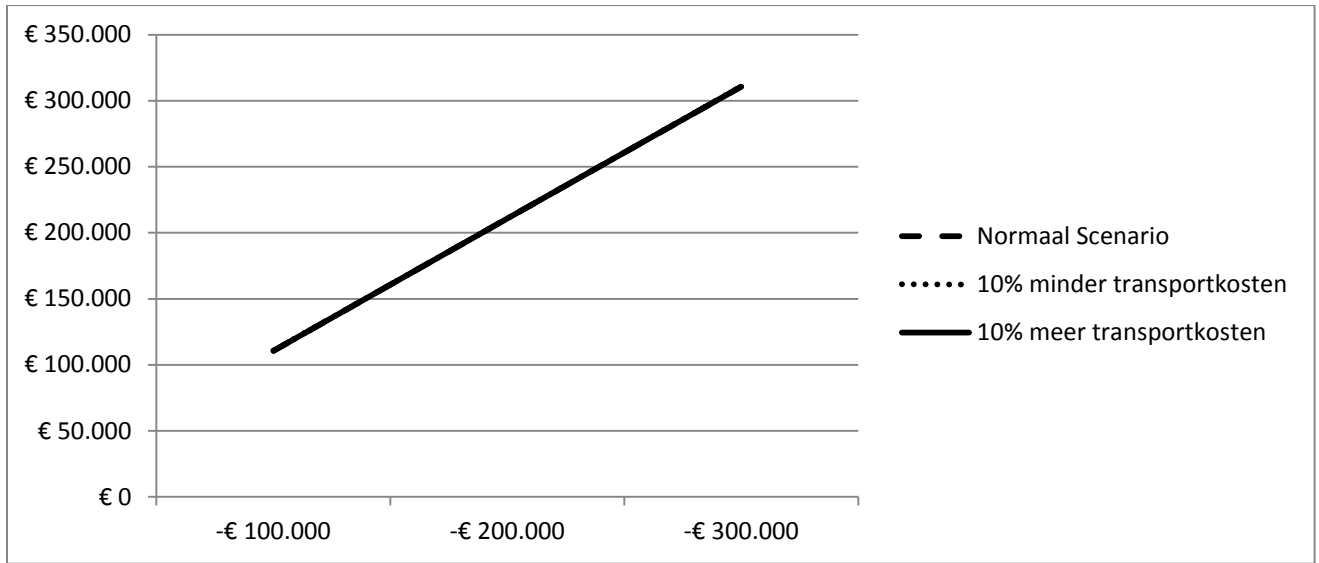
Figuur 22: Sensitiviteitsanalyse monitorkosten CS7 Freiberg

Weinig invloed



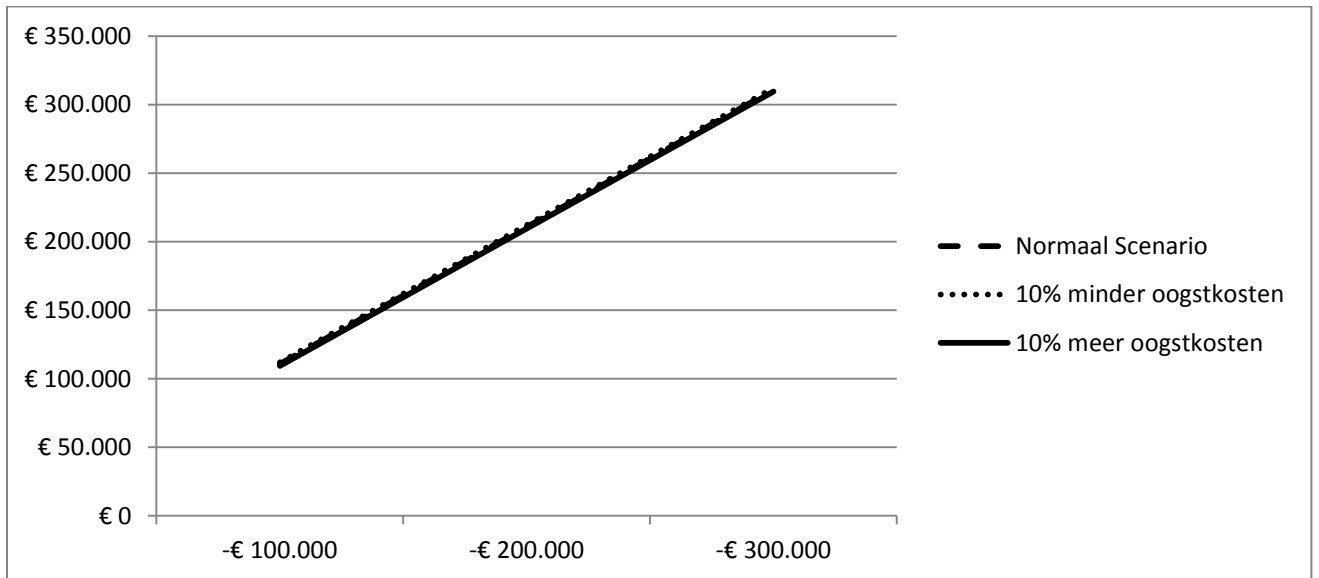
Figuur 23: Sensitiviteitsanalyse transportkosten

Weinig invloed



Figuur 24: Sensitiviteitsanalyse oogstkosten

Weinig invloed



Sensitiviteitsanalyse tijdsduur (maar gelijke kosten als normaal scenario)

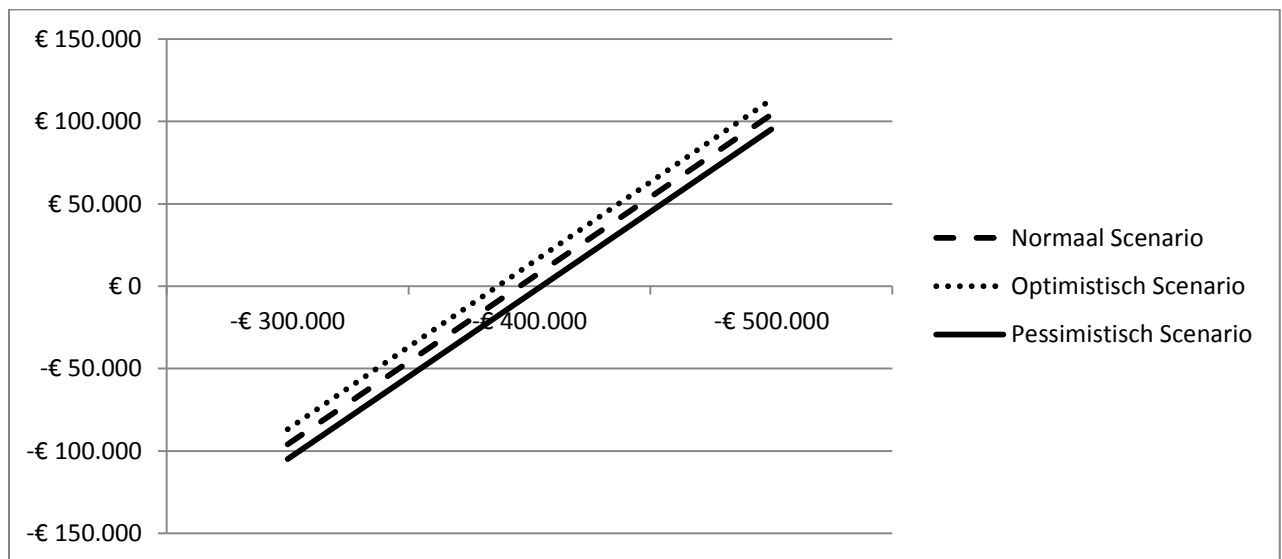
Aangezien in dit geval sprake is van stabilisatie, is deze sensitiviteit niet relevant.

Bijlage 5: Sensitiviteitsanalyse Phytosed – Ech1

Scenario-analyse

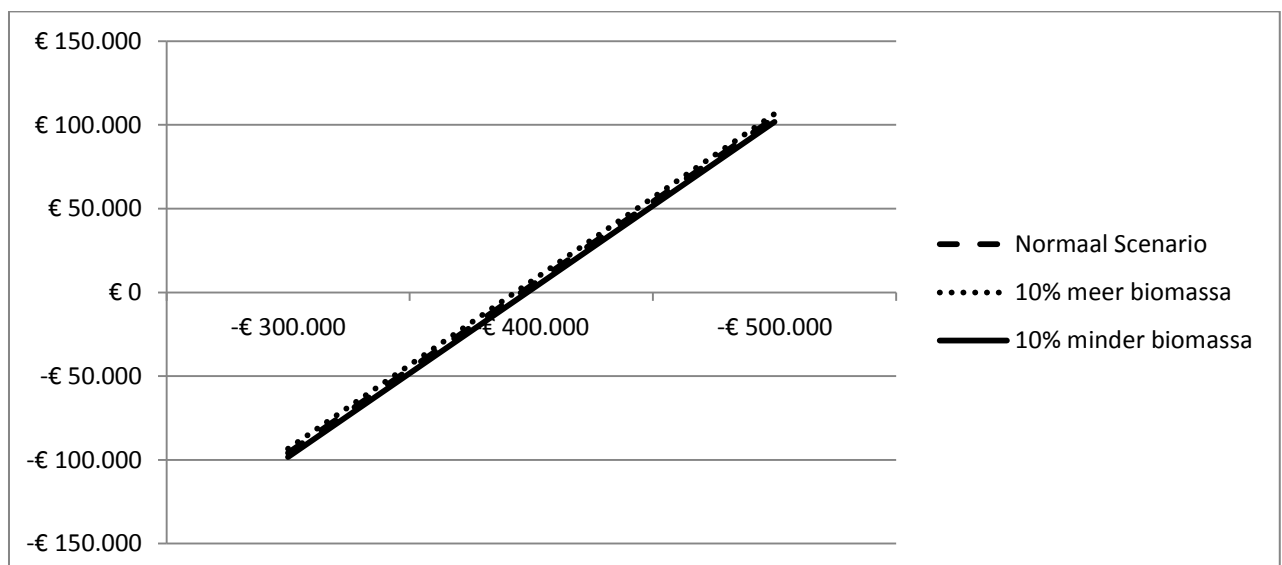
Figuur 25 toont drie scenario's voor site Phytosed – Ech1 in Frankrijk. In het normale scenario bedraagt de kost €395 847, met een oneindige tijdsduur. In het optimistische scenario bedraagt deze kost minder, namelijk: €386 831. De tijdsduur blijft oneindig. In het pessimistische scenario stijgt de kost tot €404 863. Zoals in de vorige case stijgt de maximale eenmalige baat in het optimistische scenario, en daalt ze in het pessimistische scenario, al zijn de veranderingen klein in vergelijking met de totale maximale baat.

Figuur 25: Normaal, optimistisch en pessimistisch scenario maximale eenmalige baat voor site Phytosed – Ech1



Figuur 26: Sensitiviteitsanalyse biomassa

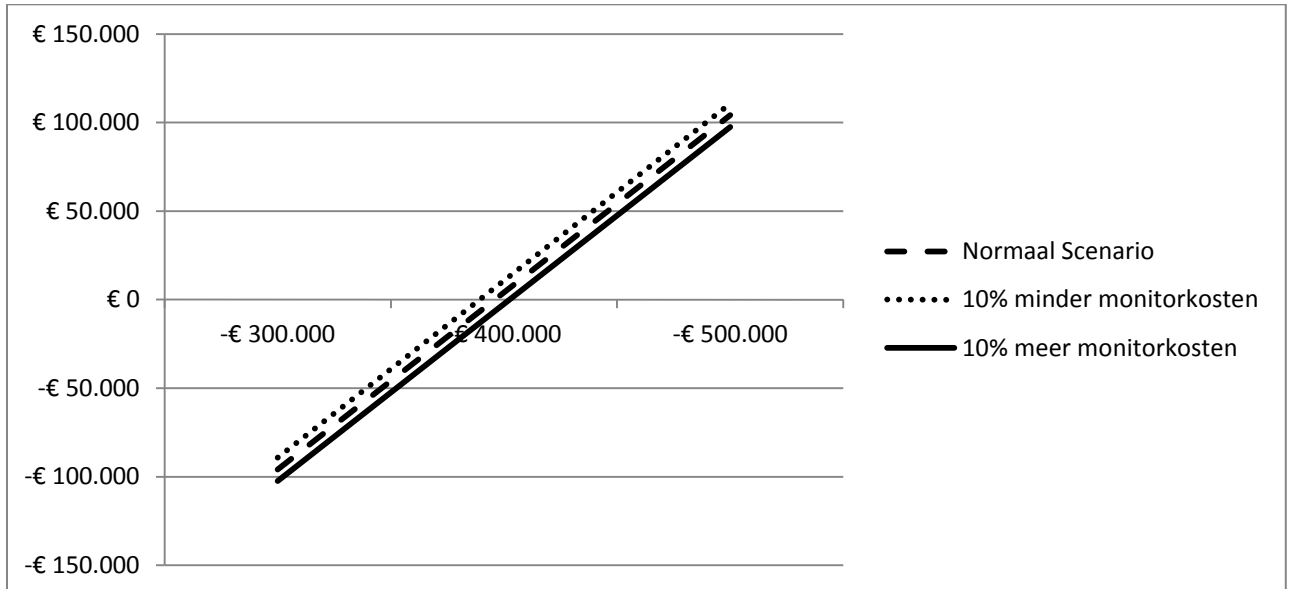
Weinig invloed



Sensitiviteitsanalyse accumulatie

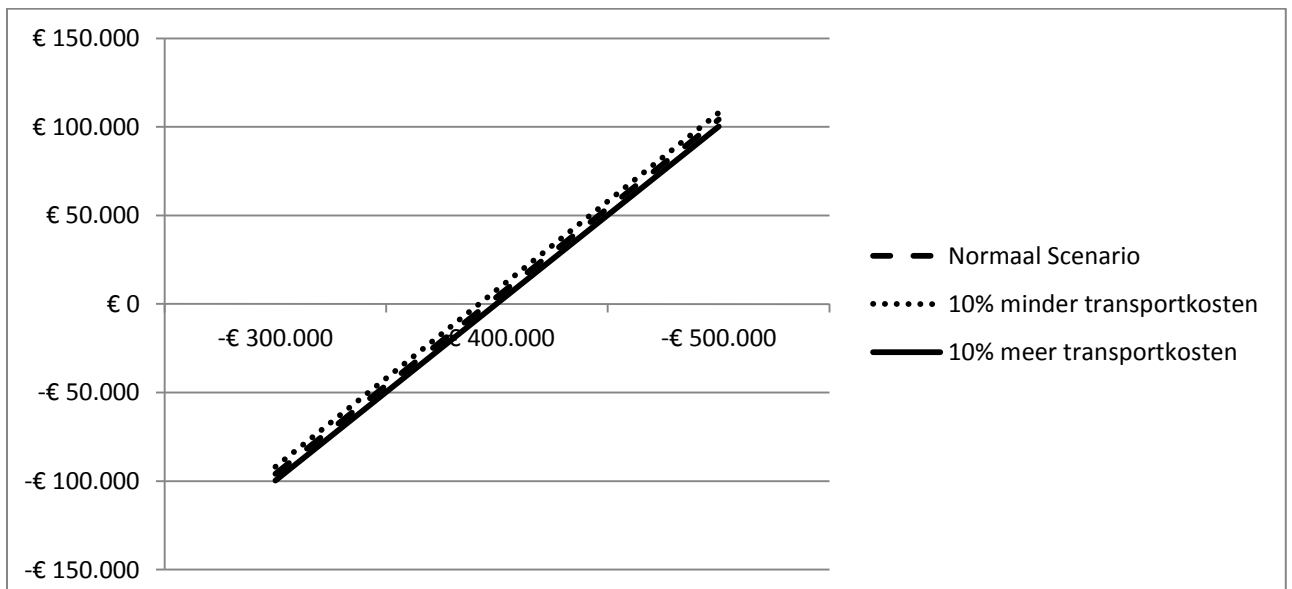
Aangezien in dit geval sprake is van stabilisatie is deze sensitiviteit niet relevant. De duur blijft oneindig en de kosten zullen dus niet veranderen.

Figuur 27: Sensitiviteitsanalyse monitorkosten

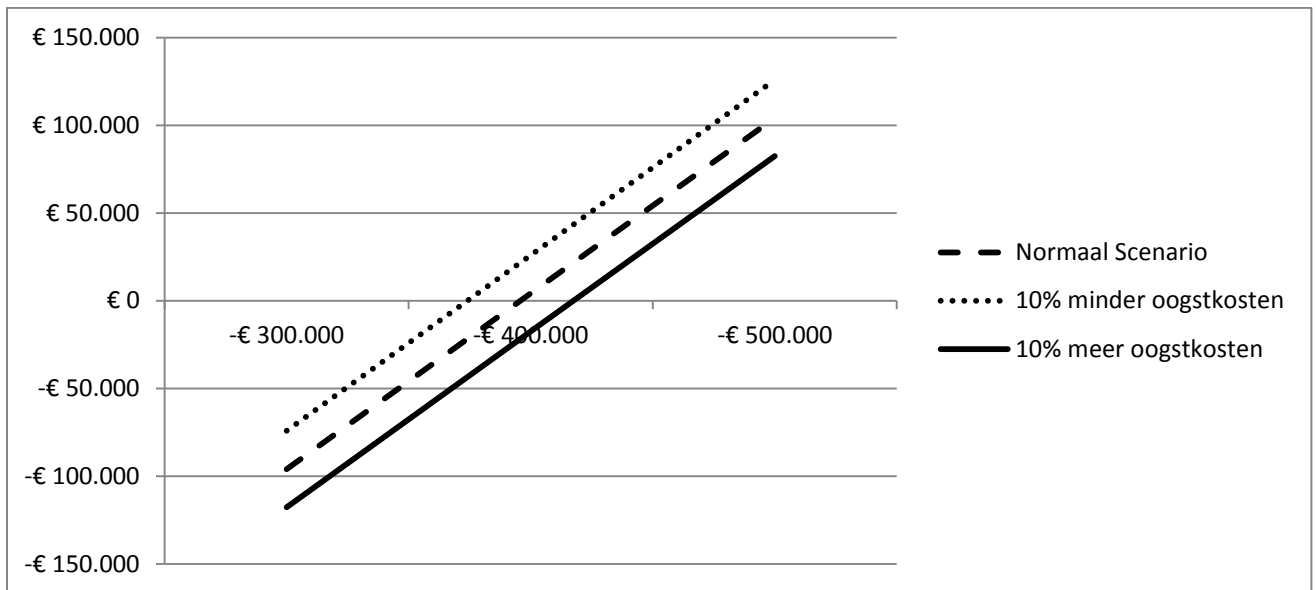


Figuur 28: Sensitiviteitsanalyse transportkosten

Weinig invloed



Figuur 29: Sensitiviteitsanalyse oogstkosten



Sensitiviteitsanalyse tijdsduur (maar gelijke kosten als normaal scenario)

Aangezien in dit geval sprake is van stabilisatie, is deze sensitiviteit niet relevant.

Bijlage 6: Gegevens site CS1 Freiberg

General Site Information		General Plant Information	
Name of site	CS 1 Freiberg	Plant used	poplars, willows
Country	Germany	Rotation speed of crop	3 Years
Site type	agricultural	Remediated surface/plant	0,99 m ² /plant 0,000099 ha/plant
Site coordinates	4594864,2 5648792,35	Kg of dry mass per harvest per ha	16200 Kg DM/ha
Distance to crop supplier	28 km	Of which ...% is in	
Distance to biomass processor	13 km	Plant part 1	stem
Size of site	16200 m ² 1,62 ha	% of total biomass plant part 1	100
Depth of contamination	0,3 m	Plant part 2	plant part 2
Density soil	1,44 ton/m ³	% of total biomass plant part 2	
Total weight per ha	4320 ton	Plant part 3	plant part 3
Discount rate	5 %	% of total biomass plant part 3	
		Plant part 4	plant part 4
		% of total biomass plant part 4	
		Plant part 5	plant part 5
		% of total biomass plant part 5	
General contamination information		Extraction in mg/kg DM per harvest per year	
Define metal(s):	Cd	stem	5,74 mg/kg DM
Concentration in soil	3,2	plant part 2	mg/kg DM
Concentration in solution	0,17	plant part 3	mg/kg DM
Start:		plant part 4	mg/kg DM
Start concentration	0,17 mg/kg (solution)	plant part 5	mg/kg DM
Contamination in soil	0,7344 kg/ha		
Goal			
End concentration	0,1 mg/kg soil (solution)		
Contamination in soil	0,432 kg/ha		
Contamination to be removed	0,3024 kg/ha		

Cost of plants

Price per plant	OR	0,14 #plant
Price seed	OR	0 #ha
Plant density		11643 plant/ha
		0 #plant
Cost of transporting plant to site		0 #plant

Maintenance costs site and crops

Cost of site	275,4				
Variable cost (in #m ²)	0,1655	0,037	0,037	0,037	0,037
fence	0,072				
herbicide	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
planting	0,048				
irrigation	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
ploughing	0,0085				
Fixed cost (in #jaar)	0	0	0	0	0
general maintenance					
analysis of soil (4 replicates)					
define fixed cost 3					
define fixed cost 4					
define fixed cost 5					

Costs and revenues associated with the end of one crop rotation (and the end of the project)							
Years per rotation		3					
Amount of rotations		3					
Harvesting costs							
What type of harvesting method is used?	chipping						
Cost associated with harvesting machine							
Machine rent cost		640	l	per harvest			
How long are crops dried after harvest? (t)		30	days				
Biomass transport							
Is there an extra cost associated with this?		1560	l				
Biomass price**							
Price received (yes or no)?	price	Change in price of biomass due to contamination					
stem	1	0,135	€/Kg DM	stem	0	€/kg DM	
Monitoring costs							
Monitor costs tranche II (after remediation)							
Cost during year. If 0, leave blank				300			300
Extra costs that have not been added							
	Year 0	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5	Year 6
recultivation							3000

Total time of remediation project			
For entire plant	10	years	10

Total biomass plants in one harvest per ha		Total accumulation in plant parts in one harvest per ha	
Part 1 of plant	stem	stem	92988 mg/ha
% of total biomass	100		0,092988 kg/ha
Biomass of part	16200 kg DM/ha	plant part 2	0 mg/ha
Part 2 of plant	plant part 2		0 kg/ha
% of total biomass	0	plant part 3	0 mg/ha
Biomass of part	0 kg DM/ha		0 kg/ha
Part 3 of plant	plant part 3	plant part 4	0 mg/ha
% of total biomass	0		0 kg/ha
Biomass of part	0 kg DM/ha	plant part 5	0 mg/ha
Part 4 of plant	plant part 4		0 kg/ha
% of total biomass	0	Total	92988 mg/ha
Biomass of part	0 kg DM/ha		0,092988 kg/ha
Part 5 of plant	plant part 5		
% of total biomass	0		
Biomass of part	0 kg DM/ha		

Bijlage 7: Gegevens site Freiberg CS7

Koolzaad

General Site Information		General Plant Information	
Name of site	CS7 Freiberg	Plant used	winter oilseed rape
Country	Germany	Rotation speed of crop	1 year
Site type	agricultural	Remediated surfaceplant	0,03 m ² /plant 0,000003 ha/plant
Site coordinates	4.598.368,22 #####	Kg of dry mass per harvest p	3400 Kg DM/ha
Distance to crop supplier	5 km	Of which _% is in	
Distance to biomass processor	5 km	Plant part 1	corn
Size of site	35.000 m ² 3,5 ha	% of total biomass plant part 1	100
Depth of contamination	0,3 m	Plant part 2	plant part 2
Density soil	1,36 ton/m ³	% of total biomass plant part 2	
Total weight per ha	4080 ton	Plant part 3	plant part 3
Discount rate	4 %	% of total biomass plant part 3	
General contamination information		Plant part 4	plant part 4
Define metal(s):	Cd	% of total biomass plant part 4	
Concentration in soil	16 mg/kg	Plant part 5	plant part 5
Concentration in solution	0,88 mg/kg NH ₄ NO ₃	% of total biomass plant part 5	
Start:		Extraction in mg/kg DM per harvest per year	
Start concentration	0,88 mg/kg (soil solution)	corn	0,7 mg/kg DM
Contamination in soil	3,5904 kg/ha	plant part 2	mg/kg DM
Goal		plant part 3	mg/kg DM
End concentration	0,1 mg/kg soil (solution)	plant part 4	mg/kg DM
Contamination in soil	0,408 kg/ha	plant part 5	mg/kg DM
Contamination to be removed	3,1824 kg/ha		

Tarwe

General Site Information		General Plant Information	
Name of site	CS7 Freiberg	Plant used	winter wheat
Country	Germany	Rotation speed of crop	1 year
Site type	agricultural	Remediated surfaceplant	0,0026 m ² /plant 0,00000026 ha/plant
Site coordinates	4598368,2 5641814	Kg of dry mass per harvest p	5525 Kg DM/ha
Distance to crop supplier	5 km	Of which _% is in	
Distance to biomass processor	5 km	Plant part 1	corn
Size of site	35.000 m ² 3,5 ha	% of total biomass plant part 1	100
Depth of contamination	0,3 m	Plant part 2	plant part 2
Density soil	1,36 ton/m ³	% of total biomass plant part 2	
Total weight per ha	4080 ton	Plant part 3	plant part 3
Discount rate	4 %	% of total biomass plant part 3	
General contamination information		Plant part 4	plant part 4
Define metal(s):	Cd	% of total biomass plant part 4	
Concentration in soil	16 mg/kg	Plant part 5	plant part 5
Concentration in solution	0,8 mg/kg NH ₄ NO ₃	% of total biomass plant part 5	
Start:		Extraction in mg/kg DM per harvest per year	
Start concentration	0,8 mg/kg (solution)	corn	0,7 mg/kg DM
Contamination in soil	3,264 kg/ha	plant part 2	mg/kg DM
Goal		plant part 3	mg/kg DM
End concentration	0,1 mg/kg soil (solution)	plant part 4	mg/kg DM
Contamination in soil	0,408 kg/ha	plant part 5	mg/kg DM
Contamination to be removed	2,856 kg/ha		

Koolzaad

Cost of plants							
Price per plant	OR		0	€/plant			
Price seed	OR		60	€/ha			
Plant density			800000	plant/ha			
			0,000075	€/plant			
Cost of transporting plant to site			0	€/plant			

Adding new crops/replacing crops in % of original amount							
	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5		
Adding new plants	100	100	100	100	100	100	100

Tarwe

Cost of plants							
Price per plant	OR		0	€/plant			
Price seed	OR		91	€/ha			
Plant density			3800000	plant/ha			
			2,39474E-05	€/plant			
Cost of transporting plant to site			0	€/plant			

Adding new crops/replacing crops in % of original amount							
	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5		
Adding new plants	100	100	100	100	100	100	100

Koolzaad

Maintenance costs site and crops								
	Year 0	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5	Year 6	
Cost of site								
Variable cost (in €/m²)		0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042
herbicide		0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
drying of corn yield		0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
tillage operations		0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
hail insurance		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
define variable cost 5								
Fixed cost (in €/jaar)	2046,19	837	837	837	837	837	837	837
general maintenance								
fertilizer		761	761	761	761	761	761	761
fertilization (subcontractor)		76	76	76	76	76	76	76
licensing agreement between LFLG and farmer	1209,19							
analysis of soil (4 replicates)								

Tarwe

Maintenance costs site and crops								
Cost of site	175							
Variable cost (in €/m²)	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335
herbicide	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
drying of corn yield	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
tillage operations	0,0135	0,0135	0,0135	0,0135	0,0135	0,0135	0,0135	0,0135
hail insurance	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
define variable cost 5								
Fixed cost (in €/jaar)	2528,74	1319,55	1319,55	1319,55	1319,55	1319,55	1319,55	1319,55
general maintenance								
fertilizer	1243,55	1243,55	1243,55	1243,55	1243,55	1243,55	1243,55	1243,55
fertilization (subcontractor)	76	76	76	76	76	76	76	76
licensing agreement between LfJL/G and farmer	1209,19							
analysis of soil (4 replicates)								

Koolzaad

Costs and revenues associated with the end of one crop rotation (and the end of the project)								
Years per rotation	1							
Amount of rotations	1338							
Harvesting costs								
What type of harvesting method is used?								
Cost associated with harvesting machine								
Machine rent cost	525	l	per harvest					
How long are crops dried after harvest? (if any)		days						
Biomass transport								
Is there an extra cost associated with this?	21	l		4403				
Biomass price**								
Price received (yes or no)?	1	price	0,37	€/Kg DM	Change in price of biomass due to contamination	0	€/kg DM	
corn					corn			
Monitoring costs								
	Year 0	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5	Year 6	
Monitor costs tranche I (during remediation)								
Cost during year. If 0, leave blank	300	300	300	300	300	300	300	300
Monitor costs tranche II (after remediation)								
Cost during year. If 0, leave blank								
Monitor costs tranche III (after-care)								
Cost during year. If 0, leave blank								

Tarwe

Costs and revenues associated with the end of one crop rotation (and the end of the project)								
Years per rotation	1							
Amount of rotations	739							
Harvesting costs								
What type of harvesting method is used?								
Cost associated with harvesting machine								
Machine rent cost	525	l	per harvest					
How long are crops dried after harvest? (if any)		days						
Biomass transport								
Is there an extra cost associated with this?	35	l		3384,0625				
Biomass price**								
Price received (yes or no)?	1	price	0,175	€/Kg DM	Change in price of biomass due to contamination	0	€/kg DM	
corn					corn			
Monitoring costs								
	Year 0	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5	Year 6	
Monitor costs tranche I (during remediation)								
Cost during year. If 0, leave blank	300	300	300	300	300	300	300	300

Koolzaad

Total time of remediation project			
For entire plant		1338 years	

Total biomass plants in one harvest per ha		Total accumulation in plant parts in one harvest per ha	
3400 kg DM/ha		11900	
Part 1 of plant	corn	corn	2380 mg/ha
% of total biomass	100		0,00238 kg/ha
Biomass of part	3400 kg DM/ha		
Part 2 of plant	plant part 2	plant part 2	0 mg/ha
% of total biomass	0		0 kg/ha
Biomass of part	0 kg DM/ha		
Part 3 of plant	plant part 3	plant part 3	0 mg/ha
% of total biomass	0		0 kg/ha
Biomass of part	0 kg DM/ha		
Part 4 of plant	plant part 4	plant part 4	0 mg/ha
% of total biomass	0		0 kg/ha
Biomass of part	0 kg DM/ha		
Part 5 of plant	plant part 5	plant part 5	0 mg/ha
% of total biomass	0		0 kg/ha
Biomass of part	0 kg DM/ha		
		Total	2380 mg/ha
			0,00238 kg/ha

Tarwe

Total time of remediation project			
For entire plant		739 years	

Total biomass plants in one harvest per ha		Total accumulation in plant parts in one harvest per ha	
5525 kg DM/ha		19337,5	
Part 1 of plant	corn	corn	3867,5 mg/ha
% of total biomass	100		0,0038675 kg/ha
Biomass of part	5525 kg DM/ha		
Part 2 of plant	plant part 2	plant part 2	0 mg/ha
% of total biomass	0		0 kg/ha
Biomass of part	0 kg DM/ha		
Part 3 of plant	plant part 3	plant part 3	0 mg/ha
% of total biomass	0		0 kg/ha
Biomass of part	0 kg DM/ha		
Part 4 of plant	plant part 4	plant part 4	0 mg/ha
% of total biomass	0		0 kg/ha
Biomass of part	0 kg DM/ha		
Part 5 of plant	plant part 5	plant part 5	0 mg/ha
% of total biomass	0		0 kg/ha
Biomass of part	0 kg DM/ha		
		Total	3867,5 mg/ha
			0,0038675 kg/ha

Bijlage 8: Gegevens site Phytosed – Ech1 Frankrijk

General Site Information		General Plant Information	
Name of site	Phytosed - Ech1	Plant used	willow (and deschampsia)
Country	France	Rotation speed of crop	1 year
Site type	Sediment landfill site	Remediated surface/plant	0,83 m ² /plant 0,000083 ha/plant
Site coordinates		Kg of dry mass per harvest per ha	39000 Kg DM/ha
Distance to crop supplier	0 km	Of which _% is in	
Distance to biomass processor	100 km	Plant part 1	willow
Size of site	10000 m ²	% of total biomass plant part 1	100
Depth of contamination	1 ha 0,3 m	Plant part 2	
Density soil	1,3 ton/m ³	% of total biomass plant part 2	
Total weight per ha	3900 ton	Plant part 3	
Discount rate	4 %	% of total biomass plant part 3	
General contamination information		Plant part 4	
Extraction (0) or stabilisation (1)?	1	% of total biomass plant part 4	
Define metal(s):	Zn	Plant part 5	
Concentration in soil	12000	% of total biomass plant part 5	
Concentration in solution		Extraction in mg/kg DM per harvest per part, only for extraction	
Start:		willow	7,5 mg/kg DM
Start concentration	12000 mg/kg soil	0	mg/kg DM
Contamination in soil	46800 kg/ha	0	mg/kg DM
stabilisation for how long?	500 years	0	mg/kg DM
		0	mg/kg DM
		0	mg/kg DM

Costs associated with start of project		
Costs associated with licences and permits		0 €
Preparation of site		
Surface to be deforested		10000 m ²
Surface to be leveled		10000 m ²
Removing asphalted surface		0 m ²
Price per m²		
Deforestation		0 €/m ²
Leveling		1,227368 €/m ²
Asphalt removal		0 €/m ²

Cost of plants		
Price per plant	OR	1,142916667 €/plant
Price seed	OR	13715 €/ha
Plant density		12000 plant/ha
		1,142916667 €/plant
Cost of transporting plant to site		0 €/plant

Maintenance costs site and crops	Year 0	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5
Cost of plants						
Variable cost (in €/plant)	1,621316667	0	0	0	0	0
Planting willow plants	0,4784					
Purchase willow plants	1,142916667					
Cost of site						
Variable cost (in €/m²)	2,485218	0,58604	0	0	0	0
Planting canche	0,038	0,58604				
Control of invasive plants(renouée du Japon)	2,259005					
Rolling the canche	0,041262					
Application of amendement	0,058604					
Purchase canche seeds	0,088347					
Fixed cost (in €/jaar)	0	813,16	813,16	813,16	813,16	813,16
Ground maintenance(weeding...)		538,2	538,2	538,2	538,2	538,2
Equipment rental		274,96	274,96	274,96	274,96	274,96

Costs and revenues associated with the end of one crop rotation (and the end of the project)	
Years per rotation	7
Amount of rotations	71
Harvesting costs	
What type of harvesting method is used?	Hand harvesting
Cost associated with harvesting machine	
Machine rent cost	6144 € per harvest
Extra cost of chipping machine	28489,37 €
How long are crops dried after harvest? (if any)	days
Biomass transport	
Is there an extra cost associated with this?	6234 €
Biomass price**	Price received (yes or no)? price
willow	1 0,1 €/Kg DM
	Change in price of biomass due to contamination willow 0 €/kg DM

Monitoring costs	Year 0	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5
Monitor costs tranche I (during remediation)						
Cost during year. If 0, leave blank		3319	3319	3319	3319	3319
Extra costs that have not been added						
Traitment plants Pyrethre					1128	
Traitment plants Chrysomèle					3634,8	
Drying cost						

Monitoring costs	Year 6	Year 7	Year 8	Year 9	Year 10	Year 11	Year 12
Monitor costs tranche I (during remediation)							
Cost during year. If 0, leave blank	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319
Extra costs that have not been added							
Traitment plants Pyrethre							
Traitment plants Chrysomèle							
Drying cost		159,6	159,6	159,6	120	120	120

Bijlage 9: Bodemsaneringsnormen

Bestemmingstype	Vaste deel van de aarde (mg/kg droge stof)					Grond- water (µg/l)
	I	II	III	IV	V	I,II,III,IV V,
ZWARE METALEN EN METALLOÏDEN (1)						
Arseen	58	58	103	267	267	20
Cadmium	2	2	6	9,5	30	5
Chroom (III) (2)	130	130	240	560	880	50
Koper	120	120	197	500	500	100
Kwik	2,9	2,9	4,8	4,8	11	1
Lood	200	200	560	735	1250	20
Nikkel	93	93	95	530	530	40
Zink	333	333	333	1000	1250	500
MONOCYCLISCHE AROMATISCHE KOOLWATERSTOFFEN (3)						
Benzeen	0,5	0,5	0,5	0,5	1	10
Tolueen	4	4	7	80	80	700
Ethylbenzeen	2	2	10	30	77	300
Xyleen	3	3	11	65	165	500
Styreen	0,8	0,8	3	13	20	20
GECHLOEREERDE KOOLWATERSTOFFEN (3)						
Dichloormethaan	0,13	0,13	0,35	3,5	3,5	20
Tetrachloormethaan	0,1	0,1	0,1	0,85	1	2
Tetrachlooretheen	0,7	0,7	1,4	30	35	40
Trichlooretheen	0,65	0,65	1,4	10	10	70
Monochloorbenzeen	2,5	2,5	8	30	40	300
1,2-dichloorbenzeen (4)	35	35	110	690	690	1000
1,3-dichloorbenzeen (4)	40	40	140	750	1260	1000
1,4-dichloorbenzeen (4)	4	4	15	80	190	300
Trichloorbenzeen (5)	0,5	0,5	2	20	80	20
Tetrachloorbenzeen (5)	0,1	0,1	0,3	6,5	275	9
Pentachloorbenzeen	0,5	0,5	1,3	65	385	2,4
1,1,1-trichloorethaan	10	10	13	230	300	500
1,1,2-trichloorethaan	0,2	0,2	0,6	1	1	12
1,1-dichloorethaan	2	2	5	95	95	330
Cis+trans-1,2-dichlooretheen	0,4	0,4	0,7	18	33	50
CARCINOGENE GECHLOEREERDE KOOLWATERSTOFFEN (6)						
1,2-dichloorethaan	0,1	0,1	0,1	7,6	9,6	30
Vinylchloride	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	5
Trichloormethaan	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	200
Hexachloorbenzeen	0,1	0,1	0,1	3,0	66,0	1
POLYCYCLISCHE AROMATISCHE KOOLWATERSTOFFEN (7)						
Naftaleen	1,5	1,5	5	80	160	60
Benzo(a)pyreen	0,5	0,5	3,6	5	7,2	0,7
Fenantreen	60	60	65	1650	1650	120
Fluoranteen	20	20	30	270	270	4
Benzo(a)antraceen	5	5	10,5	30	30	7
Chryseen	10	10	180	320	320	1,5
Benzo(b)fluoranteen	2	2	7	30	30	1,2
Benzo(k)fluoranteen	1	1	11,5	30	30	0,76
Benzo(ghi)peryleen	160	160	3920	4300	4690	0,26
Indeno(1,2,3-cd)pyreen	1	1	20	30	30	0,1
Antraceen	3	3	70	2380	4690	75
Fluoreen	45	45	3950	4320	4690	120
Dibenz(a,h)antraceen	0,5	0,5	2,9	3,6	3,6	0,5
Acenafteen	9	9	14	210	210	180
Acenaftyleen	1	1	1	20	40	70
Pyreen	125	125	395	3150	3150	90

CYANIDES						
Cyanides (8)						70
Vrij cyanide	5	5	5	60	110	
Niet-chlooroxideerbare cyanides	5	5	12	300	550	
PESTICIDEN						
Aldrin + dieldrin						0,03
Chloordaan (cis + trans)						0,2
DDT + DDE + DDD						2
Hexachloorcydohexaan (g-isomeer)						2
Hexachloorcydohexaan (α - isomeer)						0,06
Hexachloorcydohexaan(β - isomeer)						0,2
Endosulfan (α, β en sulfaat)						1,8
TRIMETHYLBENZENEN (3)						
1,2,3-TMB	0,81	0,81	1,2	6,5	14,1	150
1,2,4-TMB	1,3	1,3	1,7	9,7	19,5	150
1,3,5-TMB	0,61	0,61	0,86	5,2	9,7	150
CHLOORFENOLEN (9)						
2,4,6-trichloorfenol	0,64	0,64	14	38	310	200
Pentachloorfenol	0,25	0,25	0,54	0,71	9,0	9
2-chloorfenol	3,93	3,93	130	1300	5600	15
2,4-dichloorfenol	0,67	0,67	47	150	150	9
2,4,5-trichloorfenol	24	24	850	1100	2200	300
2,3,4,6-tetrachloorfenol	1,79	1,79	37	41	130	90
OVERIGE ORGANISCHE VERBINDINGEN						
Hexaan (3)	1,5	1,5	1,5	6,5	10	180
Heptaan (3)	25	25	25	25	25	3000
Octaan (3)	75	75	90	90	90	600
Minerale olie (3)	1000	1000	1000	1500	1500	500
Methyltertiairbutylether (10)	2	2	9	140	140	300

Bestemmingstype 1: natuurgebied. Bestemmingstype 2: agrarisch gebied. Bestemmingstype 3: Woongebied. Bestemmingstype 4: parken en recreatiegebied. Bestemmingstype 5: industriegebied.

Bijlage 10: Richtwaarden voor bodemkwaliteit

	Vaste deel van de aarde (mg/kg droge stof)	Grondwater (µg/l)
ZWARE METALEN EN METALLOÏDEN (1)		
Arseen	35	12
Cadmium	1,2	3
Chroom (2)	91	30
Koper	72	60
Kwik	1,7	0,6
Lood	120	12
Nikkel	56	24
Zink	200	300
MONOCYCLISCHE AROMATISCHE KOOLWATERSTOFFEN		
Benzeen	0,3	2
Tolueen	1,6	20
Ethylbenzeen	0,8	20
Xyleen	1,2	20
Styreen	0,32	10
GECHLOREERDE KOOLWATERSTOFFEN		
Dichloormethaan	0,05	5
Tetrachloormethaan	0,04	1,2
Tetrachlooretheen	0,28	5
Trichlooretheen	0,26	5
Monochloorbenzeen	1	5
1,2-dichloorbenzeen (3)	14	5
1,3-dichloorbenzeen (3)	16	5
1,4-dichloorbenzeen (3)	1,6	5
Trichloorbenzeen (4)	0,2	5
Tetrachloorbenzeen (5)	0,04	5
Pentachloorbenzeen	0,2	1,4
1,1,1-trichloorethaan	4	5
1,1,2-trichloorethaan	0,08	5
1,1-dichloorethaan	0,08	5
Cis + trans-1,2-dichlooretheen	0,16	5
CARCINOGENE GECHLOREERDE KOOLWATERSTOFFEN		
1,2-dichloorethaan	0,06	5
Vinylchloride	0,06	2
Trichloormethaan (Chloroform)	0,06	5
Hexachloorbenzeen	0,06	0,6
POLYCYCLISCHE AROMATISCHE KOOLWATERSTOFFEN		
Naftaleen	0,8	20
Benzo(a)pyreen	0,3	0,4
Fenantreen	30	20
Fluoranteen	10,1	2
Benzo(a)antraceen	2,5	2
Chryseen	5,1	0,9
Benzo(b)fluoranteen	1,1	0,7
Benzo(k)fluoranteen	0,6	0,4
Benzo(ghi)peryleen	35	0,1
Indeno(1,2,3-cd)pyreen	0,55	0,06
Antraceen	1,5	20
Fluoreen	19	20
Dibenz(a,h)antraceen	0,3	0,3
Acenafteen	4,6	20

Acenaftyleen	0,6	20
Pyreen	62	20
CYANIDES (6)		
Vrij cyanide	3	
Niet-chlooroxideerbaar cyanide	3	
Som cynides		40
PESTICIDEN		
Aldrin + dieldrin		0,02
Chloordaan (cis + trans)		0,12
DDT + DDE + DDD		1,2
Hexachloorcyclohexaan (γ-isomeer)		1,2
Hexachloorcyclohexaan (α -isomeer)		0,03
Hexachloorcyclohexaan(β -isomeer)		0,12
Endosulfan (α, β en sulfaat)		1
OVERIGE ORGANISCHE STOFFEN		
Hexaan	0,6	20
Heptaan	10	50
Octaan	30	50
Minerale olie	300	300
Methyltertiairbutylether	1	20
Polychloorbifenylen (7 Congeneren) (7)	0,033	

Auteursrechtelijke overeenkomst

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

De kosteneffectiviteit van fytoremediatie van metalen en metalloïden: een aantal Europese gevalstudies

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen-beleidsmanagement**

Jaar: **2014**

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,

Vliegen, Sander

Datum: **3/06/2014**