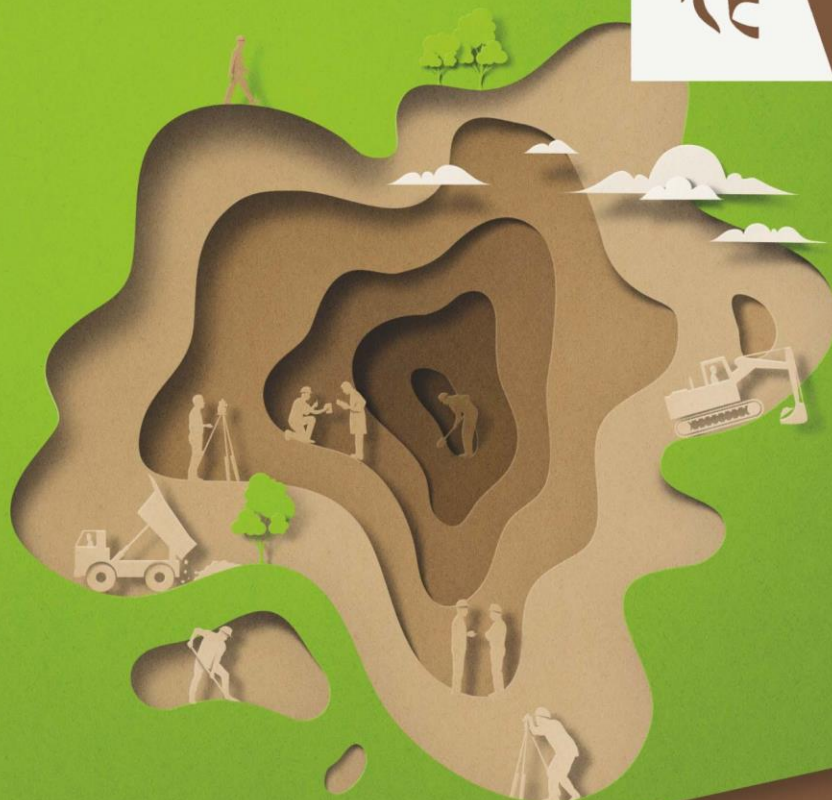




Vlaanderen  
is bodembewust



# FYTOREMEDIATIE - CODE VAN GOEDE PRAKTIJK

SAMEN MAKEN WE  
MORGEN MOOIER

**OVAM**

[WWW.OVAM.BE](http://WWW.OVAM.BE)

**OVAM**



# **FYTOREMEDIATIE**

Code van Goede Praktijk  
publicatiedatum / 1.01.2019



# **Code van goede praktijk Fytoremediatie**

## DOCUMENTBESCHRIJVING

- |  |   |
|--|---|
| 1 <i>Titel van publicatie:</i><br>Fytoremediatie – Code van Goede Praktijk   | 2 <i>Verantwoordelijke Uitgever:</i><br>OVAM  |
| 3 <i>Wettelijk Depot nummer:</i>   | 4 <i>Trefwoorden:</i><br>Bodemsaneringswerken, fyto-remediatie,<br>micro-organismen<br>geassisteerde fytotechnieken |
| 5 <i>Samenvatting:</i><br>Deze code van goede praktijk behandelt de sanering van verontreinigde bodems en grondwater door middel van fyto-remediatie. De code omvat een algemene beschrijving van de techniek (literatuurstudie), en concrete richtlijnen voor het ontwerp en het opvolgen van saneringen door middel van fytotechnieken.                    |   |
| 6 <i>Aantal bladzijden:</i> 168  | 7 <i>Aantal tabellen en figuren:</i> 14 tabellen / 26 figuren   |
| 8 <i>Datum publicatie:</i><br>Januari 2019   | 9 <i>Prijs*:</i> /  |
| 10 <i>Begeleidingsgroep en/of auteur:</i><br>Jaco Vangronsveld, Nele Weyens, Sofie Thijs (UHasselt – CMK);<br>Dirk Dubin, Mario Clemmens (Bio2clean);<br>Karen Van Geert, Miet Van Den Eeckhaut (Arcadis Belgium nv); Peter Van den bossche (Witteveen+Bos Belgium nv) (auteurs)<br>Griet Van Gestel, Nick Bruneel, Lieve Crauwels, Cathérine Lemmens (OVAM) | 11 <i>Contactpersonen:</i><br>Griet Van Gestel, Nick Bruneel, Lieve Crauwels, Cathérine Lemmens                     |
| 12 <i>Andere titels over dit onderwerp:</i> /  |   |

U hebt het recht deze brochure te downloaden, te printen en digitaal te verspreiden. U hebt niet het recht deze aan te passen of voor commerciële doeleinden te gebruiken.

De meeste OVAM-publicaties kunt u raadplegen en/of downloaden op de OVAM-website: <http://www.ovam.be>

\* Prijswijzigingen voorbehouden.

<b>Code van goede praktijk Fytoremediatie .....</b>	<b>1</b>
<b>Documentbeschrijving .....</b>	<b>2</b>
<b>1 Inleiding .....</b>	<b>7</b>
1.1 Doel .....	7
1.2 Tot stand komen van dit document.....	8
1.3 Waarom kiezen voor een op de natuur gebaseerde saneringstechniek? .....	8
1.4 Inhoud en doelstellingen .....	9
1.4.1 Literatuurstudie .....	9
1.4.2 Procedures .....	9
1.4.3 Veiligheids- en gezondheidsaspecten .....	9
1.5 Verklarende woordenlijst .....	10
1.6 Lijst van afkortingen .....	13
<b>2 Literatuurstudie .....</b>	<b>15</b>
2.1 Definitie .....	15
2.2 Mechanismen en processen .....	16
2.2.1 Algemeen .....	17
2.2.2 Klassieke fytoremediatie mechanismen .....	20
2.2.3 Micro-organismen geassisteerde fytoremediatie .....	28
2.2.4 Positionering van (micro-organismen geassisteerde) fytoremediatie tov andere saneringstechnieken.....	31
2.2.5 Fytotechnologie toepassingen in de praktijk .....	32
2.3 Verontreinigingen .....	38
2.3.1 Organische verontreinigingen .....	38
2.3.2 Metalen en andere anorganische contaminanten .....	43
2.4 Plantensoorten .....	50
2.5 Bepalende terreinkarakteristieken .....	54
2.6 Meerwaarde met betrekking tot duurzaamheid, leefomgevingskwaliteit en biodiversiteit .....	56
2.7 Saneringsduur en kostprijs .....	61
2.7.1 Saneringsduur.....	61
2.7.2 Kostprijs.....	62
<b>3 Procedure voor onderzoek naar haalbaarheid en voorbereiding ontwerp.....</b>	<b>66</b>
3.1 Eerste screening naar haalbaarheid fytoremediatie.....	68
3.1.1 Fyto-specifieke terrein karakterisatie.....	68

3.1.2	Eerste inschatting haalbaarheid fyto remediatie .....	74
3.2	Selectie meest geschikte fyto remediatie mechanisme .....	77
3.3	Identificatie van meest geschikte plant(en) .....	78
3.4	Grondige evaluatie haalbaarheid .....	80
3.4.1	Haalbaarheidsanalyses .....	81
3.4.2	Labo- en serre experimenten .....	87
3.4.3	Pilootproef .....	90
<b>4</b>	<b>Procedure voor ontwerp, inrichting, beheer, opvolging en monitoring</b>	<b>93</b>
4.1	Ontwerp .....	93
4.1.1	Fyto remediatie-specifieke terrein karakterisatie .....	94
4.1.2	Verontreinigd medium .....	94
4.1.3	Saneringsdoelstellingen .....	96
4.1.4	Identificatie fyto remediatie-mechanisme .....	96
4.1.5	Plantenkeuze .....	97
4.1.6	Afstemmen van het ontwerp op de specifieke noden die naar voor komen uit de haalbaarheidsstudie .....	100
4.2	Inrichting .....	101
4.2.1	Stabiliserende bodembedekking .....	102
4.2.2	Afbrekende bodembedekking .....	105
4.2.3	Extractie bodembedekking .....	107
4.2.4	Hydraulisch barrière met fyto degradatie en fyto volatilisatie .....	110
4.2.5	Multi-mechanisme design .....	112
4.2.6	Bio-zuiveringssystemen .....	114
4.3	Keuze van het successiestadium .....	118
4.4	Beheer .....	120
4.4.1	Pioniersstadium .....	122
4.4.2	Grasland .....	122
4.4.3	Ruigte .....	123
4.4.4	Bos .....	124
4.4.5	Verwerking van de biomassa .....	124
4.4.6	Faunavriendelijk beheer .....	125
4.5	Monitoring (Ontwerp) .....	125
4.5.1	Monitoringslocaties .....	126
4.5.2	Monitoringsparameters .....	127
4.5.3	Periodiciteit en duur van monitoring .....	130
4.5.4	Evaluatie van de meetgegevens en aanpassing van het	

monitoringsprogramma.....	131
4.6 Kostenraming .....	134
4.7 Wetgevend kader .....	135
<b>5 Procedure voor stopzetten en nazorg.....</b>	<b>139</b>
5.1 Uitgangspunt .....	139
5.2 Effectiviteit en efficiëntie van de sanering.....	139
5.3 Eindevaluatieonderzoek .....	139
5.4 Procedure voor stopzetting.....	140
5.5 Nazorg.....	140
<b>6 Veiligheid- en gezondheidsaspecten .....</b>	<b>142</b>
<b>Bijlage 1: Lijst van tabellen .....</b>	<b>143</b>
<b>Bijlage 2: Lijst van figuren .....</b>	<b>144</b>
<b>Bijlage 3: Bibliografie .....</b>	<b>146</b>
<b>Bijlage 4: Plantenlijsten.....</b>	<b>154</b>

# 1 Inleiding

Fytoremediatie is een duurzame, groene saneringstechnologie die gebruik maakt van planten en hun geassocieerde micro-organismen om verontreinigende stoffen uit bodem, water of sediment te verwijderen via afbraak, extractie, transformatie of vervluchtiging. Een plantendek kan ook aangewend worden om een verontreiniging te stabiliseren (immobilisatie). Fytoremediatie is reeds een aantal jaren in de belangstelling als een innovatieve, milieuvriendelijke, duurzame en lage-kosten sanerings-alternatief voor huidige saneringsmethodes. Er worden ook bijkomende voordelen verwacht op vlak van kwaliteit van de leefomgeving, natuurlijk kapitaal, biodiversiteit en ecosysteemdiensten.

In Vlaanderen wordt fyto-remediatie nog heel weinig toegepast in de praktijk. Een mogelijke reden hiervoor is het gebrek aan bekendheid, praktische ervaring en/of technische kennis. Voor elk van deze beperkingen wil dit document oplossingen aanreiken.

## 1.1 Doel

Voorliggend rapport dient enerzijds als leidraad voor beleidsmedewerkers en bodemsaneringsdeskundigen bij het afwegen van fyto-remediatie als relevante technische mogelijkheid voor het saneren of beheersen van verontreinigde bodems, oppervlakte- en grondwater en sedimenten. Anderzijds geeft dit document ook een overzicht van de huidige kennis betreffende plant-gebaseerde technologieën en levert het procedures die helpen bij het afwegen van de voorgestelde fyto-remediatie-toepassingen. De principes en richtlijnen die worden beschreven zijn geldig voor zowel verontreinigde industrieterreinen, private domeinen, woonzones, natuurgebieden, stadsparken, ... Fyto-remediatie is toepasbaar op een grote verscheidenheid aan terreinen mits er voldaan is aan een aantal randvoorwaarden zoals verder in dit document beschreven.

De subdoelstellingen zijn:

- Een beschrijving geven van de verschillende fyto-remediatie mechanismen;
- een overzicht geven van veel voorkomende types verontreinigingen en fyto-remediatie toepassingen;
- een beschrijving geven van omgevingsfactoren die door de deskundigen in het veld gebruikt kunnen worden bij het beslissen en toepassen van fyto-remediatie voor een specifieke site. Hiertoe behoort ook een kritische evaluatie van plantensoorten;
- een omschrijving geven van de meerwaarde van fyto-remediatie met betrekking tot duurzaamheid, leefomgevingskwaliteit en biodiversiteit;
- een procedure opstellen voor onderzoek naar de haalbaarheid van fyto-remediatie;



- een procedure opstellen voor ontwerp, uitvoering, opvolging en monitoring van fyto remediatie tijdens de saneringswerkzaamheden;
- een procedure opstellen voor het stopzetten en de nazorg bij fyto remediatie;
- een overzicht geven van verschillende veiligheidsaspecten;
- het geven van praktijkvoorbeelden die de toepassing van fyto remediatie illustreren.

## 1.2 Tot stand komen van dit document

De volgende aanpak werd gevolgd om de informatie rond fyto remediatie-processen en -procedures samen te stellen:

- Een uitgebreide literatuurstudie werd uitgevoerd;
- onderzoekers en instellingen werden betrokken (Centrum voor Milieukunde (UHasselt), bio2clean, Arcadis en Witteveen+Bos) om informatie over fyto remediatie toepassingen en kosten te bekomen;
- huidige onderzoeksprojecten en veldtoepassingen van fyto remediatie werden geëvalueerd. Een overzicht van fyto remediatietechnieken die reeds uitgevoerd werden in de praktijk werd opgesteld;
- uit de verzamelde informatie, internetbronnen en praktijkervaring van de buurlanden werd informatie gehaald voor het opstellen van de procedures inzake haalbaarheid, uitvoering, monitoring en nazorg.

## 1.3 Waarom kiezen voor een op de natuur gebaseerde saneringstechniek?

Instanties zoals de OVAM spelen een sleutelrol in het herstellen en behouden van het natuurlijk kapitaal, de biodiversiteit en de ecologische diensten die eruit ontstaan. De sanering van verontreinigde bodems, sediment en water is gericht op het herstel van de verstoorde ecosystemen en het herstel van de ecosysteemfuncties, zoals waterzuivering en de vorming van grond- en bouwstoffen.

Dit kan enerzijds met de klassieke saneringsmethodes zoals het oppompen van verontreinigd grondwater met bovengrondse nabehandeling, het afgraven en afvoeren van verontreinigde bodem voor externe verwerking, het *'in situ'* behandelen door middel van chemische redoxreacties en thermische technieken. Voor veel verontreinigde sites zijn er echter ook minder ingrijpende, op de natuur gebaseerde saneringsmethoden beschikbaar zoals fyto remediatie die de klassieke saneringsaanpak kunnen aanvullen of in sommige gevallen zelfs helemaal vervangen. Fyto remediatie omvat het geheel aan plant-gebaseerde technologieën om de verontreiniging aan te pakken. Hieronder verstaan we zowel de aanplanting van groen, het installeren van diep wortelende bomen om verontreinigende stoffen (olie en vluchtige gechloreerde

verbindingen) uit het grondwater op te pompen en/of in de wortelzone af te breken, als het aanleggen van bufferstroken langs akkers om de uitloging van mest en pesticiden naar omliggende waterlopen tegen te gaan. Aanvullend op de klassieke saneringsmethodes speelt fyto-remediatie een belangrijke rol in het behoud of de verhoging van de biodiversiteit maar ook in het beheren van de natuur met oog op het herstel van ecosysteefuncties zoals waterzuivering en de vorming van grond- en bouwstoffen. Het draagt bovendien bij aan het creëren van een aangename woon- en werkomgeving en het biedt educatieve en esthetische voordelen waardoor de algehele kwaliteit van de leefomgeving en ons natuurlijk kapitaal erop vooruitgaan.

Ten opzichte van traditionele saneringstechnieken heeft fyto-remediatie heel wat voordelen. Aangezien planten de hoofdrol spelen, werkt fyto-remediatie grotendeels op zonne-energie. Het heeft verder een minimale onderhouds- en werkingskost, de sanering gebeurt ter plaatse en er is geen transport vereist. Bovendien zorgt fyto-remediatie ook voor een verminderde percolatie van hemelwater waardoor de tijdelijk nog aanwezige verontreiniging veel minder uitspoelt naar het grondwater.

## **1.4 Inhoud en doelstellingen**

### **1.4.1 Literatuurstudie**

Aan de hand van een literatuurstudie (hoofdstuk 2) wordt nagegaan welke kennis voorhanden is inzake:

- de verschillende mechanismen en processen inzake fyto-remediatie;
- de soorten verontreinigingen;
- de plantensoorten;
- de verschillende terrein-karakteristieken die de technologie bepalen en de meerwaarde inzake duurzaamheid, leefomgevingskwaliteit en biodiversiteit.

### **1.4.2 Procedures**

In dit rapport zijn de volgende procedures uitgewerkt voor fyto-remediatie:

- Procedure voor onderzoek naar haalbaarheid en voorbereiding ontwerp (hoofdstuk 3);
- Procedure voor ontwerp, inrichting, beheer, opvolging en monitoring (hoofdstuk 4);
- Procedure voor stopzetten en nazorg (hoofdstuk 5).

### **1.4.3 Veiligheids- en gezondheidsaspecten**

In hoofdstuk 6 worden de specifieke veiligheids- en gezondheidsaspecten bij fyto-remediatie behandeld.

## 1.5 Verklarende woordenlijst

Allelopatie	Een proces waarbij planten, algen, bacteriën en schimmels stoffen produceren die de groei van andere organismen beïnvloeden.
Apoplast	De apoplast in een plant is de ruimte waar passieve, niet selectieve diffusie van stoffen plaatsvindt. Het omvat de celwanden en intercellulaire ruimtes.
Assimilaten	Assimilaten zijn stoffen die onder invloed van zonlicht in de bladeren worden aangemaakt en voornamelijk via het floëem worden getransporteerd.
Bioaugmentatie	Proces waarbij speciaal geselecteerde micro-organismen (bacteriën, schimmels) worden toegevoegd aan de verontreinigde bodem, met als doel de afbraak van de verontreinigende stof te versnellen en ook vaak plantengroei te verbeteren.
Biochar	Een vast materiaal dat wordt verkregen door thermochemische conversie van biomassa in een zuurstofarme omgeving (pyrolyse). Definitie van International Biochar Initiative, 2012.
Conjugatie	Conjugatie treedt op bij bacteriën en leidt tot de overdracht van DNA van de ene cel naar een andere cel waarbij deze met elkaar in verbinding staan via een pilus.
Endofyten	Endofytische micro-organismen leven in planten en zijn niet pathogeen of ziekteverwekkend voor de plant, maar ondersteunen of bevorderen de plantengroei.
Evapotranspiratie	Een som van evaporatie (beweging van water naar de atmosfeer van de grond, bladerdek) en transpiratie door vegetatie.
Exudaat	Exudaten in de context van planten, zijn lage en hoge moleculaire gewichtscomponenten (suikers, aminozuren, peptiden) die uitgescheiden worden door de plant (bijvoorbeeld via de wortels).

Exudatie	Proces waarbij exudaten o.a. via de plantenwortels worden vrijgezet.
Floëem	Deel van het geleidingsweefsel van vaatplanten opgebouwd uit zeefvaten en geassocieerde cellen, dat instaat voor o.a. het transport van water en daarin opgeloste assimilaten.
Foto-autotroof	In staat tot opbouw van eigen organische moleculen uit anorganische moleculen dankzij zonlicht.
Freatofyt	Plant die wortelt tot in de grondwatertafel.
Fytodegradatie	Proces waarbij planten en hun geassocieerde micro-organismen verontreinigende stoffen opnemen en afbreken in plantenweefsels door metabolische processen of enzymatische activiteit.
Fytoextractie	Proces waarbij planten en hun geassocieerde micro-organismen verontreinigende stoffen opnemen en vastzetten in plantenweefsel.
Fytohydraulica	Proces waarbij planten en hun micro-organismen water opnemen en transpireren en hierdoor een invloed uitoefenen op de grondwaterstand en op de richting en snelheid van de grondwaterstroming.
Fytoremediatie	Een saneringsstrategie die gebruik maakt van planten en micro-organismen om verontreinigende stoffen uit bodem, water of sediment te verwijderen via afbraak, extractie, transformatie of vervluchtiging ofwel de verontreiniging te stabiliseren (immobilisatie).
Fytostabilisatie	Proces waarbij planten en hun micro-organismen bepaalde verontreinigende stoffen in de bodem, rizosfeer of in de wortels stabiliseren en/of vastzetten.
Fytovolatilisatie	Proces waarbij planten en hun micro-organismen verontreinigende stoffen opnemen, transporteren en vervolgens vervluchtigen via transpiratie.
Hydrofobiciteit	Toestand of eigenschap van weinig of geen affiniteit voor water te hebben, waterafstotend.

Hyfen	De lange, zich vertakkende draden van een schimmel.
Inoculatie	Het introduceren van micro-organismen in de bodem.
Log $K_{ow}$	Octanol/water verdelingscoëfficiënt, de ratio van de concentratie van de chemische stof in de octanol fase t.o.v. zijn concentratie in de waterfase van een twee-fase octanol/water systeem.
Metalloïden	De groep van semi-metalen die qua eigenschappen tussen de metalen en niet-metalen te situeren zijn.
Micro-organismen	Organismen met cel afmetingen $< 0.2$ mm die ééncellig of meercellig kunnen zijn. Voorbeelden zijn bacteriën (Eubacteria en archaea), Cyanobacteriën (Eubacteria), schimmels en zwammen (Eukaryoten), protozoa (Eukaryota) en algen (Eukaryota).
Microbe-geassisteerde fyto-technologie	Speciaal geselecteerde micro-organismen worden in de bodem gebracht om de afbraak van organische verontreinigingen te versnellen, de extractie of stabilisatie van metalen te verbeteren en de plantengroei en gezondheid te bevorderen.
Microbioom	Het geheel aan micro-organismen in een bepaalde omgeving.
Mutualisme	Mutualisme is een interactie tussen twee levensvormen waarbij beide voordeel van die interactie hebben.
Plasmide	Een cirkelvormige streng DNA die zich buiten het chromosomaal DNA bevindt van bacteriën.
Rizodegradatie	Proces waarbij verontreinigende stoffen in de rizosfeer afgebroken worden door een gecombineerde werking van vrijgezette enzymen van planten en micro-organismen in de rizosfeer.
Rizodepositie	Het geheel aan cellen, slijmlagen, anorganische componenten en exudaten dat planten kunnen vrijzetten via de wortels.

Rizofiltratie	Een vorm van fyto remediatie waarbij water doorheen een massa wortels beweegt en waarbij giftige stoffen verwijderd worden.
Rizosfeer	Het dunne laagje bodem rond plantenwortels dat onder invloed staat van de plant en hun geassocieerde micro-organismen en waar de micro-organismen een sterke invloed uitoefenen op de plant.
Sequesteren	Opslaan/vastleggen, of apart houden in bv. plantenweefsel.
Symbiose	Het langdurig samenleven van twee of meer organismen van verschillende soorten waarbij de samenleving voor beide organismen voordelen biedt.
Transgene planten	Planten waarin in het genoom één of meerdere genen van een andere soort zijn geïntroduceerd door genetische manipulatie.
Wissenteelt	Teelt van wilgentenen/twijgen; dichte wilgen aanplantingen op natte gronden. Het hout wordt na één of enkele jaren afgezet en gebruikt voor het mandenvlechten, het beschoeien van oevers, het opbinden van planten etc.
Xyleem	Het geheel van houtvaten en geassocieerde elementen in het geleidingsweefsel van vaatplanten dat instaat voor het transport van water en nutriënten van de wortels naar de bladeren.

## 1.6 Lijst van afkortingen

BSN	Bodemsaneringsnorm
BTEX	Benzeen, Tolueen, Ethylbenzeen, Xylenen
°C	Graden Celsius (temperatuur)
DDE	dichlorodiphenyldichloroethaan

DNT	dinitrotolueen
DNA	desoxyribonucleïnezuur
m	Meter (afstand)
m-mv	Meter beneden het maaiveld (diepte)
MTBE	Methyl-tert-butylether
K	hydraulische conductiviteit
KEGG - databank	Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes databank
$K_{ow}$	Octanol water partitie coëfficiënt
KOH	Korte Omloop-Houtteelt
PAKs	Polycyclische aromatische koolwaterstoffen
PBM	Persoonlijke beschermingsmiddelen
PCBs	Polychloorbifenylen
PCE	tetrachloorethyleen
POP	persistent organic pollutant
TCE	Trichloorethyleen
TNT	Trinitrotolueen
TPH	Total Petroleum Hydrocarbons (omvat minerale olie)
VOC	Vluchtige organische componenten
$\mu\text{g/l}$	Microgram per liter (concentratie)
2,4-D	2,4-dichloorfenoxiazijnzuur

## 2 Literatuurstudie

In dit hoofdstuk wordt het begrip fyto-remediatie toegelicht, wordt een kort overzicht gegeven van de mechanismen en processen inzake fyto-remediatie, de soorten verontreinigingen, de verschillende omgevingsfactoren die de technologie bepalen, de plantensoorten en tot slot de meerwaarde inzake duurzaamheid, leefomgevingskwaliteit en biodiversiteit.

Het doel is om de bodemsaneringsdeskundige informatie te verschaffen over de mechanismen en toepassingen van fyto-remediatie en hem een hulpmiddel aan te reiken om te bepalen of fyto-remediatie succesvol zal zijn op een specifieke site.

### 2.1 Definitie

Fyto-remediatie omvat een gamma aan technieken die gebruik maken van planten en hun geassocieerde micro-organismen voor het vastleggen, verwijderen, omzetten en afbreken van verontreinigende stoffen in de bodem, (grond)water en sediment. Fyto-remediatie onderscheidt zich van andere biologische saneringstechnieken omdat het gebruik maakt van levende micro-organismen in samenwerking met levende hogere planten om verontreinigende stoffen uit het milieu te verwijderen of te stabiliseren. De laatste jaren wordt in plaats van de traditionele term “fyto-remediatie” vaak gebruik gemaakt van de term “fytotechnologieën”, dit om te benadrukken dat het ook plant-gebaseerde technologieën omvat die verontreinigingen stabiliseren. Dit is ontstaan doordat de term fyto-remediatie vaak verkeerdelijk geïnterpreteerd wordt als plant-gebaseerde saneringstechnieken met enkel de “verwijdering” van de verontreinigingen als doelstelling.

Sommige fyto-remediatie toepassingen kunnen als hoofd -saneringsvariant (al dan niet in combinatie met andere saneringstechnieken) aangewend worden voor de sanering van verontreinigde bodems, grondwater en sediment, terwijl andere als nazorg kunnen gebruikt worden na het toepassen van conventionele saneringsmethodes (vb. na afgraven). Het is mogelijk om fyto-remediatie ook als aanvullende bodemsaneringstechniek te gebruiken, bijvoorbeeld in combinatie met een ontgraving of drijfslagverwijdering waarbij fyto-remediatie dan wordt ingezet voor het verwijderen van de restverontreiniging of het verwijderen van de verontreinigingspluim.

Fyto-remediatie is inzetbaar:

- (1) voor de sanering van matig, lage of hoge concentraties van anorganische en organische verontreinigingen, ook als die verspreid zijn over grote gebieden;



- (2) voor de nabehandeling na traditionele sanering (bv ontgraving, meerfasen extractie)
- (3) om de infiltratie van verontreinigende stoffen in grondwater tegen te gaan of de uitloging van meststoffen en pesticiden in waterlopen te verminderen,
- (4) voor het controleren van de verspreiding van diffuse, niet-punt bron verontreinigingen (vb. depositie via de lucht) en
- (5) voor het leveren van een actieve vorm van gecontroleerde natuurlijke attenuatie.

Fytoremediatie kan een brede verscheidenheid aan verontreinigende stoffen verwijderen of stabiliseren waaronder metalen en organische verontreinigingen zoals onder meer vluchtige wateroplosbare componenten, polycyclische koolwaterstoffen, minerale olie en explosieven residuen, zoals verder toegelicht in de volgende paragrafen.

Er moet worden opgemerkt dat het veld van fyto-remediatie continu en zeer snel evolueert. Bepaalde richtlijnen zullen periodiek dienen te worden geactualiseerd en bijgewerkt op basis van de meest recente informatie, kennis en inzichten.

## 2.2 Mechanismen en processen

Fyto-remediatie is een ruim begrip zoals eerder vermeld. Het verwijderen of stabiliseren van verontreinigingen in bodem, sediment, of grond- en oppervlaktewater met behulp van fyto-remediatie kan via verschillende mechanismen en processen. Deze mechanismen hangen samen met de processen die planten gebruiken voor de opname van organische en anorganische verontreinigingen, maar ook de rol van de plant-geassocieerde micro-organismen is van groot belang, hetgeen hieronder meer in detail besproken wordt in 2.2.1.

Bij “**klassieke**” **fyto-remediatie** wordt gebruik gemaakt van planten en hun van nature aanwezige geassocieerde micro-organismen. De verscheidenheid aan plant-micro-organisme symbioses, verontreinigingen en verontreinigde media (bodem, (grond)water, sediment) die kunnen optreden, leiden tot een aantal verschillende (klassieke) fyto-technologie mechanismen die kunnen worden toegepast: fyto-degradatie, rizodegradatie, fyto-volatilisatie, fyto-stabilisatie, fyto-extractie en fyto-hydraulica (2.2.2).

Indien echter beperkingen optreden bij “klassieke” fyto-remediatie, kan **micro-organismen geassocieerde fyto-remediatie** mogelijk een oplossing bieden (2.2.3). Hierbij wordt een selectie aan micro-organismen aangerijkt in de rizosfeer en/of binnenin de plant. Vervolgens wordt ter verduidelijking een vergelijking gemaakt met andere, beter gekende, saneringstechnieken zoals

bioremediatie, natuurlijke attenuatie en “pump and treat” (2.2.4); en worden enkele fyto-technologie toepassingen in de praktijk toegelicht (2.2.5).

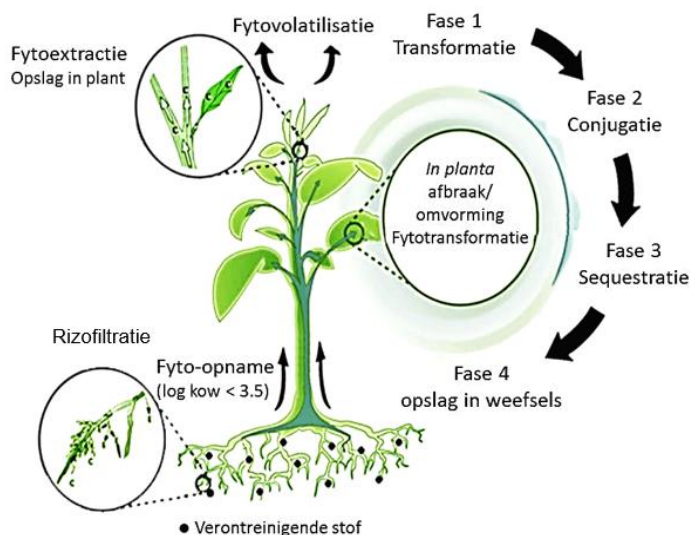
### 2.2.1 Algemeen

Om te bepalen welk fyto-remediatie mechanisme kan toegepast worden, is het cruciaal om te weten of de verontreiniging door de plant opneembaar, en/of biodegradeerbaar is.

#### *Opname van de verontreiniging*

De opname van de verontreinigende stof gebeurt voornamelijk via de wortels waarna de stoffen kunnen getransporteerd worden naar de bovengrondse delen voor accumulatie of afbraak (**Figuur 1**). De opname van organische stoffen is sterk afhankelijk van de hydrofobiciteit van de moleculen, alsook van de gekozen plantensoort en de omgevingscondities. Hydrofobiciteit wordt uitgedrukt als de  $\log K_{ow}$  (logaritme van de octanol water verdelingscoëfficiënt). Over het algemeen kan gesteld worden dat een  $\log K_{ow}$  van 0,5 - 3,5 een goede opname door planten betekent terwijl stoffen met een hogere  $\log K_{ow}$  waarde voornamelijk zullen adsorberen aan plantenwortels met geen tot een zeer geringe translocatie naar de bovengrondse delen. Zeer goed wateroplosbare verontreinigende stoffen anderzijds dringen vrij snel de xyleemvaten binnen vooraleer ze kunnen worden afgebroken door micro-organismen in de rizosfeer. Voor de afbraak van dit type verontreinigende stoffen spelen de endofyten (de bacteriën en schimmels die in de plant leven) een cruciale rol. Dit wordt verder besproken.

Na opname door de plant, kunnen de opgenomen stoffen verschillende wegen gaan waaronder: fyto-degradatie, rizodegradatie, fyto-volatilisatie en fyto-extractie.

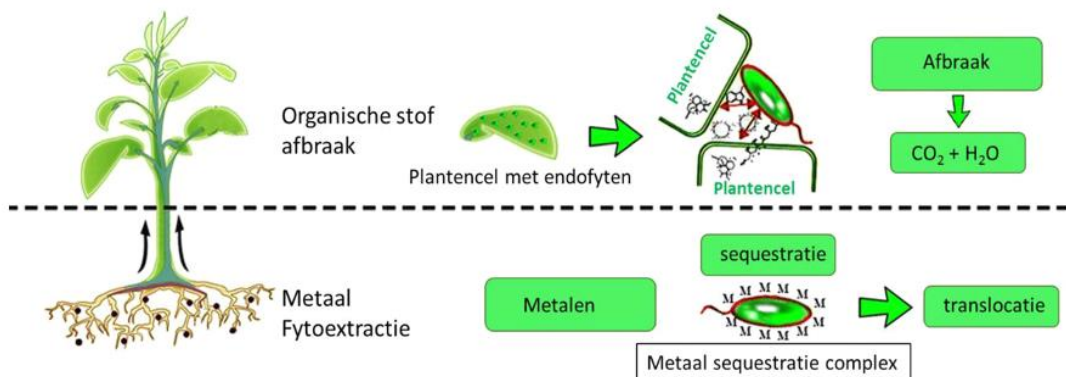


**Figuur 1: Plant opname, omvorming en afbraak van verontreinigende stoffen in de plant. (groene-lever-model) Aangepast naar Van Aken et al. (2009).**

## Afbraak van de verontreiniging

Er dient opgemerkt te worden dat planten als foto-autotrofe organismen evolutionair niet zijn uitgerust met enzymen om organische stoffen en verontreinigingen te metaboliseren (in tegenstelling tot heterotrofe organismen zoals dieren en de mens). Planten gaan daarom stoffen niet echt afbreken maar eerder transformeren tot meer wateroplosbare en minder schadelijke vormen volgens het zogenaamde groene-lever model (**Figuur 1**). In het kort: verontreinigende stoffen zonder reactieve groep treden eerst fase 1 in en worden geactiveerd door redoxreacties (bv. een functionele groep wordt op het molecule gezet zoals hydroxyl, amino of sulfhydryl). In fase 2 worden deze stoffen geconjugeerd op suikers door o.a. glutathion- en UDP-glycosyltransferases, tot slot worden ze gesequestreerd, meestal in de vacuole of celwand en finaal opgeslagen in minder fotosynthetisch actieve weefsels waaronder oude bladeren, in de wortels, of in de houtstof van de plant.

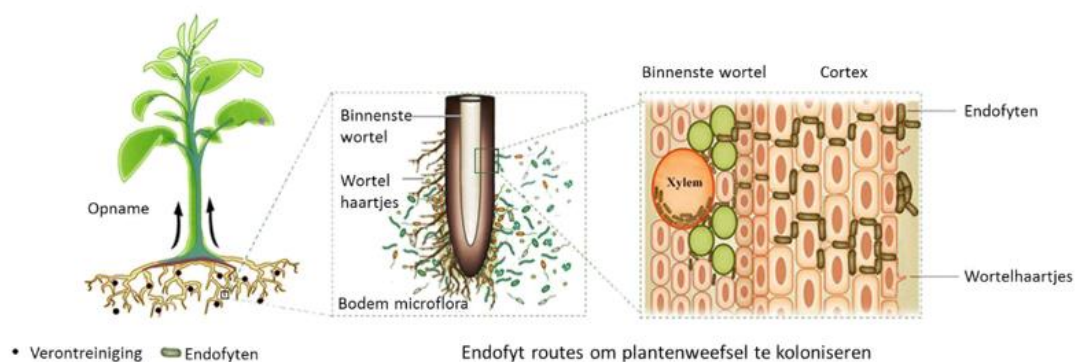
Naast transformatie door de plant zelf, zijn er de plant -geassocieerde micro-organismen, het microbioom, die gezamenlijk door hun grote verscheidenheid aan metabole enzymen wel volledige afbraak van organische stoffen tot CO<sub>2</sub> en water kunnen katalyseren (**Figuur 2**).



**Figuur 2: Endofyten in actie tegen organische en anorganische verontreinigingen. Aangepast van Weyens et al. 2009.**

Om het even welk fyto-remediatie mechanisme wordt toegepast, de **rol van de plant-geassocieerde micro-organismen** is onmiskenbaar. Planten leven samen met een enorme diversiteit aan micro-organismen, zowel bovengronds als ondergronds, wat een zeer breed spectrum van interacties toelaat (Weyens *et al.*, 2009). Ter illustratie, in de wortelzone kunnen miljarden bacteriële cellen en duizenden verschillende soorten bacteriën voorkomen per gram bodem (Berendsen *et al.*, 2012). Voor schimmels kan de biomassa oplopen tot 0,5 mg per gram bodem (Bonfante & Anca, 2009). De ondergrondse fungidraden (hyfen) kunnen wel tot 100 m lang zijn en vormen heuse netwerken tussen planten voor nutriëntenuitwisseling, communicatie en transport (Bonfante & Anca, 2009). Opmerkelijk, een bodem zonder vegetatie heeft in verhouding honderd tot duizend keer minder bacteriën en schimmels. Zijn er daarnaast nog verontreinigingen dan kan dit op zijn beurt ook zeer sterke effecten hebben op de microbiële gemeenschappen (kwantiteit en diversiteit) afhankelijk van de concentratie en aard van de verontreinigende stof (Tardif *et al.*, 2016). Omdat bacteriën en schimmels in de bodem zo een belangrijke rol spelen in tal van ecosysteem processen, is het van cruciaal belang om de impact van bodemverontreiniging op de microbiële gemeenschappen te bestuderen en ook het effect van sanering te evalueren in termen van herstel van de fysicochemische bodemstructuur maar ook van microbiologische activiteit.

Belangrijke routes, waarlangs micro-organismen de plant binnendringen zijn via de wortels (vnl. juncties tussen wortelhaartjes en ter hoogte van zich vormende zijwortels (Compant *et al.*, 2010) (**Figuur 3**). Nadat ze in de plant zijn binnengedrongen kunnen endofyten in de wortelcortex verblijven (tussen de cellen), ofwel in het xyleem binnendringen na translocatie doorheen de apoplast of het vaatbundel systeem. Endofyten interageren zeer intens met hun gastheerplant, terwijl ze profiteren van een minder competitieve omgeving voor nutriënten en niches in vergelijking met de zeer diverse, complexe en dynamische omgeving van de bodem en rizosfeer.



**Figuur 3: Kolonisatie-routes van endofytische bacteriën. Aangepast van Van Aken *et al.* (2009).**

Een interessant gegeven voor de bodemsaneringsdeskundige is dat de interacties tussen planten en micro-organismen vaak leiden tot een verbeterde efficiëntie van fytoremediatie (Quiza *et al.*, 2015, Thijs *et al.*, 2016). Bepaalde micro-organismen kunnen verontreinigende stoffen omvormen, metalen vastzetten en de plant beschermen tegen stress. Daarnaast kunnen ze ook de plantengroei stimuleren door de synthese van plantenhormonen, het vrijzetten van weinig oplosbaar ijzer en fosfaat en helpen bij de opname van deze vaak limiterende, niet-biobeschikbare elementen. Elke plant heeft een specifiek microbiom, medebepaald door de fysiologie van de plant en het vrijzetten van een plant-specifieke mengeling aan exudaten. Dat is een interessant maar nog onvolledig begrepen fenomeen. Men kan plantensoorten kiezen in termen van hun interactie met bepaalde micro-organismen die meer kunnen bijdragen aan het verwijderen van verontreinigingen. Bovendien kan, in het geval dat de klassieke fytoremediatie onvoldoende efficiënt verloopt, geopteerd worden om een selectie van micro-organismen aan te rijken en dus over te gaan naar micro-organisme geassisteerde fytoremediatie (2.2.3).

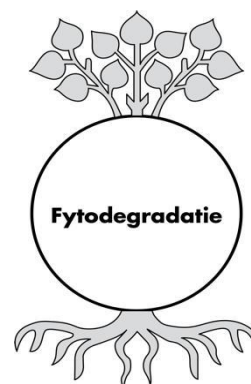
### 2.2.2 **Klassieke fytoremediatie mechanismen**

De term “klassieke” fytoremediatie verwijst hier naar de mechanismen die gebruik maken van planten en de van nature aanwezige plant-geassocieerde micro-organismen voor het verwijderen of stabiliseren van de verontreiniging. In sommige gevallen is het nodig om, naast de planten en hun geassocieerde micro-organismen, ook gebruik te maken van bodemadditieven om de beschikbaarheid van de verontreiniging te verlagen (bv bekalken bij stabilisatie) of te verhogen (enkel in geval de risico's tot uitloging vermeden kunnen worden).

De verschillende mechanismen met daarbij de rol van de plant en zijn van nature geassocieerde micro-organismen alsook de eventuele noodzaak om bodemadditieven toe te voegen worden hieronder in detail beschreven.

## **Fytodegradatie**

Fytodegradatie omvat de opname van verontreinigende stoffen in de plant en de afbraak ervan door metabole processen in de plant (zie **Figuur 1**) of door de plant of micro-organismen uitgescheiden enzymen (bv. dehalogenases, nitroreductases, oxofytodienoaat reductases, polyfenol oxidases, peroxidases, laccases, dehydrogenases). De verontreinigende stoffen worden afgebroken tot eenvoudigere moleculen, in het meest optimale geval CO<sub>2</sub> wat dan door de plant kan worden vrijgezet. De uitgescheiden plant-enzymen hebben vaak een



ruimtelijk effect, omdat ze op zichzelf buiten de plant werken, en een temporeel effect: ze kunnen nog actief zijn zelfs na het afsterven van de plant. Hoe zo een enzyme werkt, kan als volgt worden beschreven: polyfenol oxidase katalyseert de oxidatie van fenol tot quinone tijdens de afbraak van PAK's. Quinones kunnen dan condenseren met aminozuren en peptiden en daarbij initiële humuszuren vormen. Een afname in PAK's concentraties met verhoogde polyfenol oxidase activiteit is al gemeten in Belgische bodem (Andreoni *et al.*, 2004).

Fytodegradatie is enkel van toepassing op organische verontreinigingen aangezien metalen niet kunnen worden 'afgebroken'. Een eerste cruciaal aspect bij fyto-degradatie is de **plant-beschikbaarheid van de verontreiniging**.

Plant-geassocieerde micro-organismen kunnen een belangrijke rol spelen bij het **meer biobeschikbaar maken en mobiliseren van de verontreiniging**. Zo zijn er bv micro-organismen die **surfactanten** produceren die in staat zijn om olie los te maken van het bodemcomplex. Bovendien gaat de mobilisatie die veroorzaakt wordt door micro-organismen niet gepaard met het risico op uitloging naar het grondwater en dus verdere verspreiding van de verontreiniging. Dit in tegenstelling tot wanneer de mobiliserende agentia als dusdanig worden toegevoegd. Dit verschil is te wijten aan het feit dat de productie van mobiliserende stoffen door micro-organismen vooral gebeurt in de directe omgeving van de wortels en in evenwicht is met de activiteit van de plant. Kort samengevat: een actieve plant (bv in de zomermaanden) stimuleert het microbiële leven in de omgeving van de wortels waardoor de productie aan mobiliserende agentia toeneemt, maar tegelijkertijd is de opnamecapaciteit van een actieve plant ook groter. Bij het toevoegen van mobiliserende bodemadditieven komt een groot deel van de verontreiniging tegelijk vrij, terwijl de plant niet in staat is dit allemaal tegelijk op te nemen. Het toevoegen van bodemadditieven met een mobiliserende werking zou dan ook, waar mogelijk, vermeden moeten worden, tenzij er mogelijkheden zijn om uitloging naar het grondwater te voorkomen.

Een volgende belangrijke stap is de opname van de verontreiniging door de plant. Zoals eerder vermeld wordt de opname van organische moleculen door de plant in belangrijke mate bepaald door de hydrofobiciteit ( $\log K_{ow}$ ) ervan. Verschillende gechloreerde solventen, herbiciden, pesticiden, insecticiden en explosieven worden goed door planten opgenomen. Een efficiënte beschikbaarheid en opname van de verontreiniging is echter nog geen garantie voor een succesvolle fytodegradatie. Eens de verontreiniging opgenomen, kan enkel een voldoende hoge afbraakefficiëntie in de plant ervoor zorgen dat zowel fytotoxiciteit als eventuele vervluchtiging kan vermeden worden. Ook hier spelen de micro-organismen een cruciale rol. Welke micro-organismen (soorten, functionele groepen) belangrijk zijn voor de afbraak van een bepaalde contaminant is moeilijk te zeggen. Vaak liggen de afbraak-elementen op plasmiden (kleine circulaire stukjes DNA in een bacterie) die vrij kunnen uitgewisseld worden.

Enkele voorbeelden: een recente studie heeft aangetoond dat een gemeenschap gedomineerd met *Pseudomonas* sp. efficiënt was om diesel af te breken, maar indien deze groep selectief afgedood werd en *Burkholderia* sp. konden domineren werd een snellere afbraak vastgesteld (Bell *et al.*, 2013). Dit wijst erop dat er functionele redundantie is bij micro-organismen om een verontreinigende stof efficiënt te verwijderen. Saneringsdeskundigen kunnen gebruik maken van inocula met afbrekende micro-organismen (genen) om tekorten op een bepaalde site aan te vullen (zie 2.2.3). De KEGG-databank kan worden geraadpleegd om naar specifieke microbiële genen voor afbraak van aromaten te zoeken (<http://www.genome.jp/kegg/pathway.html>).

### **Rizodegradatie**



Net zoals bij fytodegradatie worden de verontreinigingen bij rizodegradatie afgebroken, maar hier voornamelijk door microbiële activiteit in de bodem in de directe omgeving van de plantenwortels. De term rizodegradatie wordt vooral gebruikt wanneer het gaat om afbreekbare verontreinigingen die niet kunnen opgenomen worden door de plant. Het is echter zo dat bij elke toepassing van fytodegradatie (afbraak in de plant) ook een deel van de verontreiniging afgebroken wordt door rizodegradatie (afbraak in rizosfeer, buiten de plant). Hoewel opname door de plant geen vereiste is voor rizodegradatie, is een goede beschikbaarheid alsnog noodzakelijk. Net zoals bij fytodegradatie is hier een belangrijke rol weggelegd voor de micro-organismen.

In de rizosfeer wordt de microbiële activiteit gestimuleerd door de aanwezigheid van plantenwortels en door de aanvoer van zuurstof, water en rizodeposities.

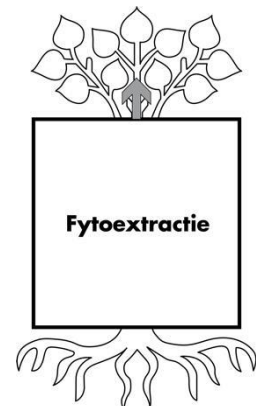


Deze rizodeposities zijn fotosynthese restproducten (5 tot 20% van de netto door een plant gefixeerde koolstof wordt vrijgezet in de rizosfeer). Het omvat zowel anorganische componenten (CO<sub>2</sub> van cel respiratie en protonen efflux) als een breed gamma aan complexe organische componenten (zoals resten van cellen, weefsels, slijm en proteïnen) en de (on)oplosbare laagmoleculair gewicht componenten (ook wel exudaten genoemd) zoals verschillende klassen van suikers, aminozuren, amiden, organische zuren aromaten en fenolen.

Naast een rijke voedselbron voor micro-organismen kunnen sommige van deze uitgescheiden verbindingen als inductor optreden voor de afbraak van aromatische componenten door bacteriën. Een bijkomend voordeel van rizodegradatie is dat de aanwezige micro-organismen in de rizosfeer zich sneller door de bodem kunnen verspreiden indien ze geadsorbeerd zijn aan de wortels. Op deze manier kunnen de aan de verontreiniging aangepaste micro-organismen sneller een groter volume verontreinigde grond koloniseren. Dit proces is onder andere belangrijk voor de afbraak van petroleumkoolwaterstoffen (Van Hamme *et al.*, 2003) en explosieven (Rylott *et al.*, 2011).

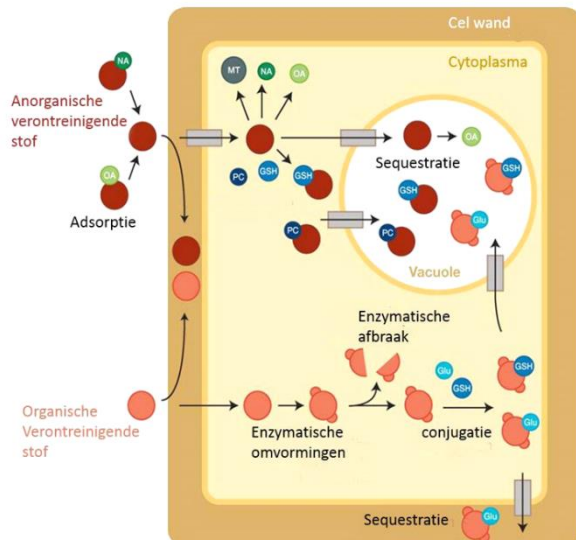
### **Fytoextractie**

Bij fytoextractie worden de verontreinigende stoffen, veelal metalen, opgenomen door de plantenweefsels en vervolgens geaccumuleerd in bij voorkeur de bovengrondse delen van de plant (**Figuur 1**). De metaalopname en accumulatie is sterk afhankelijk van de plantensoort, het type en de concentratie van de verontreiniging, de pH en de biobeschikbaarheid van de metalen in de bodem. Er zijn verschillende mechanismen die een rol spelen bij de opname van metalen door planten, o.a. exudatie van protonen en organische zuren bevorderen de biobeschikbaarheid en mobilisatie van metalen in de rizosfeer.



Daarnaast kunnen plant-geassocieerde chelatoren zoals fytochelatines en sideroforen metaalcomplexen vormen waarna ze kunnen worden opgenomen door de plant en vervolgens getransporteerd en getransloceerd (**Figuur 4**). Metaaltolerante micro-organismen kunnen de extractie van metalen bevorderen door de secretie van zuren en H<sup>+</sup>, ze kunnen zorgen voor de detoxificatie van de metalen, en de biomassa productie van de plant verbeteren alsook de stress reduceren. Ook hier dient opgemerkt te worden dat het grote voordeel van deze micro-organisme – geïnduceerde mobilisatie van de metalen het feit is dat dit in evenwicht gebeurt met de activiteit van de plant. Hierdoor gaat een grotere mobilisatie steeds gepaard met een hogere opname, waardoor risico's op uitloging vermeden worden.





**Figuur 4: Mechanismen voor de opname en opslag van organische en anorganische verontreinigende stoffen, aangepast uit Pilon -Smits, 2005. PC: fytochelatines, OA: organische zuren, GSH: glutathion, MT: metallothioneïnes, NA: nicotianamine, Glu: glutamine zuur.**

Het mobiliseren van de metalen, gebruik makend van bodemadditieven, gaat echter gepaard met hoge risico's op uitloging naar het grondwater doordat een te hoge concentratie aan metalen tegelijk vrijkomt en de plant dit niet snel genoeg kan opnemen. Mobiliserende bodemadditieven kunnen dan ook enkel toegepast worden om fytoextractie te versnellen indien de risico's op uitloging vermeden kunnen worden.

Er zijn zeer veel voorbeelden gekend van endofytische micro-organismen die extreem hoge toleranties bezitten voor metalen zoals Cr, Cd, Cu, Pb, Zn en die zowel de plantengroei als de opname van metalen door de plant stimuleren. Er zijn echter nog niet veel studies die het totale microbioom bestudeerd en beschreven hebben van metaal-accumulerende planten (Thijs *et al.*, 2017). Meer dan 99 % van de bacteriële gemeenschappen van hyperaccumulators moet nog voor het eerst beschreven worden.

Planten die de metalen accumuleren moeten ook vaak geoogst worden. Dit moet op een zorgvuldige manier gebeuren zodat de met metaal-beladen biomassa de bodem niet opnieuw vervuult als de planten afsterven of bomen hun bladeren verliezen. Er bestaan verschillende economisch rendabele manieren voorhanden om de metaal-beladen biomassa te waarderen, bv. door pyrolyse.

Fytoextractie wordt typisch toegepast bij anorganische verontreinigingen, zoals metalen, metalloïden en radioactieve elementen. Fytoextractie duurt meestal lang (tiental jaren afhankelijk van de vervuilingsgraad, de saneringsdoelstelling die moet gehaald worden en toestand van de te saneren site). Vandaar dat fytoextractie vaak als secundaire benefit wordt gezien, naast andere acties voor natuurherstel en bodemvalorisatie.

## **Fytohydraulica**

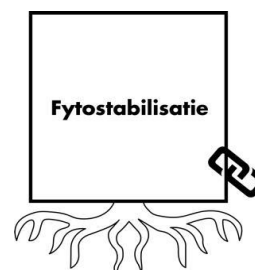


Fytohydraulica is gebaseerd op de capaciteit van planten om oppervlakte- en grondwater te evapotranspireren (**Figuur 5a en 5c**). De horizontale migratie van grondwater kan worden gecontroleerd en ingeperkt door diep-wortelende plantensoorten die veel water kunnen opnemen en transpireren. Bomen die worden geclassificeerd als freatofyten zijn diep wortelende, snel transpirerende bomen die graag in natte bodems staan en tijdelijke perioden van waterverzadiging kunnen tolereren. Typische freatofyten

zijn populieren en wilgen. Bomen die wortelen in een verontreinigde grondwaterpluim kunnen de verontreiniging inperken en dit is dan een barrière/grondwater-pluimbeheerstechniek. Populieren kunnen ook aangeplant worden op sites met verontreinigd grondwater en functioneren dan als een echte grondwatersaneringsinstallatie.

## **Fytostabilisatie**

In dit geval worden planten gebruikt om verontreinigingen vast te leggen (te immobiliseren) door adsorptie, absorptie en accumulatie in de wortels, neerslagvorming in de wortelzone of door fysieke stabilisatie van de bodem (**Figuur 5d**). Fytostabilisatie vermindert de verplaatsing van verontreinigingen naar het grondwater of de atmosfeer. Het kan onder andere een nuttige rol spelen bij het vastleggen van metalen in de bodem en hydrofobe koolwaterstoffen (**Figuur 4**).



Na verloop van tijd kunnen de concentraties aan gebonden hydrofobe koolwaterstoffen dalen door micro-organismen gemedieerde afbraak. Een veel voorkomend probleem bij fytostabilisatie is een te hoge fytotoxiciteit. In dit geval is het aangewezen te werken met stabiliserende bodemadditieven (bv bekalking, fosfaten, mineraaloxides en organische stoffen) om zo de fractie aan verontreiniging die de plant kan opnemen, en dus ook de fytotoxiciteit, zoveel mogelijk te beperken.

## **Fytovolatilisatie**

Na opname door de plant kunnen de verontreinigingen ook getransporteerd worden naar de bladeren van de plant (**Figuur 5a en 5c**). Hier kunnen vluchtige verontreinigingen worden uitgescheiden door middel van verdamping.

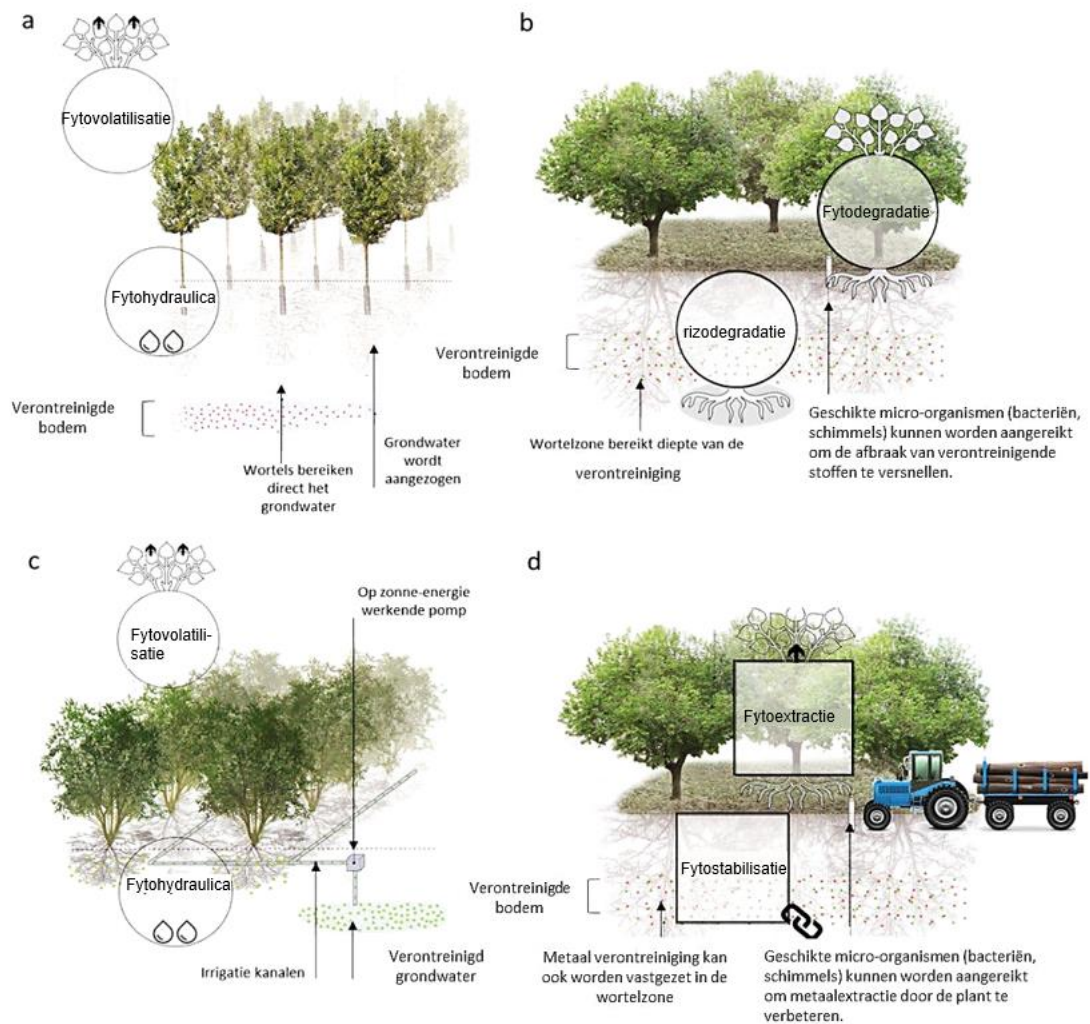


De planten zorgen hierbij voor een versnelde verdamping zodat de verontreinigingen sneller uit de bodem verdwijnen. Het kan echter een verschuiving van het probleem naar een ander milieucompartment veroorzaken en dit moet dus goed opgevolgd en vermeden worden. Fytovolatilisatie kan dus enkel toegepast worden als de vervluchtigde verontreiniging snel afgebroken wordt eens het in de lucht terecht komt of als het vrijkomen onder gecontroleerde omstandigheden kan gebeuren. Bij afbreekbare vluchtige verontreiniging is het echter aangewezen om ervoor te zorgen dat er voldoende afbraakcapaciteit aanwezig is zodat fytodegradatie en rizodegradatie optreden in plaats van fytovolatilisatie. Hierbij spelen endofytische micro-organismen een essentiële rol in het afbreken van wateroplosbare vluchtige componenten. Om het mogelijke probleem van fytovolatilisatie te voorkomen is het dan ook aangeraden om de juiste micro-organismen toe te voegen aan de plant via inoculatie (zie 2.2.2).

**Tabel 1: Voorstelling fyto-remediatie mechanismes. Tabel aangepast van Interstate Technical Regulatory Council (ITRC). 2009. Phytotechnology Technological and Regulatory Guidance and Decision tree.**

Mechanismes	Omschrijving	Saneringsdoelstelling
Fytodegradatie	Proces waarbij planten en hun geassocieerde micro-organismen verontreinigende stoffen opnemen en afbreken in plantenweefsels door metabolische processen of enzymatische activiteit.	Sanering door afbraak
Fytoextractie	Proces waarbij planten en hun geassocieerde micro-organismen verontreinigende stoffen opnemen en vastzetten in plantenweefsel.	Sanering door verwijdering van planten die de verontreiniging hebben opgenomen
Fytohydraulica	Proces waarbij planten en hun micro-organismen water opnemen en transpireren en hierdoor een invloed uitoefenen op de grondwaterstand en op de richting en snelheid van de grondwaterstroming.	Verspreidingsbeperking door controle van de hydrologie
Fytostabilisatie	Proces waarbij planten en hun micro-organismen bepaalde verontreinigende stoffen in de rizosfeer of in de wortels vastzetten.	Verspreidingsbeperking

Fytovolatilisatie	Proces waarbij planten en hun micro-organismen verontreinigende stoffen opnemen, transporteren en vervolgens vervluchtigen via transpiratie.	Sanering door verwijdering door de plant (transpiratie)
Rizodegradatie	Proces waarbij verontreinigende stoffen in de rizosfeer afgebroken worden door een gecombineerde werking van vrijgezette plantenzymen en micro-organismen in de rizosfeer.	Sanering door afbraak



**Figuur 5: Vereenvoudigde schetsen van fyto-remediatie mechanismes. Aangepast uit "PHYTO, Principles and resources for site remediation and landscape design", door Kate Kennen en Niall Kirkwood, 2015.**

### 2.2.3 Micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie

In het geval met klassieke fyto-remediatie de saneringsdoelstellingen onvoldoende kunnen bereikt worden, kan **micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie** een oplossing bieden. Bij micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie worden speciaal geselecteerde micro-organismen aangerijkt in de rizosfeer en/of binnenin de plant om de afbraak van organische verontreinigingen te versnellen, de extractie of de stabilisatie van metalen te verbeteren en de plantengroei en de gezondheid te bevorderen (Weyens *et al.*, 2009, Weyens *et al.*, 2009, Thijs *et al.*, 2016). Een andere term die wordt gebruikt is bioaugmentatie. Het toevoegen van micro-organismen is geen sanering op zich maar moet worden gezien worden als een ondersteunende maatregel. Voorzieningen die de groei van de micro-organismen verzekeren zoals toevoeging van elektronacceptor, nutriënten kunnen bijkomend toegepast worden. De bacteriën die voor bioaugmentatie gebruikt worden zijn bij voorkeur **geïsoleerd van de site zelf**, dit omdat meer goede interacties voorkomen tussen inheemse micro-organismen en lokale planten dan met site-vreemde microorganismen (Bell *et al.*, 2014b). Hetzelfde geldt wanneer met werkt met plant-exoten, er moet een symbiose met de gastheerplant kunnen plaatsvinden, en deze interacties zijn sterker tussen inheemse planten en van nature voorkomende micro-organismen (Bell *et al.*, 2014b).

Het **verschil tussen bacterie-geassisteerde fyto-remediatie en bacterie-geassisteerde bio-remediatie** is dat bij fyto-remediatie, de plant een **gunstige omgeving** creëert waardoor geïntroduceerde bacteriën veel langer aanwezig zullen blijven en hun werking langer kunnen uitoefenen, in tegenstelling tot een plantloze bodem waar geïntroduceerde bacteriën zeer snel worden uitgeconcentreerd door de aanwezige microorganismen (Bento *et al.*, 2005). Het **succesvol toepassen van bioaugmentatie** kan enkel indien rekening wordt gehouden met tijdstip van toediening, wijze van toediening en bovenal dient men een goed begrip te hebben van de ecologische interacties die bepalen of een symbiose tussen plant en afbrekende microorganismes 'leefbaar' is (Thijs *et al.*, 2016). Daarom is het aangeraden om voor bioaugmentatie beroep te doen op fyto-remediatie specialisten, zoals ook verder duidelijk zal worden.

Bioaugmentatie kan worden toegepast voor alle organische en metaalverontreinigingen. Er zijn **verschillende manieren waarop micro-organismen kunnen bijdragen aan een efficiënte fyto-remediatie**.

- 1) Micro-organismen kunnen de algemene plantengroei en ontwikkeling bevorderen, hetgeen bv cruciaal kan zijn om negatieve effecten van fytotoxiciteit te onderdrukken.
- 2) Ze kunnen de groei en ontwikkeling van een uitgebreider wortelstelsel stimuleren, wat dan weer zorgt voor een groter bereik van de plant op de verontreiniging.
- 3) Een bevordering van de plantengroei kan ook de pompcapaciteit verhogen hetgeen voordelig is bij fytohydraulica en fytovolatilisatie toepassingen.
- 4) Verder kunnen micro-organismen op verschillende manieren interageren met de aanwezige verontreiniging: ze kunnen zorgen voor mobilisatie (bv door de productie van surfactanten en organische zuren), stabilisatie (bv door de productie van chelatoren), afbraak en detoxificatie (bv door sequestratie op de celwand).

In onderstaande tabel wordt voor elk fyto-remediatie mechanisme weergegeven (i) wanneer het aangewezen is om **over te gaan van klassieke fyto-remediatie naar micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie** en (ii) welke processen bevorderd kunnen worden door aanrijking van bepaalde geselecteerde micro-organismen (**Tabel 2**).

**Tabel 2: Klassieke fyto-remediatie vs. micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie en de rol van de toegevoegde micro-organismen**

Fyto-remediatie mechanisme	Wanneer is het aangewezen om over te gaan van klassieke fyto-remediatie naar micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie	Micro-organismen die worden aangerijkt staan in voor de bevordering van:				
		Algemene plantengroei	Stabilisatie	Mobilisatie	Afbraak	Detoxificatie
Fytodegradatie	Onvoldoende afbraakpotentieel Vervluchtiging via de bladeren Onvoldoende beschikbaarheid Onvoldoende opname Fytotoxiciteit	x		x	x	x
Rizodegradatie	Onvoldoende afbraakpotentieel Onvoldoende beschikbaarheid Fytotoxiciteit	x		x	x	x
Fytoextractie	Onvoldoende beschikbaarheid Onvoldoende opname Onvoldoende translocatie Fytotoxiciteit	x		x		x
Fytohydraulica	Onvoldoende biomassa Onvoldoende pompcapaciteit Fytotoxiciteit	x	x			x
Fyto-stabilisatie	Te grote beschikbaarheid Te sterke opname Fytotoxiciteit	x	x			x
Fytovolatilisatie	Onvoldoende beschikbaarheid Onvoldoende opname Fytotoxiciteit	x		x		x



Bij micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie worden de meest gunstige micro-organismen voor het actieve fyto-remediatie mechanisme geselecteerd en **aangerijkt via inoculatie (Figuur 6a)**. In vele gevallen zal men de toediening ook meerdere malen moeten herhalen om de aanwezigheid van de toegevoegde micro-organismen te garanderen. In sommige gevallen kan men ook gebruik maken van consortia (groepen van micro-organismen) die zich onder gecontroleerde omstandigheden in de bodem beter kunnen handhaven en vestigen.



**Figuur 6:** a) Inoculeren van populier op een kerosine-verontreinigde site. b) Bemonsteren en meten van trichloroethyleen evapotranspiratie door populieren. Foto: Nele Weyens, Universiteit Hasselt.

Een belangrijke strategie die kan worden toegepast om het succes van de kolonisatie te verhogen is gebruik maken van **endofyten**, bacteriën die in de plant leven in de intracellulaire ruimtes of in het xyleem en floëem van de plant zonder negatieve effecten voor de plant. De 'omgeving' in de plant is minder stressvol voor microben, er is een lagere biodiversiteit en dus minder competitie tussen micro-organismen wat het succes op vestiging van specifieke bacteriën kan verhogen. Momenteel wordt er nog veel onderzoek verricht naar welke endofyten voorkomen bij een bepaalde plantensoort wat ook de selectie van endofytsorten voor inoculatie kan vergemakkelijken (Beckers *et al.*, 2016). Momenteel zijn er sterke indicaties dat endofyten gemeenschappen voor een belangrijk deel specifiek zijn voor een plantensoort (en zelfs cultivar), en voor een ander gedeelte bepaald worden door de omgevingsfactoren waaronder de bodem micro-organismen (Berg & Smalla, 2009). Endofyten uitgerust met trichloorethyleen- en toluëen afbraakgenen geïnfiltreerd in de wortelzone van populieren koloniseerden de boom snel, en er werd zelfs vastgesteld dat de afbraakgenen via **natuurlijke gen-uitwisseling** werden overgedragen naar andere natuurlijke endofyten die deze genen nog niet hadden (Barac *et al.*, 2004, Taghavi *et al.*, 2005, Weyens *et al.*, 2010).

Het resultaat was dat er veel meer toluen of TCE werd afgebroken tot CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>O en dus geen schadelijke restproducten werden geëvapotranspireerd. Deze technologie heeft dan ook een zeer hoog potentieel en kan voor vele andere organische stoffen worden toegepast. Het wortel-endofyt-microbioom van *Acer pseudoplatanus*, een belangrijke boomsoort voor de sanering van vervuiling met explosieven, is recent ook in detail onderzocht (Thijs et al.,2018).

#### 2.2.4 Positionering van (micro-organismen geassisteerde) fyto remediatie tov andere saneringstechnieken

Aangezien fyto remediatie gebaseerd is op natuurlijke processen, wordt vaak de vergelijking gemaakt met **natuurlijke attenuatie** (reductie verontreiniging door natuurlijke processen) waar in de meeste gevallen ook een vorm van vegetatie aanwezig is. Meer bepaald: Wat is nu de meerwaarde van fyto remediatie t.o.v. natuurlijke attenuatie?

Het grote verschil schuilt zich in het feit dat je bij de toepassing van fyto remediatie heel gericht een plant gaat selecteren. Gaat het bv om een grondwaterverontreiniging, dan zal het nodig zijn om freatofyten aan te planten aangezien deze bomen met hun wortels tot in het grondwater gaan. Het omgekeerde geldt echter wanneer het om een oppervlakkige verontreiniging gaat waarbij dan bv kan geopteerd worden om met grassen te werken die meer oppervlakkig wortelen. Ook is het zo dat voor heel wat verontreinigingen geweten is welke planten (soorten/cultivars) het best in staat zijn om ze te accumuleren. Een **goede plantenkeuze** zal dus de efficiëntie significant kunnen verbeteren. Tot slot kan bij de aanplant voor fyto remediatie een **drainagesysteem** voorzien worden dat het mogelijk maakt om nadien het fyto remediatie proces verder te bevorderen door toevoeging van specifieke micro-organismen. In geval bij natuurlijke attenuatie geen vegetatiedek aanwezig is, biedt de aanwezigheid van de plant bij fyto remediatie nog bijkomende voordelen met als belangrijkste **de zuurstoftoevoer in diepere bodemlagen** via de plantenwortels, **de stimulatie van de microbiële activiteit in de wortelzone** en het **“aanzuigen” van de verontreiniging**.



Ook **bioremediatie** wordt vaak vergeleken met fyto-remediatie. Het gebruik van planten heeft echter vele, vaak nog onvoldoende gekende, voordelen. Zo zorgt het wortelstelsel voor een **sterke bevordering van de zuurstoftoevoer** in de bodem, hetgeen in de meeste gevallen een positief effect heeft op de afbraak van organische verontreiniging. Verder zorgen de **wortel-exudaten voor een sterke stimulering van de microbiële activiteit** in de omgeving van de wortels. Afhankelijk van om welke micro-organismen het gaat, kan dit resulteren in (i) hogere beschikbaarheid van de verontreiniging of (ii) verbeterde afbraak van de verontreiniging. Doordat de **hogere beschikbaarheid optreedt in de directe omgeving van de wortels** van de plant, kan de beschikbaar gemaakte verontreiniging direct opgenomen worden door de plant hetgeen de risico's op uitloging naar het grondwater vrijwaart. Tot slot kunnen planten een enorme **pompcapaciteit** hebben. Zo kan 1 wilgenboom tot wel 200 l water per dag transpireren. Deze enorme pompkracht geeft een bijkomende aanzuiging van verontreinigingen.

Tot slot kan fyto-remediatie, meer bepaald fytodegradatie en rizodegradatie, vergeleken worden met een conventionele "**pump and treat**" toepassing. De aanwezige planten fungeren als **pomp op zonne-energie**, terwijl de plant-geassocieerde micro-organismen zorgen voor de afbraak van de verontreiniging. Hierbij dient opgemerkt te worden dat het sterk verspreide wortelstelsel van planten zorgt dat het bereik van de verontreiniging door de plant als pomp veel groter is dan bij een conventionele pompinstallatie. Bovendien kunnen de wortels van freatofyten tot wel 10m diep gaan om het grondwater te bereiken. De afbraak wordt zoals hierboven reeds aangegeven bevorderd door bijkomende zuurstoftoevoer en een stimulatie van microbiële activiteit in de omgeving van de wortels.

### 2.2.5 Fytotechnologie toepassingen in de praktijk

Fytotechnologie-toepassingen kunnen worden ingedeeld op basis van het lot van de verontreinigende stof (afbraak, extractie, immobilisatie, vervluchtigen of een combinatie van de voorgaande) (**Tabel 1, Tabel 2 en Figuur 5**). Fytotechnologie-toepassingen kunnen ook worden ingedeeld op basis van het mechanisme dat betrokken is zoals het extraheren van verontreinigende stoffen uit het grondwater door freatofyten, het concentreren van de vervuilende stoffen in het plantenweefsel, het vervluchtigen of transpireren van vluchtige stoffen van de plant naar de lucht, het immobiliseren van de vervuiling in de wortelzone, de controle van uitloging door bufferstroken en de controle van infiltratie door een vegetatiedek.

**Tabel 3: Fytotechnologie toepassingen**

<b>Toepassing</b>	<b>Medium</b>	<b>Mechanisme</b>
Vegetatie afdekkingen voor stabilisatie van bodem, sediment en voor infiltratiecontrole	Bodem Sediment Grondwater Oppervlaktewater	Fytodegradatie Fytoextractie Fytohydraulica Fytovolatilisatie Rizodegradatie Fytostabilisatie
Remediërende afdekkingen	Bodem Sediment Grondwater Oppervlaktewater	Fytodegradatie Fytoextractie Fytohydraulica Fytovolatilisatie Rizodegradatie Fytostabilisatie
Hydraulische barrières	Grondwater	Fytoextractie Fytodegradatie Fytohydraulica Fytostabilisatie
Aanplantingen van bomen voor fytoremediatie	Bodem Sediment Grondwater	Fytodegradatie Fytoextractie Fytohydraulica Fytovolatilisatie Rizodegradatie Fytostabilisatie
Oeverbuffers en bufferstroken langs autosnelwegen en akkers	Bodem Sediment Oppervlaktewater Grondwater	Fytodegradatie Fytoextractie Fytovolatilisatie Rizodegradatie Fytostabilisatie
Biofilters (Rietvelden, moerassen en andere 'constructed wetlands')	Sediment Oppervlaktewater	Fytodegradatie Fytoextractie Fytovolatilisatie Rizodegradatie Fytostabilisatie

## **Vegetatiebedekkingen voor stabilisatie van bodem/sediment**

Bodem en sediment kunnen zich mobiliseren (verticaal en lateraal) wanneer ze worden blootgesteld aan ongecontroleerde waterstromen en/of mobilisatie door de wind, meer bepaald "erosie" of "uitloging". Stabiliserende vegetatiebedekkingen bieden een natuurlijke barrière en weerstand tegen erosie en uitloging.

Het belangrijkste mechanisme dat bijdraagt aan het tegengaan van erosie is de infusie van plantenwortels in de bodem of sediment. Typisch worden planten met vezelachtige wortelstelsels gebruikt, zoals grassen, kruidachtige soorten en waterrijke soorten. Wanneer de bodem of het sediment verontreinigd is, kunnen de verontreinigingen ook door planten worden aangepakt. Specifiek heeft fytostabilisatie betrekking op bodem/sedimenterosie of om bulkmigratie van de verontreiniging te minimaliseren, terwijl fytosequestratie-mechanismen de mobiliteit van de verontreiniging zelf aanpakken. Bij vegetatiebedekkingen voor stabilisatie van bodem of sediment, zijn planten specifiek geselecteerd om bodem/sediment-migratie te beheersen (via infusie met vezelachtige wortelstelsels) en/of migratie van contaminanten door fytosequestratie te voorkomen. In sommige gevallen kan dezelfde plantensoort beide doelen dienen.

Hiernaast kunnen andere planten geselecteerd worden op basis van hun vermogen tot fytoextractie en verontreinigingen accumuleren in de bovengrondse plantdelen.

## **Vegetatiebedekkingen voor infiltratiecontrole**

Vegetatiebedekkingen voor infiltratiebeheersing maken gebruik van het vermogen van planten om aanzienlijke volumes water op te nemen en om de percolatie van de verontreiniging tot een minimum te beperken (Veissman, Lewis en Knapp 1989).

Het belangrijkste fytotechnologiemechanisme voor deze toepassingen is fytohydraulica (zie paragraaf 2.2.2).

Vegetatiebedekkingen voor infiltratiecontrole maken gebruik van planten die de verdamping en plant-evapotranspiratieprocessen van het systeem maximaliseren. De vegetatie bestaat meestal uit zaadmengsels of combinaties van planten/bomen die toegang hebben tot het opgeslagen water en een hydraulische barrière creëren.

## Remediërende bedekkingen

Naast het vermogen van afdeksystemen om bodem/sediment te stabiliseren en het toepassen van een hydraulische controle, kunnen dicht op elkaar geplaatste bodembedekkers en grassen ook worden gebruikt om verontreinigende stoffen te fytoremediëren. Remediërende afdekkingen zijn vegetatiesystemen die doorgaans worden toegepast op bodems met een zeer oppervlakkige verontreiniging (verontreiniging in de toplaag van de bodem). Dit in tegenstelling tot fytoremediërende aanplantingen met bomen (zie paragraaf 2.2.2), die worden toegepast voor bodems en/of grondwater met dieper gelegen verontreinigingen.

Het typische bereik van de effectiviteit voor remediërende afdekkingen is 30 tot 60 cm onder het grondoppervlak; echter, in sommige situaties werd gerapporteerd dat diepten tot 1,5 m beïnvloed werden door deze bodembedekkers (Olsen en Fletcher 1999).

Fytoremediatie omvat rizodegradatie, fyto-degradatie en/of fyto-volatilisatie-mechanismen (zie respectievelijk paragraaf 1.2.2, 1.2.5 en 1.2.6) om de concentraties van verontreinigende stoffen op de locatie te verminderen. Bovendien omvat fytoremediatie ook fytoextractie (zie paragraaf 1.2.4) zolang het oogsten en verwijderen van de verontreinigende stoffen in de toepassing is opgenomen. Bodembedekkingen voor fytoremediatie worden (in sommige landen) op grote schaal toegepast op bodems verontreinigd met o.a. PAK's, PCB's en andere persistente organische verontreinigende stoffen die doorgaans minder mobiel, oplosbaar, biologisch afbreekbaar en biologisch beschikbaar zijn. Recensies van deze werken zijn te vinden in de literatuur (Flathman en Lanza 1998; Frick, Farrell en Germida 1999; Zeeb et al. 2006; Russell 2005).

Tenslotte worden remediërende bodembedekkingen gebruikt voor fytoextractie van specifieke anorganische verontreinigingen zoals metalen, zouten en radionucliden. Typische concentratieverhoudingen van veel van dergelijke elementen zijn door veel wetenschappers beschreven (Wang, Biver en Yu 1993). Hierbij moeten de bovengrondse delen van de plant waar de anorganische verontreiniging zich ophoopt, worden geoogst met conventionele landbouwmethoden en van de locatie worden verwijderd.

## Hydraulische barrières

Hydraulische controle is een andere vorm van controle van een grondwater verontreinigingspluim of voor het verwijderen van grondwater dat in niet-verontreinigd gebied instroomt (Ferro *et al.*, 2003, 2013). Bomen kunnen een

substantiële hoeveelheid grondwater verwijderen van de verontreinigde zone door het grondwater te verbruiken via transpiratie en fungeren daarbij als biologische pompen. De diepte van de grondwatertafel t.o.v. de worteldiepte is daarbij een belangrijke overweging. Sommige boomsoorten die diep wortelen zijn uitermate geschikt voor hydraulische controle. Hydraulische controle kan worden berekend en gemodelleerd door het vergelijken van de hoeveelheid getranspireerd water met de grondwaterstroming, en door terrein-specifieke, geologische en klimatologische variabelen mee in rekening te brengen.

### **Aanplanting van bomen voor fytoremediatie**

Naast het vermogen van diepwortelende planten en bomen om grondwater op te nemen en te transpireren, kunnen ze ook worden gebruikt voor het fytoremediëren van diepere bodemlagen en verontreinigde pluimen die zich bv. bij de top van de grondwaterspiegel bevinden. Fytohydraulica kan worden gebruikt om de verontreinigingen in de wortelzone te brengen door het pompeffect van de bomen. Rizodegradatie, fytodegradatie en/of fytovolatiliserings-mechanismen (zie paragraaf 2.2.2) kunnen verontreinigende stoffen in de onverzadigde zone remediëren.

Aanplantingen van bomen voor fytoremediatie worden (in het buitenland) op grote schaal toegepast op grondwaterverontreinigingen met stoffen zoals aardolieproducten (BTEX, MTBE, alifaten, mineralie olie) en gechlorideerde koolwaterstoffen. De lichtere fracties van deze bestanddelen zijn over het algemeen mobiel, oplosbaar en biologisch beschikbaar met log  $K_{ow}$ -waarden in het bereik waar opname in planten wordt verwacht. Maar ook de bioactiviteit in de rizosfeer speelt een voorname rol aangezien de verontreinigingen ook vaak hier al afgebroken kunnen worden vooraleer ze door de plant kunnen worden opgenomen. Verschillende reviews van deze applicaties zijn gepubliceerd (Chappell 1998, Van Den Bos 2002). Bovendien zijn sommige aanplantingen van bomen voor fytoremediatie succesvol geweest zelfs bij het aanplanten in een zone met vrije fase-product. Hierbij werd een drastische verlaging van de concentraties vastgesteld indien de verontreinigingspluim door de wortelzone stroomde (Fiorenza *et al.* 2005, Nichols *et al.*, 2014). Wilgen en populieren die werden aangeplant op een petroleum verontreinigde grondwaterpluim, konden succesvol de verontreinigingspluim inperken, waarbij ze grondwater onttrokken aan 23 liter tot 59 liter per dag per boom (Ferro *et al.*, 2003, 2013).

### **Oeverbuffers en bufferstroken langs autosnelwegen en akkers**

Oeverbuffers zijn begroeide gebieden die aangrenzende waterbronnen beschermen tegen verontreiniging. Bovendien bieden deze buffers bescherming tegen erosie en een habitat voor waterdieren en andere dieren in het wild. Landbouw en verstedelijking kunnen immers verontreiniging van stroomafwaarts gelegen oppervlaktewaterlichamen veroorzaken.

Het is bekend dat oeverbuffers (ook bekend als oeverzones, begroeide wouden, retentie- / detentiebekkens, enz.) van vitaal belang zijn voor het beheersen van de hydrologie, het zuiveren van de afstroming en ondiep grondwater. De hydrologie wordt beïnvloed door de vegetatie in de oeverbuffer met dezelfde mechanismen die fytohydraulica aansturen, terwijl hun wortelsystemen fytosequestratie, rizodegradatie, fytoextractie, fytodegradatie en/of fytovolatilisatie bevorderen (zie paragraaf 2.2.2).

### **Biofilters (rietvelden, moerassen en andere ‘constructed wetlands’)**

Rietvelden, moerassen en andere biologische zuiveringssystemen gebruiken geochemische en biologische processen die inherent zijn aan het ‘wetland’-ecosysteem om metalen, explosieven en andere organische verontreinigende stoffen uit afvalwater te verwijderen. De voornaamste processen die plaatsvinden zijn filtratie en rizodegradatie. Hoewel de fytotechnologie alle componenten van het ecosysteem omvat: de organische bodems, vasculaire planten, algen, en microbiële fauna, is het voornamelijk de microbiële activiteit die verantwoordelijk is voor de sanering.

Afvalwater met hoge concentraties aan zware metalen vloeit door de aërobe en anaërobe zones van de biofilter. De metalen worden verwijderd door ion-uitwisseling, adsorptie, absorptie en precipitatie met geochemische en microbiële oxidatie en reductie (vb. neerslaan van metalen als hydroxides en sulfiden). Ion-uitwisseling gebeurt wanneer de metalen contact maken met humus of andere organische componenten in het rietveld. De metalen slaan neer en blijven gebonden in de moerassen of worden eruit gefilterd als het water doorheen de biofilter percoleert of worden opgenomen door de planten. In het laatste geval kunnen de planten die metalen hebben opgenomen als grondstof gebruikt worden voor pyrolyse waarbij biogas en bio-olie kunnen worden gewonnen en de kleine resthoeveelheid met metaal-beladen biochar veilig kan worden verwijderd.

Een aangelegd rietland waarbij gravel werd vervangen door geleidend materiaal (steenool, actieve kool, grafiet) resulteerde in een tot vijf keer snellere waterzuivering van organische stoffen dan een conventioneel rietveld (Aguirre-Sierra *et al.*, 2016). Dat komt omdat het geleidend materiaal het elektronen-transport kan versnellen in de anaërobe zone en dus ook het microbiële metabolisme van elektrogene bacteriën (bv. *Geobacter sulfurreducens*) die het ammonium verwijderen en het biologische zuurstofverbruik (BZV) verlagen. Wanneer het afvalwaterzuiveringsbekken daarbovenop ook nog eens elektrisch gepolariseerd wordt, gebeurt de afbraak van organische verontreinigende stoffen nog sneller (iMETLand, 2020; <http://imetland.eu/>).

## 2.3 Verontreinigingen

Fytoremediatie kan toegepast worden op een grote diversiteit aan verontreinigende stoffen met elk hun specifieke kenmerken en randvoorwaarden. Vaak is het type verontreiniging bepalend voor welk mechanisme kan worden toegepast, maar ook met welke mogelijke knelpunten er rekening dient te worden gehouden. De efficiëntie van een fytotechnologie hangt ook sterk af van welke planten worden gekozen voor de sanering en welke beheersmaatregelen worden genomen. Resultaten van labo-studies, serre-experimenten, pilootstudies en echte veldexperimenten op gelijkaardige sites kunnen een heel belangrijke gids zijn bij het bepalen of een fytotechnologie geschikt is voor een bepaalde site. Zie verder onder hoofdstuk 3. Succesverhalen kunnen helpen om de juiste plantenkeuze te maken voor toepassing op nieuwe verontreinigde terreinen. Zie ook paragraaf 2.4 en hoofdstuk 3. Als relevante lokale data niet beschikbaar zijn dan is een pilootstudie of terrein specifieke studie zeker nodig.

Wegens de grote diversiteit aan contaminanten die in theorie in aanmerking komen voor een fytoremediatie-technologie, worden deze onderverdeeld in grote categorieën van organische en anorganische verontreinigingen. **Tabel 5** geeft weer voor elke categorie van verontreinigende stoffen welk fytotechnologie-mechanisme er speelt, welke toepassingen al werden uitgevoerd en succesvol bleken, de schaal waarop het al is toegepast en een korte toelichting van de belangrijkste bevindingen en referenties. Bovendien werd op basis van deze uitgebreide literatuurstudie en een experten-evaluatie voor alle verontreinigingen een inschatting gemaakt van het fytoremediatie potentieel. Hiervoor werden de duurtijd en de mogelijkheid tot opschaling naar veldtoepassingen gehanteerd als de belangrijkste criteria (**Figuur 8**).

### 2.3.1 Organische verontreinigingen

Veel organische verontreinigende stoffen kunnen worden afgebroken of gestabiliseerd door fytodegradatie, rizodegradatie en fytostabilisatie. Daarnaast kan ook fytohydraulica worden gebruikt om grondwater(verontreiniging) in te perken en/of verontreinigd grondwater te saneren. Informatie over hoe fytotechnologieën kunnen worden toegepast voor bepaalde organische stoffen is uitgewerkt in de volgende secties.

#### ***Gechloreerde solventen en vluchtige organische componenten***

Diep wortelende populieren zijn meermaals zeer succesvol gebleken voor de aanpak van grondwater verontreinigd met gechloreerde solventen of BTEX, door middel van rizodegradatie, fytodegradatie, en sorptie van de stoffen aan het plantenweefsel (**Figuur 4**) (Porteous Moore *et al.*, 2006). Het vrijzetten van

de vluchtige fractie van de verontreinigende stoffen in de atmosfeer moet vermeden worden via aanrijking van afbrekende bacteriën in de wortelzone en binnenin de plant (Barac *et al.*, 2004, Newman & Reynolds, 2005, Taghavi *et al.*, 2005, van der Lelie *et al.*, 2005). De toegediende bacteriën kunnen de vluchtige giftige stoffen neutraliseren omdat ze de specifieke afbraakgenen bezitten. Bovendien kunnen deze bacteriën de afbraakgenen doorgeven aan bacteriën die van nature in de stam en bladeren van de plant leven (endofyten) en die deze genen nog niet hadden. De endofyten uitgerust met de afbraakgenen kunnen nu ook de vluchtige giftige stoffen afbreken terwijl deze door de vaatbundels 'stromen'. Door de langere contacttijd (uren, dagen) kan dus wel volledige mineralisatie tot CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>O plaatsvinden dat wordt vrijgezet via de bladeren. Dezelfde strategie werd succesvol in situ toegepast om trichloorethyleen (TCE) verontreinigd grondwater te saneren (Weyens *et al.*, 2009, Weyens *et al.*, 2010, Weyens *et al.*, 2010, Weyens *et al.*, 2015). Enkel voor BTEX werd voldoende aangetoond dat de van nature aanwezige afbraakcapaciteit toereikend is om vervluchtiging te voorkomen zodat voor deze verontreiniging kan geconcludeerd worden dat klassieke fyto-remediatie haalbaar is. Voor de andere gechloroerde solventen en vluchtige organische componenten is het echter nodig om aan te tonen dat er voldoende afbraakpotentieel aanwezig is om vervluchtiging te vermijden alsook fytoxiciteit tot een minimum te beperken.

### ***Munitie en explosieven***

Fytotechnologieën zijn ook veelbelovend voor de sanering van met explosieven verontreinigde terreinen, voornamelijk voor de sanering van grote oppervlaktes, licht verontreinigde en diffuus verspreide verontreiniging van de bodem en grondwater door fyto-degradatie (Ramos *et al.*, 2005, Rylott & Bruce, 2009). Defensie heeft al interesse getoond voor het toepassen van rizodegradatie voor de sanering van bodems verontreinigd met explosieven waaronder trinitrotolueen (TNT) drijfgassen zoals dinitrotolueen (DNT) en gelijkaardige componenten.

Onderzoek is al verricht naar grassen en esdoorn voor stabilisatie en rizodegradatie van verontreinigingen met explosieven. Zo werd bijvoorbeeld de microbiële gemeenschap in de wortelzone van grassen op het militair schietveld van Helchteren bestudeerd. Hierbij werd vastgesteld dat de bacteriën in de wortelzone het drijfgas DNT snel konden afbreken (Thijs *et al.*, 2014). De aanwezigheid van de bacteriën was ook belangrijk voor de groei van grassen en het herstel van de niet-begroeide of 'dode zones' (**Figuur 7**).





**Figuur 7: Onbegroeide 'dode zone' op het schietveld van Helchteren. Foto: Sofie Thijs, Universiteit Hasselt.**

Er werd ook onderzoek verricht naar de optimalisatie van de rizodegradatie van het zeer moeilijk afbreekbare en resistente explosief TNT in bodems van het fort van Zwijndrecht. De esdoorns op het terrein bevatten bacteriën in hun wortels met enzymen die TNT konden denitreren, d.w.z. een stikstofgroep eraf splitsen, dat vervolgens door de bacterie als N-bron kon worden gebruikt en zo de toxiciteit van TNT verminderde (Thijs *et al.*, 2014a, Thijs *et al.*, 2014b).

### ***Persistente organische stoffen (POP)***

POP's bestaan uit een groep van stoffen voornamelijk pesticiden en polychloorbifenylen met de volgende kenmerken: ze zijn toxisch, persistent, bio-accumulerend en kunnen over zeer grote afstanden worden getransporteerd. Fytotechnologieën zijn over het algemeen moeilijk voor PCB-verontreinigde bodems maar kunnen wel gebruikt worden als nazorg om pesticide residuen weg te nemen (Eevers *et al.*, 2017).

Veldstudies toonden aan dat courgetten en pompoenen (*Cucurbita* sp.) pesticide residu's konden opnemen in de wortels en ook transporteren naar de scheuten (White *et al.*, 2003, Wang *et al.*, 2004). Een pilootstudie in de VS vergeleek de mogelijkheid van 21 courgette-variëteiten van 2 soorten *C. pepo* ssp *texana* en *C. pepo* ssp *pepo* voor de opname van dichlorodiphenyldichloroethane (DDE) en het effect van inoculatie met geschikte bacteriën op de groei en gezondheid van de planten. Resultaten toonden aan de *C. pepo* ssp *pepo* variëteit wel drie keer meer DDE extraheerde uit de bodem (White *et al.*, 2003), en dit was verder verbeterd na inoculatie met een consortium van plantengroei stimulerende en DDE-afbrekende endofyten (Eevers *et al.*, 2017). Ook de geïnoculeerde planten vertoonden geen witziekte terwijl dit wel het geval was bij de niet-geïnoculeerde planten. Bodemstalen genomen na één groeiseizoen toonden al een belangrijke vermindering in DDE-concentraties in de bodem. Er werden ook experimenten uitgevoerd met koper-nano partikels. De resultaten van deze labo-studies

toonden aan dat koper-nano partikels de opname van DDE door de plant sterk verhoogde maar de onderliggende mechanismes moeten nog verder onderzocht worden (De La Torre-Roche *et al.*, 2013).

POP's werden ook aangepakt via fytostabilisatie, fytohydraulica, fytodegradatie en fytoextractie (Zhu *et al.*, 2014, Arslan *et al.*, 2015). Onderzoek is ook uitgevoerd op transgene planten die sites verontreinigd met POP's kunnen fytoremediëren (Sylvestre *et al.*, 2009). De planten werden uitgerust met een enzyme geïsoleerd uit bacteriën om PCB's af te breken en de giftigheid van gechloreerde verbindingen te verminderen.

### **Minerale olie en PAK's**

Minerale olie is een verzamelnaam voor een aantal producten die bestaan uit verschillende destillatiefracties van aardolie: benzine, diesel, kerosine, motorolie en stookolie. De chemische samenstelling van 'minerale olie' kan sterk variëren en bijgevolg ook effecten hebben op mogelijkheden voor fytoremediatie. Een degelijke kennis van de samenstelling van de minerale olie is bijgevolg essentieel om de haalbaarheid van fytoremediatie en de mogelijke saneringsdoelstellingen te kunnen inschatten. De bepaling van de samenstelling van minerale olie aan de hand van de EPK/VPK-methode of oliekaracterisatie wordt vaak reeds in het kader van de risico-evaluatie in het beschrijvend bodemonderzoek uitgevoerd (Humane risico-evaluatie voor minerale, OVAM 2007).

**Tabel 4: Overzicht belangrijkste indicatorstoffen meest voorkomende minerale olieverontreinigingen in bodem en grondwater. (Uit Humane risico-evaluatie voor minerale, OVAM 2007)**

Indicator stoffen	Benzine	Kerosine	Diesel, lichte stookolie	Zware stookolie	Ruwe olie	Smeerolie
BTEX	X	X				
PAK		X	X	X	X	X
Alifaten						
C5-C6	X				X	
C6-C8	X	X	X	X	X	
C8-C10	X	X	X	X	X	
C10-C12	X	X	X	X	X	
C12-C16		X	X	X	X	
C16-C21			X	X	X	X
Aromaten						
C8-C10	X	X	X	X	X	
C10-C12	X	X	X	X	X	
C12-C16	X	X	X	X	X	
C16-C21		X	X	X	X	
C21-C.35				X	X	X

Uitgebreid onderzoek (labo- en serre-experimenten) op bodemstalen van sites verontreinigd met minerale olie heeft de afbraak (door rizodegradatie) van minerale olie in deze bodems aangetoond (Ramos *et al.*, 2010, Balseiro-Romero *et al.*, 2017, Yateem, 2013). In het algemeen wordt in studies betreffende rizodegradatie van minerale olie gebruik gemaakt van grassen, populieren, wilgen, maar ook vlinderbloemigen (Gkorezis *et al.*, 2016, Kaimi *et al.*, 2007). De aanwezigheid van mengsels van verontreinigende stoffen op met minerale olie verontreinigde terreinen maakt het niet altijd gemakkelijk om een fyto-remediatie project uit te werken en de juiste toepassing te kiezen. Hoogmoleculair gewicht polycyclisch aromatische koolwaterstoffen (PAK's) zijn minder biobeschikbaar en zijn moeilijker te saneren door fyto-technologie alleen. Om de biobeschikbaarheid te verhogen kunnen surfactanten worden toegevoegd, maar ook bodembacteriën kunnen **biosurfactanten** produceren die de oppervlaktespanning verminderen en waardoor de verontreinigende stoffen gemakkelijker worden opgenomen en afgebroken (Borah & Yadav, 2017). De samenstelling van de minerale olie is eveneens een belangrijke factor. De lichtere fracties C6-8, C8-10, C10-12, en C12-16 zijn vlotter biodegradeerbaar door micro-organismen dan de zwaardere fracties (Balseiro -Romero *et al.*, 2017). Biodegradatie van n-alkanen met ketenlengtes tot C44 is al aangetoond (zie Code van goede praktijk, natuurlijke attenuatie). N-alkanen kunnen via verschillende oxidatie-mechanismen worden afgebroken. Bij terminale oxidatie gebeurt de initiële oxidatiestap aan één van de uiteinden van de koolstofketen door een mono-oxygenase, waarbij eerst een vrij radicaal en vervolgens een alcohol wordt gevormd, dat verder wordt geoxideerd tot een aldehyde of carbonzuur. Door  $\beta$ -oxidatie van het carbonzuur worden vetzuren en acetyl-coënzyme A gevormd, met uiteindelijke vrijstelling van koolstofdioxide.

Labo- en serre-experimenten hebben aangetoond dat alkanen en de C10-14 fractie kunnen worden afgebroken door combinaties van verschillende grassen en rizodegradatie, terwijl diep-wortelende populieren en wilgen de diepere vervuiling aanpakken met fyto- en rizodegradatie (Ramos *et al.*, 2010; Balseiro-Romero *et al.*, 2017, Yousaf *et al.*, 2010, Yousaf *et al.*, 2011, Page *et al.*, 2015). Rizoremediatie leidt tot een snellere en vollediger sanering dan bioremediatie (Gkorezis *et al.*, 2016, Khan *et al.*, 2013, Mezzari *et al.*, 2011) omwille van de grotere dichtheid en activiteit van micro-organismen in de nabijheid van planten. In geval van benzine en kerosine kan op basis van de uitgebreide ervaringen, geconcludeerd worden dat fyto-remediatie haalbaar is als actieve saneringstechniek. Voor diesel en lichte stookolie kan fyto-remediatie toegepast worden op voorwaarde dat er voldoende afbraakpotentieel gegarandeerd wordt, terwijl voor de zwaardere stookolie en andere verontreinigingen en mengsels een grondige haalbaarheidsanalyse nodig is alvorens conclusies kunnen worden getrokken (zie ook hoofdstuk 3 voor meer uitleg).

### 2.3.2 Metalen en andere anorganische contaminanten

Metalen en andere anorganische verontreinigingen in de bodem kunnen niet worden afgebroken, maar wel worden gestabiliseerd of geëxtraheerd. Er zijn heel wat planten die zware metalen kunnen opnemen, transporteren en opslaan in de bovengrondse biomassa, maar dit proces is over het algemeen traag. Daarom is het aangeraden fytoextractie te combineren met economische valorisatie van de biomassa voor hout of bio-energie (Van Slycken *et al.*, 2013, Kuppens *et al.*, 2015, Cundy *et al.*, 2016). Het stabiliseren van metalen in de bodem door gebruik te maken van metaal immobiliserende bodemadditieven en microbiële inocula (bio stimulantia) heeft gunstige effecten (Kidd *et al.*, 2015). Chelatoren kunnen worden toegevoegd aan de bodem om de biobeschikbaarheid van de plant-beschikbare fractie te verhogen, maar sommige chelatoren kunnen ook de mobiliteit van de schadelijke metalen bevorderen wat aanleiding geeft tot uitloging en verontreiniging van omgevende gronden, grond- en oppervlaktewaters (Sessitsch *et al.*, 2013).

Fytovolatilisatie kan ook bij sommige metalen optreden, meer bepaald in geval van kwik en selenium. In geval van selenium zijn planten in staat om selenium op te nemen, te sequestreren en om het anorganische selenium om te zetten naar vluchtige organische, niet schadelijke componenten die zonder risico kunnen vervluchtigd worden (Banuelos *et al.*, 2002). Voor kwik echter is dit niet van toepassing aangezien in dit geval de vluchtige verbindingen gevormd door van nature bestaande planten, toxisch zijn. Het onderzoek hieromtrent focust bijgevolg op het genetisch modificeren van de planten in kwestie om alsnog het gewenste effect te bekomen (Meagher *et al.*, 2007).

Fytohydraulica kan ook worden gebruikt om grondwater verontreinigd met zware metalen in te perken of te saneren. Bomen kunnen lage concentraties aan metalen extraheren die essentiële nutriënten zijn, terwijl hyperaccumulators bepaalde metalen kunnen opnemen en op concentreren tot wel 100 tot 1.000 keer meer dan de concentraties in de bodem. De hogere concentraties aan metalen in de bladeren van hyperaccumulators maakt ze minder geliefd voor consumptie door herbivoren en geeft dus zo een bijkomend voordeel aan deze planten die overleven in deze moeilijke bodems. Fytotechnologie-toepassingen voor sommige van de metalen wordt hieronder verder toegelicht.

## **Arseen**

Arseen vervuilde bodems en grondwater werden al succesvol gesaneerd door middel van fytoextractie. Sommige varens zoals de Chinese varen (*Pteris vittata*) kunnen arseen efficiënt hyper accumuleren (Ma *et al.*, 2011). Deze varens groeien in gebieden met een mild klimaat en hebben wortels die ongeveer tot 30 cm diep kunnen reiken in de bodem, afhankelijk van de bodemtextuur en arseen concentraties (Lampis *et al.*, 2015). Fytoextractie van arseen is toepasbaar voor grote en kleine verontreinigde terreinen. Op bepaalde sites kunnen hyper accumulerende varens (zoals de Chinese varen (*Pteris vittata*) en goudvaren (*Pityrogramma calomelanos*)) meer dan 2 % arseen in hun biomassa accumuleren (Gonzaga *et al.*, 2006). Terwijl *P. vittata* wordt beschouwd als een hyperaccumulator van arseen, converteert de plant ook arsenaat naar arseniet (een zeer giftige vorm van arseen), dit moet zeker in rekening worden gebracht indien met deze planten gewerkt wordt. Ook berken geïnoculeerd met goede endofytische bacteriën kunnen arseen accumuleren in de bovengrondse delen (Mesa *et al.*, 2017). De bovengrondse plantendelen kunnen worden geoogst voor recycling. Als recycling mogelijk is kan arseen worden teruggewonnen uit biomassa in percentages groter dan 70 % door vloeibare extractie, wat dan in industriële toepassingen kan worden gebruikt.

## **Cadmium**

Fytoextractie van cadmium uit verontreinigde bodems is over het algemeen een vrij traag proces. In de eerste plaats hebben cadmium-hyper accumulerende planten maar een kleine biomassa en trage groeisnelheid. Ten tweede gebeurt de opname van cadmium door hoge biomassa producerende planten zoals kortemomloop wilg (*Salix* spp.) en populier (*Populus* spp.) traag ten gevolge van geringe biobeschikbaarheid, trage opname en groei-beperkende factoren. Recente onderzoeksresultaten van de cadmium-verontreinigde bodems in de Noorder Kempen (België) hebben aangetoond dat door een goede selectie van het type wilgenkloon een verhoging van de metaalconcentraties in de stam kan worden bereikt van meer dan 74 % voor cadmium en 91 % voor zink in vergelijking met andere wilgenklonen (Janssen *et al.*, 2015). Verder werd aangetoond dat door inoculatie van de bomen met de bacterie *Rahnella* sp. het extractie rendement van cadmium verhoogde door een toename van de twijg-biomassa. Waarom sommige klonen het beter doen dan andere moet nog verder worden onderzocht. Een studie uit Canada toonde aan dat naast kenmerken voor hoge biomassa en snelle groei, het succes van een bepaalde kloon op een bepaalde site ook heel erg afhankelijk is van met welke rizosfeer-micro -organismen de planten associëren (Bell *et al.*, 2015).

Een vergelijkende studie tussen wilgenklonen op een metaal verontreinigde bodem toonde aan dat de dominantie van bepaalde schimmels (ectomycorrhiza) in de wortelzone gelinkt was met een hogere Zn-accumulatie en dus cultivarschimmel specificiteit cruciaal kan zijn om metaalaccumulatie te verklaren. Een andere studie die de bacterie-gemeenschappen vergeleek van koolzaad (*Brassica napus*) groeiend op de cadmium vervuilde bodem in Lommel en een niet-vervuilde bodem in Alken, toonde aan dat er meer metaal-tolerante bacteriën voor kwamen in de vervuilde bodem, die meer fosfaat konden vrijzetten in de bodem, het plantenhormoon auxine produceerden en plantenstress hormonen konden verminderen, wat erop wijst dat de bacteriën de planten helpen om te overleven in verontreinigde bodems via verschillende mechanismes (Croes *et al.*, 2013). Een techno-economische evaluatie van fytoextractie toonde aan dat snelle pyrolyse van korte omloophout met valorisatie van de biochar tot actieve kool en de olie voor bio-energie wel economisch voordelig kan zijn (Kuppens *et al.*, 2015).

### **Chroom**

Ondanks het feit dat er geen planten gekend zijn die chroom kunnen hyperaccumuleren, hebben studies wel aangetoond dat bepaalde plantensoorten kunnen worden ingezet om chroom verontreiniging op te nemen uit grond, oppervlakte- of grondwater door fytoextractie of fytostabilisatie (Pulford *et al.*, 2001). Bijvoorbeeld, wilg (*Salix* spp.) en berk (*Betula* spp.) kunnen chroom opnemen van het grondwater, maar de chroom blijft wel voornamelijk in de wortels aanwezig (Pulford *et al.*, 2001). De belangrijkste bevindingen in chroom-fytoremediatie is de bio reductie van Cr(VI) naar Cr(III) door de planten en micro-organismen. Stekend loogkruid (*Salsola kali*) een plant die voorkomt langs het strand en in de duinen kan chroom III accumuleren, wat aantoont dat deze plant eventueel ook in beschouwing kan worden genomen voor fytoextractie van chroom uit de bodem (Gardea-Torresdey *et al.*, 2005).

### **Koper**

Veldstudies hebben aangetoond dat wilgen koper kunnen accumuleren en dus geschikt zijn voor koper-fytoextractie (Mleczek *et al.*, 2013). Bodemadditieven zoals fosfaat kunnen de koper opname ook verhogen zoals aangetoond in studies met Indiase mosterd (*Brassica juncea*), en deze kunnen ook verder worden onderzocht voor fytotechnologie-toepassingen (Fang *et al.*, 2012).

### **Lood**

Het gebruik van bodemadditieven en planten zoals waterlelies (*Nymphaeaceae*) is efficiënt gebleken om lood in de bodem te stabiliseren (Lin *et al.*, 2009). Omdat lood zeer weinig biobeschikbaar is in bodems is fytoextractie van lood niet mogelijk.

Het gebruik van chelatoren is al vaak onderzocht om lood meer biobeschikbaar te maken maar hierin schuilt het gevaar om het te sterk te mobiliseren en uitloging van gecheleerde lood complexen in het oppervlakte- en grondwater te veroorzaken, sneller dan dat het kan worden opgenomen door planten. Bepaalde schimmels die onder andere voorkomen in de wortelzone van specifieke grassen kunnen lood mineraliseren tot chloropyromorfiet, het meest stabiele loodmetaal dat er bestaat (Rhee *et al.*, 2012). Deze omzetting is irreversibel en zorgt ervoor dat het aanwezige lood niet meer biobeschikbaar is. Op die manier is fytostabilisatie mogelijk van bodems die verontreinigd zijn met lood.

### **Nikkel**

Er zijn rapporten van succesvolle saneringen van nikkel verontreinigde sites door fytoextractie door middel van hyperaccumulators van de Alsem genera (*Alyssum* spp.) van de mosterd familie (Mengoni *et al.*, 2004, Cabello-Conejo *et al.*, 2014). Daarnaast werden *Alyssum* soorten ook al gebruikt voor de fyto-mining van nikkel, dit wil zeggen het extraheren van nikkel uit de plant door drogen en verbranden (Chaney *et al.*, 2007).

### **Selenium**

Grond, sediment en oppervlaktewater verontreinigd met selenium werden al succesvol gesaneerd met behulp van fytoextractie, fytostabilisatie en fytovolatilisatie, afhankelijk van welke planten werden gebruikt. Bijvoorbeeld, waterplanten zoals eendekroos (*Lemnaoideae*) en water hyacinten (*Eichhornia* spp.) kunnen selenium saneren in rietvelden en andere natuurlijke waterzuivingsbekkens (Pal & Rai, 2010). Daarnaast worden ook Indiase mosterd (*Brassica juncea*) en koolzaad (*Brassica napus*) gebruikt voor de fytovolatilisatie van selenium, hierbij wordt selenaat omgevormd tot het minder giftige dimethylseleniet-gas dat vervolgens wordt vrijgezet in de atmosfeer (Pilon-Smith *et al.*, 2013).

### **Zink**

Zink kan worden geaccumuleerd door zinkboerenkers (*Nocceae caerulescens*) en andere metaal hyper accumulerende *Nocceae* en *Arabidopsis* soorten, maar omwille van de lage biomassa en trage groei, is de fytoextractie van zink onvoldoende efficiënt (Lodewyckx *et al.*, 2002). Meestal is er naast zink verontreiniging ook koper aanwezig die de groei van de planten vertraagt en zo dus ook de opname van zink (Lombi *et al.*, 2001). Fytoextractie van zink door korte-omloop hout is ook toegepast met resultaten sterk afhankelijk van de geselecteerde kloon en de omgeving-specifieke kenmerken, zoals bodemschimmels, zinkconcentratie en pH (Bell *et al.*, 2015).

## **Radionucliden**

Fytoextractie is ook mogelijk voor de sanering van bodem en water verontreinigd met radioactieve elementen. Zonnebloemen kunnen bijvoorbeeld uranium, cesium en strontium verwijderen uit hydroculturen (Lee & Yang, 2010). Daarnaast kunnen planten ook cesium en strontium opnemen van verontreinigde bodems (Fuhrmann *et al.*, 2002). Bodem additieven kunnen ook de plant opname van radionucliden verhogen. Wilde Sorgo (*Sorghum halpense*) geplant in bodem verrijkt met kippenmest nam grotere hoeveelheden cesium en strontium op dan andere plantensoorten in met kippenmest verrijkte bodems (Entry *et al.*, 2001).

## **Cyaniden**

Cyaniden kunnen in bodem en grondwater aanwezig zijn als vrije cyaniden of cyanide-zouten, als cyanaten of thiocyanaten ( $\text{OCN}^-$  of  $\text{SCN}^-$ ) of als complexen met metalen zoals bijvoorbeeld Fe, Ni en Zn.

Er zijn vier algemene afbraakmechanismen bij de biodegradatie van vrije cyaniden en organische stoffen met een cyanidegroep: hydrolyse-, oxidatie-, reductie- en substitutie/transfer reacties (Ebbs S., 2004). Diverse organismen gebruiken een combinatie van deze afbraakmechanismen afhankelijk van externe factoren zoals de beschikbaarheid van zuurstof, de pH en de concentratie aan cyanide.

Vaatplanten beschikken over de enzymen beta-cyanoalanine synthase en beta-cyanoalanine hydrolase die vrije cyaniden afbreken en omzetten naar het aminozuur asparagine (Larsen M. *et al.*, 2002). Het risico op volatilisatie van cyanide kan worden verwaarloosd omdat de planten zouden sterven nog voor er aanzienlijke concentraties worden bereikt.

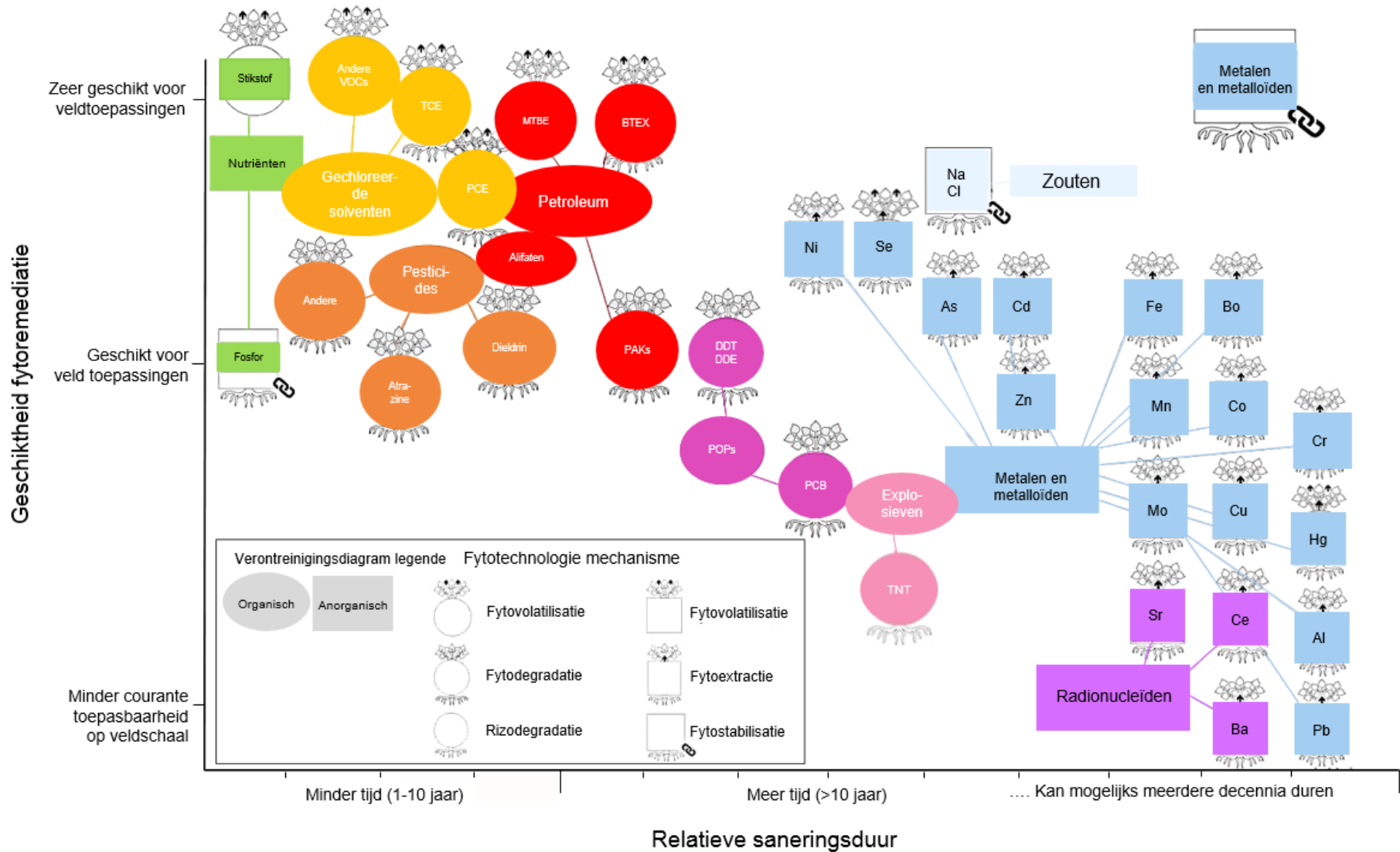
Heel wat micro-organismen en planten zijn in staat om vrije cyaniden af te breken zonder noemenswaardige accumulatie van cyaniden in de bladeren en zonder noemenswaardige vervluchtiging. Dit maakt dat fytoremediatie mogelijkheden biedt voor het verwijderen van vrije cyaniden en het beheersen van de risico's die uit gaan van een cyanideverontreiniging. Ook het verwijderen van een cyanideverontreiniging behoort tot de mogelijkheden maar aangezien de omzetting naar vrije cyaniden relatief traag verloopt zal dit ook een lange tijd in beslag nemen. De mogelijkheden van fytoremediatie bij cyanideverontreiniging situeren zich dan ook eerder op het vlak van risicobeheersing.



**Tabel 5: Fytotechnologie matrix**

Verontreinigende stof	Fytotechnologie-mechanisme						Toepassingen					Schaal					Belangrijkste resultaten	Referentie
	Fytoastabilisatie	Rizodegradatie	Fyohydraulica	Fytoextractie	Fyodegradatie	Fytovolatilisatie	Biofilters, rietvelden	Afkapping, vegetatiedek	Herstel van vennen	Hydraul. barrière	Buffer zones, groenstroken	Serre	Laboratorium	Veld	Piloot-studie	Grootschalig		
BTEX		✓	✓		✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓		Populieren konden efficiënt een BTEX grondwaterpluim saneren	(Barac <i>et al.</i> , 2009)
Chloor-solventen		✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓			Eik, es en geassocieerde micro-organismen saneren TCE grondwaterverontreiniging	(Weyens <i>et al.</i> , 2009)
PCB's	✓	✓	✓									✓		✓			Vaak moeilijk om PCB verontreiniging met fyto-technologie op te lossen, eerder voor de residuen	(Sylvestre <i>et al.</i> , 2009) (Slater <i>et al.</i> , 2011)
Explosieven	✓	✓	✓		✓					✓	✓	✓	✓				Grassen en bomen aanwezig op militaire sites kunnen explosieven vervuiling (TNT, DNT) stabiliseren of rizodegraderen.	(Thijs <i>et al.</i> , 2014a) (Thijs <i>et al.</i> , 2014b) (Ryloft <i>et al.</i> , 2011)
PAK's		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			Vrij moeilijk af te breken, toch hebben populieren, wilg en hun microbiële gemeenschappen wel potentieel	(Bell <i>et al.</i> , 2014)
Pesticiden	✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			Courgetten kunnen worden gebruikt om DDE op te nemen en af te breken.	(Wang <i>et al.</i> , 2004) (White <i>et al.</i> , 2003) (White <i>et al.</i> , 2006)
Minerale olie, petroleum		✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓			Alkanen en laag moleculair gewicht PAKs kunnen worden gesaneerd door wilgen, populieren, grassen en vlinderbloemige planten.	(Gkorezis <i>et al.</i> , 2016) (Page <i>et al.</i> , 2015)
Arseen	✓		✓	✓			✓	✓	✓		✓	✓					Populieren zijn al gebruikt geweest om stortplaatsen af te kappen.	(Ma <i>et al.</i> , 2011) (Mesa <i>et al.</i> , 2017)
Cadmium	✓			✓						✓	✓	✓	✓	✓	✓		Experimentele wilgklonen met hoge biomassa opbrengst verbeteren cadmium en zink extractie uit de bodem in de stam	(Janssen <i>et al.</i> , 2015) (Bell <i>et al.</i> , 2015) (Croes <i>et al.</i> , 2013)
Chroom	✓			✓			✓				✓	✓	✓				Wilg en berk nemen chroom op maar het blijft in de wortels.	(Pulford <i>et al.</i> , 2001) (Gardea-Torresdey <i>et al.</i> , 2005)
Koper	✓			✓			✓				✓	✓	✓				Bodem additieven kunnen koper opname in Indiase mosterd verbeteren, maar meer veldstudies zijn nodig	(Mleczeck <i>et al.</i> , 2013) (Fang <i>et al.</i> , 2012)
Nikkel	✓			✓			✓				✓	✓	✓				Planten van de mosterdfamilie kunnen nikkel accumuleren	(Chaney <i>et al.</i> , 2007)
Selenium	✓			✓			✓				✓						Eendekroos en waterhyacint zijn al gebruikt om selenium op te nemen van waterbassins en rietvelden	(Pal & Rai, 2010)
Radionucleïden	✓			✓		✓	✓				✓	✓		✓			Zonnebloemen kunnen uranium, cesium en strontium verwijderen van hydroculturen. Bodem additieven kunnen de opname verbeteren.	(Lee & Yang, 2010) (Fuhmann <i>et al.</i> , 2002) (Entry <i>et al.</i> , 2001)
Cyaniden	✓	✓	✓		✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓			Vaatplanten zijn in staat om vrije cyaniden af te breken. Opname van Berlijns blauw kan zowel gebeuren in de vorm van colloïdaal Berlijns blauw, hexacyanoferraten, waterstofcyanide of vrije cyanide-ionen. Er is geen accumulatie van cyanide in de bladeren en er treedt nauwelijks of geen vervluchtiging op.	(Dimitrova <i>et al.</i> , 2015) (Ebbs, 2004) (Ebbs <i>et al.</i> , 2003) (Larsen <i>et al.</i> , 2002) (Trapp <i>et al.</i> , 2003)
Nutriënten	✓	✓	✓				✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓			Een bodem met hoge biodiversiteit verhoogde de opbrengst van mais met 20 % en verminderde significant de uitloging van nitraat en fosfaat naar het water.	(Garnier <i>et al.</i> , 2016) (Bender & van der Heijden, 2015)

✓ betekent dat de toepassing al experimenteel uitgevoerd is. Indien geen ✓, betekent niet dat het onmogelijk is maar dat relevante experimenten nog niet voorhanden zijn.



**Figuur 8: Overzicht van het fyto-remediatie potentieel van sommige verontreinigende stoffen en bijhorend fyto-remediatie mechanisme. Aangepast uit "PHYTO, Principles and resources for site remediation and landscape design", door Kate Kennen en Niall Kirkwood, 2015. Aanpassingen zijn gebaseerd op informatie van veldstudies (tot 2019) en kunnen wijzigen in volgende edities naargelang meer saneringen worden uitgevoerd.**

## 2.4 Plantensoorten

In de literatuur zijn talrijke publicaties te vinden over fyto-remediatie experimenten met een enorme diversiteit aan plantensoorten. Het is van groot belang om uit dit overaanbod aan data die plantensoorten relevant voor toepassing in Vlaanderen te selecteren. Naast de wetenschappelijke literatuur zijn ook enkele gebruiksvriendelijke databanken ter beschikking waarin kan gezocht worden naar plantensoorten die reeds gebruikt werden voor bepaalde fyto-remediatie toepassingen.

Hoe start je nu aan het plant selectieproces waarbij je als uitkomst een geschikte plantensoort wilt met de juiste eigenschappen voor groei onder de specifieke site-condities en die de doelstellingen van fyto-remediatie kan halen? Er zijn verschillende startpunten om de juiste planteselectie te maken. Enkele algemeenheden in het plant selectieproces worden hierna kort toegelicht.

### ***Wortelstelsel type***

Een fibreus wortelsysteem heeft zeer veel fijne wortels verspreid in de bodem en zal dus, door zijn groot worteloppervlak, een zeer grote contactzone met de bodem realiseren. Mycorrhiza schimmels die rond de wortels van de planten leven kunnen de absorptie oppervlakte tot wel 1.000 maal vergroten, waarbij de mogelijkheid van planten om nutriënten en verontreinigende stoffen op te nemen immens toeneemt. Hoge concentraties aan verontreinigende stoffen kunnen mycorrhiza doden. Daarom is het van belang om met verontreiniging-tolerante mycorrhiza te werken of bijkomende maatregelen te nemen zoals co-infiltratie met bacteriën (mycorrhiza-helper bacteriën) om de mycorrhiza-groei te bevorderen. Veel grassen zoals *Festuca* sp. (tall fescue) hebben een fibreus wortelstelsel en zijn uitgebreid gekoloniseerd met arbusculaire mycorrhiza.

### ***Worteldiepte***

De worteldiepte verschilt van plantensoort tot plantensoort en kan ook binnen één soort variëren afhankelijk van de omgevingscondities zoals diepte van het water, vochtgehalte van de bodem, bodemstructuur, dichtheid, bodemvruchtbaarheid etc ... De meeste plantenwortels worden echter op geringe tot matige diepte gevonden, met een kleiner aantal wortels op grotere diepte.

Uit onderzoek blijkt dat bij poten van wilg en populier na één groeiseizoen 75% van de ondergrondse biomassa zich binnen een straal van 1,5 meter bevindt (Phillips *et al.*, 2014). Wilgen ontwikkelen in vergelijking tot populier meer en fijnere wortels die een groter volume bodem bezetten. Populieren hebben een minder vertakt wortelstelsel maar ontwikkelen wel dikkere wortels die gemakkelijker doordringen in meer compacte bodems. Tussen de 30% en 50%

van de totale wortellengte bevindt zich op minder dan één meter van de stam. De klasse wortels met een dikte van 1,0 mm tot 2,0 mm en 2,1 mm tot 5,0 mm vormt 75% van de totale wortellengte waarbij meer dan 60% gaat naar de fijnste categorie die slechts 20% tot 40% van de wortelbiomassa uitmaken. De maximale worteldiepte is gelinkt aan de aanwezigheid van afzinkers. Afzinkers zijn wortels die zich van op de zijwortels verticaal naar beneden ontwikkelen. Deze afzinkers hebben vaak een diameter van 10 mm tot 20 mm. Ondergrondse barrières zoals de watertafel of minder doordringbare lagen beletten de diepere groei van wortels. Na één groeiseizoen kunnen de wortels van wilg en populier een lengte tot meer dan 5 meter bereiken.

De diepte van de verontreiniging zou best de diepte van de wortelzone niet overschrijden. Uitzonderingen zijn de gevallen waarbij verontreinigd water wordt opgepompt en beschikbaar gemaakt voor plantenwortels door opstuwen of irrigatie. Het inbrengen van micro-organismen en plantenzymen dieper in de bodem is meestal niet zo efficiënt omdat de ecologische condities zo verschillend zijn. Sommige vlinderbloemigen zoals alfalfa kunnen wel tot 9 meter diep wortelen, sommige grassen met een fibreus wortelstelsel wortelen dan weer tot 3 meter diep, freatofytische bomen (populier, wilg) kunnen tot wel 24 meter diep wortelen. Andere planten zoals koolzaad en zonnebloemen wortelen meestal maar tot 30 cm diep. Door de mate van verontreiniging of de opbouw van de ondergrond worden deze maximale worteldieptes vaak niet bereikt op de te saneren site. Meestal wordt rekening gehouden met 6 meter voor bomen en andere niet-houtachtige planten, terwijl struiken meestal 1 à 2 meter diep wortelen. Fytoremediatie van verontreinigd grondwater is mogelijk door gebruik te maken van freatofyten (populier, wilg) indien het grondwater op een maximale diepte van 10 meter zit.

### ***Groeisnelheid***

De groeisnelheid van een plant heeft een directe invloed op de snelheid van sanering. Voor rizodegradatie, rizofiltratie en fytostabilisatie is het van belang een snelle groei te hebben in termen van worteldiepte, dichtheid, volume, oppervlakte ratio en laterale expansie. Voor fytodegradatie, fytoextractie, fytovolatilisatie en fytohydraulica is de groeisnelheid van de bovengrondse biomassa dan weer voordelig.

Een grotere wortelmassa en bovengrondse biomassa zijn belangrijk voor de accumulatie van grotere hoeveelheden metalen, voor een hogere transpiratie van water, een hogere assimilatie en metabolisatie van organische verontreinigingen, of voor een hogere productie aan enzymen en meer niches voor afbrekende micro-organismen.

Metaal-hyperaccumulatoren bezitten meestal maar een lage biomassa. Daarom is het in vele gevallen toch interessanter om voor planten te kiezen die een

grotere biomassa vormen zodat de totale hoeveelheid aan metalen die kunnen verwijderd worden groter is. Populieren werden al vaak gebruikt in fytoremediatie-processen in Vlaanderen.

### ***Transpiratiesnelheid***

De transpiratiesnelheid van vegetatie is belangrijk voor die fytotechnologieën die contaminant-opname en hydraulische controle omvatten. Dit hangt in belangrijke mate af van de plantensoort, ouderdom, massa, grootte, bladoppervlakte, groeistadium en seizoens-effecten. Voor populieren wordt de transpiratie snelheid op zo'n 100 liter per dag voor een amper vijfjarige boom geschat terwijl wel 200 liter water per dag door 1 wilgenboom kan worden getranspireerd.

### ***Zaad en origine van de plant***

Belangrijk om rekening mee te houden in saneringsprojecten is de origine van de planten:

- (i) zijn de planten/zaden lokaal verkrijgbaar? Het is meestal best om met planten/zaden te werken eigen aan de regio en aangepast aan de klimaatcondities. Dit moet zeker nagetrokken worden bij de leverancier.
- (ii) Kunnen de planten/zaden geleverd worden wanneer nodig?
- (iii) Zijn er transport- of importrestricties?
- (iv) Kan de leverancier informatie verschaffen over de groei en het onderhoud van de planten (snoei *etc.*)?

### ***Allelopathie***

Allelopathie verwijst naar de inhibitie van de groei van een plantensoort door de aanwezigheid van stoffen geproduceerd door een andere plantensoort. Dit is vooral belangrijk wanneer men gemengde aanplantingen wil toepassen met verschillende soorten. Allelopathie kan ook optreden door plantenresiduen die onder de bodem zijn gemengd bv. wortel, stengel en blad residuen van koolzaad kunnen de groei van mais, tarwe en gerst verminderen.

### ***Lokale plantensoorten***

Verontreinigde sites kunnen ook van nature opnieuw begroeid zijn. Het is belangrijk om te controleren welke plantensoorten voorkomen die kunnen overleven in zulke omstandigheden. Sommige daarvan kunnen misschien al efficiënt de verontreiniging afbreken. Omdat de vegetatie al een lange tijd aanwezig is, in vergelijking met de tijd die meestal bedoeld is voor fytoremediatie veldstudies, kan het een voordeel zijn voor onderzoeker en saneerder. Het blijft hierbij afwegen of extra stimulatie bv. door infiltreren met micro-organismen nodig is. De efficiëntie van deze planten dient wel bevestigd te worden door serre-experimenten en indien nodig door een pilootexperiment in veld (zie ook 3.4).

## **Planten gebruikt in fytoremediatie**

Momenteel zijn de meest gebruikte en onderzochte planten voor fytoremediatie in Vlaanderen: populier (*Populus* spp.), wilg (*Salix* spp.), esdoorn (*Acer* spp.), grassen (*Festuca* spp., *Agrostis* spp., *Molinia caerulea*), vlinderbloemigen (*Medicago sativa*, *Lotus* spp., *Trifolium* spp.), land - en tuinbouwgewassen (*Zea mais*, *Brassica juncea*, *Heliantus annuus*, *Triticum* spp. *Cucurbita* spp.), metaal-hyperaccumulatoren (*Nocceaei caerulescens*) en waterplanten (*Phragmites* spp., *Thypha* spp.).

In Bijlage 4 wordt een overzicht gegeven van welke inheemse planten het meest worden gebruikt voor welke verontreinigingen en welk type van fytoremediatie met succes werd toegepast, hetgeen het zoeken naar plantensoorten relevant voor Vlaanderen vergemakkelijkt.

In de online databank fytotechnologie project profielen, US-EPA worden wereldwijde fytoremediatie-cases verzameld. Deze web-based databank bevat verschillende fytoremediatie-projecten die kunnen doorzocht worden op vegetatietype, fytotechnologie, verontreinigende stof, en geeft als uitkomst een samenvatting van alle gevonden fytoremediatie-projecten: [Fytotechnologie databank](#).

Het is echter niet zo dat enkel de planten, die momenteel terug te vinden zijn in de databank kunnen gebruikt worden voor fytoremediatie. Van nature voorkomende plantensoorten die kunnen groeien onder onze klimaatcondities kunnen geraadpleegd worden op de website van Agentschap Natuur en Bos ([ANB autochtone bomen lijst](#)). In principe komen zeer veel planten in aanmerking (liefst inheems) met een gunstige groeisnelheid en tolerantie voor de verontreiniging en die de saneringsdoelstelling kunnen helpen bereiken.

Samengevat, de volgende planten-kenmerken zijn optimaal voor de verschillende fytotechnologie-mechanismes:

- Rizofiltratie en fytostabilisatie: planten kunnen metalen verwijderen, geen translocatie van metalen van de wortels naar de scheut, snelgroeiend wortelstelsel;
- Fytoextractie: plant tolereert, transloceert en accumuleert hoge concentraties metalen in de oogstbare bovengrondse delen (stengel en bladeren). Hoge groeisnelheid en biomassa productie;
- Rizodegradatie: plant secreteert veel enzymen en zou de verontreinigende stof best niet opnemen, geschikte wortelgroei (diepte en uitgebreidheid), mogelijkheid om met een divers en efficiënt microbiom te associëren;
- Fytodegradatie: plant heeft de mogelijkheid om de verontreinigende stof op te nemen, afbraakproducten zijn niet giftig;

- Fytovolatilisatie: mogelijkheid om de verontreinigende stof op te nemen en te vervluchtigen;
- Fytohydraulica: mogelijkheid om de verontreinigende stof ter plaatse te houden door invloed uit te oefenen op de grondwaterdiepte, -stroming en – richting.

## 2.5 Bepalende terreinkarakteristieken

Zoals alle saneringstechnieken is een fytotechnologie ook sterk afhankelijk van de omgevingscondities zoals bodemtype, pH, kationen uitwisselingscapaciteit, organische stofgehalte, aanwezigheid van • ondoordringbare lagen, de diepte en stromingssnelheid van het grondwater en het klimaat. Al deze factoren zullen de toepassing van een fytotechnologie sterk beïnvloeden alsook de snelheid en efficiëntie ervan. Het is daarom van cruciaal belang om de site zo vroeg mogelijk in het saneringsproces duidelijk te onderzoeken en te beschrijven om te bepalen hoe fyto-remediatie kan bijdragen aan het wegnemen van de verontreiniging. Deze evaluatie wordt meer in detail beschreven in 3.1 (eerste screening naar haalbaarheid fyto-remediatie).

Hieronder worden de belangrijkste terrein karakteristieken die bepalend zijn voor de haalbaarheid van fyto-remediatie in kaart gebracht.

### ***Verontreinigd medium (bodem, sediment, (grond)water)***

Voor fyto-remediatie moet de verontreiniging bereikbaar zijn voor de planten. Dit houdt in dat de verontreiniging zich niet te diep in de ondergrond mag bevinden. Maar indien gebruik gemaakt wordt van bomen waarvan de wortels vrij diep in de bodem doordringen (bv. populieren), kan ook (een deel van) het grondwater gesaneerd worden (tot zeker 10 meter diepte). Indien de diepte van de aanwezige verontreinigingen een probleem oplevert, kan geopteerd worden om de verontreinigde bodems af te graven en op hopen te leggen. Deze hopen kunnen dan worden ingezaaid of beplant. De planten zorgen dan voor de aanvoer van zuurstof en nutriënten voor de afbraak van de verontreinigingen (eco-piling). Het is ook mogelijk om op grotere diepte verontreinigd grondwater op te pompen en dit vervolgens voor fyto-remediatie te infiltreren in de wortelzone.

### ***Verontreiniging***

Fytotechnologieën voor de sanering van metaal verontreinigde bodems vragen veel tijd omdat de planten al eerst een groot wortelstelsel en grote biomassa moeten ontwikkelen om de metalen het meest efficiënt op te nemen. De enige snelle technologie voor de sanering van metaal verontreinigde bodems is ontgraven.

Daarentegen voor organische verontreiniging zoals bv BTEX, benzine en kerosine kunnen bomen en hun geassocieerde micro-organismen het bijzonder goed doen om de verontreiniging af te breken (Barac *et al.*, 2004; Balseiro-Romero *et al.*, 2017, Yousaf *et al.*, 2010, Yousaf *et al.*, 2011, Page *et al.*, 2015). Voor diesel en lichte stookolie werd aangetoond dat in labo-omstandigheden afbraak kan optreden. De saneringstermijn en % afbreek-baarheid hangt sterk af van de specifieke samenstelling van de minerale olie (zie § 2.3), een goede oliekarakterisatie is dus noodzakelijk, naast een goede bodemkarakterisatie.

Fytoremediatie kan, algemeen gesteld, enkel toegepast worden op bodems die plantengroei toelaten, d.w.z. de meeste bodems. Op sites waar te hoge concentraties aan verontreinigende stoffen aanwezig zijn die de plantengroei verhinderen, zal fyto-remediatie eventueel mogelijk zijn in combinatie met één of meerdere andere saneringstechnieken.

### ***Aanwezige vegetatie***

Indien op de site reeds vegetatie aanwezig is, kan dit gebruikt worden als eerste indicator voor fyto-toxiciteit en voor het inschatten van nog andere groeiomstandigheden.

### ***Externe factoren***

Aangezien fyto-remediatie een *in situ* technologie is, dient er voldoende vrije ruimte te zijn op de verontreinigde site. Verder kan een ruimte toch ongeschikt blijken door obstructies zoals ondergrondse leidingen, hoogspanning, *etc.*,... Bovendien is het niet alleen belangrijk dat de beschikbare ruimte voldoende groot is, ook de locatie van de beschikbare ruimte moet aan een aantal voorwaarden voldoen. Fyto-remediatie kan ofwel ter plaatse van verontreiniging zelf toegepast worden, ofwel op een (bepaalde afstand) stroomafwaarts van de verontreiniging. Het feit dat fyto-remediatie op de plaats van de verontreiniging kan ingezet worden, waardoor noch grondverzet, noch grondtransport nodig zijn en er amper energie-input vereist is, maakt van fyto-remediatie een uitermate duurzame saneringstechniek in vergelijking met 'klassieke' saneringstechnieken (zie 2.6).

Na het beoordelen van de terreinkenmerken om te bepalen of fyto-remediatie mogelijk is op de betreffende site, is het belangrijk om het geschikte fyto-technologie-type te kiezen samen met de juiste plantensoort (3.2 en 3.3).



## 2.6 Meerwaarde met betrekking tot duurzaamheid, leefomgevingskwaliteit en biodiversiteit

Naast de sanering van de bodemverontreiniging biedt fyto remediatie een meerwaarde op vlak van duurzaamheid, leefomgevingskwaliteit en biodiversiteit. Deze paragraaf geeft een beknopte toelichting van de meerwaarde zoals zijn samengevat in **Tabel 6**.

**Tabel 6: Meerwaarde fyto remediatie**

nr.	Thema	Toelichting meerwaarde
<b>1. Duurzaamheid</b>		
1.1	Verbruik materialen en energie	In vergelijking met het gebruik van 'klassieke' saneringstechnieken is de ecologische voetafdruk van fyto remediatie in de meeste gevallen merkelijk kleiner. De behoefte aan energie en materialen is bij het toepassen van fyto remediatie bijzonder klein.
1.2.	CO <sub>2</sub> -sequestratie	De inzet van zonlicht versus conventionele energie en omzetting van CO <sub>2</sub> in biomassa. De opgebouwde biomassa (bovengronds en ondergronds) vormt een belangrijke koolstofvoorraad (sink).
1.3.	Bio-energie	Energie uit biomassa kent drie vormen van energetische valorisatie: warmte- of koelingsbron, elektriciteitsproductie en tot slot biobrandstof (vloeibaar of gasvormig). Gebruik van bio-energie resulteert in verminderde CO <sub>2</sub> -uitstoot, klimaatbeheersing en bezuiniging fossiele brandstoffen.
1.4.	Opslag van broeikasgassen	Planten dragen bij aan de opslag van broeikasgassen (waterdamp, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> en N <sub>2</sub> O) waarbij deze worden uitgewisseld met de atmosfeer.
<b>2. Biodiversiteit</b>		
2.1.	Bodemherstel	Fytotechnologieën zorgen voor bodemherstel. Aansluitend kunnen fyto technologieën worden gebruikt in combinatie met andere bodemherstel projecten en doelstellingen, zoals een groen overkapping of ecologische opwaardering.
2.2.	Bodemstructuur, bodemvruchtbaarheid en erosie	Bodemstructuur en vruchtbaarheid worden niet negatief beïnvloed en verbeteren zelfs. Aansluitend vormt de plant een buffer tegen erosie.
2.3.	Bodemleven en microbiële diversiteit	Door de doorworteling en de permanentie van de teelt (tot 20 jaar) wordt voor een intensifiëring van het bodemleven gezorgd.
2.4.	Bodemkwaliteit	Bodem genereert tal van ecosystemediensten: (i) het ondersteunen van (bodenvorming, voedselkringloop, habitat), (ii) het reguleren van (regulering van de elementaire cycli, C-vastlegging, waterzuivering en opslag; adsorptie en transformatie van verontreinigende stoffen), (iii) voorzien van (grondstoffen en biomassa), en (iv) cultureel (erfgoed).
2.5.	Wilde dieren en planten	Mogelijkheid om een nieuwe habitat te creëren of een bestaande aan te vullen. Wilde dieren en planten worden aangetrokken.

<b>3. Leefomgevingskwaliteit</b>		
3.1.	Stedelijke groene infrastructuur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planten kunnen een aangename woon- en werkomgeving creëren. Ze dragen ook bij aan het esthetisch karakter.</li> <li>- Fytoremediatie-technologieën kunnen worden gebruikt, naast en zonder schade aan volwassen bomen en struiken, en op speciale locaties zoals straatbermen, bestrating, daken, etc.</li> </ul>
3.2.	Geluidshinder	Planten zorgen voor reductie van geluid, geluidsbuïfering en geluidsmaskering
3.3.	Luchtkwaliteit	Vegetatie is in staat om fijn stof en pollutiepluimen uit de lucht te filteren of pollutiepluimen van snelwegen of industriebronnen te verdunnen. Door dit proces wordt de luchtkwaliteit gunstig beïnvloed met een positief effect op de volksgezondheid. Anderzijds zorgen bomen in nauwe “street canyons” voor een afname van de ventilatie en voor een toename van de concentraties op grondniveau. Het effect van vegetatie op de luchtkwaliteit kan dus zowel positief als negatief zijn.
3.4.	(Lokale) klimaatregulatie	<p>Vegetatie emitteert aerosolen die de zonnearadiatie interceperen en verstrooien, met een verminderde directe instraling tot gevolg waardoor bv. hitte-eilandeffecten worden voorkomen;</p> <p>Vegetatie heeft door de effecten van beschaduwing, verdamping, windstoppen en albedo een invloed op het plaatselijk klimaat. Vegetatie in stedelijke omgeving is in staat het microklimaat in de stad te milderen, door verkoeling tijdens de zomer en door beperking van de warmteverliezen tijdens de winter.</p>
3.5.	Aantrekkelijke natuurlijke landschappen	Het landschap wordt verbeterd met stimulatie van groene recreatie. De beleving van natuurlijke landschappen wordt ingedeeld bij de culturele ecosysteemdiensten. Landschappen kunnen gewaardeerd worden omwille van hun recreatieve, cultuurhistorische, esthetische en natuurwetenschappelijke waarde.

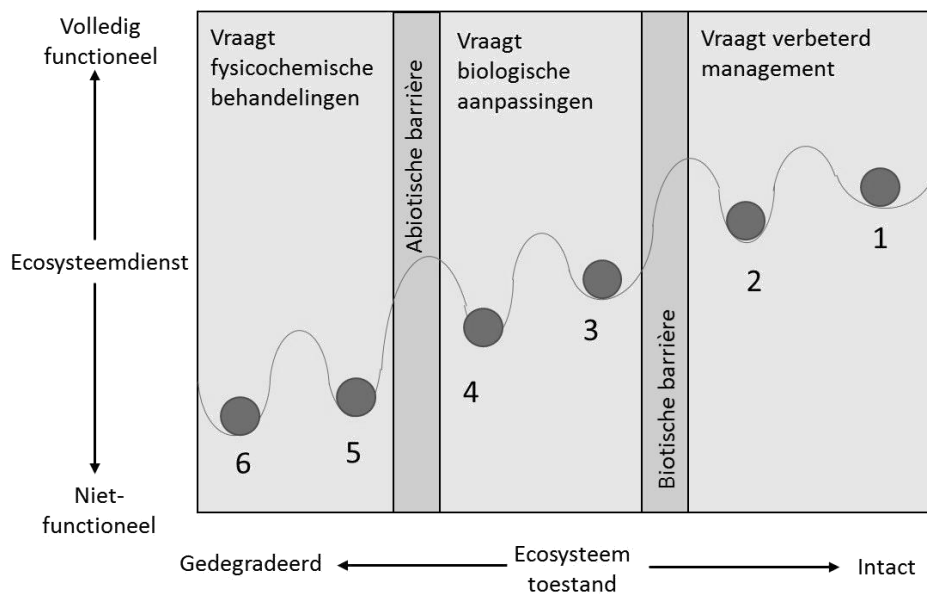
Het gebruik van fytotechnologieën betekent over het algemeen ook een significante **reductie in opstart- en onderhoudskosten** van sanering en herstel (ten opzichte van 'klassieke' saneringstechnieken), omdat planten zelf-onderhoudend (fotosynthese) en zelf-herstellend zijn. Bovendien kan het ook worden ingezet rekening houdend met de aanwezige beplanting en/of vegetatie, en op specifieke locaties zoals straatbermen, daken, verticale geluidsschermen. Fytoremediatie laat toe om bodemsanering te combineren met tal van andere functies.

Bodemsanering hoeft ook niet steeds het primaire doel te zijn. Bepaalde gronden zijn verontreinigd maar hoeven niet te worden gesaneerd bijvoorbeeld bij lichte verontreinigingen, bij historische verontreinigingen die geen risico vormen of voor restverontreinigingen. Het **vergroenen** van dergelijke terreinen kan een grote meerwaarde bieden voor mens en ecosysteem niet in het minst op bedrijfsterreinen en in de bebouwde omgeving. De kennis over fytoremediatie draagt in dit geval bij aan het verhogen van de slaagkans van een eventuele aanplant of vegetatie -ontwikkeling, de afname van de bodemverontreiniging en het verminderen van eventuele risico's die van een beplanting kunnen uitgaan zoals een mobilisatie van de verontreiniging als gevolg van veranderende bodemparameters, verspreiding via de voedselketen, bladval, vervluchtiging door de plant.

Fytoremediatie levert in de meeste gevallen een **win-win situatie** die heel wat opportuniteiten biedt. Een doordachte monitoring laat toe om het proces op te volgen en erover te communiceren met tal van stakeholders.

Het gebruik van groene saneringstechnieken zoals fytoremediatie kan rekenen op een **grote publieke acceptatie**. Als het groen bijkomende functies (ecologische functies, recreatieve functies, esthetische functies, ...) vervult zal deze acceptatie nog verder toenemen. Het combineren van meerdere functies vormt een belangrijk aspect bij de uitwerking van een fytoremediatie-project. Hierbij dient steeds het dynamische aspect van de fytoremediatie in rekening te worden gebracht. Het is cruciaal om met de omwonenden te communiceren over de verschillende stappen in het proces en over de concrete meerwaarde voor mens en ecosysteem.

Tot slot draagt fyto-remediatie bij tot **ecosysteemherstel** (Figuur 9). Het mitigeren van abiotische problemen is vaak slechts één van de barrières die moet overwonnen worden in het hele proces naar ecosysteemherstel (Figuur 9). De andere barrières zoals het herstellen van biotische interacties (bv. het inoculeren van N<sub>2</sub>-fixerende bacteriën, revegetatie, soorten herintroductie) of het verbeteren van natuurbeheer (plantingsdichtheid, gewasrotatie, snoeiwijze, bemesten, invasieve soorten controle) zijn ook belangrijk en maken deel uit van de aspecten van ‘fytotechnologie’ voor het herstel van natuurlijk erfgoed, de biodiversiteit en ecosysteefuncties. Terzelfdertijd moeten we de langdurige relatie tussen mens en zijn omgeving erkennen en meenemen bij de keuze van fyto-remediatie strategieën waarbij naar een gezonde relatie tussen de mens (cultuur) en natuur moet gezocht worden.



**Figuur 9: Conceptueel model voor ecosysteem herstel (aangepast van Whisenant 1999, en Hobbs en Harris, 2001).**

## 2.7 Saneringsduur en kostprijs

### 2.7.1 Saneringsduur

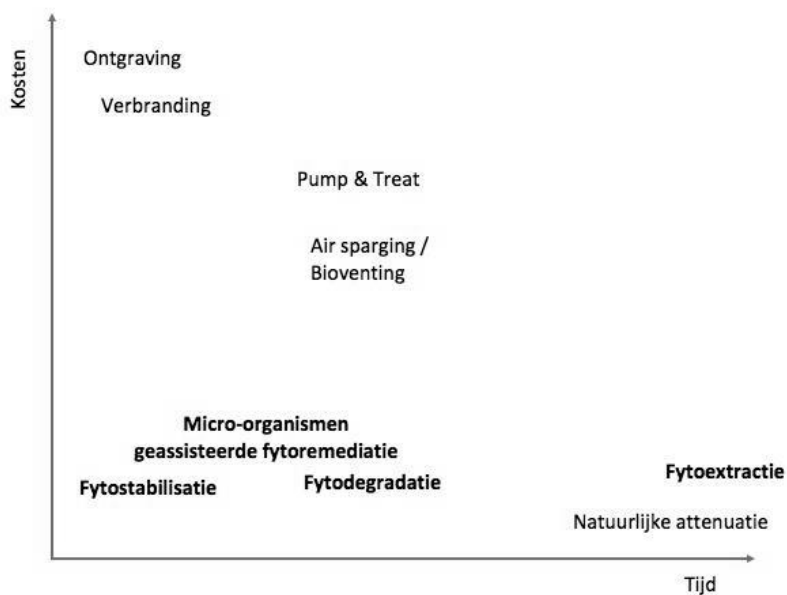
#### *Hoe veel tijd is nodig?*

De tijd nodig voor fyto remediatie hangt af van verschillende factoren:

- de saneringsdoelstelling;
- de concentraties en omvang van de verontreiniging;
- de biobeschikbaarheid van de verontreiniging;
- de diepte van de verontreinigde zone;
- de groeisnelheid van de planten;
- het groeiseizoen van de plant;
- de klimatologische condities;
- de bodemcondities;
- de bereikbaarheid van de verontreiniging maw kan de fyto remediatie toegepast worden in de verontreinigde zone (=bereikbare zone) of kan fyto remediatie enkel als barrière toegepast worden (bijvoorbeeld: bij de toepassing van een hydraulische barrière hangt de saneringsduur af van de afstand van de verontreiniging tot de hydraulische barrière en van de verspreidingssnelheid van de verontreiniging naar de hydraulische barrière toe) .

Deze factoren zijn site-specifiek. Verder kan het nodig zijn om planten te vervangen als deze beschadigd zouden zijn door extreme weersomstandigheden, ziektes en dieren. Dit kan bijgevolg de saneringsduur verlengen.

Afhankelijk van de saneringsdoelstelling en dus ook het gekozen fytotechnologie-mechanisme zal de saneringsduur variëren. Zo zal enerzijds de saneringsduur kort zijn indien geopteerd wordt voor fytostabilisatie. De saneringsdoelstelling kan dan reeds gerealiseerd worden binnen het jaar. Anderzijds zal de saneringsduur lang zijn in het geval van fytoextractie van metaal verontreinigde bodems. In dit geval zal de sanering vaak meerdere tientallen jaren in beslag nemen. Voor de sanering van organische verontreinigingen door middel van een fytotechnologie zal de saneringsduur zich echter bevinden tussen deze twee uitersten en vaak vergelijkbaar zijn met de saneringsduur van de *in situ* alternatieven (zoals persluchtinjectie, biosparging,...).



**Figuur 10: Fytotechnologieën – kosten tov saneringsduur (Reynolds, 2011).**

## 2.7.2 Kostprijs

Bij de kostenraming voor een sanering met fytoremediatie wordt rekening gehouden met vier hoofdcategorieën (zie ook hoofdstuk 4): (1) Ontwerp, (2) Inrichting (3) Beheer en (4) Opvolging van de efficiëntie en resultaat van sanering (=bemonstering en analyse).

- (1) Kosten bij het ontwerp, opmaak bodemsaneringsproject, opmaak bestek omvatten haalbaarheidsstudies, planteselectie en de bijbehorende engineeringkosten voor de opmaak van het bodemsaneringsproject en bestek voor de uitvoering van de werken. Serre-experimenten of piloottesten kunnen nodig zijn om te bepalen welke planten moeten worden gebruikt en om de mogelijkheid van fytoremediatie als behandelingsoptie voor de locatie te beoordelen. In principe dienen deze voorafgaand aan de opmaak van een bodemsaneringsproject uitgevoerd te worden. De opmaak van een bestek voor de uitvoering van de aannemingswerken kan bij fytoremediatie vrij beperkt gehouden worden: type plant, aanplantingsplan, drainagebuizen, ... evenals de noodzaak om eventuele landbelemmeringen op de locatie te verwijderen.
- (2) Inrichtingskosten omvatten de voorbereiding van de locatie, voorbereiding van de grond, materialen en arbeid. Om de site voor te bereiden moet deze mogelijk worden vrijgemaakt, genivelleerd of omheind. Bodemvoorbereiding kan betrekking hebben op pH-aanpassing, toevoer van voedingsstoffen of bewerking in het algemeen. Terrein- en grondvoorbereiding vereisen in sommige gevallen arbeid en/of materialen, waaronder zware apparatuur, organische stoffen, irrigatiesystemen, plantmateriaal (inclusief 10-20% overschot voor herbeplantingsbehoeften (ITRC, 2004)) en vraatbeschermingsmaterialen voor de planten.
- (3) Beheerkosten omvatten het plaatsen van monitoringputten, eventuele kost van stroombronnen (ingeval toch een pomp nodig is voor recirculatie), irrigatie, snoeien en onderhouden van de planten/bomen en arbeid zijn inbegrepen. Specifieke vereisten voor het beheer voor fytoremediatie worden beschreven in deel 4.4 van dit document.
- (4) Opvolging van de efficiëntie en resultaat van sanering door bemonstering- en analyse van grond of grondwater. Deze kosten kunnen de totale kosten van het project overheersen vanwege de tijd die nodig is voor monitoring en de benodigde hoeveelheid gegevens. De kosten omvatten voornamelijk staalnametijd (uitvoeren van controleboringen en grondwaterstaalnames) en laboratoriumkosten voor het analyseren van de monsters. Gegevens verzameld tijdens bemonstering en analyse zijn cruciaal voor grondige documentatie van de voortgang van de site en de prestaties van fytoremediatie als een nieuwe technologie.

De kosten verbonden aan deze vier categorieën zijn relatief klein in vergelijking met traditionele ‘klassieke’ saneringstechnieken. Dit is met name het geval in de exploitatie- en onderhoudsfase, waarbij de primaire factor voor kostenreductie de energiebron van de besturingssystemen is. Traditionele systemen maken gebruik van elektrische stroom, tegen aanzienlijke kosten, om bijvoorbeeld water te pompen, terwijl fyto-remediatie-systemen gebruikmaken van gratis zonne-energie. Individuele sites variëren in kosten, ongeacht de technologie die wordt toegepast. Over het algemeen is fyto-remediatie een goedkoop alternatief voor traditionele methoden, zoals te zien is in de kostenramingen van **Tabel 7**.

**Tabel 7: Totale projectkosten saneringen (Green & Hoffnagle, 2004)**

Probleem	Klassieke sanering	Fyto-remediatie en passieve technieken	Kost (EUR) klassieke sanering	Kost (EUR) fyto-remediatie	Project kosten uitgespaard	Referentie
Metalen in bodem (Cd, Cu,...)	Flushen/ Vitrificatie	Fytostabilisatie/ extractie oogst en afvoer	60-170 EUR/ton 240-400 EUR/ton	20-80 EUR/ton	45-50 %	Blaylock et al., 1997
Solventen in grondwater, 1 ha	Pump en treat	Fytodegradatie en hydraulische controle	700 000 annual running cost	200 000 installatie en initieel onderhoud	50 % kosten besparing vanaf het derde jaar	Solvent recovery Systems of New England
TPH in grondwater, 6 m, 0.4 ha	Pump en treat	Fytodegradatie en hydraulische controle	535 800	201 126	62 %	Gatliff, E., 1994
TPH in bodem, 0.4 ha	Uitgraven en storten, verbranden	<i>In situ</i> degradatie	500 000	50 000 - 100 000	80-90 %	Drake 1997
Kerosine, diesel, benzine, BTEX in grondwater (567 000-756 000 L)	Pump en treat	Passieve olie drijf laag verwijdering en fyto-remediatie	Geschat op 1 miljoen	326 985	67 %	Nichols et al., 2014
PCE in het grondwater	Pump en treat	Fytodegradatie en hydraulische controle	1.89 -1.12 EUR/1000L	0.43 EUR/1000L	> 50 %	Schnoor 2002

Voor sommige fyto-remediatie-toepassingen, werden reeds in het verleden hypothetisch kostenvergelijkingen geprojecteerd. **Tabel 7** geeft schattingen weer op basis van werken uitgevoerd op laboratorium- en pilotschaal. Zij trachten om de geprojecteerde totale projectkosten te weerspiegelen.

De kosten voor fyto-remediatie zijn sterk afhankelijk van het mechanisme dat wordt toegepast en project- en locatieafhankelijk.



Op basis van de resultaten van bovenstaande kostenramingen voor de totale projectkosten voor het uitvoeren van saneringen, alsook het uitvoeren van een uitgebreide literatuurstudie met betrekking tot de saneringskosten voor fytotechnologie-projecten werd **Tabel 8** – Fytotechnologieën: Kosten tov saneringsduur verder aangevuld.

In deze tabel zijn tevens de gegevens uit de projectfiches, die deel uitmaken van deze code van goede praktijk, opgenomen alsook de gegevens uit relevante projecten (full-scale en waarvan kosten beschikbaar zijn) uit de [online fytotechnologie databank \(US EPA\)](#).

Bondig samengevat:

- **Fytoextractie:** de saneringskosten zijn van vele factoren afhankelijk en kunnen bijgevolg variëren van enkele euro's per vierkante meter tot bijna 500 €/m<sup>2</sup>.
- **Fytostabilisatie:** een vergelijking van 6 fytostabilisatie-projecten leert ons dat de kosten kunnen variëren van enkele euro's per vierkante meter tot 65 €/m<sup>2</sup>.
- **Fytodegradatie:** Uit onderzoek van een achttal projecten waar fytodegradatie werd toegepast voor de sanering van een terrein met een organische verontreiniging blijkt dat de kosten zich voornamelijk situeren tussen een tiental euro's tot ongeveer 65 €/m<sup>2</sup>. Ook hier werd een uitschieter opgetekend van 323 €/m<sup>2</sup>.
- **Hydraulische controle:** Op basis van 12 projecten waarbij fytohydraulica een voorname rol speelt, kan besloten worden dat de kosten kunnen variëren van enkele euro's tot bijna 100 €/m<sup>2</sup>, met een uitschieter van 862 €/m<sup>2</sup>.

Tabel 8: Fytotechnologieën – kosten tov saneringsduur (Reynolds, 2011)

Contaminant	Rhizodegradatie	Fytodegradatie	Fytovolatilisatie	Fytohydraulica	Fytoextractie	constructed wetland	Fyotabilisatie	Microbe geassisteerde fytodegradatie	Doel/Design	Grassen	Populier	Wilg	Esdoorn	Ceder	Spar	Eucalyptus	Tamarisk	Ruwe berk	Witte els	Varens	Duinriet	Klaver	Wonderboom	Fungi	Zonnebloem	Moesterplant	Mais	Courgette	Oppervlakte (ha)	Diepte (m)	Saneringsduur (jaar)	Tot Kosten	Kosten in €/m2	Locatie	Site
Anorganisch: As			x													x	x											0,49	10	€ 78.523,75	16,17	California			
Anorganisch: As				x																x								0,004	#	€ 3.489,94	86,24	Texas			
Anorganisch: As					x															x								0,40	#	€ 1.983.187,19	490,06	Virginia			
Anorganisch: As, Pb, Zn				x					(lange termijn) remediatie			x																20,00	0,50	2	€ 90.000,00	0,45	Spanje	3	
Anorganisch: Cd, Cu, Pb, ...					x		x							x		x												10,93	3	€ 134.362,87	1,23	Texas			
Anorganisch: Cd, Cu, Pb, Zn						x			risicocontrole	x																		135,00	0,35	0	€ 1.350.000,00	1,00	Maatheide	2	
Anorganisch: Cd, Pb, Nitraat, Sulfaat							x			x	x																	6,88	11	€ 226.846,40	3,30	South Carolina			
Anorganisch: Cd, Pb, Zn					x																		x	x	x	x		0,50	9	€ 47.986,74	9,60	Poland			
Anorganisch: Cd, Pb, Zn					x				(lange termijn) remediatie			x																10,00	0,30	8	€ 45.000,00	0,45	Lommel	1	
Anorganisch: Cu, Zn							x		Risicocontrole	x	x	x																10,00	0,35	0	€ 140.000,00	1,40	Frankrijk	5	
Anorganisch: Ni				x					Hydraulische barrière	x	x	x																0,36	6,00	5	€ 0,00	0,00	Harelbeke	4	
Gemengd: As, Pb, Zn, VOCl	x	x		x	x		x			x	x	x																1,62	5	€ 1.046.983,38	64,68	Illinois			
Gemengd: Cr, Olie, VOCl	x		x	x						x	x																	1,21	8	€ 61.074,03	5,03	Florida			
Organisch: BTEX		x	x						Remediatie pluim																			12,50	9,00	4	€ 308.837,50	2,47	Genk	7	
Organisch: BTEX		x								x	x	x																0,24	4	€ 43.188,06	17,79	Ohio			
Organisch: BTEX		x	x							x	x	x	x	x														8,09	3	€ 26.174.584,50	323,39	Michigan			
Organisch: BTEX				x						x	x																	4,05	2	€ 627.317,54	15,50	Ohio			
Organisch: BTEX		x								x	x																	0,81	8	€ 6.979.889,19	862,38	New Hampshire			
Organisch: Chlorendisch zuur				x					Risicocontrole		x													x				0,87	6,00	30	€ 52.697,00	6,06	Genk	11	
Organisch: DDE							x		Remediatie																	x		-	0,30	1	€ 0,00		USA	10	
Organisch: Olie		x		x					Remediatie kern + pluim	x	x																	0,30	7,00	8	€ 61.524,30	20,51	Genk	9	
Organisch: Olie		x	x							x																		0,09	10	€ 23.775,25	25,59	Alaska			
Organisch: Olie, diesel, BTEX		x	x							x	x																	0,16	4	€ 69.798,89	43,12	Wisconsin			
Organisch: Olie, diesel, BTEX		x	x							x																		0,06	1	€ 12.781,92	22,93	Alaska			
Organisch: VOCl				x				x	Remediatie pluim		x																	2,00	10,00	10	€ 810.000,00	40,50	Vlaanderen	8	

### 3 Procedure voor onderzoek naar haalbaarheid en voorbereiding ontwerp

Vooraleer we enig saneringsproject plannen, is het belangrijk om te weten (1) of sanering nodig is (dit blijkt uit een **beschrijvend bodemonderzoek** en bijhorende **risico-evaluatie**), en (2) indien sanering noodzakelijk is, welke de saneringsdoelstellingen zijn: gewenste eindpunt van de verontreiniging (afbraak, vastzetting, ...) en gewenste concentraties. Een geschikte saneringstechnologie kan dan worden geselecteerd met het oog op het behalen van de saneringsdoelstellingen.

Een **haalbaarheids-analyse**, of evaluatie van geselecteerde voorkeurssaneringsvarianten, wordt uitgevoerd om voldoende informatie te bekomen over saneringsopties die geschikt zijn voor de verontreinigde site om de geïdentificeerde doelstellingen te bereiken. Het haalbaarheidsonderzoek vormt dus de basis voor het selecteren van een geschikte saneringsoptie, die efficiënt de gevaarlijke stof(fen) verwijdert of de blootstelling ervan voor mens en milieu minimaliseert door vastlegging (stabilisatie) of omvorming tot minder schadelijke stoffen. De wijze waarop het haalbaarheidsonderzoek wordt uitgevoerd en de resultaten ervan dienen te worden opgenomen in het bodemsaneringsproject.

Dit hoofdstuk focust op de **evaluatie van fyto remediatie als een mogelijk saneringsalternatief**. In wat volgt wordt niet expliciet de vergelijking gemaakt van fyto remediatie met andere saneringsopties; we focussen voornamelijk op de haalbaarheid van fyto remediatie. In realiteit moet een vergelijking van efficiëntie, kost, en tijdsduur worden uitgevoerd met verschillende andere saneringsalternatieven. **Verder is het zo dat fyto remediatie ook interessant kan zijn in combinatie met andere saneringstechnieken**. Een typisch voorbeeld hiervan is passieve drijf laag recuperatie met en drijf laag recuperatie unit (DRU) voor het verwijderen van petroleum koolwaterstoffen die op het grondwater drijven, gevolgd door fyto remediatie. De combinatie van beide passieve technieken is al succesvol gebleken voor de sanering van een ondiep verontreinigd aquifer bij een brandstof opslag terminal, in Elizabeth City, NC, USA (Nichols *et al.*, 2014). Een drijf laag recuperatie unit verwijderde 109,561 L vrije-fase petroleum product, en daarna namen de bomen het over en was er een duidelijke afname in dikte van de drijf laag onder de fyto remediatie aanplant.

Het proces dat moet worden doorlopen om te evalueren of fyto remediatie al dan niet een haalbare optie is, wordt schematisch weergegeven in **Figuur 11**. Dit proces vormt tevens de basis voor het ontwerp van het fyto remediatie proces (hoofdstuk 4).

NODIGE INPUT	WORKFLOW HAALBAARHEIDSANALYSE	AANGEREIKTE TOOLS
<i>Al uitgevoerd onderzoek (OBO/BBO/OBBO)</i> <i>Fyto-specifieke terreinkarakterisatie</i> <i>Literatuur</i> <i>Databanken</i>	<b>3.1 Eerste screening naar haalbaarheid fyto remediatie</b> ↓ <b>3.2 Selectie meest geschikte fyto remediatie mechanisme</b> ↓ <b>3.3 Identificatie van meest geschikte plant(en)</b> ↓ <b>3.4 Grondige evaluatie haalbaarheid</b>	<i>Fytotechnologie matrix (Tabel 4)</i> <i>Fyto remediatie potentieel (Figuur 8)</i> <i>Screeningsmatrix (Tabel 8)</i>
<i>Fyto-specifieke terreinkarakterisatie</i> <i>Literatuur</i> <i>Databanken</i>		<i>Beslissingsboom Fyto remediatie mechanisme (Figuur 14)</i>
<i>Labo-, serre- en veldexperimenten</i>		<i>Beslissingsboom plantenkeuze (Figuur 15)</i>
		<i>Beslissingsboom Haalbaarheidsanalyses (Figuur 16)</i> <i>Samenvatting uit te voeren experimenten per mechanisme (Tabel 9)</i>

**Figuur 11: Workflow haalbaarheidsanalyse**

Een eerste stap in de haalbaarheidsanalyse is een **snelle screening naar de haalbaarheid van fyto remediatie (3.1)** in het algemeen. Belangrijke parameters hierbij zijn de kenmerken van het verontreinigd medium (grond, sediment, water...), de verontreiniging zelf (type en concentratie), de aanwezige vegetatie en terrein specifieke factoren (eventuele obstructies en beschikbare ruimte). Reeds eerder uitgevoerd onderzoek (OBO en eventueel BBO en OBBO), de literatuur, beschikbare databanken en een bijkomende fyto-specifieke terrein karakterisatie leveren voldoende informatie om deze eerste screening uit te voeren. Voor minerale olie is een karakterisatie belangrijk om de effectieve samenstelling te kunnen inschatten (zie paragraaf 2.3).

Verder kunnen de fyto technologie matrix (**Tabel 5**), het overzicht van fyto remediatie potentieel van de verschillende verontreinigingen (**Figuur 8**) en de screeningsmatrix (**Tabel 9**) gebruikt worden als hulpmiddel bij deze snelle screening naar haalbaarheid. Deze screening kan leiden tot 3 verschillende conclusies: (1) fyto remediatie is niet haalbaar op deze site, (2) fyto remediatie kan interessant zijn voor een bepaald gedeelte van de verontreiniging en dient gecombineerd te worden met een andere saneringstechniek of (3) fyto remediatie kan toegepast worden voor de volledige verontreiniging.

Indien de uitkomst van deze screening positief blijkt te zijn (conclusie 2 of 3), zal in een volgende stap bepaald worden welk **fyto remediatie mechanisme** het **meest geschikt** is (**3.2**). Hiervoor dient de beslissingsboom fyto remediatie mechanisme (**Figuur 14**) stap voor stap gevolgd te worden en is er geen bijkomende input nodig.

Eens het meest geschikte mechanisme bepaald is, kan overgegaan worden tot **de plantenkeuze (3.3)**. Ook hier werd een beslissingsboom opgesteld (**Figuur 15**) om de selectie te vergemakkelijken. De fyto-specifieke terrein karakterisatie,

de literatuur en beschikbare databanken zijn hier voldoende als bron van informatie.

In geval de screening naar haalbaarheid positief is en het fyto-remediatiemechanisme alsook de meest geschikte plant(en) geïdentificeerd zijn, is de volgende stap een grondige haalbaarheidsanalyse. Afhankelijk van het type verontreiniging en de reeds bestaande ervaring met fyto-remediatie van de verontreiniging in kwestie, zullen verschillende haalbaarheidstesten al dan niet uitgevoerd moeten worden. Ook hier werd een beslissingsboom voorzien die stap voor stap dient gevolgd te worden om te bepalen welke haalbaarheidstesten nodig zijn (**Figuur 16**). Hierbij zal de **haalbaarheid** van het meest geschikte fyto-remediatiemechanisme **grondig getest (3.4)** worden voor een 3 tot 5-tal geselecteerde interessante planten. Verder wordt duidelijk in welke gevallen men moet overgaan van klassieke fyto-remediatie naar micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie. Bovendien geeft tabel 10 een overzicht van de verschillende labo- en/of serre experimenten die nodig kunnen zijn en een schatting van de tijdsduur en kostprijs die eraan verbonden zijn. De resultaten kunnen ook gebruikt worden om de meest optimale plant te kiezen.

Indien men dit proces heeft doorlopen, dan komt men tot een voorontwerp van de uiteindelijke full-scale saneringswerkwijze. Het full-scale ontwerp, opvolging en monitoring wordt besproken in Hoofdstuk 4.

## **3.1 Eerste screening naar haalbaarheid fyto-remediatie**

In functie van het toepassen van fyto-remediatie is het aangewezen om een grondige fyto-specifieke terrein karakterisatie uit te voeren (**3.1.1 Fyto-specifieke terrein karakterisatie**). Eens de fyto-specifieke terrein-karakterisatie is uitgevoerd, kan op basis van een aantal gebruiksvriendelijke aangereikte tools een eerste inschatting gemaakt worden van de haalbaarheid van fyto-remediatie (**3.1.2 Inschatting haalbaarheid fyto-remediatie**).

### **3.1.1 Fyto-specifieke terrein karakterisatie**

Het terreinonderzoek kan zowel tijdens als na de uitvoering van het beschrijvend bodemonderzoek gebeuren door middel van een rondgang ter plaatse. Hierbij is het van belang duidelijke notities en schetsen te maken aangevuld met de nodige opmetingen, zodat deze nadien in het ontwerp kunnen gebruikt worden. Er moet hierbij aandacht besteed worden aan o.a. bodemkenmerken, het al dan niet aanwezig zijn van vegetatie en de staat ervan, de toestand en ligging van bestaande nutsleidingen, bebouwing en verhardingen, de grenzen van het terrein, ... Tijdens deze fyto-specifieke terrein karakterisatie kan het ook aangewezen zijn al enkele bodemstaalnamen te doen voor bijkomende analyses.

Het uitvoeren van een correcte en volledige fyto-specifieke terrein karakterisatie is van groot belang voor een goed ontwerp en uitvoering van het fyto-remediatie-project.

Het is belangrijk dat na deze fyto-specifieke terrein karakterisatie de reeds voorhanden informatie (OBO, BBO en OBBO) kan aangevuld worden zodanig dat de hieronder beschreven parameters voor het **verontreinigd medium (3.1.1.1)**, de **verontreiniging (3.1.1.2)** zelf, de **aanwezige vegetatie (3.1.1.3)** en een aantal **externe factoren (3.1.1.4)** voldoende gekend zijn.

### 3.1.1.1 Verontreinigd medium

#### ***Grond, sediment, slib***

Voor verontreinigde grond, sediment of slib zijn de voornaamste criteria de diepte en het volume van de verontreinigingen en de bodemkenmerken zoals textuur, watergehalte, nutriëntengehalte, pH en doordringbaarheid, die bepalen of de verontreiniging al dan niet bereikbaar is voor de plant.

De verontreinigde grond moet binnen het bereik van de wortelzone van de geselecteerde planten vallen. Hierbij dient er rekening mee gehouden worden dat planten wortels ontwikkelen in functie van het onttrekken van water en nutriënten voor zover ze die nodig hebben om zichzelf in stand te houden. Zo ontwikkelen wortels zich in de zones die het meeste vocht en nutriënten bevatten en die het minste weerstand bieden bij de groei van de wortels. Deze factoren limiteren vaak de ontwikkeling van wortels in een verontreinigde zone die wordt gekenmerkt door een gebrek aan vocht en/of nutriënten of die moeilijker doordringbaar is voor de wortels. Heel wat verontreinigde terreinen bestaan uit aangevulde gronden die weinig voedselrijk zijn en vaak sterk verdicht zijn. Dit kan echter gemakkelijk opgelost worden door een voorafgaande bodembewerking, waarbij de bovenste laag (- 40 cm-mv) omgeploegd wordt en de nodige bemesting wordt toegediend.

Na een voorafgaande bodembewerking (indien nodig), kan de bereikbaarheid van de verontreiniging voor de plant gegarandeerd worden als aan volgende voorwaarden voldaan wordt:

1. De verontreiniging situeert zich niet dieper dan 8 m;
2. De verontreiniging situeert zich niet dieper dan 5 m in de verzadigde zone;
3. Afwezigheid van door de plant ondoordringbare/compacte lagen tussen de wortels van de plant en de verontreiniging (zoals bijvoorbeeld zandsteenbanken).

Indien toch ondoordringbare/compacte lagen aanwezig zijn, kan overwogen worden om deze machinaal open te breken en/of indien nodig gebruik te maken van wortelkokers (**Figuur 12**).

## **(Grond)water**

Voor de sanering van oppervlakte- en afvalwater worden natuurlijke rietvelden en andere biofilter-installaties gebruikt (zie literatuurstudie). Voor grondwater geldt dat, net zoals voor grond en sediment, de bereikbaarheid van het grondwater en de verontreinigde zone de belangrijkste bepalende factor is.

De diepte van de watertafel moet binnen het bereik van de plantenwortels vallen. Echter door een juiste plantkeuze te maken, kan ook een dieper gelegen grondwatertafel (bv -10m) zonder probleem bereikt worden. Het betreft hier "freatofyten", zijnde planten die met hun wortels steeds op zoek gaan naar het grondwater.

Ook belangrijk is dat fyto-remediatie meestal enkel in de bovenste lagen van het grondwater optreedt omdat plantenwortels niet doorheen zuiver grondwater gaan om daarna dieper verontreinigd grondwater aan te trekken. De verontreiniging mag zich bijgevolg niet te diep (<5m) onder de grondwatertafel bevinden.

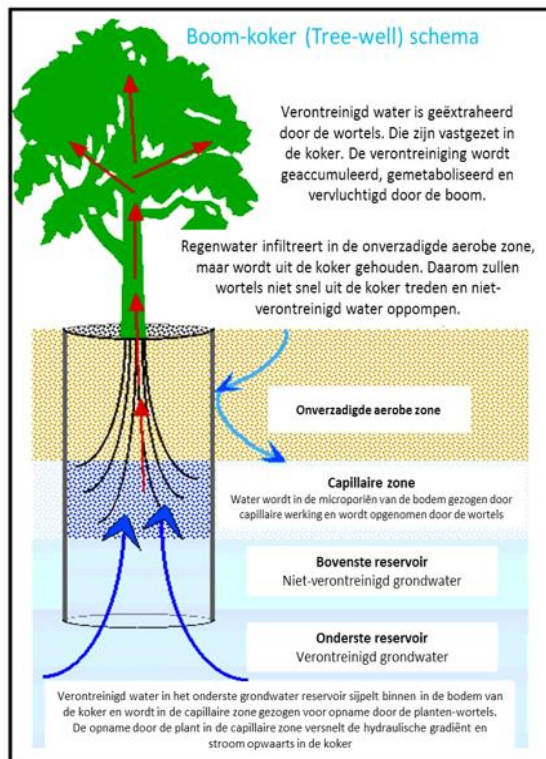
Verder zijn er ook seizoensgebonden fluctuaties in de watertafel die de worteldiepte beïnvloeden.

Indien toch diepere grondwaterlagen moeten gesaneerd worden, kan men gefaseerd te werk gaan, waarbij men in eerste instantie het verontreinigd diep grondwater oppompt en vervolgens ondiep herinfiltrateert ter hoogte van de plantenwortels. Hierbij dient de herinfiltratie dusdanig berekend/gemodelleerd te worden dat herinfiltratie van verontreinigd grondwater niet tot bijkomende verspreiding in het ondiepe grondwater leidt.

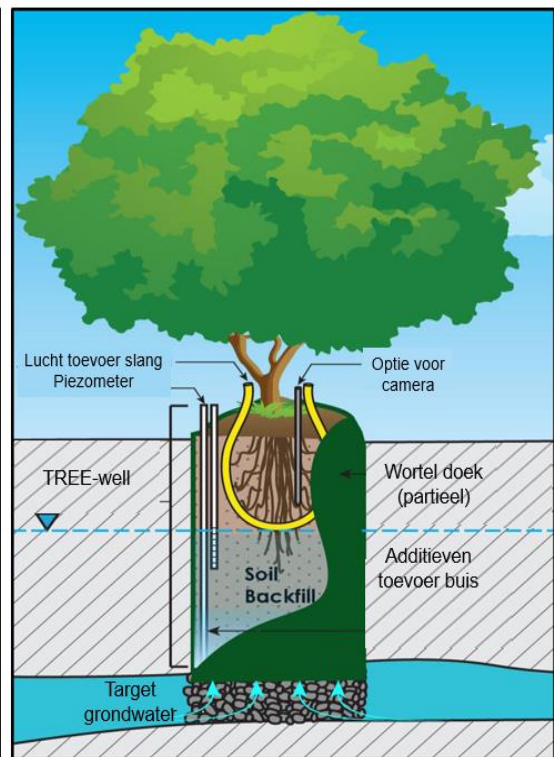
Tot slot kan, net zoals voor grond, sediment en slib, de bereikbaarheid van het (grond)water belemmerd worden door ondoordringbare lagen. De aanwezigheid van hardere lagen, bijvoorbeeld een kleilaag in een zandpakket of zandsteenbanken, kan de ontwikkeling van de wortels beïnvloeden. Deze harde lagen kunnen doorbroken worden door gebruik te maken van tree-wells of boomkokers bestaande uit voor de wortels ondoordringbaar materiaal zoals afgebeeld op **Figuur 12a**. Zo kan de wortelgroei geleid worden doorheen deze ondoordringbare lagen naar het diepere grondwater.



a)



b)



**Figuur 12:** a) Tree-well koker om wortels doorheen hardere lagen te leiden en dieper verontreinigd grondwater te bereiken. b) Voorbeeld grondwater sanering van 1,4-dioxaan met een Tree-well. Bioaugmentatie van de wortelzone kan worden toegepast om 1,4-dioxaan afbraak te versnellen. Aangepast van SiREM (<https://www.siremlab.com/14-dioxane-bioremediation-update/>).

De verontreiniging van het grondwater met 1,4-dioxaan is ook een gekende problematiek in Vlaanderen omwille van het gebruik als solvent en solvent stabilisator voor 1,1,1-trichloroazijnzuur. Anaerobe ijzer-reducerende bacteriën zouden 1,4-dioxaan kunnen biodegraderen, maar dat gebeurt traag. Vandaar dat men interesse heeft om de aerobe afbraak van 1,4-dioxaan te versnellen. Hierbij worden aerobe co-metabolisatie en bioventing strategieën gebruikt om zuurstof toe te voegen aan het grondwater. Bacteriën zoals *Pseudonocardia dioxanivorans* CB1190 (Mahendra *et al.*, 2006) hebben speciale monooxygenase enzymen dat toelaat 1,4-dioxaan als enigste C en energie bron te gebruiken.

SiREM heeft al verschillende malen de Tree-well succesvol gebruikt op 1,4-dioxaan sites. De planten nemen grondwater op via hun wortels en helpen aerobe condities te voorzien in de wortelzone, daarbij creëren ze ideale condities voor microbiële 1,4-dioxaan afbraak. De versnelde wortelzone afbraak door bacteriestammen zoals CB1190 zorgt er ook voor dat fytovolatilisatie van dioxaan wordt beperkt.



Een andere factor is de snelheid van de grondwater beweging. Enerzijds zal dit bepalen welke dimensies aan beplanting vereist zijn om te voorkomen dat in de winterperiode, wanneer de pompcapaciteit van de planten te verwaarlozen is, de verontreiniging zich onder de aanplant door verder verspreidt. Een gulden regel die hierbij gehanteerd kan worden, is de volgende: de afstand die de verontreiniging onder de aanplant moet overbruggen moet minstens dubbel zo groot zijn als de afstand die door de meest mobiele component van de verontreiniging of meest mobiele afbraakparameters per jaar wordt afgelegd. Indien bv de verspreidingsnelheid van de meest mobiele component van de verontreiniging 5m/jaar is, dient de aanplant 10m breed te zijn in de richting van de stromingsrichting. In geval de saneringsdoelstelling een hydraulische controle betreft, dient men ervoor te zorgen dat de stromingssnelheid (minstens) evenredig is met de opname en transpiratie door de plant.

Anderzijds kan de grondwatersnelheid ook een invloed hebben op de snelheid van het saneringsproces. Dit is van toepassing indien de aanplant stroomafwaarts van de bron van de verontreiniging geïnstalleerd wordt omdat de snelheid van de aanvoer van de verontreiniging dan bepaald wordt door de grondwatersnelheid.

### 3.1.1.2 Verontreiniging

Ook het type **verontreiniging** moet in beschouwing worden genomen in de haalbaarheidsanalyse. Voor organische verontreinigingen bepaalt de hydrofobiciteit, uitgedrukt in de log Kow waarde in welke mate de verontreinigende stof zal worden opgenomen door de planten (een log Kow tussen 0,5 en 3,5 betekent een goede opname door planten, < 0,5 te hydrofiel en dus een geringe opname, > 3,5 te hydrofoob en binding in de celwand). Voor metaalverontreinigingen hebben studies reeds de fytoextractie-coëfficiënten berekend (van de gemakkelijkste naar de moeilijkste te extraheren metalen zijn het:  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  en  $\text{Cr}^{3+}$ ). Fytoremediatie kan ook anders verlopen voor mengsels van metalen dan voor de afzonderlijke metalen, ook wanneer ze gemengd voorkomen met organische verontreinigingen.

In geval van organische verontreiniging is de afbreekbaarheid (biologisch en/of chemisch) van groot belang. Indien biologische afbraak mogelijk is, kan deze via fytoremediatie optimaal ingezet worden, hetgeen een groot voordeel is.

De **verontreinigingsconcentraties** mogen niet te hoog zijn; ze mogen niet te toxisch zijn voor planten of onaanvaardbare negatieve effecten uitlokken op plantengroei en opbrengst. Hierbij is het van cruciaal belang dat fytotoxiciteit bepaald wordt door de plant-beschikbare concentratie van de verontreiniging en niet door de totaalconcentraties. Zo kan een totale concentratie van 5 mg/kg ds Cd bv fytotoxisch zijn op een typische zure zandbodem waar nagenoeg al de aanwezige metalen plant-beschikbaar zijn, terwijl bij dezelfde totaal-concentratie aan metalen in een kleibodem, planten geen negatieve effecten

ondervinden van dezelfde totale concentratie omdat in dat geval de concentratie aan plant-beschikbare metalen veel lager is. Dit is te wijten aan een sterke binding van het Cd aan het aanwezige organische materiaal alsook op de kleideeltjes. Vaak is op basis van de reeds uitgevoerde testen (OBO (en OBBO, BBO) enkel de totaalconcentratie gekend. Om na te gaan welke fractie van de totaalconcentratie plant-beschikbaar is, kunnen tijdens het terreinbezoek bodemstalen genomen worden op verschillende plaatsen op de site zelf. Van deze stalen moeten zowel de totale concentraties (*aqua regia*) als de plant-beschikbare concentraties (0.01M calciumchloride extractie) geanalyseerd worden om zo voor eenzelfde staal een juiste vergelijking te kunnen maken. Dit zijn analyses die gemakkelijk kunnen worden uitgevoerd door standaard erkende labo's.

### 3.1.1.3 Aanwezige vegetatie

In bepaalde gevallen komt er op het verontreinigde terrein of op een aanpalend terrein een **begroeiing** voor. Het waarnemen van de wortelontwikkeling, bijvoorbeeld in een gegraven sleuf, kan heel wat nuttige informatie opleveren. Aanwezige vegetatie op het terrein kan ook een goede indruk geven van mogelijke soorten die **tolerant** zijn voor de verontreiniging (bv geen geel verkleurde bladeren, geen of sterk gereduceerde groei). Bij twijfel of er al dan niet fytotoxiciteit optreedt bij de aanwezige vegetatie en welke plantensoorten reeds aanwezig zijn, kan een uitgebreide inspectie op het terrein door een plantexpert uitsluitend bieden. Dit betreft enkel visuele waarnemingen.

### 3.1.1.4 Externe factoren

Naast het verontreinigd medium en de verontreiniging zelf, zijn er ook nog een aantal externe factoren die in acht genomen moeten worden om de haalbaarheid van fytoremediatie in te schatten.

In eerste instantie kan gesteld worden dat er voldoende vrije **ruimte** moet zijn en dit op de juiste locatie. In het ideale geval is er voldoende ruimte op de locatie van de verontreiniging zelf, anders kan een aanplant op een beperkte afstand stroomafwaarts van de verontreiniging ook overwogen worden. De ruimte die minimaal nodig is, kan ingeschat worden op basis van de verspreidingssnelheid van de meest mobiele component van de verontreiniging (zie 3.1.1.1). In geval van relatief lage verspreidingssnelheid kunnen bijvoorbeeld enkele rijen bomen voldoende zijn als hydraulische barrière.

Eens duidelijk is hoeveel ruimte nodig is en waar, moet nagegaan worden of er ter hoogte van deze vrije ruimte geen andere **obstructies** zijn zoals bv. hoogspanningskabels, andere ondergrondse kabels, leidingen, funderingen, ...

Fytoremediatie wordt meestal beschouwd als een *in situ* technologie door vegetatie te voorzien in gebieden van verontreinigd grondwater of grond. Grond

kan echter ook uitgegraven worden en in een 'behandelingseenheid' geplaatst worden waar vervolgens fyto-remediatie kan plaatsvinden. Hetzelfde geldt ook voor grondwater of oppervlaktewater. Deze kunnen ook worden opgepompt naar een 'behandelingseenheid' waar fyto-remediatie kan plaatsvinden, of ze kunnen worden gebruikt als irrigatiewater. Kortom, indien de terrein-specifieke kenmerken niet gunstig zijn voor de *in situ* toepassing van fyto-remediatie, kan alsnog overwogen worden om fyto-remediatie in een *ex situ* 'behandelingseenheid' toe te passen of gecombineerd uit te voeren met andere technieken.

### **3.1.2 Eerste inschatting haalbaarheid fyto-remediatie**

Er zijn een heel aantal tools voorhanden om een inschatting te maken of fyto-remediatie kan toegepast worden.

Ten behoeve van een haalbaarheidsonderzoek voor fyto-remediatie wordt een evaluatie gemaakt van volgende parameters: verontreinigd medium, verontreiniging en externe factor.

**Tabel 9: Screeningsmatrix**

Screeningscriteria	Voordelig	(intermediair)	Nadelig
<b>Verontreinigd medium- grond, sediment, slib (zie 3.1.1.1)</b>			
Bodemopbouw: Horizontale en verticale heterogeniteit, Positie van slecht doorlatende lagen	Verontreiniging bereikbaar	Verontreiniging bereikbaar mits maatregelen	Verontreiniging niet rechtstreeks door plant bereikbaar
Diepte verontreiniging	Verontreiniging bereikbaar	Verontreiniging bereikbaar mits maatregelen	Verontreiniging niet rechtstreeks door plant bereikbaar
<b>Verontreinigd medium- grondwater (zie 3.1.1.1)</b>			
Bodemopbouw: Aanwezigheid van slecht doorlatende lagen	Verontreiniging bereikbaar	Verontreiniging bereikbaar mits maatregelen	Verontreiniging niet rechtstreeks door plant bereikbaar
Diepte verontreiniging	Verontreiniging bereikbaar	Verontreiniging bereikbaar mits maatregelen, andere planten keuze,...	Verontreiniging niet bereikbaar
Grondwaterstromingssnelheid/verspreidingsnelheidverontreiniging (→invloed op noodzakelijke ruimte)	Traag→ weinig ruimte voor planten nodig	Gemiddeld	Hoog→ meer ruimte voor planten nodig
<b>Verontreiniging (zie 3.1.1.2)</b>			
Type verontreiniging	Zie Figuur 8		
Organische componenten	0,5 < Log K <sub>ow</sub> < 3,5		Te hydrofiel, Te hydrofoob
Anorganische componenten	Afhankelijk van de saneringsdoelstelling		
Verontreinigingsconcentratie Obv visuele inspectie en/of biobeschikbaarheidstesten in labo	Laag risico op fytotoxiciteit	Matig risico op fytotoxiciteit	Sterk risico op fytotoxiciteit
<b>Aanwezige vegetatie (zie 3.1.1.3)</b>			
Aanwezige vegetatie en wortelontwikkeling	Zeer goed groei/wortelontwikkeling	Matige groei/wortelontwikkeling	Sterk gereduceerde groei/wortelontwikkeling

<b>Externe factoren (zie 3.1.1.4)</b>			
Vrije ruimte	Vrije ruimte beschikbaar op de juiste plaats	Matige vrije ruimte beschikbaar en/of niet op de juiste plaats	Weinig vrije ruimte beschikbaar en/of niet op de juiste plaats
Aanwezigheid bovengrondse constructies /obstructies (bijv verhardingen)	Niet aanwezig	Beperkt aanwezig	Over grote oppervlakte aanwezig
Aanwezigheid ondergrondse constructies (kabels, leidingen, funderingen, etc.)	Niet aanwezig	Beperkt aanwezig	Over grote oppervlakte aanwezig

**Conclusie Screening:**

- Fytoremediatie mogelijk haalbaar indien screeningscriteria hoofdzakelijk als voordelig/intermediair werden beoordeeld
- Fytoremediatie niet haalbaar als enige saneringstechniek, als geen van de screeningscriteria als voordelig werd beoordeeld, of als een criterium vet werd onderlijnd (definitief breekpunt)

In eerste instantie kan dit algemeen bekeken worden voor een bepaalde verontreiniging. In de literatuurstudie van deze Code van Goede Praktijk worden hiervoor reeds de fytotechnologie matrix (**Tabel 5**) en de overzichtsfiguur van het fyto-remediatie potentieel (**Figuur 8**) aangereikt als handige instrumenten.

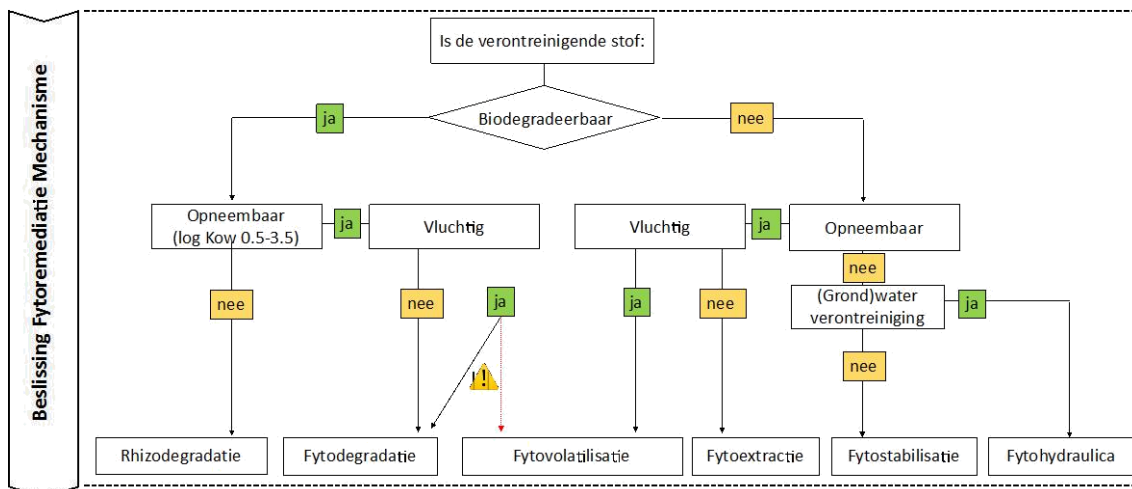
- Fytotechnologie matrix (**Tabel 5**): geeft weer voor elke categorie van verontreinigende stoffen welk fytotechnologie-mechanisme er speelt, welke toepassingen al werden uitgevoerd en succesvol bleken, de schaal waarop het al is toegepast en een korte toelichting van de belangrijkste bevindingen en referenties.
- Overzichtsfiguur van het fyto-remediatie potentieel (**Figuur 8**): Inschatting van het fyto-remediatie potentieel voor alle verontreinigingen met als belangrijkste criteria de duurtijd en de mogelijkheid tot opschaling naar veldtoepassingen.

Aanvullend kan ook gezocht worden in de [online fyto-remediatie databank](#) of in **Bijlage 4** naar reeds eerder uitgevoerde toepassingen van fyto-remediatie van de verontreiniging in kwestie.

Naast deze eerder algemene inschatting, is het van cruciaal belang om de terrein specifieke kenmerken ook mee in acht te nemen om specifiek voor de verontreinigde site in kwestie een inschatting naar haalbaarheid te kunnen maken. De parameters die hierbij van belang zijn, werden reeds uitgebreid besproken in 3.1 (fyto-specifieke terrein karakterisatie). Om de interpretatie van de resultaten hiervan te vergemakkelijken, kan de screeningsmatrix worden gebruikt (**Tabel 9**).

### 3.2 Selectie meest geschikte fyto-remediatie mechanisme

Eens de nodige terrein karakterisatie is uitgevoerd en dus de meest relevante gegevens beschikbaar zijn, kan worden bepaald welk fyto-remediatie-mechanisme het meest geschikt is voor de betreffende site. Het stap-voor-stap volgen van onderstaande beslissingsboom (**Figuur 14**) zal leiden tot de selectie van het meest geschikte fyto-remediatie-mechanisme. In geval het gaat om biodegradeerbare vluchtige verontreinigingen, moet er gegarandeerd kunnen worden dat er voldoende afbraak optreedt zodat ongewenste vervluchtiging via de blaadjes, dus fyto-volatilisatie, vermeden wordt.



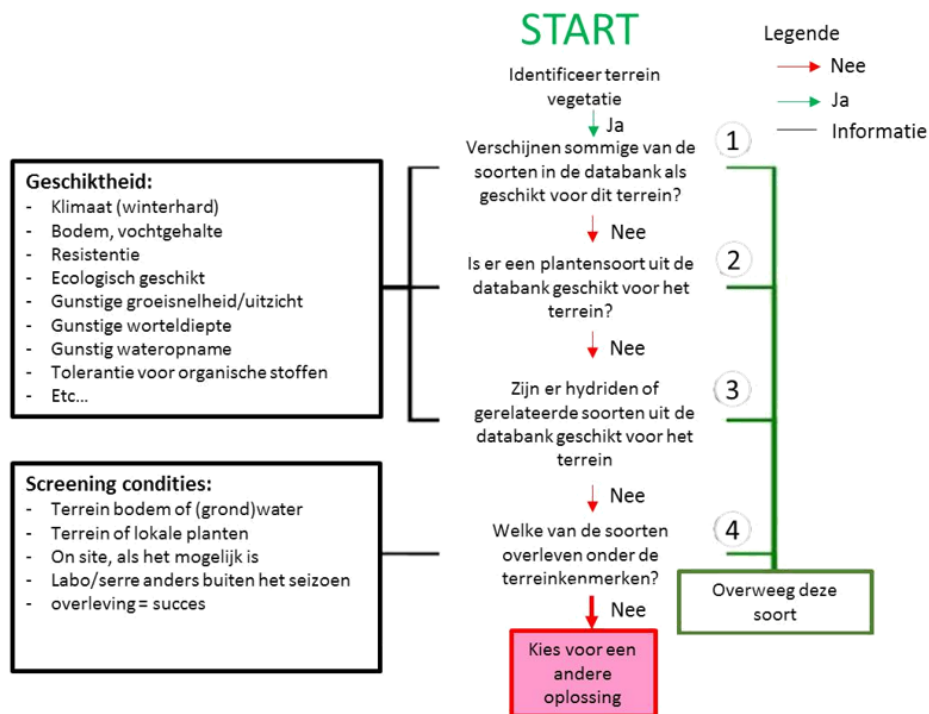
Figuur 14: Beslissingsboom fytoremediatie mechanisme.

### 3.3 Identificatie van meest geschikte plant(en)

Voor fytoremediatie is het uitermate belangrijk een plantensoort te kiezen die de saneringsdoelstelling kan bereiken en de geschikte groei-kenmerken heeft. Een eerste vereiste is vanzelfsprekend dat de plantensoort aangepast is aan de condities van het verontreinigd terrein.

Een goede indicatie van het succes van bepaalde plantensoorten zijn **eerdere succesvolle toepassingen op gelijkaardige sites**. Fytoremediatie is relatief nieuw voor Vlaanderen, maar kent toch sedert begin jaren 70 al verschillende field-cases in de US en andere landen. De verschillende databanken zoals omschreven in 3.1.2 kunnen de zoektocht naar eerdere gelijkaardige toepassingen vergemakkelijken. Bovendien werd van de voor Vlaanderen interessante planten een lijst opgesteld met een overzicht van eerdere succesvolle toepassingen (**Bijlage 4**).

Onderstaande beslissingsboom voor de plantenkeuze (**Figuur 15**) kan tijdens deze zoektocht in databanken en plantenlijsten helpen om de meest geschikte soorten te selecteren die mogelijk toepasbaar zijn.



**Figuur 15: Beslissingsboom voor planten.**

Het doorlopen van de plantbeslissingsboom (**Figuur 15**) veronderstelt dat de aanwezige planten op het terrein geïdentificeerd werden en begint met:

- (1) soorten gevonden in de fyto-technologie-databank en momenteel aanwezig op het terrein;
- (2) soorten gevonden in de [fyto-technologie-databank](#) en **Bijlage 4**, en bruikbaar in de omgeving, maar momenteel niet aanwezig op het terrein;
- (3) hybriden of soorten gerelateerd aan een soort die geïdentificeerd als mogelijke kandidaat onder punt 1 of 2;
- (4) soorten niet gevonden in de databank of Bijlage 4 maar momenteel aanwezig op het terrein of de omgeving.

De bruikbaarheid van een soort, zoals besproken in de eerste 3 categorieën, is gebaseerd op basis van de mogelijkheid van de soort om te groeien en te overleven rekening houdend met de terrein specifieke omstandigheden (bodemkenmerken, verontreiniging, klimaat, ...).

Eens geweten is welke plantensoorten het best overleven op de verontreinigde site, zijn er een aantal bijkomende factoren die in acht moeten genomen worden.

Naast de aard van de verontreinigende stoffen is ook de diepte van de verontreiniging van belang. Zo zal bij een diepere verontreiniging het gebruik



van diep wortelende planten noodzakelijk zijn om voldoende saneringseffect te bekomen. Het is uiteraard steeds mogelijk om fyto-remediatie te combineren met andere technieken om voldoende invloed op de diepere verontreiniging uit te oefenen. Zo kan bijvoorbeeld grondwater worden opgepompt om daarna in de wortelzone te infiltreren.

Verder dient ook de nodige aandacht besteed te worden aan de herkomst van de soorten. Waar mogelijk dient gekozen te worden voor inheemse soorten omdat ze goed zijn aangepast aan de lokale bodem- en klimaatomstandigheden en hun levenscyclus nauw verbonden is met die van heel wat inheemse organismen. Studies hebben aangetoond dat autochtone planten zelfs betere associaties met lokale afbrekende bodem micro-organismen vormen dan allochtone planten (Bell *et al.*, 2014). Het kiezen voor inheemse soorten vergroot ook de ecologische waarde van de beplanting. Informatie over **inheemse plantensoorten** en andere kenmerken kunnen teruggevonden worden in het [vademecum van Agentschap Natuur en Bos](#).

De uitkomst van deze beslissingsboom geeft enkel een lijst van soorten weer die mogelijk toepasbaar zijn, het leidt alleszins niet tot een finale plantenselectie voor het terrein. Hiervoor is in de meeste gevallen een grondige haalbaarheidsanalyse aan de hand van labo-, serre- en eventueel veldexperimenten noodzakelijk (zie paragraaf 3.4).

Meer specifiek voor Vlaanderen kan gesteld worden dat voor fyto-remediatie van Cd, Zn, Pb, BTEX, diesel, benzine, lichte stookolie en kerosine voldoende kennis en ervaring is opgedaan om na een grondige terrein karakterisatie de verdere keuze van de plant te baseren op fyto-toxiciteitstesten (aan de hand van serre-experimenten) en reeds voorhanden fyto-remediatie-cases (zie 2.3.1). Voor minerale olie is een EPK/VPK-analyse of oliekarakterisatie belangrijk om de effectieve samenstelling te kunnen inschatten (zie paragraaf 2.3 en uitgevoerd tijdens BBO). Op basis hiervan kan nagegaan worden of er reeds fyto-remediatie cases of serre-experimenten voorhanden zijn (zie 2.3.1), in functie daarvan zijn al dan niet bijkomende experimenten noodzakelijk om een optimale plantenkeuze te garanderen. Voor de andere dan hierboven vermelde verontreinigingen zijn bijkomende experimenten noodzakelijk. Deze relatief goedkope experimenten kunnen naast het bewerkstelligen van een optimale plantenkeuze, ook de efficiëntie van de site-specifieke sanering garanderen.

### 3.4 Grondige evaluatie haalbaarheid

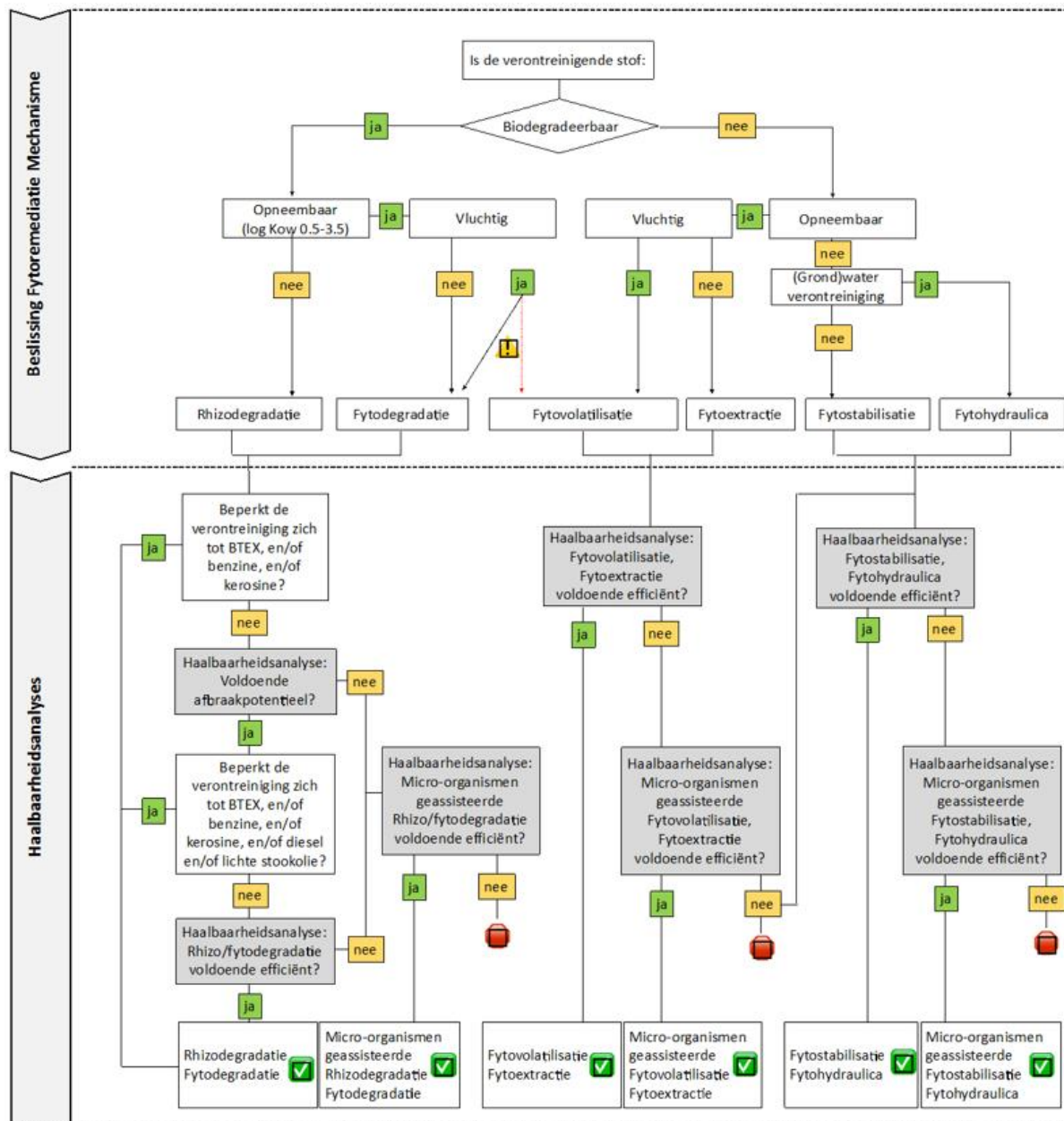
Afhankelijk van het geselecteerde fyto-remediatie mechanisme, alsook het type verontreiniging en de aanwezige ervaring met desbetreffende fyto-remediatie toepassingen, zullen bepaalde haalbaarheidsanalyses al dan niet uitgevoerd moeten worden. Er zijn immers zeer veel factoren die het succes van

fyto-remediatie op een bepaalde site bepalen waaronder de concentratie van de verontreinigende stof, de beschikbaarheid van nutriënten, de temperatuur, neerslag, esthetische overwegingen en de aanwezigheid van groei-limiterende factoren (verontreinigingen, pH, ...). De gewenste graad van sanering en snelheid moeten ook altijd in beschouwing worden genomen. Al deze elementen worden best op voorhand geëvalueerd vooraleer veel geld en tijd uit te besteden aan een grootschalige sanering.

Om te weten welke analyses moeten uitgevoerd worden, is het voldoende om stap voor stap de beslissingsboom voor haalbaarheidsanalyses te volgen (figuur 16) (3.4.1). Deze beslissingsboom geeft ook duidelijk aan in welke gevallen het nodig is om over te gaan van een klassieke fyto-remediatie naar een micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie. Door het toevoegen van microbiële inocula kunnen bepaalde micro-organismen in de bodem, rizosfeer en/of in de plant aangerijkt worden. Dit kan gaan van bacteriën die zorgen voor een verbeterde plantengroei, of een hogere opname van de contaminant, tot bacteriën die een volledige afbraak van de organische contaminant kunnen verwezenlijken. In 3.4.2 wordt een overzicht gegeven welke labo- en serre experimenten dienen uitgevoerd te worden voor de verschillende haalbaarheidsanalyses. Het gaat hier om **kleinschalige testen** die meestal niet al te veel tijd in beslag nemen en moeten plaatsvinden in de aanloop van het bodemsaneringsproject. Het type van de verontreiniging (metalen vs organische verontreiniging) alsook het gekozen remediatie-mechanisme (fytostabilisatie, fytoextractie, fytodegradatie, rizodegradatie, fytohydraulica, fytovolatilisatie) bepalen welke testen dienen uitgevoerd te worden. In **Tabel 10** wordt een overzicht gegeven van de experimenten die nodig zijn samen met een inschatting van de tijdsduur en de kostprijs die hieraan verbonden is. Tot slot is het in sommige gevallen alsnog aan te raden om alvorens naar full-scale toepassingen in het veld over te gaan, eerst een bijkomende pilootproef op het terrein uit te voeren (3.4.3).

### 3.4.1 Haalbaarheidsanalyses

Onderstaande beslissingsboom (**Figuur 16**) kan gebruikt worden als handige tool om na te gaan welke haalbaarheidsanalyses nodig zijn voor specifieke fyto-remediatie cases. De labo-experimenten die nodig zijn voor deze haalbaarheidsanalyse(s) worden beschreven in 3.4.2.



Figuur 16: Beslissingsboom haalbaarheidsanalyses.

### 3.4.1.1 Rizodegradatie en Fytodegradatie

Voor rizodegradatie en fytodegradatie kan op basis van uitgebreide ervaring voor BTEX, benzine en kerosine verontreinigingen onmiddellijk overgegaan worden naar een effectieve toepassing op het terrein. Voor diesel en lichte stookolie verontreinigingen kan fytoremediatie toegepast worden nadat is aangetoond dat er voldoende afbraakpotentieel aanwezig is. Om de effectieve samenstelling van de minerale olie (type kerosine, benzine, diesel etc.) en dus ook de afbreekbaarheid goed te kunnen inschatten, maakt men hiervoor best gebruik van de EPK/VPK-analyse of oliekaracterisatie uitgevoerd tijdens het BBO (zie paragraaf 2.3). Voor de andere verontreinigingen moet een voldoende efficiëntie van het fytoremediatie proces aangetoond worden in een uitgebreide

haalbaarheidsanalyse. Indien de efficiëntie van een “klassieke” fyto-remediatie onvoldoende is, kan overgegaan worden op micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie. Ook hier moet eerst de efficiëntie aangetoond worden met een uitgebreide haalbaarheidsanalyse alvorens de technologie toe te passen op het terrein.

***Haalbaarheidsanalyse:  
Voldoende afbraakpotentieel?***

Bij fyto-degradatie en/of rizodegradatie kan in sommige gevallen de afbraak die van nature optreedt onvoldoende zijn, hetgeen kan leiden tot een minder efficiënte sanering en/of volatiliserende van de verontreiniging via de blaadjes naar de lucht. Indien minder dan  $10^5$  afbrekende micro-organismen per gram bodem of per ml grondwater aanwezig zijn, zal de afbraak van de verontreinigingen te traag verlopen. Deze situatie kan zich voordoen in nutriëntarme bodems of in bodems die toxische of inhiberende stoffen bevatten. Bij onvoldoende afbraak is het mogelijk deze afbraak te stimuleren door te zorgen voor een aanrijking van de afbrekende micro-organismen. Naast stalen van de bodem in de onmiddellijke omgeving rondom de plantenwortels, kunnen ook stalen gebruikt worden van de planten zelf, meer bepaald wortel en scheut. Bacteriën die in de plant leven en de capaciteit hebben om de contaminant af te breken, kunnen nadien in de plant aangerijkt worden en zorgen dat er ook afbraak optreedt tijdens het transport van de contaminanten naar de blaadjes. De combinatie van afbraak in de rizosfeer en binnenin de plant kan ervoor zorgen dat er voldoende tijd is om de afbraak volledig te laten verlopen alvorens de contaminanten de blaadjes bereiken.

***Haalbaarheidsanalyse:  
Rizo/Fyto-degradatie voldoende efficiënt?***

Bij rizo/fyto-degradatie is het de bedoeling dat de verontreiniging verwijderd wordt door afbraak in de rizosfeer en/of binnenin de plant. Het is belangrijk dat de verontreiniging volledig en voldoende snel wordt afgebroken. Indien dit niet het geval is, zal bij rizodegradatie de verwijdering van de verontreiniging te traag verlopen en bij fyto-degradatie het gevaar bestaan dat een deel van de verontreiniging en/of afbraakproducten gevolatiliseerd wordt via de blaadjes. Bovendien is het risico op fyto-toxiciteit bij onvoldoende of onvolledige afbraak groter. Fyto-toxiciteit gaat gepaard met verminderde plantengroei, hetgeen op zijn beurt kan leiden tot een kleiner wortelstelsel en dus een kleiner bereik van de verontreiniging, en een verlaagde pompcapaciteit.

Rizo/fyto-degradatie wordt bijgevolg als voldoende efficiënt beschouwd wanneer het merendeel van de verontreiniging verwijderd wordt in een relatief korte tijdspanne (serre experiment), en dit zonder dat er fyto-volatiliserende optreedt van de verontreiniging en/of zijn afbraakproducten.

***Haalbaarheidsanalyse:***

***Micro-organismen geassisteerde rizo/fitodegradatie voldoende efficiënt?***

Wanneer blijkt dat er geen afbraakpotentieel van nature aanwezig is of dat de afbraak die optreedt bij “klassieke” rizo/fitodegradatie onvoldoende efficiënt is, kan de afbraak gestimuleerd worden door toevoeging van de geschikte micro-organismen. Dit kan met micro-organismen die zich vestigen in de rizosfeer en/of binnenin de plant (endofyten). Wanneer de verontreiniging gemakkelijk wordt opgenomen, hebben endofyten het voordeel dat de contacttijd tussen de verontreiniging en de afbrekende micro-organismen langer is binnenin de plant. Het kan bv. uren tot enkele dagen duren (afhankelijk van de grootte van de plant) vooraleer de verontreiniging vertrekkend van in de wortels de blaadjes bereikt.

De efficiëntie van micro-organismen geassisteerde rizo/fitodegradatie wordt op dezelfde manier geëvalueerd als voor de “klassieke” rizo/fitodegradatie.

### **3.4.1.2 Fytovolatilisatie en Fytoextractie**

Voor fytovolatilisatie en fytoextractie moet voor alle verontreinigingen een voldoende hoge fyto-remediatie-efficiëntie worden aangetoond vooraleer toepassingen op het terrein kunnen worden gestart. In het geval de “klassieke” mechanismen onvoldoende efficiënt blijken te zijn, kan onderzocht worden of met micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie de verwachtingen wel kunnen worden ingelost. Het toevoegen van mobiliserende stoffen (bv. chelatoren, surfactanten...) om de beschikbaarheid van (an)organische contaminanten te verhogen om zo een verbeterde opname door de plant te bewerkstelligen, wordt eerder afgeraden, tenzij kan worden gegarandeerd dat er geen risico is op uitloging naar het grondwater. Om dit in te schatten dienen tijdens het experiment stalen worden genomen van het uitloogwater om na te gaan of de contaminanten niet sneller uitlogen dan dat ze worden opgenomen door de plant.

***Haalbaarheidsanalyse:***

***Fytovolatilisatie of fytoextractie voldoende efficiënt?***

Bij fytovolatilisatie en fytoextractie is het de bedoeling dat de verontreiniging door de plant wordt opgenomen, getransloceerd naar de bovengrondse plantendelen en indien vluchtig (voor fytovolatilisatie), via de blaadjes verdampt wordt naar de atmosfeer. Voor een goede opname door de plant moet de verontreiniging beschikbaar zijn voor de plant. Dit brengt met zich mee dat voldoende aandacht besteed moet worden aan het risico op uitloging naar het grondwater. Een ander groot risico bij fytovolatilisatie en fytoextractie is een beperkte plantengroei omwille van fytoxiciteit. Hierdoor zal het wortelstelsel niet optimaal ontwikkelen en zal de opname van de verontreiniging beperkt zijn.

Fytovolatilisatie of fytoextractie kan als voldoende efficiënt beschouwd worden indien het merendeel van de verontreiniging kan worden opgenomen, getransloceerd naar de bovengrondse delen en, in geval van fytoextractie, vervluchtigd via de blaadjes in een relatief korte tijdsspanne, en dit zonder dat de verontreiniging uitloopt naar het grondwater.

***Haalbaarheidsanalyse:***

***Micro-organismen geassisteerde fytoextractie of fytoextractie voldoende efficiënt?***

Indien de efficiëntie van “klassieke” fytoextractie of fytoextractie onvoldoende is, kan getracht worden om de beschikbaarheid, opname en translocatie van de verontreiniging te stimuleren door toevoeging van micro-organismen met de geschikte eigenschappen. Micro-organismen die de plantengroei stimuleren kunnen bv. fytotoxiciteit tegengaan en zorgen voor een uitgebreid wortelstelsel. Er zijn ook micro-organismen die mobiliserende stoffen produceren zodat de verontreiniging als het ware wordt losgemaakt. Het grote voordeel is dat deze mobilisatie in evenwicht gebeurt met de activiteit van de plant: actievere planten zorgen voor meer wortelstelsel, meer actieve micro-organismen, meer mobilisatie van de verontreiniging. Of met andere woorden, hoe actiever de plant hoe meer mobilisatie van de verontreiniging, maar tegelijkertijd ook meer opname door de plant. Het gevolg is dat de verontreiniging die vrijkomt nagenoeg onmiddellijk kan opgenomen worden door de plant waardoor het risico tot uitloping naar het grondwater vermeden wordt.

De efficiëntie van micro-organismen geassisteerde fytoextractie of fytoextractie wordt op dezelfde manier geëvalueerd als voor de “klassieke” fytoextractie of fytoextractie. Indien ook micro-organismen geassisteerde fytoextractie of fytoextractie onvoldoende efficiënt blijkt te zijn door onvoldoende opname van de verontreiniging, kan overwogen worden om alsnog fytostabilisatie of fytohydraulica toe te passen. Het is dan wel belangrijk om opnieuw de beslissingsboom voor de plantenkeuze te doorlopen om in functie van de nieuwe doelstelling, het stabiliseren van de verontreiniging, de optimale plant te kiezen.

### **3.4.1.3 Fytostabilisatie en Fytohydraulica**

Ook voor fytostabilisatie en fytohydraulica is voor alle verontreinigingen bijkomend onderzoek naar haalbaarheid nodig. Aangezien het voor beide mechanismen de bedoeling is om verspreiding van de verontreiniging te voorkomen, kan het nuttig zijn om bijkomend te werken met stabiliserende stoffen. Zo kunnen bv. kalk, fosfaten, mineraaloxides en organische stoffen getest worden voor hun potentieel om de anorganische verontreiniging vast te leggen en zo de opname alsook de fytotoxiciteit te beperken. Dit wordt zeker aangeraden indien op het terrein tekenen van fytotoxiciteit worden opgemerkt bij de van nature aanwezige vegetatie. Aangezien dit buiten de focus valt van deze

code goede praktijk fyto-remediatie en omwille van de enorme verscheidenheid aan types van bodemadditieven, wordt voor meer informatie verwezen naar de review van Wiszniewska *et al.* (2016) en Vangronsveld *et al.* (2009).

In geval de “klassieke” fyto-remediatie mechanismen alsnog onvoldoende efficiënt blijken te zijn, kan micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie verdere verbetering opleveren.

***Haalbaarheidsanalyse:***

***Fytostabilisatie of fytohydraulica voldoende efficiënt?***

De doelstelling van fyto-remediatie of fytohydraulica is het beperken van het risico op verdere verspreiding van de verontreiniging. Om verspreiding via de wind te beperken, is het van groot belang dat er een mooi dicht begroeid vegetatiedek ontstaat, hetgeen enkel mogelijk is als fyto-toxiciteit beperkt blijft. Om verspreiding via het grondwater te voorkomen is het bij een bodemverontreiniging van groot belang dat de verontreiniging voldoende geadsorbeerd is aan het bodemcomplex en bij grondwaterverontreiniging is een goede pompcapaciteit cruciaal. Verder moet ervoor gezorgd worden dat de verontreiniging niet terecht komt in eetbare delen van de plant om verspreiding via de voedselketen te voorkomen.

Men spreekt dus van een voldoende efficiënte fyto-remediatie of fytohydraulica indien kan worden gegarandeerd dat de verontreiniging niet verder verspreid wordt via de wind, het grondwater of de voedselketen.

***Haalbaarheidsanalyse:***

***Micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie of fytohydraulica voldoende efficiënt?***

Het toevoegen van micro-organismen die in staat zijn om (i) de plantengroei te bevorderen (om zo een gesloten vegetatiedek te garanderen, of verhoogde pompcapaciteit te realiseren), (ii) immobiliserende stoffen te produceren waardoor de verontreiniging sterker gesorbeerd wordt aan het bodemcomplex (om zowel uitloging naar het grondwater als de opname te beperken); kan een mogelijke oplossing bieden wanneer de klassieke fyto-remediatie en fytohydraulica mechanismen onvoldoende efficiënt blijken te zijn.

De efficiëntie van micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie en fytohydraulica wordt op dezelfde manier geëvalueerd als voor de “klassieke” fyto-remediatie en fytohydraulica.

## 3.4.2 Labo- en serre experimenten

### 3.4.2.1 Aanwezigheid afbraakpotentieel op het terrein

Van de verschillende stalen kunnen volgende microbiële parameters worden bepaald: aantal van de bacteriën door middel van uitplaten op selectieve media, fluorescente kleuring en tellen van de bacteriën in een bodemextract onder de microscoop, kwantitatieve PCR en DNA-fingerprinting. Ook kan specifiek op zoek gegaan worden naar de aanwezigheid van indicator soorten voor afbraak (vb. *Halomonas* in het geval van gechloreerde verontreinigingen, *Pseudomonas*, *Acinetobacter* en *Burkholderia* voor olie, *Pseudomonas* en *Enterobacteriaceae* voor TNT, *Methylobacterium* voor methanol. De abundantie en transcriptie van specifieke afbraakgenen kan worden bepaald met qPCR voor de mono-oxygenases, dioxygenases, phenol hydroxylase, naftaleen dioxygenase. Een totaaloverzicht in het aanwezige microbiële afbraakpotentieel kan worden verkregen door een genetische analyse op niveau van het totale DNA ('next generation sequencing'). Dit kan belangrijk zijn voor nieuwe verontreinigingen.

### 3.4.2.2 Basis pot-experiment onder serre condities

Via een eenvoudig pot-experiment (**Figuur 17**) kunnen 3 tot 5 interessante planten soorten (of klonen, cultivars) met elkaar vergeleken worden voor verschillende parameters. Hiervoor worden de geselecteerde planten 6 tot 15 weken gegroeid onder serrecondities. Ook potten met enkel grond en dus zonder planten worden meegenomen ter controle. In de mate van het mogelijke zouden voor het volledige experiment **grond en/of water van de site** moeten worden gebruikt. Experimenten zouden ook de vochtigheidsgehalten en temperatuur van de grond op de site zo goed mogelijk moeten benaderen omdat deze factoren ook een invloed hebben op de snelheid van sanering. Verder kan ook gewerkt worden met toevoeging van **bodemadditieven en/of micro-organismen**. In dit geval is er een uitgebreider pot-experiment nodig. Voor de keuze en toepassing van bodemadditieven wordt verwezen naar de review van Wiszniewska *et al.* (2016) en Vangronsveld *et al.* (2009). Voor het kiezen van de juiste micro-organismen kan enerzijds nagegaan worden welke micro-organismen reeds voor handen zijn. Zo zijn er micro-organismen die gekend zijn voor hun groeibevorderend effect, of zijn er reeds bacteriestammen ter beschikking die kunnen zorgen voor de afbraak van bepaalde organische contaminanten. Anderzijds kan ook uitgegaan worden van de natuurlijke situatie en op basis van de **natuurlijk aanwezige afbrekende micro-organismen** getracht worden deze stammen **aan te rijken door inoculatie**. Het toevoegen van de bacteriën kan op verschillende manieren gebeuren, afhankelijk van de plantensoort. Indien gewerkt wordt met zaden, kan de inoculatie plaatsvinden bij de kieming van de zaden, terwijl stekken van wilgen/populieren best geïnoculeerd worden tijdens de wortelontwikkeling.



De parameters die geanalyseerd kunnen worden op basis van dit (al dan niet uitgebreid) potexperiment gaan van fytotoxiciteit, metaalopname en/of sorptiecapaciteit, opname en/of afbraak van de organische contaminant, tot volatilisatie. In **Tabel 10** wordt een matrix weergegeven waarin men de parameters vindt die getest kunnen worden voor het gekozen fytoremediatie mechanisme. Bovendien wordt hier ook een indicatie gegeven naar duurtijd en kostprijs.



*Figuur 17: Potexperimenten. Foto's: Nele Weyens, Universiteit Hasselt.*

### **3.4.2.3 Fytotoxiciteit**

Om een inschatting te maken van de fytotoxiciteit die de plant ondervindt, worden groei en ontwikkeling van de planten opgevolgd tijdens het experiment. De planten kunnen beoordeeld worden voor kiemkracht, wortelgewicht en densiteit, bovengrondse biomassa, groeisnelheid en gezondheid. Gezondheid kan visueel worden beoordeeld (toestand van plant, verkleurde bladeren) of op cellulair niveau bijvoorbeeld door de activiteiten van anti-oxidatieve enzymen te meten.

### **3.4.2.4 Metaalopname en/of sorptie capaciteit**

In het geval van fytoextractie wil men bekomen dat de planten zoveel mogelijk metalen opnemen en transloceren naar de oogstbare plantdelen. In het andere geval, fytostabilisatie, wil men vastzetting of sorptie van de metalen in de bodem of in de wortels bereiken.

Bij de oogst van de planten aan het einde van het potexperiment kunnen stalen van onder- en bovengronds plantenmateriaal alsook van de bodem verzameld worden. In de bodemstalen worden totale en plant beschikbare metaalgehalten geanalyseerd. Via totale zuur-digestie en ICP-OES-analyse kunnen metaalgehalten worden bepaald in de weefsels.

Aan de hand van deze gegevens kan een vergelijking gemaakt worden tussen de verschillende geteste plantensoorten wat betreft de metaalopname en de plantenorganen waar de hoogste concentraties aan metalen geaccumuleerd worden.

### 3.4.2.5 Opname en/of afbraak van de organische contaminant

Bij toepassing van fytodegradatie en/of rizodegradatie zal de contaminant in de rizosfeer en binnenin de plant afgebroken worden. Om een inschatting te maken van hoe snel deze afbraak verloopt en welke tussenproducten eventueel gevormd worden, kunnen volgende analyses uitgevoerd worden.

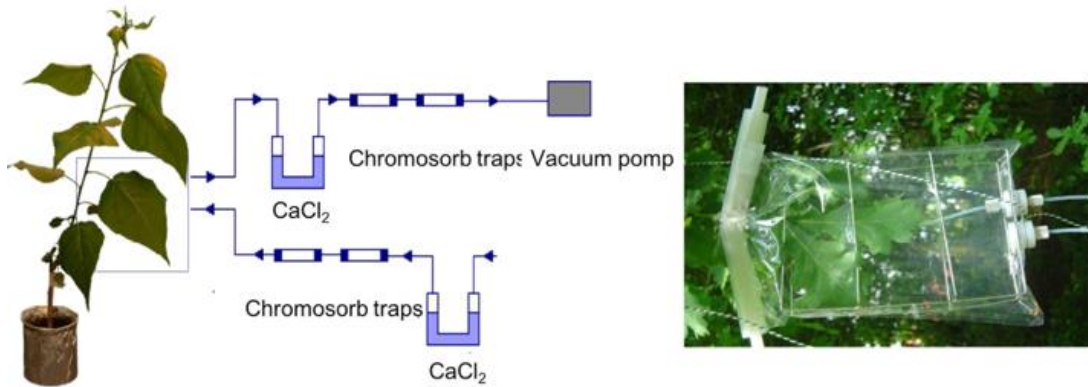
Aan het einde van het potexperiment, bij de oogst, worden stalen genomen van de bodem, de bodem in de directe omgeving van de wortels, de wortels en de scheut. Bovendien is het voor deze analyse zeer belangrijk ook bodemstalen mee te analyseren van de potten zonder planten. De bodem zelf kan ook afbrekende micro-organismen bevatten waardoor natuurlijke attenuatie optreedt. Door de vergelijking te maken kan het aandeel van de afbraak dat te wijten is aan fyto- en/of rizodegradatie ingeschat worden.

De stalen zullen onderworpen worden aan een extractieprocedure gevolgd door een chemische analyse om de concentratie te bepalen op maat van de betreffende contaminant.

Aan de hand van de resultaten kan ingeschat worden welke hoeveelheid van de organische contaminant kon afgebroken worden tijdens het experiment. Hierbij dient echter opgemerkt te worden dat het voor de vluchtige organische contaminanten nodig is rekening te houden met eventuele volatilisatie via de bladeren (paragraaf 3.4.1.4) alvorens deze berekening te maken. Op basis van de concentraties organische contaminanten die worden opgenomen door de plant kan beslist worden welke toepassingen haalbaar zijn voor de geoogste biomassa.

### 3.4.2.6 Volatilisatie

Als de vervluchtiging van verontreinigende stoffen of metabolieten de doelstelling of een mogelijke bezorgdheid is, dan kunnen tijdens het potexperiment analyses in de serre uitgevoerd worden die dit testen. Om de hoeveelheid contaminant die via de blaadjes geëvapotranspireerd wordt te bepalen, werd aan de UHasselt onderstaand meetsysteem ontwikkeld (**Figuur 18**).



**Figuur 18: Evapotranspiratie meetsysteem. Foto: Nele Weyens, Universiteit Hasselt.**

Tijdens de meting wordt een luchtdicht afgesloten teflon zak over een twijg gemonteerd, zodat er geen gasuitwisseling met de buitenlucht mogelijk is. Op 1 van de 2 teflon poorten die op deze zak bevestigd zijn, wordt een vacuümpomp aangesloten waardoor een luchtinstroom ontstaat. Omdat deze luchtinstroom volledig contaminant-vrij zou zijn, worden de contaminanten in kwestie geadsorbeerd op Chromosorb traps alvorens de lucht de teflon zak binnenkomt. Bevat de lucht die de teflon zak via de andere teflon poort verlaat wel organische contaminanten? Dan zijn deze afkomstig van evapotranspiratie. De uitgaande luchtstroom wordt opnieuw geadsorbeerd op Chromosorb traps.

De contaminanten gesorbeerd op de Chromosorb traps worden gekwantificeerd via thermische desorptie, gaschromatografie – massa spectrometrie.

De geëvapotranspireerde hoeveelheden van contaminanten worden vervolgens berekend per uur en per  $\text{cm}^2$  blad. Op deze manier kan berekend worden welke hoeveelheid contaminant een gemiddelde plant per dag van de bodem/het grondwater naar de lucht volatiliseert.

### 3.4.3 Pilootproef

Naast de hierboven beschreven relatief korte-termijn experimenten, kunnen in sommige gevallen ook langer-lopende experimenten op het terrein aangewezen zijn. Dit is van toepassing wanneer het gaat om relatief nieuwe contaminanten waarbij nog weinig of geen ervaring is opgedaan met fytoremediatie.

In langdurige experimenten onder veldcondities kunnen planten voldoende wortels en biomassa (en mogelijke enzymen) vormen. De snelheid en efficiëntie waarmee een plant een verontreinigende stof opneemt varieert immers met de leeftijd (andere enzymen, groeisnelheid etc..) en de metabole toestand van de plant (seizoensgebonden).

Bovendien kan toevoeging van microbiële inocula ook getest worden onder veldcondities. Hiervoor kan gewerkt worden met planten die nog voor de aanplant geïnoculeerd werden. Maar er dient onderzocht te worden of de microbiële inocula stabiel aanwezig blijven in de tijd of dat hiervoor bijkomende

inoculaties noodzakelijk zijn. Zo'n bijkomende inoculaties kunnen gebeuren via een drainagebuis die bij de aanplant in het wortelstelsel wordt voorzien.

**Tabel 10: Matrix die samenvat welke labo-en serre experimenten moeten uitgevoerd worden voor welke haalbaarheidsanalyses, en een inschatting geeft betreft kostprijs en duurtijd.**

		LABO-EN SERRE EXPERIMENTEN (3.4.2)						
		Aanwezigheid afbraakpotentieel op het terrein	Basis pot-experiment onder serrecondities *	Uitgebreid basis pot-experiment onder serrecondities*	Fytotoxiciteit	Metaalopname en/of sorptie capaciteit	Dynamie en/of afbraak van organische verontreiniging	Volatilisatie
MECHANISMEN	HAALBAARHEIDSANALYSES (3.4.1)							
Rhizo/Fytodegradatie	Voldoende Afbraakpotentieel?	x						
	Rhizo/Fytodegradatie voldoende efficiënt?		x		x		x	x
	Micro-organismen geassisteerde rhizo/fytodegradatie voldoende efficiënt?			x	x		x	x
Fytoextractie	Fytoextractie voldoende efficiënt?		x		x	x		
	Micro-organismen geassisteerde fytoextractie voldoende efficiënt?			x	x	x		
Fytovolatilisatie	Fytovolatilisatie voldoende efficiënt?		x		x			x
	Micro-organismen geassisteerde fytoextractie voldoende efficiënt?			x	x			x
Fytostabilisatie	Fytostabilisatie voldoende efficiënt?		x	(x)	x	x	x	x
	Micro-organismen geassisteerde fytoextractie voldoende efficiënt?			x	x	x	x	x
Fytohydraulica	Fytohydraulica voldoende efficiënt?		x	(x)	x	x	x	x
	Micro-organismen geassisteerde fytohydraulica voldoende efficiënt?			x	x	x	x	x
	<b>Duurtijd</b>	10-14 dagen	6-15 weken	6-15 weken	2-14 dagen	5-7 dagen	10-14 dagen	0 dagen
	<b>Indicatieve kostprijs (€)</b>	2000-6000	2000-6000	3000-7000	500-3500	1500-2500	2500-4000	2000-4000

\* Het "(uitgebreid) basis potexperiment onder serre condities" is het basis experiment waarbij planten gegroeid worden onder serrecondities die nadien gebruikt worden voor staalnames voor de verdere analyses. Al deze verdere analyses kunnen op eenzelfde basis potexperiment gemeten worden waardoor de kostprijs/duurtijd van dit experiment slecht eenmalig moet beschouwd worden.

## 4 Procedure voor ontwerp, inrichting, beheer, opvolging en monitoring

Dit hoofdstuk omvat de overwegingen die gemaakt moeten worden voor het ontwerp en de implementatie van fyto-remediatie-technieken. Het bevat informatie die een erkend bodemsaneringsdeskundige kan helpen om een bepaalde fyto-technologie te kiezen gebaseerd op de condities die voorkomen op de site en om deze technologie ook in de praktijk te brengen. De belangrijkste vragen die opkomen zijn: wat moet ik doen om fyto-remediatie te implementeren en hoe kan ik erop toezien dat het systeem efficiënt is?

Dit hoofdstuk bespreekt het vervolg van de proces flowchart zoals voorgesteld in hoofdstuk 3, om tot full-scale implementatie van fyto-remediatie te komen. Meer bepaald:

- 1) Opzet full-scale fyto-remediatie systeem
  - a. Ontwerp en inrichting van het systeem
  - b. Opvolging en procesevaluatie
  - c. Monitoring en prestatie evaluatie
  - d. Algemeen wetgevingskader
- 2) Saneringsdoelstellingen bereikt
  - a. Voer kwalitatieve en kwantitatieve metingen uit
  - b. Meet criteria voor succes

Vooraf deze laatste zijn van doorslaggevend belang om de nodige kwaliteit te kunnen garanderen bij enerzijds de klant (sanering plichtige) en anderzijds de toezichthoudende overheid (OVAM).

### 4.1 Ontwerp

In hoofdstuk 3 werd reeds geëvalueerd of fyto-remediatie haalbaar is als een mogelijk saneringsalternatief (schematisch weergegeven in **Figuur 12**). Dit proces vormt tevens de basis van het ontwerp van het fyto-remediatie-proces.

Het uiteindelijke ontwerp van het fyto-remediatie-project hangt sterk af van de condities van de site zoals bodemtype, concentraties van de verontreinigende stof, uitgestrektheid en diepte van de verontreiniging. Een grondige analyse van deze variabelen helpt bij het selecteren van de plantensoort, fyto-remediatiemechanisme, plantschema, onderhoud, opvolging en monitoring zoals ook beschreven werd in hoofdstuk 3.

Specifieke aspecten zoals biobeschikbaarheid, fytotoxiciteit, hydrologische controle en concentraties van verontreinigende stoffen kunnen niet over het hoofd worden gezien bij de inrichting en uitvoering van saneringssystemen.

In volgende paragrafen worden de ontwerp-specifieke criteria besproken of kort samengevat indien deze reeds aan bod kwamen in hoofdstuk 3.

#### 4.1.1 Fytoremediatie-specifieke terrein karakterisatie

Bij het ontwerp is het uitvoeren van een grondige terreinstudie noodzakelijk.

In het ontwerp dient een omschrijving gegeven te worden van de voornaamste fytoremediatie-specifieke parameters zoals opgenomen in de haalbaarheidsscreening in paragraaf **3.1.1 Fyto-specifieke terrein karakterisatie** en dient aangegeven te worden hoe hiermee rekening wordt gehouden in het ontwerp.

#### 4.1.2 Verontreinigd medium

Bij het ontwerp wordt een omschrijving en verantwoording gegeven van het medium (grond/sediment/grondwater) en de daaraan gekoppelde criteria:

- de diepte en het volume van de verontreinigingen
- de bodemkenmerken zoals textuur, watergehalte, nutriëntengehalte, pH en doordringbaarheid, die bepalen of de verontreiniging al dan niet bereikbaar is voor de plant.
  - Heel wat verontreinigde terreinen bestaan uit aangevulde gronden die **weinig voedselrijk** zijn en vaak sterk verdicht zijn. In deze gevallen kan een voorafgaande bodembewerking nodig zijn om een succesvolle beplanting te realiseren. De noodzaak hiervan dient bij het ontwerp beschreven te worden.
  - De aanwezigheid van **hardere lagen**, bijvoorbeeld een kleilaag in een zandpakket of zandsteenbanken, kan de ontwikkeling van de wortels beïnvloeden. Deze harde lagen kunnen doorbroken worden door gebruik te maken van tree-wells of boomkokers zoals afgebeeld op **Figuur 11**. De noodzaak hiervan dient in het ontwerp geëvalueerd te worden en indien relevant verder uitgewerkt te worden.

##### 4.1.2.1 Verontreinigingsconcentraties

In paragraaf 3.1.1.2 werden de randvoorwaarden toegelicht. Deze randvoorwaarden dienen verder uitgewerkt te worden voor het site-specifiek ontwerp.

Het ontwerp dient afgestemd te worden op de verontreinigingsconcentraties en type verontreiniging:

- Welke zones komen in aanmerking?
- In welke zones zijn aanvullende actieve maatregelen nodig?

#### 4.1.2.2 Aanwezige vegetatie

In bepaalde gevallen komt er op het verontreinigde terrein of op een aanpalend terrein een **begroeiing (3.1.1.3 Aanwezige vegetatie)** voor.

In het ontwerp dient aangegeven te worden of op basis van de aanwezige vegetatie volgende aspecten afgeleid zijn en hoe hiermee rekening wordt gehouden in het ontwerp:

- de wortelontwikkeling, vastgesteld in een gegraven sleuf: indien beperkte wortelontwikkeling op het terrein wordt vastgesteld, dient bij het ontwerp extra aandacht besteed te worden aan plantenkeuze (zie 4.1.4) en plantafstand. Ook worteldiepte en –densiteit kunnen op het terrein vastgesteld worden.
- de aanwezige vegetatie op het terrein: in het ontwerp dient aangegeven te worden of de aanwezige vegetatie die tolerant is voor de verontreiniging, in aanmerking kan komen voor de sanering. Op basis van een literatuurstudie kan nagegaan worden welke soorten tolerant zijn voor de aanwezige verontreiniging en het gewenste effect kunnen hebben voor de afbraak, extractie of stabilisatie van de aanwezige verontreiniging.

#### 4.1.2.3 Externe factoren

In het ontwerp dient een omschrijving gegeven te worden van de voornaamste externe factoren en dient aangegeven te worden hoe hiermee rekening wordt gehouden in het ontwerp:

- Welke ruimte is beschikbaar en wat is het huidige en toekomstig gebruik van de locatie en aangrenzende percelen?
  - Omschrijving van verontreinigde zone, verspreidingsnelheid en daarvoor noodzakelijke ruimte
  - Het combineren van meerdere gebruiksfuncties kan een bijzondere meerwaarde opleveren voor het fytoremediatie-project. Daarom is het van belang om zicht te hebben op het huidige en toekomstige gebruik van het terrein alsook op het gebruik van de omliggende terreinen.
  - Indien er beheerplannen voor de omliggende terreinen bestaan, kan een specifieke inrichting van het te saneren terrein hieraan bijdragen, hetzij door een gelijkaardig beheer te voeren hetzij door het kiezen van een andere inrichting waardoor de ecologische waarde voor beide terreinen verhoogt.
  - Het betrekken van eigenaars, gebruikers en beheerders van omliggende terreinen kan het draagvlak voor fytoremediatie vergroten.



- Hoe wordt rekening gehouden met ondergrondse/bovengrondse obstructies?

### 4.1.3 Saneringsdoelstellingen

De saneringsdoelstellingen van een saneringsproject kunnen bestaan uit het beheersen of het verwijderen van de verontreinigingen, of een combinatie van beide.

Als het beperken van het verspreidingsrisico (fytostabilisatie of fytohydraulica) de primaire doelstelling is, moet de focus vooral liggen op het beperken van de bodeminfiltratie ten gevolge van neerslag (in geval van fytostabilisatie) of het optimaliseren van de opname van grondwater alsook de evapotranspiratie (in geval van fytohydraulica) door een juiste keuze van beplanting.

Toepassingen voor beheersing van verontreinigingen kunnen bestaan uit bodembedekking door beplanting alsook het toepassen van een hydraulische barrière (meestal stroomafwaarts van de verontreinigingspluim, maar kan ook stroomopwaarts om de grondwaterstromingssnelheid en daarmee de verspreidingsnelheid van de verontreiniging te verkleinen.). In geval van beheersing is de saneringsdoelstelling: het bekomen van een stabiele verontreinigingspluim.

Fytotechnologieën die instaan voor de verwijdering van de verontreiniging zijn o.a. fytoextractie en fytovolatilisatie. De afbraak van verontreinigingen kan worden gerealiseerd door middel van rizodegradatie en fytodegradatie. De toepassingen voor de verwijdering en/of de afbraak van de verontreinigingen zijn bijvoorbeeld fytodegradatie en rizodegradatie bodembedekkingen, beplantingen die instaan voor het saneren van de diepere bodem en grondwater, rietvelden en aanverwante systemen alsook oevers.

De toepassingen van fyto-technologieën die zowel beheersing als verwijdering van de verontreiniging combineren, kunnen bestaan uit bedekkingen die de bodem stabiliseren en de verontreinigingen fyto-remediëren, een beplanting als hydraulische barrière die terzelfdertijd in deze zone de bodem en het grondwater saneert, rietvelden en aanverwante systemen waaronder oeverbeplantingen die een verspreiding van de verontreiniging naar oppervlaktewater kunnen voorkomen. Een voorbeeld hiervan zijn oevers met wilgen, Riet (*Phragmites australis*), Lisdodde (*Typha*), Gele lis (*Iris pseudacorus*), ...

### 4.1.4 Identificatie fyto-remediatie-mechanisme

Fytotechnologieën horen tegenwoordig zeker thuis tussen alle andere saneringstechnieken. Om te helpen bij dit beslissingstraject werd dan ook een beslissingsboom opgesteld waarmee de juiste fyto-technologie kan geselecteerd worden (**Figuur 16**). Het gebruik van deze beslissingsboom, samen met de rest

van dit document, kunnen een hulp zijn voor toezichthouders, terreineigenaars, bodemsaneringsdeskundigen, bodemsaneerders en de rest van het publiek om te bepalen of fytotechnologieën toepasbaar kunnen zijn op een bepaald verontreinigd terrein. Niettemin, zal de beslissingsboom vooral gebruikt worden om technische beslissingen te nemen.

De uiteindelijk geselecteerde saneringstechniek is echter ook afhankelijk van andere factoren zoals onder meer:

- saneringsdoelstellingen;
- verwachte effecten;
- aanvaarding door stakeholders, terrein eigenaars, toezichthouder en publieke opinie;
- prijs.

Daarenboven kan het toevoegen van een fytotechnologie aan een bestaande sanering op een terrein ook vaak nuttig zijn. In dat geval moeten de effecten van beide systemen beschouwd worden.

#### **4.1.5 Plantenkeuze**

In hoofdstuk 3 (**3.3 Identificatie van meest geschikte plant(en)**) werd het belang van de juiste keuze van beplanting uitvoerig besproken. Hierbij is het van belang om de beslissingsboom (**Figuur 15**) ter hand te nemen.

De uitkomst van deze beslissingsboom heeft tijdens het haalbaarheidsonderzoek een lijst van soorten opgeleverd die mogelijk toepasbaar zijn voor fyto-remediatie. Mogelijks werd dit nog verfijnd aan de hand van een grondige haalbaarheidsanalyse (**3.4 Grondige evaluatie haalbaarheid**) zoals labo-, serre- en eventueel veldexperimenten. Het is nu de bedoeling om op basis van de eerste lijst een finale planteselectie voor het terrein samen te stellen.

De uiteindelijke keuze van planten, die opgenomen zullen worden in het ontwerp, zal gebaseerd worden op een aantal belangrijke parameters zoals onder andere aard van verontreiniging, risico op verspreiding van de verontreiniging, standplaats, ..., maar ook specifieke eisen van klanten.

##### **4.1.5.1 Verontreiniging**

De aanwezige vegetatie op het terrein kan bruikbare aanwijzingen opleveren betreffende mogelijke soorten die tolerant zijn aan de verontreiniging. Verder gaan we op basis van een literatuurstudie na welke soorten tolerant zijn voor de aanwezige verontreiniging en het gewenste effect kunnen hebben voor de afbraak, extractie of stabilisatie van de aanwezige verontreiniging.

Naast de aard van de verontreinigende stoffen is ook de diepte van de verontreiniging van belang. Zo zal bij een diepere verontreiniging het gebruik van diep wortelende planten noodzakelijk zijn om voldoende saneringseffect te hebben. Het is uiteraard steeds mogelijk om fytoextractie te combineren met andere technieken om voldoende invloed op de diepere verontreiniging uit te oefenen. Zo kan bijvoorbeeld grondwater worden opgepompt om daarna in de wortelzone te laten infiltreren.

#### **4.1.5.2 Risico op verspreiding van de verontreiniging**

Bij de plantkeuze dient rekening gehouden te worden met eventuele risico's op het verspreiden van de verontreiniging via de voedselketen. Zo kan het bijvoorbeeld aan te raden zijn om geen planten te gebruiken die voor mensen of dieren eetbare delen produceren wanneer de verontreiniging in deze plantendelen terechtkomt. Dit is bijvoorbeeld het geval bij het toepassen van fytoextractie op terreinen die publiek toegankelijk zijn. In geval van fytoextractie kan bladval een verspreidingsrisico vormen.

Het is nodig om de relevante risico's op verspreiding in kaart te brengen en desgevallend de monitoring daar ook op af te stemmen.

#### **4.1.5.3 Standplaats**

De standplaats heeft bepaalde kenmerken zoals het bodemtype (zand, leem, klei, ...), de pH, de voedselrijkdom, het vochtgehalte, de lichtinval, ... Planten die niet geschikt zijn voor een bepaalde standplaats zullen mogelijks niet goed groeien, vatbaar zijn voor ziektes en eerder last hebben van de fytoextractie als gevolg van de aanwezige bodem- en/of grondwaterverontreiniging.

#### **4.1.5.4 Aandacht voor gelaagdheid**

Bij het toepassen van het successiestadium bos, wordt bij voorkeur gestreefd naar een gelaagde opbouw bestaande uit een boomlaag, struiklaag, kruidlaag en strooisellaag.

#### **4.1.5.5 Habitus**

Bij de inrichting dient rekening gehouden te worden met het habitus van de plant die wordt bepaald door de afmetingen en de groeivorm alsook door de eigenschappen van de wortels. De diepte van de wortels is onder andere soortafhankelijk en zal mee bepalen of de verontreiniging al dan niet bereikt kan worden door de plant. Bomen met oppervlakkige wortels kunnen ook verhardingen omhoog drukken en worteluitlopers kunnen door de voegen van verhardingen gaan groeien.

#### 4.1.5.6 Herkomst

Wilde planten zijn plantensoorten die in natuurlijke of half natuurlijke vegetaties voorkomen en zich zonder menselijke tussenkomst kunnen handhaven. Cultuurvariëteiten zijn ontstaan door kweek en selectie van wilde soorten. Er dient rekening mee gehouden te worden dat cultivars niet altijd zijn opgewassen tegen de concurrentie van wilde soorten wat een intensief beheer voor gevolg kan hebben.

Waar mogelijk zijn inheemse soorten te verkiezen omdat ze goed zijn aangepast aan de lokale bodem- en klimaatomstandigheden en hun levenscyclus nauw verbonden is met die van heel wat inheemse organismen. Het kiezen voor inheemse soorten vergroot de ecologische waarde van de beplanting.

Het is duidelijk dat er omwille van de beperking van verspreidingsrisico's of omwille van specifieke kenmerken voor fyto-remediatie ook bewust kan worden gekozen voor niet-inheemse soorten. In dat geval is het belangrijk dat het gaat om niet-invasieve soorten of dat de nodige maatregelen worden genomen om de verspreiding van deze niet-inheemse invasieve soorten in het leefmilieu te voorkomen. Informatie over **inheemse plantensoorten** en andere kenmerken kunnen teruggevonden worden in het [vademecum van Agentschap Natuur en Bos](#).

Een groot voordeel van cultuurvariëteiten is dat het zaad en plantstokken vaak vlot beschikbaar zijn en dat ze goedkoper zijn dan de natuurlijke soorten. Verder, door het jarenlang selecteren, zijn deze cultuurvariëteiten soms minder onderhevig aan ziekten, klimaatcondities en andere factoren die de groei kunnen beperken. Verder zijn ook vaak snelgroeiende of meer biomassa producerende variëteiten beschikbaar die met andere specifieke karakteristieken kunnen geselecteerd worden. Door deze voordelen werden ondertussen al veel hybriden van populier en wilg extensief en succesvol aangewend in fyto-technologie-processen.

Daarnaast dienen wij vanzelfsprekend ook steeds te kiezen voor een **pesticiden vrij beheer** van groen en verhardingen (zie [hier](#) voor een *pesticidetoets*). Ook streven we waar mogelijk naar een **ecologische meerwaarde** en het combineren van meerdere functies voor het terrein.

#### 4.1.5.7 Andere eigenschappen

Er zijn nog tal van andere eigenschappen die bepalend kunnen zijn bij de plantkeuze. De gevoeligheid voor takbreuk bijvoorbeeld dient in rekening te worden gebracht bij een aanplant op een parking. Ook de gevoeligheid voor ziekten en plagen is belangrijk in functie van een geslaagde aanplant.

#### **4.1.6 Afstemmen van het ontwerp op de specifieke noden die naar voor komen uit de haalbaarheidsstudie**

Het planten van bomen is helaas geen garantie voor een doeltreffende bodem- en/of grondwatersanering. Controle en opvolging door de mens zijn noodzakelijk. Het slagen van fyto-remediatie is afhankelijk van het planttype, maar ook van de aanwezige micro-organismen en eventueel toepassing van additieven.

Als uit de al dan niet uitgebreide haalbaarheidsstudie blijkt dat optimalisatie van het fyto-remediatie-proces noodzakelijk is, bijvoorbeeld omwille van een risico op vervluchtiging of als blijkt uit de monitoring dat er aanzienlijke vervluchtiging optreedt dan dient het fyto-remediatie-proces te worden verbeterd, bijvoorbeeld door toevoeging van de gewenste micro-organismen. Optimalisatie kan ook nodig zijn om de efficiëntie van het fyto-remediatie-proces te vergroten om bijvoorbeeld de duur van de sanering te verkorten of een eventuele fytotoxiciteit te verkleinen. Bij het ontwerp is het van belang de specifieke noden voor de betreffende optimalisatie te voorzien. Zo is het bv nodig om een drainagesysteem te installeren indien gewerkt wordt met micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie.

##### ***Bodemadditieven***

Afhankelijk van de doelstelling kunnen verschillende types van additieven worden gebruikt. Indien het de bedoeling is om de verontreiniging te stabiliseren kan dit met additieven als bekalking, fosfaten, mineraal oxides en organische stoffen. Indien echter een verhoogde opname van de contaminant (organisch of metaal) gewenst is, kunnen mobiliserende stoffen (bv chelatoren, surfactanten) worden toegevoegd die de beschikbaarheid van de contaminant verhogen. Dit is echter sterk af te raden, tenzij kan worden gegarandeerd dat er geen uitloging naar het grondwater optreedt.

##### ***Micro-organismen***

Indien de afbraak van de aanwezige organische contaminanten onvoldoende is, kan dit bij te hoge concentraties leiden tot fytotoxiciteit waardoor de plant een gebrekkige groei vertoont, of zelfs afsterft. Indien het bovendien gaat om een vluchtige verontreiniging, dan is er het bijkomend risico dat de organische contaminanten via de blaadjes zullen evapotranspireren naar de lucht (fytovolatilisatie). Beide problemen kunnen worden opgelost door de geschikte plant-geassocieerde bacteriën aan te rijken. Endofytische bacteriën, die van nature binnenin de plant leven, indien 'uitgerust' met de gepaste afbraakmechanismen, helpen planten te overleven in situaties met verhoogde gehalten aan verontreinigende toxische stoffen en verhogen de capaciteit van de gebruikte planten om deze verontreinigende stoffen af te breken en bijgevolg uit het milieu te verwijderen.

Een aanrijking van deze bacteriën in de plant optimaliseert bijgevolg het fytoremediatie-proces. Dit kan door verbetering van de groei en gezondheidstoestand van de plant, en daarnaast door microbiële omvorming van verontreinigende stoffen tot minder schadelijke producten voor de plant. Naast het bevorderen van afbraak van organische contaminanten, kunnen micro-organismen ook toegevoegd worden om opname van verontreiniging (metalen en organische verontreinigingen) te bevorderen (bv. bacteriën die de pH in de wortelzone verlagen of surfactanten produceren die olie mobiliseren) of tegen te gaan (bv. bacteriën met metaal-immobilisatie mechanismen).

De noodzaak voor het toedienen van micro-organismen blijkt vaak uit de resultaten van het haalbaarheidsonderzoek maar kan ook blijken uit de resultaten van de monitoring.

## 4.2 Inrichting

Welke fytotechnologie ook gekozen wordt, het terrein zal altijd één of andere vorm van bodembewerking vereisen. Voor een bodembedekking zal dit vaak de volledige oppervlakte zijn terwijl bij de aanplant van bomen dit vaak beperkt blijft tot een plantgat of een greppel. Deze bodembewerking voor fytotechnologieën is vaak gelijkaardig aan deze bij land- en tuinbouw. De inrichting van het terrein zal in veel gevallen neerkomen op het plantrijp maken, het bemesten, het inzaaien of aanplanten van de gewenste soorten en het irrigeren.

De specifieke eisen voor deze bodembewerkingen verschillen van site tot site en moeten afgestemd worden op o.a. de bodemkarakteristieken die bepaald werden tijdens eerdere onderzoeken en het terreinbezoek.

Op veel voormalige industrieterreinen moet er rekening mee gehouden worden dat de bodem vaak verdicht zal zijn. Dit is natuurlijk nadelig bij het toepassen van fytotechnologieën omdat deze verdichte bodems de wortels verhinderen hierin voldoende binnen te dringen. In dit geval moet men deze bodem dan ook voorafgaand ploegen en eggen. De diepte hierbij is afhankelijk van de mate van verdichting van de bodem. In de meeste gevallen volstaat het om de bovenste 50 cm van de bodem los te maken om een goede wortelontwikkeling te bekomen. Indien plantgaten en/of greppels moeten geïnstalleerd worden voor het aanplanten van de bodem, moet natuurlijk deze volledige diepte losgemaakt worden. Een bijkomend voordeel van deze bodembewerking is dat er zuurstof in de bodem wordt gebracht. Vooral bij organische verontreinigingen is dit dan ook aan te bevelen om de aerobe biodegradatie te stimuleren. Dit wordt dan ook best mee opgenomen in de saneringsstrategie. Wel moet de nodige aandacht besteed worden aan mogelijke vervluchting of het verspreiden van stof.

Zowel tijdens als na het ploegen kunnen eventueel noodzakelijke meststoffen ingewerkt worden. Verder kan het, afhankelijk van het tijdstip van aanplant, nodig zijn om irrigatie te voorzien. Dit is voornamelijk het geval bij bomen die bij droog weer in het voorjaar worden aangeplant.

In wat volgt worden een zestal verschillende **planttypologieën**, of inrichtingsstrategieën, beschreven evenals de beheersmaatregelen zoals voorgesteld door Agentschap Natuur en Bos die kunnen worden gebruikt voor de implementatie van de processen. De onderscheiden fyto-technologie-aanplantingen kunnen ofwel individueel of in combinatie worden gebruikt. Sommige planttypologieën zijn enkel geschikt voor bepaalde verontreinigde stoffen of voor bepaalde target media (bodem, grondwater, oppervlaktewater).

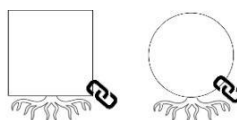
Een systeem van **pictogrammen** wordt gebruikt bij het begin van elke typologie om snel te identificeren welke verontreinigende stof en target media worden behandeld met een bepaald beplantingstype en welke **fyto-remediatiemechanismen** worden gebruikt. Verder is een diagram en een beschrijving van elk beplantingstype toegevoegd met nota's over typische toepassingen en planten selecties.

Wanneer men de planttypologieën doorloopt, moeten de planten zelf geselecteerd worden op basis van de beschreven criteria en de specifieke site-condities, waaronder de bodem, grondwater, microklimaat en aanwezige verontreinigingen. De typologieën dienen gebruikt te worden met de **plantenlijsten** zoals terug te vinden in **Bijlage 4** en de **fyto-remediatie databank**. Hoewel de planttypologieën hieronder apart worden besproken, kunnen in realiteit verschillende typologieën gecombineerd worden in een aanplant-schema om meerdere saneringsfuncties en doelstellingen te bereiken.

#### 4.2.1 Stabiliserende bodembedekking

**Beschrijving:** De planten houden de verontreinigingen vast en verhinderen migratie en uitloging. Er is geen directe verwijdering van de verontreiniging. Het doel van een stabilisatie bodembedekking is voornamelijk om de blootstellingsrisico's voor mens en milieu te verminderen.

**Mechanisme aan het werk:** fyto-stabilisatie



**Target medium:** bodem met inbegrip van grondwater

**Geschikte verontreinigende stoffen:** Deze planttypologie wordt het vaakst gebruikt bij verontreinigingen met zware metalen, POPs en zouten, maar kan in principe in een bepaalde mate voor alle verontreinigingen gebruikt worden.

Een stabilisatie bodembedekking met planten doet in principe hetzelfde als een klei-bedekking, het legt de verontreiniging op het terrein vast en minimaliseert de blootstelling voor mens en milieu. Het verschil met de kleibedekking is dat planten wel verhinderen dat vervuiling uitloopt, maar ze laten wel nog penetratie van water in de bodem toe. Plantenwortels houden de verontreiniging vast en wortel-exudaten kunnen ook extra de verontreinigende stoffen binden aan bodempartikels en organische stof.

Een stabilisatie bodembedekking wordt het meest toegepast op verontreinigde terreinen met niet biobeschikbare verontreinigingen en waar begroeiing prioriteit heeft. Plantensoorten worden gekozen die zeer tolerant zijn voor de verontreiniging en bodemadditieven kunnen bijkomstig worden toegevoegd om de plantengroei te verbeteren en verontreinigende stoffen vast te leggen. Bij fytostabilisatie worden 'excluder' planten gebruikt die de verontreinigende stoffen niet naar de bovengrondse plantendelen transporteren maar wind- en bodemerosie verhinderen. Bovendien zorgt het opwaarts pompen van water door de planten ervoor dat het risico op uitlogen van vervuiling naar het grondwater beperkt wordt. Tot slot creëren stabilisatie-bodembedekkingen habitats voor dieren en insecten.

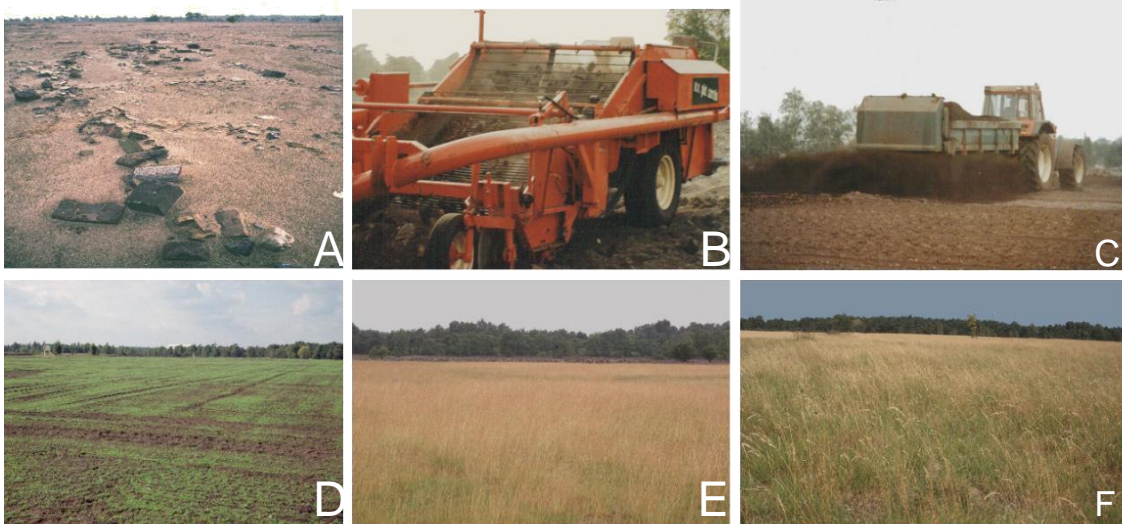
### **Typische toepassing**

**Lood verontreinigingen:** Een grote hoeveelheid lood kan mogelijks nog aanwezig zijn in bodems rond huizen die werden geveerd met loodverf dat toegelaten was tot in de jaren 1970. Naast het vroegere gebruik van loodhoudende verven zijn ook bijvoorbeeld schietstanden vaak gecontamineerd met lood. Lood is zeer slecht mobiliseerbaar in water en kan voor eeuwig in de bodem achterblijven. De meest voorkomende blootstellingsroute voor mensen is via stofdeeltjes die we inademen en die we meebrengen naar huis via onze schoenen. Indien het over een uitgestrekte verontreiniging gaat is afgraven niet haalbaar en dan biedt een fytostabilisatie bodembedekking een oplossing. De plantenmat vormt een effectieve barrière tussen bodemdeeltjes en de inwoners.

### **Planten selectie**

Voor een stabiliserende bodembedekking moet gewerkt worden met planten die tolerant zijn voor de verontreinigende stof, die de verontreinigende stof kunnen vastzetten en die een dichte vegetatiemat kunnen vormen. De plant-beslissingsboom in **Figuur 15** dient te worden gevolgd om tot de juiste plantenselectie te komen, namelijk (1) groeien er al planten op het terrein en zijn deze gekend in de databank als geschikt voor dit terrein, (2) is er in de databank al een soort geschikt voor het terrein, (3) zijn bepaalde klonen, variëteiten gekend die het meest efficiënt zijn, (4) kan de plant de vervuiling en terreincondities overleven.





**Figuur 19: Voorbeeld fytostabilisatie Lommel-Maatheide (Zn, Cd, Pb) verontreiniging. A: Toestand voor fytostabilisatie; B: Verwijderen stenen; C: Bemesting; D: 2 weken na inzaaien; E: 5 jaar na inzaaien; F: 12 jaar na inzaaien. Foto's Jaco Vangronsveld, UHasselt**

### Inrichtingstips en suggesties

1. *Hoe kan een gras-stabilisatie-mat met zero blootstelling worden aangelegd?* Kies planten die een zeer dichte groei vertonen en die geen of weinig bodem bloot laten liggen. Grassoorten zijn vaak het meest geschikt voor deze toepassing omwille van hun capaciteit om dichte zoden te vormen. Dikke, dicht gezaaide *Festuca* en *Agrostis* soorten zijn vaak een van de betere keuzes voor deze toepassing, voornamelijk voor parken en woonomgevingen met lood in de bodem.
2. *Grassen inzaaien:* Wij raden aan dat de geschikte grassoorten worden ingezaaid. Spontane vergrassing raden we af omdat het lange tijd kan duren voor de vegetatie sluit. De stabiliserende effecten zouden hierdoor pas met vertraging optreden. Het kan aangewezen zijn om in de meest verontreinigde zones geen bloemrijke graslandplanten in te zaaien om het risico op verspreiding via voedselkringlopen te vermijden. In de minder verontreinigde zones kunnen eventueel graslandplanten worden (mee) ingezaaid.
3. *Bodemchemie:* Bij stabilisatie-matten is de bodemchemie minstens even belangrijk als de plantenkeuze. Precipitatie, sedimentatie en binding aan de bodempartikels kunnen een grote rol spelen in de sanering dan de planten. Het is daarom van belang in sommige gevallen om de bodemchemie te wijzen, vb. de pH, beschikbaarheid van nutriënten. Ook kan bij te hoge toxische concentraties aan verontreiniging, de verontreiniging bijkomend vastgelegd worden door additieven. Een land- en tuinbouwdeskundige kan worden geconsulteerd voor de keuze van de beste bodemadditieven.

4. *Meststoffen*: Organische mest kan worden toegevoegd aan de bodem om de verontreinigingen mee te helpen binden, en de plantengroei te bevorderen.
5. *Verontreinigings-type en concentratie*: Niet alle verontreinigingen zullen even efficiënt kunnen worden gestabiliseerd met een vegetatiemat (**Figuur 19**). Soms zijn de verontreinigingsconcentraties zo hoog dat geen planten kunnen groeien. In andere gevallen kan de verontreiniging oplosbaar zijn in water. Aangezien vegetatiematten wel water doorlaten, kan de verontreiniging nog gemobiliseerd worden, ondanks de bedekking. Monitoring van het grond- en run-off water op regelmatige tijdstippen is aangeraden. In sommige gevallen kunnen wetgevingsvereisten ook andere saneringsopties vergen.

#### 4.2.2 Afbrekende bodembedekking

**Beschrijving:** Hagen, struiken, heesters, diep-wortelende grassen en kruidachtigen kunnen worden geplant om verontreinigingen in de bodem tot een meter diepte op te nemen en af te breken. De verontreiniging wordt verwijderd door afbraak zonder dat de plant hiervoor dient geoogst te worden.

**Mechanisme aan het werk:** rizodegradatie



en fytodegradatie



**Target medium:** oppervlakte bodem en water (0 - 1 meter)

**Geschikte verontreinigende stoffen:** organische verontreinigingen: olie, gechloreerde solventen, pesticiden en herbiciden, nutriënten zoals stikstof, POPs en explosieven op militaire terreinen kan ook maar trager. Ook bruikbaar voor het verwijderen van vrije cyaniden.

Hagen en struiken kunnen gebruikt worden om verontreinigde locaties op een terrein te omheinen. De planten en hun geassocieerde micro-organismen breken de verontreinigingen af tot minder complexe, minder schadelijke stoffen in de wortelzone, stam of bladeren. De keuze van de plantensoort kan de snelheid van afbraak sterk beïnvloeden. Sommige wortel-exudaten van planten hebben gelijkaardige chemische structuren als de verontreinigende stoffen zelf.

Bacteriën die in de wortelzone van deze planten leven hebben daarom ook vaak meer potentieel om de structureel gelijkende verontreinigende stoffen als voedsel op te nemen in plaats van de wortel-exudaten. Elke plantensoort scheidt ook een soorteigen gamma aan wortel-exudaten uit die de geassocieerde microbiële gemeenschappen zullen beïnvloeden. Hagen, struiken, grassen en kruidachtigen kunnen zeer succesvol zijn om bepaalde minerale oliën, gechloreerde solventen en pesticiden in de bodem af te breken.

Ze kunnen soms ook hoge concentraties aan stikstof opnemen uit de bodem. Sommige stikstofvormen (nitraat, ammonium) kunnen door de plant worden gemetaboliseerd en omgezet in biomassa.

## **Typische toepassingen**

### ***Verontreiniging ter hoogte van ondergrondse stookolietanks in tuinen:***

Indien een ondergrondse tank gelekt heeft, kunnen - na kernverwijdering - hagen en struiken de verontreiniging in de grond verder afbreken (zie paragraaf 2.3).

***Mest opstapeling/afvoer:*** Op plaatsen waar te veel mest in de bodem zit, kunnen planten gebruikt worden om de nutriënten op te nemen en te incorporeren in biomassa.

***Perimeters van tankstations, autogarages, industriële sites in de stad, scheiding weg en fietspad:*** Hagen kunnen rond eigendommen en wegen worden geplant om organische verontreinigingen in de bodem (en ook lucht) af te breken. De plantenbuffer kan ook esthetische voordelen hebben om ongewenste inkijk te verminderen en om de eigendomsscheiding te bepalen. Gemengde aanplantingen kunnen hier ook zeker worden overwogen om meerdere ecologische functies te bekleden zoals habitat en groene verbindingstroken tussen natuurgebieden.

***Hagen rond tuinen en akkers:*** Hagen kunnen worden aangeplant rond gemeenschapstuinen en rondom akkers om organische verontreinigingen in de bodem af te breken en om grote hoeveelheden nutriënten en pesticide-afvloeiing tegen te gaan. Daarnaast kunnen hagen ook esthetische voordelen bieden en land- en tuinbouwgewassen beschermen tegen ongedierte en pathogenen.

**Plantenselectie:** Voor een afbrekende bodembedekking moet gewerkt worden met planten die tolerant zijn aan de verontreinigende stof, die de contaminant kunnen afbreken of omvormen en diep tot matig diep kunnen wortelen. Ook hier kan men de plant beslissingsboom doorlopen om tot de juiste plantenkeuze te komen. Kijk in de databank of er al gelijkaardige verontreinigen gekend zijn en welke plantensoorten het goed deden. Het is wel belangrijk om na te gaan of de planten wel diep genoeg wortelen om de verontreiniging te bereiken. Liefst zijn de planten ook eenvoudig te kweken via stekken en kunnen ze gemakkelijk in vorm worden gesnoeid voor onderhoud. Wilgensoorten kunnen, afhankelijk van de verontreinigende stof, hiervoor heel geschikt zijn.

## **Inrichtingstips en suggesties**

1. ***Gelaagdheid:*** Om een maximale afbraak van de organische verontreinigende stof en nutriënten te verwezenlijken kunnen hagen worden afgewisseld met andere kruidachtige planten, grassen en andere planttypologieën rond de perimeter van de verontreinigde site.

2. Onderhoud: Meestal is het voldoende als hagen 1 keer per jaar terug in vorm worden gesnoeid.
3. *Irrigatie*: in warme zomermaanden kan het noodzakelijk zijn freatofyten zoals wilgen te irrigeren, voornamelijk bij de aanplant en de tijd tot ze goed geworteld zijn in de bodem van het terrein. Eenmaal ze goed ingeworteld zijn, zijn de meeste soorten wel droogte-tolerant. Het waterregime kan mee in overweging worden genomen bij het kiezen van de geschikte planten.

### 4.2.3 Extractie bodembedekking

**Beschrijving:** Hyperaccumulatoren en planten die een hoge biomassa kunnen genereren worden vaak gebruikt om anorganische en moeilijke organische verontreinigingen te verwijderen uit de bodem. De planten moeten wel geoogst worden om de verontreiniging van de site te verwijderen.



**Mechanisme aan het werk:** fytoextractie

**Target medium:** oppervlakte bodem (0 – 1m)

**Geschikte verontreinigende stoffen:** Afhankelijk van de startconcentratie en de biobeschikbaarheid op middellange termijn (minstens 10 jaar) elementen zoals arseen (As), selenium (Se) en Nikkel (Ni), op langere termijn metalen zoals cadmium (Cd) en zink (Zn).

Op dit ogenblik niet geschikt voor: Cyanide, radionucliden, zouten en volgende metalen: B, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Cr, F, Pb, Hg, Al, Ag en Au.

Niet toepasbaar voor: minerale olie, gechloreerde solventen, pesticiden en explosieven. Al deze organische verontreinigingen kunnen gesaneerd worden door middel van afbraakmechanismen. Fytoextractie is hier dan ook niet aangewezen.

Het geoogste materiaal moet gecontroleerd worden op concentraties van de verontreinigende stoffen alvorens het correct verwijderd wordt (volgens VLAREMA). De anorganische verontreinigingen (andere dan arseen, selenium en nikkel) worden meestal in onvoldoende hoge concentraties opgenomen om de saneringsdoelstelling te bereiken in een aanvaardbare tijdspanne.

Echter, indien de tijdspanne geen beperkende factor is, kan het alsnog interessant zijn om fytoextractie uit te voeren. Voor een site matig verontreinigd met Cd en Zn werd bv. reeds fytoextractie toegepast gebruik makend van populieren en wilgenklonen (praktijkvoorbeeld 1). Eigenlijk kan men stellen dat hier op korte termijn eerder sprake is van fytostabilisatie en slechts op lange

termijn fytoextractie aan de orde is. Men zou dus beter spreken van een duurzaam landgebruik van deze gronden.

### **Typische toepassingen**

**Seleen:** Seleen komt altijd voor in de bodem. In sommige streken komen echter hogere concentraties voor die kunnen uitlogen in het grondwater en dan ook een negatieve impact hebben op de gezondheid van mens en dier. Verhoogde concentraties kunnen ook voorkomen als gevolg van mijnbouw en intensief landgebruik. Er zijn verschillende planten gekend die seleen kunnen opnemen, sommige zelfs vervluchtigen. In bepaalde gevallen is het niet nodig om de planten te oogsten omdat het grootste deel van het seleen is vervluchtigd. Indien de planten toch geoogst worden, moeten deze niet altijd als afval behandeld worden. Aangezien seleen een essentieel micronutriënt is voor dieren zouden de planten dus een nuttige bestemming kunnen krijgen.

**Fytomining van nikkel:** Nikkel is één van de weinige metalen waar hyperaccumulators effectief worden ingezet om het metaal uit de bodem te extraheren. Aangezien er een grote vraag is naar nikkel, is er dus ook een potentieel om nikkel via planten te verwijderen uit de bodem.

**Grote industrieterreinen metaalsmelters:** Waar de verontreiniging nog niet te diep in het grondwater zit, kunnen hagen en struiken de verontreiniging opnemen.

**Lange termijn sanering van land- en tuinbouwgebieden:** Land- en tuinbouwgebieden kunnen met metalen verontreinigd geraken, of reeds zijn, door omliggende mijnbouwactiviteiten, intensieve industrieën en van nature voorkomende hoge concentraties in de bodem. Hierbij vormt vooral de biobeschikbare fractie een hoog risico voor de voedingsgewassen omwille van de verhoogde concentraties in de geconsumeerde delen van de planten en omwille van de groei-inhibitie van de planten. Daarenboven kunnen dieren, die deze verontreinigde gewassen eten, de metalen bio-accumuleren wat leidt tot nog hogere metaalconcentraties in de voedingketen. Een potentiële lange termijn toepassing kan er dan uit bestaan om met behulp van fytotechnologieën het biobeschikbaar gedeelte van de metalen uit de bodem te verminderen of te verwijderen. De bodem blijft echter nog steeds verontreinigd, maar de biobeschikbare fractie van de verontreiniging, die voordien in de voedselketen terecht kwam, kan verminderd of verwijderd worden. Deze extractie bodembedekking kan gedurende vele jaren toegepast worden. Van zodra de biobeschikbare fractie verwijderd is, kan terug overgeschakeld worden op de teelt van voedingsgewassen. Men moet er in dit geval wel rekening mee houden dat de evenwichten tussen metalen die vastzitten en die beschikbaar zijn dynamisch zijn. Het is namelijk zo dat als er een groot deel van de biobeschikbare fractie verwijderd wordt, de metalen die initieel gebonden waren aan de bodem beschikbaar zullen worden.

Deze verschuivingen blijven doorgaan totdat alleen nog die fracties aan metalen overblijven die zo vast gebonden zitten dat ze niet meer beschikbaar gemaakt kunnen worden. Men moet dus voldoende tijd een stabiel evenwicht hebben alvorens het fyto-remediatie-proces stop te zetten.

Een ander gebruik van extractie bodembedekking op land- en tuinbouwgebieden kan bestaan uit het volledig vervangen van de voedingsgewassen door hyperaccumulatoren die langzaam (meestal over een periode van vele tientallen jaren) de bodem saneren. Hierbij is een periodieke oogst onontbeerlijk. Biomassa gewassen, zoals grassen, wilgen en populieren werden reeds geëvalueerd als energiegewassen. Door het continue oogsten van de bovengrondse delen wordt het terrein langzaam maar zeker gesaneerd.

### Planten selectie

Hyper accumulerende planten worden geselecteerd voor verontreinigingen met arseen, seleen en nikkel. Een belangrijke opmerking is dat, hoewel vele planten wel in staat zijn om metalen op te nemen, ze de concentraties in de bodem onvoldoende kunnen verminderen om te spreken van sanering. Vaak komt dit doordat de metalen beperkt biobeschikbaar zijn en/of te sterk gebonden aan de bodemmatrix om geëxtraheerd te kunnen worden. Voor anorganische verontreinigingen is een fyto-technologie die de verontreiniging ter plaatse houdt, maar het risico van menselijke blootstelling wegneemt, dan ook vaak de beste optie. Samen met een stabiliserende bodembedekking en een hydraulische barrière kunnen verontreinigingen goed ter plaatse gehouden worden.



**Figuur 20: Extractie bodembedekking met wilgen en populier en korte-omloophout oogst. Foto's: Jolien Janssen, Universiteit Hasselt.**

### Inrichtingstips en suggesties





1. *Biobeschikbaarheid*: Veel anorganische verontreinigingen zoals metalen en radionucliden komen in de bodem voor in een vorm die weinig beschikbaar is voor planten. Dit betekent dat de extractie van deze stoffen een langere tijd in beslag neemt maar heeft ook het voordeel dat de concentraties van deze stoffen in de biomassa voldoende laag kunnen blijven waardoor verschillende meer courante toepassingen van deze biomassa mogelijk blijven.
2. *Verwijdering biomassa*: Van zodra de anorganische verontreiniging is opgenomen door de planten, moeten deze geoogst worden om de

verontreiniging te verwijderen. Afhankelijk van de concentratie in de planten dient de juiste bestemming gekozen worden. Dit wordt verder toegelicht onder 4.3.5. Verwerking van de biomassa.

3. *Risico's en bio accumulatie*: Verschillend van degradatie-typologieën die de verontreiniging volledig verwijderen zal een extractie-bodembedekking de verontreiniging voor een groot gedeelte verplaatsen van de bodem naar de bovengrondse plantendelen. Hier worden ze dan echter beschikbaar voor consumptie door insecten, dieren en andere predatoren. Deze mobilisatie van de verontreiniging kan dan ook nieuwe vormen van blootstelling creëren. In dit geval moeten bijkomende experimenten uitgevoerd worden om te bepalen of blootstelling aan de verontreiniging kan voorkomen worden en of bio-accumulatie een risico vormt. Mogelijke risico's kunnen worden voorkomen door een specifieke plantkeuze waarbij de betreffende plantendelen bijvoorbeeld geen deel uitmaken van de voedselketen. Dit is vaak het geval voor uitheemse soorten. In geval dit niet mogelijk is, kan een omheining een oplossing bieden.

#### 4.2.4 Hydraulisch barrière met fytodegradatie en fytovolatilisatie

**Beschrijving:** Bomen die diep wortelen en veel water kunnen verdampen worden geplant om de grondwaterstroming te beïnvloeden en om de migratie van verontreinigingen te stoppen. De snel-transpirerende bomen kunnen een grondwaterpluim vertragen of zelfs stoppen. Ze kunnen zelfs de stroming van de grondwaterpluim ombuigen naar de bomen toe. Het doel is dan ook vaak te beletten dat verontreinigde grondwaterpluimen het terrein zouden verlaten. Een bijkomend voordeel is dat vele organische verontreinigingen kunnen afgebroken en/of verwijderd worden met dit proces.

**Mechanisme aan het werk:** fytodegradatie  , fytovolatilisatie  ,  
 rizodegradatie,  fytohydraulica 

**Target medium:** bodem met inbegrip van grondwater

**Geschikte verontreinigende stoffen:** organische verontreinigingen (minerale olie, gechloreerde solventen, stikstof) omdat deze afgebroken kunnen worden; explosieven, POP's en metalen kunnen dan weer als beheersmaatregel (geen afbraak).

Door bomen in te zetten voor een hydraulische barrière maakt men gebruik van 'pompen' die aangedreven worden door zonne-energie.

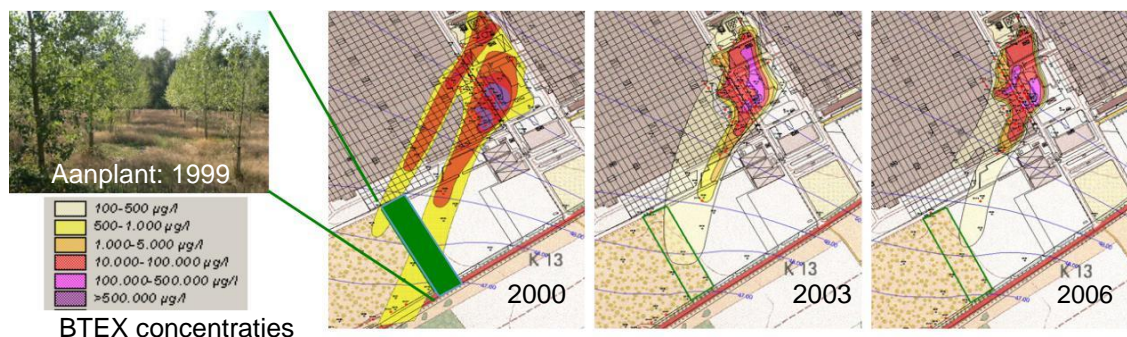


## Typische toepassingen

**Industriële terreinen verontreinigd met gechloreerde solventen en vluchtige organische componenten:** Gechloreerde solventen zoals TCE en PCE hebben vaak een hoge stroomsnelheid in het grondwater. Ze kunnen zich dan ook snel verspreiden en zijn vaak moeilijk te verwijderen met conventionele grondwatersaneringsinstallaties. Fytohydraulica door middel van een hydraulische barrière met bomen is een ideale manier om wijdverspreide verontreinigingspluimen te saneren. De bomen controleren niet alleen de stroming van de verontreinigingspluim maar door de biologische activiteit in de bomen en in de wortelzone zullen ze ook de verontreiniging afbreken.

**Droogkuis:** TCE en PCE zijn typische verontreinigingen uit de droogkuis, samen met andere gechloreerde solventen. Ze zijn zeer mobiel in het grondwater en kunnen door middel van een hydraulische barrière simpel opgepompt en verwijderd (afgebroken) worden.

**Brandstoftanks, tankstations en olieraffinaderijen:** Lichte fracties aanwezig in brandstoffen, zoals BTEX en MTBE kunnen snel migreren in het grondwater. Lekkende opslagtanks zijn een veel voorkomend milieuprobleem. Een hydraulische barrière kan dan ook de migratie van deze verontreiniging stoppen en afbreken.



**Figuur 21: Fytoremediatie van een BTEX-verontreinigingspluim bij Ford Genk (Praktijkvoorbeeld 7). Foto Nele Weyens: Universiteit Hasselt.**

In Genk werd een BTEX-verontreiniging gesaneerd door een combinatie van grondwatersanering (pump and treat) en bodemluchtexttractie in de kernzone en fytoremediatie in de pluimzone (Praktijkvoorbeeld 7). De aanplant van een populierenveld gebeurde in 1999. Na 4 jaar was de pluim al sterk gereduceerd en na 7 jaar waren de concentraties BTEX onder het populierenveld onder de detectielimiet (**Figuur 21**).

### Plantenselectie

Planten die tolerant zijn voor de verontreinigende stof, die diep wortelen en ook veel water opnemen. Freatofyten zijn hier aangewezen daar ze, afhankelijk van de diepte van de grondwatertafel, gemakkelijk tot 9 meter diep kunnen wortelen.



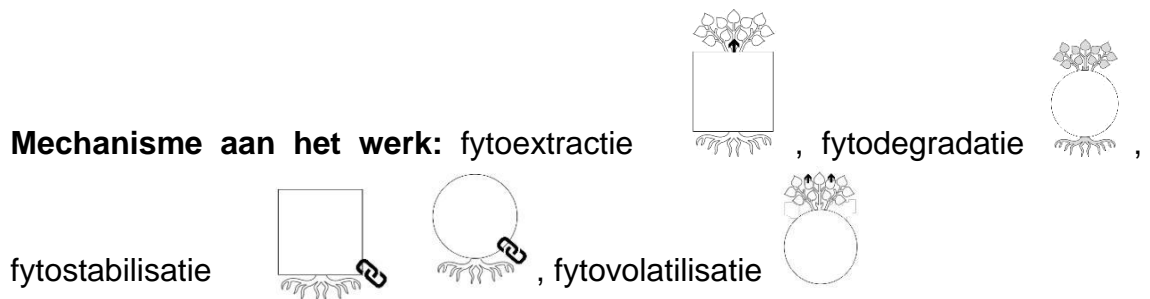
Om zeker te zijn dat het systeem vlot werkt, wordt de hydraulische barrière meestal gebruikt als het grondwater zich op maximaal 6 meter diepte bevindt. Minder diep grondwater wordt gemakkelijker en sneller bereikt door de bomen. Aangezien het een bepaalde tijd kan duren vooraleer de wortels van de bomen het grondwater bereiken, is het soms aangewezen om de bomen dieper aan te planten. Dit kan door middel van een mechanische grondboor. Op deze wijze kan men bomen tot 3 meter diep aanplanten. In de meeste gevallen is dit echter niet nodig.

### **Inrichtingstips en suggesties**

1. *Beheer*: Hydraulische barrières dienen voldoende breed te zijn om onderstroming van de verontreiniging te voorkomen als de planten in winterrust zijn. Als richtlijn nemen we een breedte die bij voorkeur minstens tweemaal de afstand bedraagt die door de meest mobiele component van de verontreiniging per jaar wordt afgelegd. Verder houden we rekening met eventuele benodigde plaats voor het uitvoeren van beheerwerken en met mogelijke schade die de beplanting kan aanbrengen aan infrastructuur zoals gebouwen, verhardingen, ondergrondse leidingen, ...
2. *Aanplant van bomen*: Bomen worden best tussen november en half februari geplant. Het is aangewezen om bij de toepassing van verschillende soorten deze groepsgewijs te mengen. Afhankelijk van de situatie kiezen we voor bosplantgoed, grotere plantmaten, al dan niet containerplanten, stekken/poten. Soms is het nodig om de plantwerkzaamheden zodanig uit te voeren dat de planten tot een gewenste diepte gaan wortelen. Dit kan door te planten in boorgaten of door het gebruik van zogenaamde boomkokers. De plantdichtheden zijn soortafhankelijk en worden ook bepaald door andere factoren zoals bijvoorbeeld de minimale breedte van doorgangen voor onderhoud. We adviseren om een onder beplanting aan te brengen met struiken of met kruidachtigen die geschikt zijn voor de betreffende groeiomstandigheden.

#### **4.2.5 Multi-mechanisme design**

**Beschrijving:** Een gemende aanplant die gebruik maakt van veel, of zelfs alle fyto-technologie-mechanismen. Het doel is om maximale fyto-remediatievoordelen te behalen over een grote oppervlakte met een gemengde verontreiniging van organische en anorganische componenten.



**Target medium:** bodem (0-1 meter diep) en grondwater

**Geschikte verontreinigende stoffen:** alle

Een multi-mechanisme bodembedekking wordt aangelegd met alle fyto-technologie-mechanismen in gedachte, fytoextractie, hydraulica, degradatie, volatilisatie, stabilisatie en dit via een lage struik, ruigteachtige aanplant die fyto-technologie-impact maximaliseert en het blootstellingsrisico minimaliseert. Elementen van stabilisatie-bodembedekkingen, extractie-aanplantingen, hydraulica-bomenrijen, en afbraak-hagen worden gecombineerd om een multifunctionele dichte aanplant te creëren op het terrein. De plots met fytoextractie zouden geoogst moeten worden op het eind van elk groeiseizoen om een maximum aan verontreinigde stoffen af te voeren van de site.

**Typische toepassingen**

**Treinbermen, verlaten industriële terreinen:** Zaaigoedmengsels kunnen worden samengesteld met extractie- en of degradatie-soorten.

**Militaire basis, schietvelden:** Verontreinigingen waaronder explosieven, minerale olie (zoals kerosine), gechloreerde solventen, metalen (lood, koper) zijn historische verontreinigingen, nog steeds aanwezig vandaag de dag omwille van hun persistente karakter. Daarnaast komen hier ook nieuwe verontreinigingen bij door trainingsactiviteiten. Terreinen die niet meer actief in gebruik zijn omwille van verloren bodemstructuur (e.g. voormalige DOVO-zones) kunnen hersteld worden door lage vegetatie aanplantingen, ruigtes, struiken en grassen, die niet interfereren met schietoefeningen (**Figuur 20**). Hogere bomenrijen kunnen aan de rand worden voorzien als buffer en om inkijk te beperken. Extractie- en afbraak-plantensoorten kunnen worden overwogen om de functionaliteit van de fyto-remediatie-mechanismen te verhogen.

**Plantenselectie**

Planten die tolerant zijn aan de verontreinigende stoffen, die voorkomen in databanken om een specifieke verontreiniging effectief te verwijderen of vast te zetten.



**Figuur 22: Multi-mechanisme op militair schietveld in Helchteren. Links, DOVO dode zone. Rechts, grasland op een herstellende locatie en bomenrijen in de verte die een buffer vormen. Foto's: Sofie Thijs, Universiteit Hasselt.**

### **Inrichtingstips en suggesties**

1. *Ecosysteemdiensten*: Naast sanering bieden deze multi-mechanisme-bodembedekkingen ook bescherming tegen erosie, stimuleren ze het voorkomen van wild, het esthetisch karakter en de CO<sub>2</sub> vastlegging in de bodem. De gemengde plant-samenstelling in deze buffers creëert kansen voor soortendiversiteit en multi-level ecosysteemdiensten (zie ook duurzaamheid).
2. *Biomassaproductie*: de biomassa die geoogst wordt op deze terreinen kan inkomsten generen, als productiehout of bio-energie. We verwijzen hiervoor naar 4.3.5. Verwerking van de biomassa.

### **4.2.6 Bio-zuiveringssystemen**

**Beschrijving:** In een horizontaal geconstrueerd wetland of een bio-zuiveringsinstallatie kan water verontreinigd met organische of anorganische stoffen worden gevloeid en gezuiverd in de wortelzone van de planten. Er kan een keuze gemaakt worden uit verschillende substraten om de verontreinigingen te verwijderen.

Organische verontreinigingen en stikstof kunnen volledig worden verwijderd en afgebroken en andere anorganische verontreinigingen kunnen uit het water worden gefilterd of in de bodem worden vastgezet.

**Mechanisme aan het werk:** rizodegradatie  en fytodegradatie 

**Target medium:** afvalwater, regenwater, grondwater, spoelwater van spuitinstallaties in de land- en tuinbouw

**Geschikte verontreinigende stoffen:**

Stoffen die worden afgebroken/verwijderd: stikstof, bepaalde minerale oliën (zie paragraaf 2.3), gechloreerde solventen, pesticiden

Stoffen die worden vastgelegd in planten: explosieven, meeste metalen, fosfor, POPs

Stoffen die worden geëxtraheerd in oogstbare plantendelen: sommige metalen, fosfor, stikstof.

Rietvelden, kustwetlands en andere 'constructed wetlands' bootsen natuurlijke ecosystemen na en maken gebruik van planten die het verontreinigde water filteren door de wortelzone. De meeste behandelingenprocessen van de verontreinigende stoffen gebeuren niet in de plant, maar in de biofilm rond de wortels. Planten fungeren als drager voor micro-organismen en leveren organisch materiaal, zuurstof, nutriënten, suikers en andere wortel-exudaten aan het systeem.

Het ontwerp van bio-zuiveringsinstallaties is zeer specifiek en is ook al gedetailleerd besproken in andere publicaties, zoals [hier](#).

De waterhuishouding en media moeten gekozen worden door specialisten om de gewenste afbraaksnelheden te bekomen. Het slecht functioneren van een 'wetland' kan nog in vele gevallen worden toegeschreven aan een foutief design, implementatie of onderhoud. Daarom is het belangrijk om een specialist aan te spreken.

De belangrijkste zuiveringsprocessen die plaatsvinden in een bio-zuiveringsinstallatie zijn:

- Veel organische verontreinigingen kunnen worden afgebroken
- Stikstof wordt verwijderd als gas, via denitrificatie door anaerobe micro-organismen
- Anorganische verontreinigingen worden gefilterd uit het water of gestabiliseerd in de bodem in plaats van in de planten. Ze blijven dus op het terrein, maar het water is zuiver.
- Phytoextractie is meestal niet het doel omdat de planten dan moeten geoogst worden om echte verwijdering van metalen te bekomen.
- Via fyto-metabolisatie worden stikstof en fosfor omgezet in plantbiomassa. De stikstof en fosfor kunnen worden verwijderd van 'wetlands' als de plant biomassa (elk jaar) wordt geoogst. De plantbiomassa kan vervolgens veilig worden gecomposteerd.

## Typische toepassingen

*Regenwaterzuivering:* wetlands kunnen efficiënt zijn als deel van een saneringsproces om regenwater dat bijvoorbeeld verontreinigd is door afspoeling of door atmosferische verontreinigingen te zuiveren (vb. te veel aan nutriënten, farmaceutische stoffen, olie, petroleum en zware metalen).

*Huishoudelijk afvalwaterzuivering, industrieel afvalwaterzuivering:* Water van het rioleringsstelsel en van de industrie kan succesvol gezuiverd worden met bio-zuiveringsinstallaties met horizontale oppervlakte stroming. De verontreinigingen die hiermee kunnen worden verwijderd kunnen nutriënten zijn, organische stoffen, zware metalen, ...

*Land- en tuinbouw-sector:* De grootste bron van verontreinigingen met gewasbeschermingsmiddelen van het oppervlaktewater in Vlaanderen zijn puntverontreinigingen (40-90%) (Brochure zuiveringssystemen PCfruit, [link](#)). De puntverontreinigingen ontstaan bij het vullen en reinigen van spuitapparatuur: morsen, overlopen van spuitmachines bij het vullen, lekken van leidingen of het lozen van spuitresten en spoel- en reinigingswater. Vaak zijn telers niet bewust van de grote hoeveelheid water belast met gewasbeschermingsmiddelen, of vrezen onterecht bijkomende hoge kosten, werk en verplichtingen om deze problematiek tegen te gaan. Naast preventieve maatregelen om het probleem te voorkomen, kan opgevangen restwater *on site* gezuiverd worden met behulp van geconstrueerde 'wetlands' of bio-zuiveringssystemen. Er zijn in Vlaanderen twee types die veel gebruikt worden, namelijk de biofilter en de fytobak (Brochure zuiveringssystemen PCfruit, [link](#)).

*Biofilter:* Een biofilter kan opgesplitst worden in twee delen: het eerste deel omvat drie op elkaar gestapelde bakken met een inhoud van 1 m<sup>3</sup> en wordt de filtereenheid genoemd. Het tweede deel omvat plantenbakken die naast elkaar zijn opgesteld en die wordt ook de verdampingseenheid genoemd. De functie van de filtereenheid is het zuiveren van de restvloeistoffen. De gestapelde bakken zijn gevuld met substraat waarin micro-organismen leven. Wanneer water doorheen het systeem stroomt zal een groot aandeel van de restanten op het materiaal geadsorbeerd worden, door deze sorptie krijgen micro-organismen de tijd om de stoffen op te nemen en tegelijk af te breken. Een efficiënt mengsel voor een filtereenheid is 50 % gehakseld stro, 40 % compost en 10 % teelaarde. De verdampingseenheid van de biofilter verhoogt de verdampingscapaciteit van het systeem. De bakken van de verdampingseenheid kunnen opgevuld met een mengsel van potgrond 90 % en 10 % teelaarde. Hierin worden zegge (*Carex* spp.) en wilgen (*Salix* spp.) geplant, aangezien zij grote hoeveelheden water kunnen verdampen. Daarnaast kunnen de planten aan de hand van visueel waarneembare symptomen van fytotoxiciteit als indicator fungeren voor de belasting van het systeem. Een biofilter met 3 verticale substraatbakken en 3 plantenbakken kan op jaarbasis maximaal 5 m<sup>3</sup> restwater verdampen. Indien men niet kiest voor



verdamping dan kan een gelijkaardig volume aan water worden gebruikt om te her-irrigeren. (Zie **Figuur 23**).



**Figuur 23: Biofilters in de praktijk. Foto:proefcentrum PCfruit, Sint-Truiden).**

*Fytobak:* Een ander type biozuiveringstelsel is de fytobak. Dit is een bak gevuld met een substraatmengsel met micro-organismen die zorgen voor de afbraak van de verontreinigingen, en deze wordt vervolgens aangeplant met wilgen of zegge. Het water uit de fytobak verdampt. Een efficiënt vulmengsel is opnieuw 50 % gehakseld stro, 40 % compost en 10 % teelaarde van het veld, andere voorbeelden gebruiken 70 % bodem en 30 % stro. Om te vermijden dat regenwater in de fytobak terechtkomt, wordt er een dakconstructie op geplaatst, deze kan eveneens de verdamping stimuleren. Speciale spuitdoppen of een druppeldarm zorgen ervoor dat het restwater gelijkmatig over de fytobak verdeeld wordt. (Zie ook **Figuur 24**).



**Figuur 24: Fytobakken in de praktijk Bron: proefcentrum PCfruit Sint-Truiden.**

## Plantenkeuze

Planten in rietvelden, biofilters en fytobakken worden meestal gekozen omdat ze zoveel mogelijk verontreinigende stoffen kunnen verwijderen. Voor fytobakken zijn soorten met een hoge evapotranspiratie snelheid interessant indien men kiest voor verdamping in plaats van hergebruik van het gezuiverde water.

Oevers van natte zones kunnen op de meest verontreinigde zones gedeeltelijk beplant worden met soorten voor wisselnatte gronden zoals bijvoorbeeld Kleine lisdodde (*Typha angustifolia*), Gewone kattestaart (*Lythrum salicaria*) en Gele lis (*Iris pseudacorus*). Bij de soortkeuze dienen we uiteraard rekening te houden met de aard van de verontreiniging. Ter hoogte van de watertafel kunnen planten zoals Riet (*Phragmites australis*) worden aangeplant. De jaarrond natte zones waarin minder verontreiniging voorkomt worden ingezaaid met specifieke soorten voor natte of moerassige bodems.

### 4.3 Keuze van het successiestadium naar Coremans et al. (2011)

Pioniersvegetatie is de begroeiing op kale en verstoorde bodem. Het zijn hoofdzakelijk éénjarige planten die veel en lichte zaden vormen en zich snel kunnen verspreiden. Bij de pioniersplanten zijn ook heel wat ongewenste kruidachtigen zoals Perzikkruid (*Persicaria maculosa*) en Melganzevoet (*Chenopodium album*) maar ook soorten als Korenbloem (*Centaurea cyanus*), Grote klaproos (*Papaver rhoeas*) en Echte kamille (*Matricaria chamomilla*).

Na een tijd, meestal al na één groeiseizoen, evolueert een pioniersvegetatie naar een graslandvegetatie. Grassen zijn meerjarig, kiemen trager en wortelen dieper dan pioniersplanten. De graswortels vormen een mat die ondoordringbaar is voor de wortels van pioniersplanten met als gevolg dat deze verdwijnen. Naast grassen komen er ook graslandplanten voor. Ze hebben diepe wortels en ook vaak een bladrozet die schaduw werpt op het gras om daarmee het gras op een afstand houden. Ze beschikken ook over lange bloeistengels om boven de grassen uit te steken. Een aantal bekende soorten zijn Margriet (*Leucanthemum vulgare*), Duizendblad (*Achillea millefolium*) en Langbladige ereprijs (*Veronica longifolia*).

Als we het gras niet maaien of laten begrazen, komt het tot bloei en leggen de halmen zich plat waardoor een pak opeengestapeld gras ontstaat waarvan de onderste laag langzaam verteert. Hier vestigt zich een ruigtekruidenvegetatie, hoog opschietende kruiden met sterk ontwikkelde wortels die groeien op voedselrijke bodems. Tot deze groep behoren onder andere grote brandnetel (*Urtica dioica*), bramen (*Rubus sp.*), Leverkruid (*Eupatorium cannabinum*), Harig

wilgenroosje (*Epilobium hirsutum*), Boerenwormkruid (*Tanacetum vulgare*), Moerasspirea (*Filipendula ulmaria*) en Kattenstaart (*Lythrum salicaria*). Grassoorten en de graslandplanten verdwijnen langzaam.

In de ruigte duiken zaailingen op van struiken en bomen. Hun zaden worden aangevoerd door wind, water en dieren. Er ontstaat een struweel met struiken zoals Meidoorn (*Crataegus sp.*) en Vlier (*Sambucus nigra*) en de eerste bomen zoals berk, els en wilg. Na verloop van tijd groeien de bomen boven het struweel uit en door een gebrek aan licht verdwijnen een aantal struiken, grassen en ruigtekruiden. Het struweel verandert langzaam in een bos.

Als we een bepaald successiestadium in stand willen houden, moeten we ingrijpen. Anders evolueert alles in de richting van een bos. Om te voorkomen dat een pioniersstadium over gaat in grasland moeten we de bodem verstoren. Om te voorkomen dat een grasland over gaat in een ruigte, moeten we minstens één keer per jaar maaien. Om te voorkomen dat een ruigte over gaat in een bosvegetatie moeten we minstens om de drie tot vijf jaar maaien.

De keuze van het successiestadium bepaalt dus in sterke mate het uitzicht en vooral het beheer. Vandaar dat een doordachte keuze, nog los van de specifieke plantenkeuze, cruciaal is voor de verdere aanpak en voor het huidige en toekomstige gebruik van het terrein.

Hou er dus rekening mee dat het bij het toepassen van éénjarigen (pioniersvegetatie) het wellicht nodig zal zijn om jaarlijks de bodem te verstoren door een bodembewerking zoals frezen. Dit kan de beheerkosten vergroten en het risico op verspreiding van verontreinigde bodemdeeltjes via wind- of watererosie doen toenemen.

Een belangrijk gegeven bij het toepassen van fytoremediatie is dat de verontreiniging bereikbaar is voor de wortels van de plant. Dit betekent dat we voor diepere verontreinigingen eerder gebruik maken van diep wortelende struiken en bomen. Zo kunnen bijvoorbeeld freatofyten wortels ontwikkelen tot in de grondwatertafel. Vandaar dat we voor de aanpak van diepere verontreinigingen eerder gebruik maken van bomen.

In veel gevallen is het waardevol om verschillende deelconcepten met verschillende successiestadia bij elkaar te laten aansluiten.

De successiestadia vertalen we naar de volgende groenvormen en typologieën (zoals eerder besproken) die binnen fytoremediatie toepasbaar zijn:

- Pioniersvegetatie: bloemenakker, éénjarigen gebruikt als extractiedek, degradatiedek, stabilisatiedek;
- Graslandvegetatie: gazon, bloemenweide, bollengrasland, grasland, grassen en/of graslandplanten gebruikt als extractiedek, degradatiedek, stabilisatiedek, extractieborder, degradatieborder, stabilisatieborder;



- Ruigtevegetatie: meerjarige kruidachtigen gebruikt als extractiedek, degradatiedek, stabilisatiedek, extractieborder, degradatieborder, stabilisatieborder;
- Bosvegetatie: heg, haag, struikengordel, houtkant, bos(je) gebruikt als extractiedek, degradatiedek, stabilisatiedek of hydraulische barrière.

#### 4.4 Beheer

Omdat fyto-remediatie levende organismen gebruikt, zullen er dan ook specifieke vereisten voor het beheer zijn in vergelijking met andere meer traditionele saneringssystemen:

- Het handhaven van een gezond systeem is cruciaal voor de voortzetting en effectiviteit van het saneringsproces. Variaties in planten, klimaten en verontreinigende stoffen kunnen aanleiding geven tot sommige, alle of bijkomende vereisten zoals: Visuele inspecties
- Bemesting
- Irrigatie
- Beheer van ongewenste kruidgroei
- Maaien
- Kappen/snoeien
- Afvoeren van biomassa
- Bescherming tegen vraat
- Opnieuw planten

Visuele inspecties, bemesting, irrigatie en vraatbescherming zijn maatregelen om de plant te beschermen en de groei te controleren of te stimuleren. Beheer van ongewenste kruidgroei helpt bij zowel plantengroei als bij het voorkomen van invasieve soorten.

Maaien wordt in de eerste plaats geïmplementeerd om graslandvegetaties en ruigtevegetaties te handhaven, bij het beheer van ongewenste kruidgroei of om in specifieke gevallen het terrein toegankelijk te houden.

Kappen/snoeien kan nodig zijn als beheersmaatregel in functie van de vorm van de planten (KOH, knotbomen, ...). Indien de verontreinigingen zich echter hebben opgehoopt in het plantenweefsel helpen zij om deze te verwijderen uit de bodem op voorwaarde dat de biomassa wordt afgevoerd. Als het gehalte aan verontreinigende stoffen de geldende normen overschrijdt dan moet de biomassa worden verwijderd als gevaarlijk afval (VLAREMA) tegen extra kosten. In bijzondere gevallen kunnen sommige verontreinigingen die zich in het plantenweefsel hebben opgehoopt, zoals zware metalen, worden

teruggewonnen en verkocht. Dit staat bekend als phytomining. In dergelijke gevallen kunnen deze "cash crops" een aanwinst voor het project zijn door een deel van de totale kosten te verminderen.

Bescherming tegen vraat is belangrijk om de aanplant te beschermen maar ook om in specifieke gevallen te vermijden dat de verontreiniging zich verspreidt via de voedselkringloop.

Opnieuw planten, ook wel inboeten genoemd, kan nodig zijn om de plantdichtheid te behouden zodat een continue opname van verontreinigingen wordt gewaarborgd. Vegetatie kan sterven door verschillende redenen (dat wil zeggen schade door dieren, insecten en het weer) en moet dan opnieuw worden aangeplant in functie van het behoud van de wortelmassa die nodig is voor de opname van verontreinigende stoffen en de afgifte van exudaten.

Dood plantenmateriaal en snoeiafval kan, als het geen verontreinigingen bevat, op terrein worden gecomposteerd of verwerkt in takkenrillen. De aanwezigheid van dood hout zal in veel gevallen een ecologische meerwaarde opleveren voor het terrein.

Waakzaamheid, frequent sitebezoek en onderhoud tijdens het eerste jaar van een aanplant zijn cruciaal en spelen een grote factor in de vraag of fyto-remediërende planten zullen slagen of niet. De beschikbaarheid van vocht en beheer van ongewenste kruidgroei zijn enkele van de meer kritische eisen (Compton, 2003).

Ook de keuze van het gewenste successiestadium is belangrijk in functie van het toekomstige beheer alsook van het huidige en toekomstige gebruik van het terrein of de verschillende deelterreinen.

Successie verwijst naar de natuurlijke evolutie van een niet begroeide bodem naar een begroeiing met pioniersplanten, vervolgens grassen en graslandplanten gevolgd door ruigtekruiden en ten slotte struweel en bos (Coremans *et al.* 2011).

#### 4.4.1 Pioniersstadium

Groenvorm	Beheer
Bloemenakker of specifieke éénjarigen	Eén keer per jaar maaien en maaisel afvoeren + jaarlijks de bodem verstoren

Eénjarigen worden eenmaal per jaar gemaaid in oktober. Het maaisel wordt steeds verwijderd om verruiging te voorkomen. Daarna is het nodig de grond te verstoren bijvoorbeeld door te harken of te frezen. Daarom is een blijvende bedekking met éénjarigen niet steeds aangewezen op verontreinigde grond. Het verstoren van de bodem kan een risico op verspreiding van verontreinigde bodemdeeltjes inhouden.

Eventueel kunnen we het verstoren van de bodem combineren met het bijzaaien van éénjarigen.

Het maaisel wordt afgevoerd van het terrein of kan bijvoorbeeld ook op het terrein worden gecomposteerd. De concrete verwerking van het maaisel is afhankelijk van de eventuele verontreiniging die in de biomassa is opgeslagen (zie verder).

#### 4.4.2 Grasland

Groenvorm	Beheer
Gazon	20 maal per jaar maaien
Bloemenweide / extensief beheerd grasland	1 tot 5 maal per jaar maaien en maaisel afvoeren
Bloemenweide	3 tot 5 maal per jaar wieden 1 of 2 maal per jaar maaien en maaisel afvoeren

Waar nodig (wandelpaden, ligweiden, speelzones, ...) wordt een intensief beheer gevoerd. Waar mogelijk wordt het grasland zo veel als mogelijk extensief beheerd. Bloemenweiden worden één- tot tweemaal per jaar gemaaid afhankelijk van de voedselrijkdom. Het maaitijdstip wordt gekozen in functie van de bloei (vaak stopt een eerste bloei begin juni en een tweede eind augustus).

Het wieden beperkt zich tot het eventuele verwijderen van ongewenste kruidachtigen. Er wordt nooit een bodembewerking (harken, schoffelen, ...) uitgevoerd omdat dit de groei van éénjarige ongewenste kruidgroei stimuleert.

Het maaisel wordt afgevoerd van het terrein of kan bijvoorbeeld ook op het terrein worden gecomposteerd. De concrete verwerking van het maaisel is afhankelijk van de eventuele verontreiniging die in de biomassa is opgeslagen (zie verder).

#### 4.4.3 Ruigte

Groenvorm	Beheer
Bloemenweide Specifieke meerjarigen	3 tot 5 maal per jaar wieden 1 of 2 maal per maaien en maaisel afvoeren In sommige gevallen lagere maai frequentie tot 1 maal per 3 jaar.

Ruigten kunnen met een lagere frequentie worden gemaaid afhankelijk van de voedselrijkdom en de gewenste soorten.

Het wieden beperkt zich tot het eventuele verwijderen van ongewenste kruidachtigen. Er wordt nooit een bodembewerking (harken, schoffelen, ...) uitgevoerd omdat dit de groei van éénjarige ongewenste kruidgroei stimuleert.

Het maaisel wordt afgevoerd van het terrein of kan bijvoorbeeld ook op het terrein worden gecomposteerd. De concrete verwerking van het maaisel is afhankelijk van de eventuele verontreiniging die in de biomassa is opgeslagen (zie verder).

Een specifieke situatie is het beheer van natte zones met oeverplanten:

De meeste kruidachtige vegetatie kan jaarlijks worden gemaaid waarbij het maaisel wordt afgevoerd. De zones met Gele lis dienen zo weinig mogelijk te worden gemaaid. Maaien kan leiden tot het verdwijnen van Gele lis. De zones met Riet kunnen begin maart worden gemaaid.

Om verlanden tegen te gaan kan het nodig zijn op termijn gefaseerd te baggeren. De verwerking van de baggerspecie wordt uitgevoerd conform de wetgevende bepalingen.

#### 4.4.4 Bos

Groenvorm	Beheer
Kruidachtige vegetatie met schaduwplanten	1 tot 2 maal per jaar wieden
Bosje	Zaailingen van bomen en struiken verwijderen
Bosrand / struikengordel	Zaailingen van bomen en struiken verwijderen
Klimplanten	Weinig tot veel snoei afhankelijk van de soort
Haag	1 tot 3 keer per jaar snoeien
Heg	Niets of sporadisch (bij)snoeien
Houtkant	1 maal per 5 tot 10 jaar kappen
Knotboom	1 maal per 5 tot 10 jaar knotten

Het vrijkomende snoeimateriaal en hout kan als dood hout op het terrein blijven, bijvoorbeeld verwerkt in een takkenril of kan worden afgevoerd voor verdere verwerking afhankelijk van de aard en de hoeveelheid van verontreinigende stoffen die in de biomassa zijn opgeslagen (zie verder).

In de eerste jaren na de aanplant is het nodig om de bomen één tot twee keer per jaar vrij te stellen zodat ze niet overgroeid geraken door grassen en/of kruidachtigen.

#### 4.4.5 Verwerking van de biomassa

Een eindbestemming wordt gekozen in functie van de geldende normen.

We verwijzen hiervoor naar het VLAREMA, Besluit van de Vlaamse Regering tot vaststelling van het Vlaams reglement betreffende het duurzaam beheer van materiaalkringlopen en afvalstoffen.

- Als de concentratie de geldende normen niet overschrijdt, kan de biomassa worden afgevoerd voor aerobe of anaerobe verwerking.
- Als de concentratie van de verontreiniging de geldende normen van het VLAREMA wel overschrijdt, moet de biomassa afgevoerd worden voor verbranding.

#### 4.4.6 Faunavriendelijk beheer

Groenzones hebben een bijzondere ecologische functie. Een faunavriendelijk beheer van deze zones vergroot deze ecologische waarde.

Naast een pesticiden-vrij beheer dragen volgende eenvoudige acties bij aan een faunavriendelijk beheer:

- Graslandbegroeiingen beperkt maaien om de levenscyclus niet te doorbreken. Ongeveer 1/5 van het grasland niet maaien.
- Tussen verschillende deelconcepten geleidelijke overgangen voorzien. Dit zorgt voor extra structuurvariatie.
- Graslandplanten niet later dan september maaien.
- In graslandzones met extensief beheer de graspollen ontzien.
- Niet korter maaien dan 6 cm.
- Ruigtes gefaseerd maaien. Het maaien gebeurt om de twee tot drie jaar.
- Voldoende dood hout op het terrein bewaren. Hiertoe kan snoeimateriaal bijvoorbeeld in takkenwallen worden gestapeld.

#### 4.5 Monitoring (Ontwerp)

Het fyto-remediatie systeem moet net zoals andere saneringstechnieken periodiek gemonitord worden om de progressie naar het eindresultaat te evalueren. De monitoring is afhankelijk van de fyto-remediatietechniek en de gekozen saneringsdoelstelling.

Meer bepaald moet worden nagegaan of de aanwezige verontreiniging en/of verontreinigingspluim stabiel of krimpend is. Een goed opgezet monitoringssysteem leidt tot een databank met trendgegevens van de relevante parameters over tijd en ruimte. Het laat ook toe om wijzigingen te noteren in de achtergrondwaterkwaliteit en in de grondwaterstroming.

Het monitoringsplan dient minimaal aan de volgende vereisten te voldoen:

1. aantonen dat de fyto-remediatie-techniek verloopt zoals voorspeld;
2. identificeren van alle toxische nevenproducten die eventueel worden gevormd;
3. controleren of de verontreiniging of verontreinigingspluim stabiel of krimpend is;
4. controleren dat er geen gevoelige receptoren worden bedreigd;
5. ontdekken van veranderingen in milieuomstandigheden die de effectiviteit van de fyto-remediatie-techniek in het gedrang kunnen brengen;
6. verifiëren van het bereiken van de saneringsdoelstellingen

Een meetprogramma is steeds site-specifiek. Alle beschikbare gegevens uit het vooronderzoek (OBO, BBO en terrein karakterisatie) kunnen worden gebruikt voor het opstellen van een conceptueel sitemodel en van een monitoringsplan.

Bij het opstarten van een lange termijn monitoring, moet een staalname- en analyseplan worden opgesteld waarin minimaal de volgende zaken worden vastgelegd:

- de locatie van de staalnamepunten;
- de te bepalen parameters, mogelijke afbraakproducten en de wijze van bemonstering en het medium dat dient bemonsterd te worden (grond, grondwater, bodemlucht, plant);
- de periodiciteit van monitoring (staalnamefrequentie) en duur.

#### **4.5.0 Monitoringslocaties**

De locatie van de staalnamepunten is afhankelijk van de matrix waar de verontreiniging aanwezig is.

- Bij de monitoring van het vaste deel van de aarde worden bodemstalen genomen in relatie tot de diepte en aanwezigheid van de verontreiniging.
- Bij de monitoring van de verontreiniging in het grondwater worden de monitoringspeilbuizen geplaatst in en rondom de verontreinigde zone. De bedoeling van deze peilbuizen is tweeledig: nagaan of het gedrag van de verontreiniging in het grondwater wijzigt en nagaan of de verontreiniging in het grondwater zich verder verspreidt. De peilbuizen die worden geplaatst om het gedrag van de grondwaterverontreiniging te observeren, moeten afhankelijk van het mechanisme ten minste op de volgende plaatsen worden aangebracht:
  1. stroomopwaarts van de bron van verontreiniging in de niet-verontreinigde zone, langs de centrale stroombaan van de grondwaterverontreiniging, als controle van de kwaliteit van het instromende grondwater;
  2. ter hoogte van de verontreinigingsbron indien deze met een fyto-techniek wordt gesaneerd, voor inschatting van de evolutie van de concentratie in de tijd; er moeten voldoende peilbuizen voorzien worden om de evoluties van de concentraties in de bron goed te kunnen inschatten;
  3. fytohydraulica: stroomafwaarts van de verontreiniging, langs de centrale stroombaan, om wijzigingen in gedrag en concentraties van verontreinigingen op te volgen; het aantal punten is afhankelijk van de grootte en breedte van de pluim;
  4. alarmpunten ter hoogte van kritische zones, zoals bijvoorbeeld aan de perceelgrenzen stroomafwaarts van de grondwaterverontreiniging, die het mogelijk moeten maken om tijdig inzicht te krijgen in een eventuele

uitbreiding van de verontreinigingspluim en zo tijdig te kunnen overgaan tot alternatieve beheersmaatregelen om verdere verspreiding naar bijvoorbeeld een gevoelige receptor te voorkomen;

5. lateraal: om laterale verspreiding te monitoren.

#### **4.5.2 Monitoringsparameters**

Algemene parameters die kunnen worden gemonitord tijdens fyto-remediatie staan samengevat in **Tabel 11**. In functie van het individueel fyto-remediatie systeem moet beslist worden welke parameters moeten worden opgenomen in het monitoringsplan. **Tabel 11** kan hierbij een hulpmiddel zijn.

##### **4.5.2.1 Klimatologische gegevens**

Om de waterbalansen van de site en de evapotranspiratie van de plant op te volgen, is het van belang om de klimaatgegevens te monitoren. Hierbij wordt minstens rekening gehouden met de temperatuur, neerslag, relatieve vochtigheid, zonnestraling, windsnelheid en -richting.

##### **4.5.2.2 Planten**

Ter hoogte van de plant kunnen volgende kenmerken worden gemonitord:

- visuele eigenschappen (gezondheid, stress, schade door dieren, bladmassa, etc.)
- (evapo)transpiratie en kwantificatie van afbraakproducten in de verschillende plantenweefsels (wortels, stengels en blad).

##### ***Visuele beoordeling***

Voor de visuele beoordeling van de conditie van de plant kan men in eerste instantie letten op bladbezetting, eventuele bladverkleuringen, vertakkingspatroon, achterblijvende groei, reactie op wonden, mate waarin wondovergroeiingsweefsel wordt gevormd en symptomen die wijzen op aantastingen door insecten, bacteriën, virussen of schimmels. Deze determinatiesleutels voor schade en meetinstrumenten zijn hulpmiddelen die toelaten om planten op een gestandaardiseerde wijze te beoordelen. Toch, elke plant, standplaats en context is verschillend en er zijn tal van factoren zoals windbelasting die mee in rekening moeten worden gebracht. Verder zijn er ook nog andere methodes zoals takscheutlengtemeting, biomassabepalingen, groei-ring-analyse, en zetmeelanalyse die kunnen helpen bij het verkrijgen van een meer volledig beeld van de toestand van de plant.

Gedurende een groeiseizoen zijn er ook verschillende methodes om de groei en toestand van de vegetatie te meten. Met een aantal sensoren kan de toestand waargenomen worden, daarnaast kan men met deze sensoren een beeld krijgen



van de variatie in de vegetatieontwikkeling binnen een perceel. De metingen berusten op de vegetatiereflectie en berekenen van daaruit een vegetatie-index. Er wordt ook vanuit gegaan dat de hoeveelheid biomassa en de kleur van het gewas iets vertellen over de vitaliteit. Stressfactoren zoals water- en nutriëntentekorten kunnen hierdoor zichtbaar gemaakt worden. Er zijn 'Near Sensing Systemen' die vlak boven de vegetatie meten vanaf een statief, of 'Remote Sensing Systemen'; die van een afstand boven de vegetatie meten, bijvoorbeeld met satellieten of UAS's.

### ***Evapotranspiratie en kwantificatie afbraakparameters***

In geval fyto-degradatie toegepast wordt (al dan niet geassisteerd door toevoeging van micro-organismen) is het belangrijk om te bevestigen dat de verontreiniging (en eventuele afbraakproducten) niet door de plant worden opgenomen en via de bladeren naar de lucht volatiliseren.

Volatilisatie via de blaadjes meten is niet zo eenvoudig. Onder gecontroleerde labocondities kan deze volatilisatie rechtstreeks aan de blaadjes gemeten worden (zie 3.4.1.4). Dit is echter praktisch moeilijk realiseerbaar voor grootschalige *in situ* metingen.

Er zijn andere meetmethodes waarmee ook gemeten kan worden of de verontreiniging niet via de blaadjes naar lucht transpireert. Hierbij worden de concentraties aan organische verontreiniging in de sapstroom bepaald op verschillende hoogtes in de stam. Er wordt hierbij aangenomen dat indien bovenaan de stam, dichtbij de bladeren, de concentratie aan organische stof voldoende gedaald is, er weinig of geen transpiratie via de bladeren optreedt.

De concentraties van wateroplosbare organische verontreinigingen en mogelijke afbraakproducten worden gemeten via boringen in de stam, en het extraheren van metabolieten in de sapstroom via solid-phase micro-extraction (SPME) of Solid-phase spectrophotometry (SPS) en on-site analyse of in het lab (Burken *et al.*, 2011) (**Figuur 25**).



**Figuur 25: Boring tot in sapstroom en SPME of SPS staalname. Bron: Joel Burken lab, Missouri S&T, USA.**

Er kan via deze methode ook een vergelijking gemaakt worden tussen de evapotranspiratie van bomen die wel en niet geïnoculeerd zijn met **VOC-afbrekende bacteriën**. Bijkomende inoculaties kunnen zo tijdig uitgevoerd worden.

Bij de plantkeuze in fyto-remediatie houden we rekening met eventuele risico's op het **verspreiden van de verontreiniging via de voedselketen**. Zo kan het in bepaalde gevallen aan te raden zijn geen land- en tuinbouwgewassen te gebruiken. In geval van fytoextractie kan bladval een verspreidingsrisico vormen.

De opname en accumulatie van metalen in plantenweefsels vraagt monitoring naar de concentratie van de metalen in de (eventueel consumeerbare) plantenweefsels (bladeren, zaden) voor bio-accumulatie van de contaminant en gevaar voor transfer naar de voedselketen. Hierbij kunnen blad, scheut, zaden worden verzameld, geëxtraheerd met geconcentreerd zuur en vervolgens geanalyseerd met ICP-OES. Ook bij deze monitoringsschema's kan geïdentificeerd worden of inoculaties met tolerante schimmels of bacteriën noodzakelijk zijn om bijvoorbeeld stabilisatie van metalen in de wortels te bevorderen t.o.v. translocatie naar eetbare plantendelen.

#### **4.5.2.3 Bodem**

Indien de fyto-remediatietechniek erop gericht is concentraties in het vaste deel van de aarde te stabiliseren, te extraheren, ... dient de efficiëntie van de techniek nagegaan te worden door het nemen van bodemstalen en deze op de relevante parameters te laten analyseren in een erkend laboratorium.

De parameters die op het bodemstaal geanalyseerd dienen te worden zijn minstens de verontreinigingsparameters en afbraakproducten waarvoor een saneringsnoodzaak gedefinieerd is.

#### 4.5.2.4 (Grond)water

Indien de fyto-remediatietechniek gericht is op de sanering of beheersing van het grondwater, dient het monitoringsprogramma gericht te zijn op grondwater. Hierbij dienen volgende parameters opgevolgd te worden:

- grondwaterstaalnamen en -analyses op de relevante parameters in een erkend laboratorium. De parameters die op het grondwaterstaal geanalyseerd dienen te worden zijn minstens de verontreinigingsparameters en afbraakproducten waarvoor een saneringsnoodzaak gedefinieerd is.
- de lokale grondwaterstromingsrichting en –snelheid.

Indien **bodemadditieven** werden toegevoegd om de biobeschikbaarheid van metalen te verhogen, is grondwatermonitoring noodzakelijk om mogelijke uitloging van de metalen op te volgen. Hiervoor dienen grondwaterstalen genomen te worden en geanalyseerd te worden op de relevante parameters.

#### 4.5.3 Periodiciteit en duur van monitoring

De periodiciteit en duur van monitoring is afhankelijk van de techniek en de vooropgestelde saneringsdoelstelling.

**Tabel 11** geeft een overzicht van de monitoringsparameters en de frequentie. Deze tabel is richtinggevend en dient door de bodemsaneringsdeskundige verder onderbouwd te worden. Bij het bepalen van de staalnamefrequentie in geval van fytohydraulica dient rekening gehouden te worden met:

Verspreidingssnelheid van de verontreiniging: de **staalnamefrequentie** moet zo worden gekozen dat ze toelaat om verspreiding van de verontreinigingspluim vast te stellen en een uitspraak te kunnen doen over mogelijk nabijgelegen receptoren. Hierbij dient ook rekening gehouden te worden met seizoenswijzigingen in de lokale hydrologie. De intervallen tussen de opeenvolgende monitoringscampagnes mogen maximaal de tijd bedragen die de verontreinigingspluim nodig heeft om de eerste niet- verontreinigde peilbuis te bereiken.

Algemeen gesteld verloopt de frequentie van plant monitoring parallel met de leeftijd van de plant; er kan bijvoorbeeld minstens jaarlijks een staalname uitgevoerd worden indien seizoenaal niet relevant of mogelijk is. Veiligheidshalve kan geadviseerd worden om bij aanvang van de monitoring de verschillende campagnes sneller op elkaar te laten volgen, bv halfjaarlijks (éénmaal in zomer en éénmaal in winter) de eerste twee of drie jaren en nadien jaarlijks. Bij zeer mobiele verontreinigingen kan een -hogere meetfrequentie nodig zijn. Voor lagere frequenties kan worden gekozen indien de verontreiniging minder mobiel is. De **termijn van monitoren** bedraagt minimaal de tijd die is vereist om de vooropgestelde saneringsdoelstellingen te bereiken.

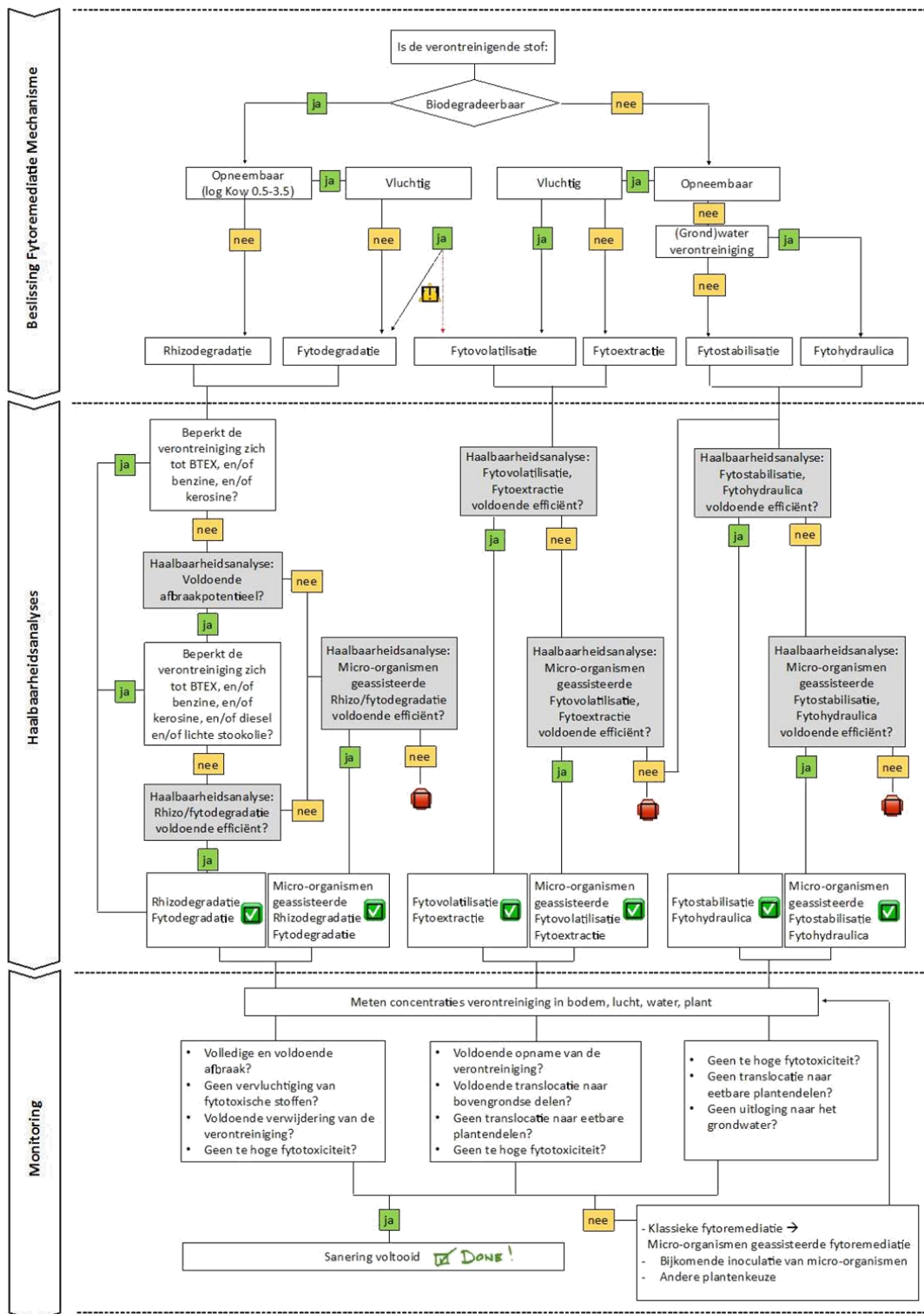
De monitoringsfrequentie kan worden afgebouwd in functie van de bekomen resultaten en mits grondige onderbouwing. Dit alles wordt in **Tabel 11** overzichtelijk weergegeven.

**Tabel 11: Samenvatting van monitoringsparameters, reden van monitoring en meetfrequentie**

Monitoringsparameter	Reden van monitoring	Frequentie (aangeraden)
<b>Klimatologische gegevens</b> Temperatuur Neerslag  Relatieve vochtigheid Zonnestraling Windsnelheid en richting	-Onderhoudsnoden (irrigatie, ...) -Om de waterbalans te bepalen en Evapotranspiratie-snelheid	Seizoenaal
<b>Planten</b> Visuele kenmerken (tekenen van stress, ziekte, vitaliteit, schade door insecten, schimmelziekte, groei, bladmassa etc... Weefsel conc. (wortel, scheut, stam, blad) Transpiratie snelheid/VOC evapotr.	-Onderhoudsnoden van planten: herplanting, vervanging van planten, bemesten, pesticide gebruik -Verontreinigende stof bepalen en afbraakproducten -Kwantificeren en voorspellen van het fyto-remediatie-proces	Trimester of seizoenaal  Jaarlijks  Eerste maal twee jaar na aanplant, nadien eventueel tweejaarlijks
<b>Bodem/sediment</b> Geochemische parameters (pH, nutriënt concentraties, watergehalte...) Microbiële gemeenschappen  Verontreinigende stof en afbraakproducten	-Optimalisatie van kenmerken voor vegetatie  -Kwantificeren afbraakpotentieel  -Kwantificeren en voorspellen van het fyto-remediatie-proces	Seizoenaal/jaarlijks  Jaarlijks (nadien twee- of driejaarlijks) Jaarlijks
<b>(Grond)water</b> Grondwater informatie (snelheid grondwater stroming, diepte ...)  Verontreinigende stof en afbraakproducten	-Kwantificeren van verontreinigende stof en concentraties van afbraakproducten -Kwantificeren en voorspellen van het fyto-remediatie proces	Seizoenaal/Jaarlijks  Seizoenaal/Jaarlijks

#### 4.5.4 Evaluatie van de meetgegevens en aanpassing van het monitoringsprogramma

Het monitoringsprogramma is een iteratief proces, waarbij men na elke meetcampagne nagaat of de resultaten het conceptueel model bevestigen (**Figuur 26**).



**Figuur 26: Beslissingsboom: Monitoring.**

Indien dit het geval is, dan kan men overwegen om de intensiteit van de meetcampagne te verminderen. Indien blijkt dat de gekozen fytoremediatietechniek niet vlot verloopt zoals verwacht op basis van de voorspellingen dan dient men zorgvuldig na te gaan wat de oorzaak kan zijn van deze discrepantie (verkeerde veronderstellingen in het conceptuele model? Of gebruik van

verkeerde concentratiegegevens of van verkeerde geochemische achtergrondgegevens?). In dit geval kan het aangewezen zijn om het meetprogramma intensiever te maken of aanvullende testen in het laboratorium uit te voeren.

Fytoremediatie is een innovatieve technologie. Daarom is een essentieel onderdeel van elk programma voor monitoring van fyto-remediatie een actieplan dat beschrijft hoe actieve beheersmaatregelen zullen worden ingezet wanneer uit de monitoringactiviteiten blijkt dat fyto-remediatie niet verloopt volgens de verwachtingen (**Figuur 26**). Om de prestatie van fyto-remediatie te evalueren moet rekening gehouden worden met de saneringsdoelstelling. In dit geval kan het enerzijds gaan over een vuilvrachtreductie of –verwijdering en anderzijds over een fytostabilisatie. In beide gevallen moeten de concentraties van de verontreinigende stof en afbraakproducten in de bodem en/of het (grond)water worden gemeten en de evolutie worden opgevolgd.

In een tussentijdse rapportage naar OVAM dient het resultaat van de monitoring beschreven te worden. In geval de resultaten onvoldoende gunstig evolueren, is het aangewezen bijkomende metingen te doen om na te gaan of optimalisatie van de techniek mogelijk is:

- bijvoorbeeld tellen van bacteriën in de rizosfeer of in het water; ook het microbieel afbraakpotentieel (aanwezige genen) kan gekwantificeerd worden met behulp van moleculaire DNA-technieken (zie ook 3.2.2.3 labo- en veldtesten).
- plaatsen van bijkomende peilbuizen om een beter beeld van de evolutie van de verontreiniging en/of potentiële instroom van verontreiniging te kunnen verklaren.
- staalname van bodemcondities om na te gaan of bijkomende additieven noodzakelijk zijn.

Algemeen kan gesteld worden dat indien bij klassieke fyto-remediatie de vooropgestelde doelstellingen niet worden bereikt, kan worden getracht over te gaan naar micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie. Indien ook bij micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie de verwachtingen niet worden ingelost, kan overwogen worden om bijkomende inoculaties te doen of een herziening van de plantenkeuze te doen. In geval bij fytoextractie en fytovolatilisatie bovenstaande acties niet zorgen voor de nodige verbetering, kan een heroverweging van het fyto-remediatie mechanisme (fyto-remediatie of fytohydraulica) een oplossing bieden.

Alleszins moet men bij fyto-remediatie rekening houden met de tijd die nodig is voor de aanplant om het grondwater en/of de verontreiniging te bereiken en mogen niet te snel conclusies getrokken worden.

Indien optimalisatie niet mogelijk is, kan overgegaan worden tot een alternatieve of complementaire saneringsconcept of -techniek. Ten behoeve van de voorwaarden voor een kleine of grote wijziging wordt verwezen naar de standaardprocedure Bodemsaneringswerken, Eindevaluatieonderzoek en Nazorg.

#### 4.6 Kostenraming

Bij de kostenraming voor een sanering met fyto-remediatie wordt rekening gehouden met vier hoofd-categorieën: (1) Ontwerp, (2) Inrichting (3) Beheer en Bemonstering en analyse. (zie ook hoofdstuk 2.7.2)

(1) Bij het ontwerp van een fyto-technologie (hoofdstuk 4.1) voor een bepaalde site moet men rekening houden met welke testen nodig zijn om deze technologie in de praktijk te kunnen omzetten. Hierbij moet vooral gedacht worden aan de eventueel noodzakelijke haalbaarheidstesten en/of plantselectietesten van hoofdstuk 3.4 Grondige evaluatie haalbaarheid. Een overzicht van de hieraan verbonden kosten is terug te vinden in tabel 8. Bovenop deze kosten komen eventueel ook nog de bijhorende engineeringkosten voor de opmaak van het bestek.

(2) Bij de inrichting van een terrein moet er rekening gehouden worden met de voorbereiding van de locatie, de grond, het plantmateriaal alsook met eventueel noodzakelijke irrigatie of vraatbeschermingsmaterialen. Meer detail hieromtrent is terug te vinden onder hoofdstuk 4.2. De kosten voor de bodembewerking voor de fyto-technologieën is vergelijkbaar aan deze bij land- en tuinbouw of bosbouw. Over het algemeen situeren zich deze kosten tussen 300 en 400 €/ha. Afhankelijk van verschillende parameters kan dit echter oplopen tot meer dan 100.000 €/ha.

Zo moet er oa rekening gehouden worden met:

- De voorbereiding van het terrein: 0,5 – 100 € en meer per m<sup>2</sup>;
- De aanplanting (inclusief plantmateriaal, paal, vraatbescherming en drainagebuis): 1 – 40 € per m<sup>2</sup>

(3) De beheerkosten omvatten alle noodzakelijke kosten verbonden aan het beheer van het terrein, de aanplant, de eventuele oogst en de opgezette fyto-technologie (inclusief bioaugmentatie) over de volledige saneringsduur. Ook de voor de fyto-technologie noodzakelijke monitoringputten en toebehoren, stroombronnen, onderhoud van de apparatuur en arbeid zijn inbegrepen. Specifieke vereisten voor het beheer voor fyto-remediatie worden beschreven in hoofdstuk 4.4 van dit document. Ook de beheerkosten kunnen variëren van enkele honderden euro's tot meer dan 100.000 €/ha over de volledige saneringsduur. Hierbij moet oa rekening gehouden worden met:

- De noodzakelijke maaibeurten of klepelen tussen de aanplant: 0,1 – enkele € per m<sup>2</sup>;

- de onderhoudssnoei, de knotbeurten en eventuele oogst: tot enkele € per m<sup>2</sup>;
  - irrigatie: tot enkele € per m<sup>2</sup>
  - de bioaugmentatie (indien nodig): enkele tot tientallen € per m<sup>2</sup>.
- (4) Opvolgen van efficiëntie en resultaat van de sanering zijnde=bemonstering- en analysekosten. Deze kosten kunnen de totale kosten van het project overheersen vanwege de tijd die nodig is voor monitoring en de benodigde hoeveelheid gegevens. De kosten omvatten voornamelijk staalnametijd (uitvoeren van controleboringen en grondwaterstaalnames) en laboratoriumkosten voor het analyseren van de monsters. Gegevens verzameld tijdens bemonstering en analyse zijn cruciaal voor grondige documentatie van de voortgang van de site en de prestaties van fyto-remediatie als een nieuwe technologie. Monitoringsparameters en frequentie worden weergegeven in hoofdstuk 4.5.3.
- Hierbij moet rekening gehouden worden met de monitoring van de volatiliteit. Deze kosten kunnen oplopen tot meer dan 10.000 € per keer afhankelijk van het aantal planten dat gemonitord moet worden.

## 4.7 Wetgevend kader

Zoals vermeld dient men bij de inrichting van een fyto-remediatie-project, net zoals andere saneringsprojecten, rekening te houden met specifieke wetgeving die van toepassing is voor het betreffende terrein. De nodige vergunningen worden aangevraagd via het indienen van het bodemsaneringsproject. De slaagkansen van het bodemsaneringsproject zullen immers sterk verhogen als er in het haalbaarheidsonderzoek en bij de inrichting en beheer maximaal rekening wordt gehouden met deze wetgeving.

**Het veldwetboek van 7 oktober 1886** regelt onder andere de **afstand van beplantingen** tot de eigendomsgrens. Belangrijk is ook de bepaling van artikel 35§5: in de voor land- en tuinbouw bestemde gedeelten van het grondgebied is bosaanplanting verboden op minder dan 6 meter van de eigendomsgrens. Aanplant van lijnvormige landschapselementen worden echter niet als bosaanplanting beschouwd. Bovendien is voor de bosaanplanting in land- en tuinbouwgebied een vergunning nodig van het college van burgemeester en schepenen. Deze bepalingen zijn ook van toepassing op de voor bosbouw bestemde zones die grenzen aan de voor land- en tuinbouw bestemde zones.

**Het Bosdecreet van 1990** regelt de verschillende **bosfuncties**. Deze worden voor de meeste bossen geconcretiseerd in een bosbeheerplan. In 1999 zijn daar de criteria voor duurzaam bosbeheer bijgekomen. Handelingen die niet werden opgenomen in een bosbeheerplan zijn onderworpen aan een machtiging van het Agentschap Natuur en Bos.



Of een groep bomen als **bos wordt gedefinieerd**, wordt bepaald **door de aanwezigheid van bomen of struiken enerzijds en de aanwezigheid van een boseigen fauna en flora anderzijds**. De ruimtelijke bestemming speelt geen rol bij de bepaling of een vegetatie als bos wordt gedefinieerd. Ook de oppervlakte speelt geen rol!

Volgende vegetaties worden in Vlaanderen **nooit** als bos beschouwd:

- sierbeplantingen en plantsoenen;
- de korte-omloop-houtteelt (KOH) waarvan de aanplant plaatsgevonden heeft op gronden gelegen buiten de ruimtelijk kwetsbare gebieden. KOH is een teelt van snelgroeiende houtige gewassen die met zeer korte omlooptijden (max. 8 jaar) geoogst worden. Aanplantingen van bijvoorbeeld populier en wilg met omlooptijden van 2 à 5 jaar en bestemd voor de energiewinning of aanplantingen met als doel vezelproductie voor papier of productie van biomassa met een omlooptijd tot 8 jaar worden bijgevolg niet als bos beschouwd.
- de wissenteelt waarvan de bovengrondse massa periodiek tot maximaal drie jaar na de aanplanting of na de vorige oogst, in zijn totaliteit wordt geoogst. Ook hier wordt met zeer korte rotaties gewerkt en is het hoofddoel productie van wisselen.

Volgende vegetaties worden in Vlaanderen **altijd** als bos beschouwd:

- de aanplantingen die hoofdzakelijk bestemd zijn voor de houtopbrengst, o.m. die van populier en wilg, uitgezonderd de korte-omloop-houtteelt (KOH) op gronden gelegen buiten de ruimtelijk kwetsbare gebieden. Homogene aanplantingen van cultuurpopulieren zijn bijgevolg bos tenzij ze ook in gebruik zijn als land- en tuinbouwgrond (graasweide of hooiweide) en beschouwd kunnen worden als boslandbouwsysteem (agroforestry);
- de grienden, uitgezonderd de wissenteelt met korte rotaties en productie als hoofddoel;
- hakhoutculturen: hakhout is een beheervorm van bos en wordt dus als bos beschouwd;
- struwelen, waarbij we enkel houtachtige struikvegetaties aantreffen en geen bomen, worden als bos beschouwd. Voorbeelden zijn: gagelstruweel, vochtig wilgenstruweel op venige of zure grond, zuur duinbos, duindoornstruweel, brem- en gaspeldoornstruweel, doornstruweel, spontaan struweel van allerlei aard, vochtig, meso- tot eutroof wilgenstruweel, ... Heide wordt in deze context niet beschouwd als struikachtige vegetatie.

Een perceel met bomen, bv. **een weide** kan in bepaalde gevallen als bos worden beschouwd. Het criterium dat gebruikt wordt om dit te bepalen is de bedekkingsgraad. Dit is de verhouding van de totale oppervlakte van alle kroonprojecties ten opzichte van de totale bosoppervlakte. Als die groter is dan 50%, geprojecteerd naar volgroeid stadium, dan spreken we van een bos. Bij een bedekkingsgraad <50% is er sprake van een open vegetatie al dan niet met verspreide bomen (bv. heide met vliegden) (geen bos), of een open plek binnen het bos (dat wel als bos wordt aanzien als het max. 3 hectare groot is en voor de helft omgeven is met bos).

**Het Natuurdecreet** (Decreet van 21 oktober 1997 betreffende het natuurbehoud en het natuurlijk milieu, gewijzigd door het decreet van 19 juli 2002). Een **natuurvergunning** is vereist onder andere voor het wijzigen van vegetaties en kleine landschapselementen in een reeks ruimtelijke bestemmingen en in gebieden met een bepaald beschermd statuut, tenzij de noodzakelijke werken reeds voorzien zijn in een goedgekeurd beheerplan, of indien dit vermeld staat in een andere vergunning (bijvoorbeeld een stedenbouwkundige vergunning) en indien het Agentschap voor Natuur en Bos deze vergunningsaanvraag heeft geadviseerd. Het is dus raadzaam expliciet om dit advies te vragen bij de overheid die de vergunning moet afleveren. In de meeste gevallen zal dat de gemeente zijn. Indien een (kap)machtiging werd verkregen vanwege het Agentschap voor Natuur en Bos volgens het Bosdecreet, is geen natuurvergunning meer nodig. Een natuurvergunning is eveneens niet nodig in de onmiddellijke omgeving van een vergunde woning of bedrijfsgebouw (100 meter of 50 meter in grondgebied, parkgebied, buffergebied of bosgebied). Voor het normaal onderhoud van vegetaties is verder ook geen natuurvergunning nodig. Voor bijkomende info zie [vergunningen](#) en [kleine landschapselementen](#)

Het **Soortenbesluit van 15 mei 2009** bepaalt welke soorten dieren en planten beschermd zijn in het Vlaamse Gewest (artikel 9), en welke wettelijke gevolgen verbonden zijn aan die beschermde status (artikel 10-18). In de eerste plaats worden een reeks handelingen vermeld die verboden zijn ten aanzien van beschermde soorten. Meer informatie is te vinden op [beschermde soorten](#).

Het **Landschappendecreet van 16 april 1996** en bijhorende uitvoeringsbesluiten. Deze wetgeving is van toepassing voor terreinen die gelegen zijn in beschermde landschappen.

Het **MER-besluit van 2004**. Onder andere voor bebossingen van meer dan 10 ha en voor ontbossingen van meer dan 3 ha dient een milieueffectenrapport (MER) te worden opgesteld.

Verder zijn er ook nog talrijke **subsidiemogelijkheden** voor het uitvoeren van bebossing of herbebossing en voor het bevorderen van ecologische bosfuncties.

**Tabel 12: Overzicht van de belangrijkste wetgevingen in het kader van fytoremediatie.**

Wetgeving	Motivatie
Bodemsaneringsdecreet en VLAREBO	Fytoremediatietechniek, Bodemsanering
Bosdecreet - buiten kwetsbaar gebied	Een beplanting met boomachtigen worden nooit als bos aanzien op voorwaarde dat binnen de 8 jaar geoogst wordt.
Bosdecreet - binnen kwetsbaar gebied	In bepaalde gevallen dient rekening te worden gehouden met de boscompensatieplicht. Eventueel kan in het kader van het bodemsaneringsproject via de Vlaamse regering een ontheffing op het verbod op ontbossing worden bekomen.
Landschapsdecreet	Voor een beplanting met boomachtigen is het noodzakelijk om een machtiging krachtens het landschapsdecreet te vragen bij het Agentschap Onroerend Erfgoed
Veldwetboek	Bij een beplanting met boomachtigen dient rekening gehouden te worden met de aanplant. Er dient steeds een afstand van 2 m tot aan de perceelgrens bewaard te blijven.
Materialendecreet en VLAREMA	Bij het afvoeren en verwerking van de biomassa
Omgevingsvergunningsdecreet en omgevingsvergunningsbesluit	Omgevingsvergunning - kapvergunning bij beplanting met boomachtigen

## **5 Procedure voor stopzetten en nazorg**

### **5.1 Uitgangspunt**

De sanering kan pas als beëindigd worden beschouwd na het bereiken van de vooropgestelde doelstellingen, zoals beschreven in het bodemsaneringsproject of na onderling overleg met de OVAM. Alle gegevens dienen te worden opgenomen in een eindevaluatieonderzoek.

### **5.2 Effectiviteit en efficiëntie van de sanering**

Tijdens de sanering dient de bodemsaneringsdeskundige na te gaan of het rendement van de fyto-remediatie(techniek) voldoende hoog is en of deze niet geoptimaliseerd dient te worden. Bij een onvoldoende effectieve sanering door de gekozen fyto-remediatietechniek dient mogelijk het saneringsontwerp te worden aangepast om tot de vooropgestelde saneringsdoelstellingen te komen. De bodemsaneringsdeskundige heeft hier een signaalfunctie. Hij dient aan respectievelijk de opdrachtgever en de OVAM aan te geven wanneer de sanering niet effectief en efficiënt genoeg verloopt.

Enkele fyto-remediatietechnieken (fytostabilisatie en fytohydraulica) zijn beheersmaatregelen. M.a.w. dit betreffen langdurige saneringen waarbij voorafgaandelijk geen specifieke terugsaneerwaarden werden vooropgesteld. Het beoogde doel is immers de verspreiding van de verontreiniging tegengaan. Men kan stellen dat bij deze saneringstechnieken de sanering als beëindigd kunnen worden beschouwd, wanneer er geen risico meer is of een stabiele eindtoestand verkregen wordt.

### **5.3 Eindevaluatieonderzoek**

Indien uit de resultaten van de sanering blijkt dat de vooropgestelde saneringsdoelstelling is bereikt, of een evenwichtssituatie is bereikt, of voldoende gemotiveerd kan worden waarom de sanering kan worden beëindigd, wordt een eindevaluatierapport worden opgemaakt. Dit rapport dient een duidelijk beeld te geven van de uitgevoerde bodemsaneringswerken (implementatie fyto-remediatietechniek) en de evolutie van de concentraties vanaf de implementatie van de fyto-remediatietechniek. Er dient duidelijk te worden aangegeven of het wenselijk is om de vegetatie te verwijderen of dat deze ter plaatse kan blijven.

De monitoring van de grond en/of het grondwater bij het beëindigen van de saneringswerken dient te gebeuren nadat de evenwichtssituatie in de bodem is bereikt.

Wanneer het een grondwaterverontreiniging betref, dienen ter controle van de efficiëntie van de saneringsmaatregelen minimaal de peilbuizen stroomafwaarts gecontroleerd te worden net als de peilbuizen in de kern van de verontreiniging met de hoogste concentratie aan verontreinigende stoffen. Er moet een eindevaluatieonderzoek ingediend worden bij de OVAM, rekening houdend met de bepalingen opgenomen in de standaardprocedure bodemsaneringswerken en nazorg.

Wanneer het een verontreiniging in het vaste deel van de aarde betref, dienen ter controle van de efficiëntie van de saneringsmaatregelen en ter bepaling van de eindsituatie, minimaal grondstalen genomen te worden in de kern van de verontreiniging met de hoogste concentraties aan stoffen conform de standaardprocedure bodemsaneringswerken en nazorg.

#### **5.4 Procedure voor stopzetting**

De bodemsaneringswerken kunnen als beëindigd worden beschouwd indien:

- De saneringsdoelstellingen werden gerealiseerd, conform de bepalingen van het conformiteitsattest en rekening houdend met het BATNEEC-principe;
- Een stabiele eindtoestand werd bekomen. Aangezien wordt geopteerd voor een in-situ saneringstechniek wordt de gerealiseerde eindtoestand bevestigd aan de hand van een monitoring.
- Indien aan bovenvermelde voorwaarden is voldaan, dient een eindevaluatieonderzoek aan de OVAM te worden overgemaakt. Dit onderzoek dient een beschrijving van de uitgevoerde werkzaamheden te bevatten en de resultaten waartoe de bodemsanering heeft geleid.

Wanneer de gewassen bij stopzetting verwijderd worden, dient ten behoeve van de verwerking van de verontreinigde biomassa rekening gehouden te worden met de bepalingen opgenomen in het bodemsaneringsproject.

Indien fyto-remediatie als beheersing wordt toegepast (fytohydraulica) of in geval langdurige fytoextractie wordt toegepast en de planten niet kunnen/mogen verwijderd worden, kan de sanering toch stopgezet worden en dienen gebruiksadviezen opgenomen worden voor de instandhouding van de planten.

Wanneer de bodemsaneringswerken zijn beëindigd wordt overgegaan tot nazorg of worden gebruiksadviezen geformuleerd zoals opgenomen in de standaardprocedure Beschrijvend Bodemonderzoek en Bodemsaneringsproject.

## 5.5 Nazorg

Wanneer wordt overgegaan tot nazorg wordt onderscheid gemaakt in functie van de kwaliteit van de bodem en maatregelen in functie van de instandhouding en goede werking van de saneringsinfrastructuur. Voorbeelden van maatregelen in

functie van de instandhouding en goede werking van de saneringsinfrastructuur bij fyto-remediatie zijn bijvoorbeeld:

- Controle en onderhoud van de begroeiing/gewassen;
- Instandhouding van afsluitingen;
- Instandhouding van de grondwatertafel (bv. blijvende verlaging van de grondwatertafel);
- Eventuele afvoer en/of verwerking van biomassa

Wanneer de nazorg is afgerond worden gebruiksadviezen geformuleerd zoals opgenomen in de standaardprocedure Beschrijvend Bodemonderzoek.

## 6 Veiligheid- en gezondheidsaspecten

Net zoals bij andere saneringstechnieken zijn ook tijdens de uitvoering van de fyto-remediatie de veiligheids- en gezondheidsaspecten belangrijk.

Bij de opmaak van het bodemsaneringsproject dient een risicoanalyse te worden opgesteld voor de gekozen fyto-remediatietechniek. Bij deze risicoanalyse dienen alle veiligheids- en gezondheidsrisico's te worden opgenomen. Veiligheid en gezondheid beginnen met een goed ontwerp en een goede planning van het project. De veiligheid begint dus in het bodemsaneringsproject. Bij de evaluatie van de verschillende uitvoerbare bodemsaneringstechnieken zal de veiligheid voor mens en milieu een belangrijke plaats hebben. Na de conform verklaring van het bodemsaneringsproject wordt overgegaan tot de bodemsaneringswerken.

Bij de uitvoering van bodemsaneringswerken speelt de zorg voor veiligheid, gezondheid en milieu een belangrijke rol. Deze kwaliteit wordt reeds jaren gewaarborgd door het Achilles zorgsysteem en het Achilles preventiesysteem. Elk bodemsaneringswerk zal moeten worden toegepast volgens het Achilles zorgsysteem zoals opgenomen in de standaardprocedure voor bodemsaneringswerken, eindevaluatieonderzoek en nazorg.

Bij de uitvoering van bodemsaneringswerken is het KB op de tijdelijke en mobiele werkplaatsen van kracht. Met andere woorden voor bodemsaneringswerken wordt een veiligheidscoördinator aangesteld. De aangestelde veiligheidscoördinator en de bodemsaneringsdeskundige zullen specifieke veiligheidsmaatregelen opleggen bij de uitvoering van de sanering. Deze dienen door de saneringsaannemer wordt gevolgd.

De potentiële veiligheid - en gezondheidsaspecten bij de uitvoering van de piloottesten en sanering met fyto-remediatietechnieken zijn gerelateerd aan de bodemverontreiniging op de site zelf, de verontreiniging opgenomen door de plant en de verontreiniging die via volatilisatie de plant verlaat. Aansluitend dient tijdens de uitvoering van de werken (graven, planten, zaaien, etc.) rekening gehouden met de veiligheid- en gezondheidsaspecten. Veel van deze risico's kunnen voorkomen worden door goed management en persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM's). Deze PBM's worden afgestemd op de aanwezige verontreiniging. Bij de standaard PBM's draagt elke werknemer een helm, een veiligheidsjas, veiligheidsschoenen en veiligheidshandschoenen. Afhankelijk van de aanwezige verontreiniging dienen deze standaard PBM's aangevuld te worden met aanvullende persoonlijke beschermingsmiddelen. Zo wordt ademhalingsbescherming (bv. volgelaatsmasker of halfgelaatsmasker) ingezet bij vluchtige componenten zoals gechloreerde koolwaterstoffen en vluchtige aromaten.

## Bijlage 1: Lijst van tabellen

Tabel 1: Voorstelling fyto-remediatie mechanismes. Tabel aangepast van Interstate Technical Regulatory Council (ITRC). 2009. Phytotechnology Technological and Regulatory Guidance and Decision tree.	26
Tabel 2: Klassieke fyto-remediatie vs micro-organismen geassisteerde fyto-remediatie en de rol van de toegevoegde micro-organismen	29
Tabel 3: Fytotechnologie toepassingen	33
Tabel 4: Overzicht belangrijkste indicatorstoffen meest voorkomende minerale olie-ontreinigingen in bodem en grondwater. (Uit risico-evaluatie, minerale olie-ontreiniging, OVAM 2007)	41
Tabel 5: Fytotechnologie matrix	48
Tabel 6: Meerwaarde fyto-remediatie	56
Tabel 7: Totale projectkosten saneringen (Green & Hoffnagle, 2004)	63
Tabel 8: Fytotechnologieën – kosten tov saneringsduur (Reynolds, 2011)	65
Tabel 9: Screeningsmatrix	75
Tabel 10: Matrix die samenvat welke labo- en serre experimenten moeten uitgevoerd worden voor welke haalbaarheidsanalyses, en een inschatting geeft betreft kostprijs en duurtijd.	92
Tabel 11: Samenvatting van monitoringsparameters, reden van monitoring en meetfrequentie	131
Tabel 12: Overzicht van de belangrijkste wetgevingen in het kader van fyto-remediatie.	138
Tabel 13: Plantenlijst organische verontreinigingen	154
Tabel 14: Plantenlijst anorganische verontreiniging	164



## Bijlage 2: Lijst van figuren

Figuur 1: Plant opname, omvorming en afbraak van verontreinigende stoffen in de plant. (groene-lever-model) Aangepast naar Van Aken et al. (2009).	17
Figuur 2: Endofyten in actie tegen organische en anorganische verontreinigingen. Aangepast van Weyens et al. 2009.	18
Figuur 3: Kolonisatie-routes van endofytische bacteriën. Aangepast van Van Aken et al. (2009).	19
Figuur 4: Mechanismen voor de opname en opslag van organische en anorganische verontreinigende stoffen, aangepast uit Pilon-Smits, 2005. PC: fytochelatines, OA: organische zuren, GSH: glutathion, MT: metallothioneïnes, NA: nicotianamine, Glu: glutamine zuur.	24
Figuur 5: Vereenvoudigde schetsen van fytoremediatie mechanismes. Aangepast uit "PHYTO, Principles and resources for site remediation and landscape design", door Kate Kennen en Niall Kirkwood, 2015.	27
Figuur 6: a) Inoculeren van populier op een kerosine-verontreinigde site. b) Bemonsteren en meten van trichloroethyleen evapotranspiratie door populieren. Foto: Nele Weyens, Universiteit Hasselt.	30
Figuur 7: Onbegroeide 'dode zone' op het schietveld van Helchteren. Foto: Sofie Thijs, Universiteit Hasselt.	40
Figuur 8: Overzicht van het fytoremediatie potentieel van sommige verontreinigende stoffen en bijhorend fytoremediatie mechanisme. Aangepast van Kate Kennon en Niall Kirkwood, 2015	48
Figuur 9: Conceptueel model voor ecosysteem herstel (aangepast van Whisenant 1999, en Hobbs en Harris, 2001).	59
Figuur 10: Fytotechnologieën – kosten tov saneringsduur (Reynolds, 2011).	61
Figuur 11: Workflow haalbaarheidsanalyse	67
Figuur 12: Tree-well koker om wortels doorheen hardere lagen te leiden en dieper verontreinigd grondwater te bereiken.	71
Figuur 13: Tree-well koker om wortels doorheen hardere lagen te leiden en dieper verontreinigd grondwater te bereiken.	71
Figuur 14: Beslissingsboom fytoremediatie mechanisme.	78
Figuur 15: Beslissingsboom voor planten.	79
Figuur 16: Beslissingsboom haalbaarheidsanalyses.	82
Figuur 17: Potexperimenten. Foto's: Nele Weyens, Universiteit Hasselt.	88
Figuur 18: Evapotranspiratie meetsysteem. Foto: Nele Weyens, Universiteit Hasselt.	90
Figuur 19: Voorbeeld fytostabilisatie Lommel-Maatheide (Zn, Cd, Pb) verontreiniging. A: Toestand voor fytostabilisatie; B: Verwijderen stenen; C: Bemesting; D: 2 weken na inzaaien; E: 5 jaar na inzaaien; F: 12 jaar na inzaaien. Foto's Jaco Vangronsveld, UHasselt	104
Figuur 20: Extractie bodembedekking met wilgen en populier en korteloophout oogst. Foto's: Jolien Janssen, Universiteit Hasselt.	109
Figuur 21: Fytoremediatie van een BTEX-verontreinigingspluim bij Ford Genk (Praktijkvoorbeeld 7). Foto Nele Weyens: Universiteit Hasselt.	111

Figuur 22: Multi-mechanisme op militair schietveld in Helchteren. Links, DOVO dode zone. Rechts, grasland op een herstellende locatie en bomenrijen in de verte die een buffer vormen. Foto's: Sofie Thijs, Universiteit Hasselt.	114
Figuur 23: Biofilters in de praktijk. Foto: proefcentrum PCfruit, Sint-Truiden).	117
Figuur 24: Fytobakken in de praktijk. Bron: proefcentrum PCfruit St-Truiden.	117
Figuur 25: Boring tot in sapstroom en SPME of SPS staalname. Bron: Joel Burken lab, Missouri S&T, USA.	129
Figuur 26: Beslissingsboom: Monitoring.	132

## Bijlage 3: Bibliografie

Aguirre-Sierra A, Bacchetti-De Gregoris T, Berna A, Salas JJ, Aragon C & Esteve-Nunez A (2016) Microbial electrochemical systems outperform fixed-bed biofilters in cleaning up urban wastewater. *Environmental Science: Water Research & Technology* 2: 984-993.

Andreoni V, Cavalca L, Rao MA, Nocerino G, Bernasconi S, Dell'Amico E, Colombo M & Gianfreda L (2004) Bacterial communities and enzyme activities of PAHs polluted soils. *Chemosphere* 57: 401-412.

Arslan M, Imran A, Khan QM & Afzal M (2015) Plant-bacteria partnerships for the remediation of persistent organic pollutants. *Environ Sci Pollut Res Int*.

Balseiro-Romero, M., Gkorezis, P., Kidd, P.S., Van Hamme, J., Weyens, N., Monterroso, C., et al. (2017). Characterization and degradation potential of diesel-degrading bacterial strains for application in bioremediation. *Int J Phytoremediation* 19(10), 955-963. doi: 10.1080/15226514.2017.1337065.

Banuelos GS, Lin ZQ, Wu L, & Terry N (2002) Phytoremediation of Selenium contaminated soils and waters: fundamentals and future prospects. *Rev Environ Health* 17(4): 291-306

Barac T, Taghavi S, Borremans B, Provoost A, Oeyen L, Colpaert JV, Vangronsveld J & van der Lelie D (2004) Engineered endophytic bacteria improve phytoremediation of water-soluble, volatile, organic pollutants. *Nat Biotechnol* 22: 583-588.

Barac T, Weyens N, Oeyen L, Taghavi S, van der Lelie D, Dubin D, Spliet M & Vangronsveld J (2009) Field note: hydraulic containment of a BTEX plume using poplar trees. *Int J Phytoremediation* 11: 416-424.

Beckers B, Op De Beeck M, Weyens N, Van Acker R, Van Montagu M, Boerjan W & Vangronsveld J (2016) Lignin engineering in field -grown poplar trees affects the endosphere bacterial microbiome. *Proc Natl Acad Sci U S A* 113: 2312-2317.

Bento, Fatima M., et al. "Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation." *Bioresource technology* 96.9 (2005): 1049-1055.

Bell TH, Joly S, Pitre FE & Yergeau E (2014a) Increasing phytoremediation efficiency and reliability using novel omics approaches. *Trends Biotechnol* 32: 271-280.

Bell TH, Yergeau E, D FJ, L GW & C WG (2013) Alteration of microbial community structure affects diesel biodegradation in an Arctic soil. *FEMS Microbiol Ecol* 85: 51-61.

Bell TH, El-Din Hassan S, Lauron-Moreau A, Al-Otaibi F, Hijri M, Yergeau E & St-Arnaud M (2014b) Linkage between bacterial and fungal rhizosphere communities in hydrocarbon-contaminated soils is related to plant phylogeny. *ISME J* 8: 331-343.

- Bell TH, Cloutier-Hurteau B, Al-Otaibi F, Turmel MC, Yergeau E, Courchesne F & St-Arnaud M (2015) Early rizosphere microbiome composition is related to the growth and Zn uptake of willows introduced to a former landfill. *Environ Microbiol* 17: 3025-3038.
- Berendsen RL, Pieterse CM & Bakker PA (2012) The rizosphere microbiome and plant health. *Trends Plant Sci* 17: 478-486.
- Berg G & Smalla K (2009) Plant species and soil type cooperatively shape the structure and function of microbial communities in the rizosphere. *FEMS Microbiol Ecol* 68: 1-13.
- Bonfante P & Anca IA (2009) Plants, mycorrhizal fungi, and bacteria: a network of interactions. *Annu Rev Microbiol* 63: 363-383.
- Burken JG, Vroblesky DA & Balouet JC (2011) Phytoforensics, dendrochemistry, and phytoscreening: new green tools for delineating contaminants from past and present. *Environ Sci Technol* 45: 6218-6226.
- Cabello-Conejo M, Becerra-Castro C, Prieto-Fernández A, Monterroso C, Saavedra-Ferro A, Mench M & Kidd P (2014) Rizobacterial inoculants can improve nickel phytoextraction by the hyperaccumulator *Alyssum pintodasilvae*. *Plant Soil* 379: 35-50.
- Chappel J (1998) Phytoremediation of TCE using *Populus*. Status report prepared for the United States Environmental Protection Agency Technology Innovation Office under a National Network of Environmental Management Studies Fellowship. 38 pp.
- Chaney RL, Angle JS, Broadhurst CL, Peters CA, Tappero RV & Sparks DL (2007) Improved understanding of hyperaccumulation yields commercial phytoextraction and phytomining technologies. *Journal of Environmental Quality* 36: 1429-1443.
- Compant S, Clément C & Sessitsch A (2010) Plant growth-promoting bacteria in the rizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biol Biochem* 42: 669-678.
- Coremans G, Verfaillie N & Tijssens G (2011) Groen en verhardingen zonder pesticiden; een haalbare kaart. *uitgave van VELT en INVERDE*
- Croes S, Weyens N, Janssen J, Vercamp H, Colpaert JV, Carleer R & Vangronsveld J (2013) Bacterial communities associated with *Brassica napus* L. grown on trace element-contaminated and non -contaminated fields: a genotypic and phenotypic comparison. *Microb Biotechnol* 6: 371-384.
- Cundy A, Bardos R, Puschenreiter M, Mench M, Bert V, Friesl-Hanl W, Müller I, Li X, Weyens N & Witters N (2016) Brownfields to green fields: Realising wider benefits from practical contaminant phytomanagement strategies. *J Environ Manage* 184: 67-77.
- De La Torre-Roche R, Hawthorne J, Musante C, Xing B, Newman LA, Ma X & White JC (2013) Impact of Ag Nanoparticle Exposure on p,p'-DDE Bioaccumulation by *Cucurbita pepo* (Zucchini) and *Glycine max* (Soybean). *Environ Sci Technol* 47: 718-725.

Eevers, Nele, et al. "Bio-and Phytoremediation of Pesticide-Contaminated Environments: A Review." *Advances in Botanical Research*. Vol. 83. Academic Press, 2017. 277-318.

Entry JA, Watrud LS & Reeves M (2001) Influence of organic amendments on the accumulation of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr from contaminated soil by three grass species. *Water, Air, Soil Pollut* 126: 385-398.

Fang Y, Cao X & Zhao L (2012) Effects of phosphorus amendments and plant growth on the mobility of Pb, Cu, and Zn in a multi-metal-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research* 19: 1659-1667.

Ferro, A, Gefel, M, Kjelogren, R, Lipson, D S, Zollinger, N, and Jackson, S. 2003. "Maintaining hydraulic control using deep rooted tree systems". In *Advances in biochemical engineering/biotechnology*, Edited by Tsao, D. Vol. 78, 125-156. Heidelberg,,Germany: Springer-Verlag.

Ari M. Ferro, Tarq Adham, Brett Berra & David Tsao (2013) Performance of Deep-Rooted Phreatophytic Trees at a site containing Total Petroleum Hydrocarbons, *International Journal of Phytoremediation*, 15:3; 232-244.

Fiorenza, S., F. Thomas, L. Rhea, and D. Tsao. 2005. "Groundwater Plume Delineation Using Tree Trunk Cores," presented at the 3rd International Phytotechnologies Conference, Atlanta.

Flathman, P. E, and G. R. Lanza. 1998. "Phytoremediation: Current Views on an Emerging Green Technology," *Journal of Soil Contamination* 7: 415–32.

Frick, C., R. Farrell, and J. Germida. 1999. *Assessment of Phytoremediation as an In Situ Technique for Cleaning Oil-Contaminated Sites*. Calgary, Alberta: Petroleum Technology Alliance of Canada.

Frick, C., R. Farrell, and J. Germida. 2000. "Phyto-Pet: A Database of Plants that Play a Role in the Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbons." CD-ROM developed by the University of Saskatchewan in Cooperation with Environment Canada and Petroleum Technology Alliance of Canada.

Fuhrmann M, Lasat MM, Ebbs SD, Kochian LV & Cornish J (2002) Uptake of cesium-137 and strontium-90 from contaminated soil by three plant species; application to phytoremediation. *Journal of Environmental Quality* 31: 904-909.

Gardea-Torresdey J, De la Rosa G, Peralta-Videa J, Montes M, Cruz-Jimenez G & Cano-Aguilera I (2005) Differential uptake and transport of trivalent and hexavalent chromium by tumbleweed (*Salsola kali*). *Arch Environ Contam Toxicol* 48: 225-232.

Gkorezis P, Daghighi M, Franzetti A, Van Hamme JD, Sillen W & Vangronsveld J (2016) The Interaction between Plants and Bacteria in the Remediation of Petroleum Hydrocarbons: An Environmental Perspective. *Frontiers in Microbiology* 7.

Gonzaga MIS, Santos JAG & Ma LQ (2006) Arsenic phytoextraction and hyperaccumulation by fern species. *Scientia Agricola* 63: 90-101.

Janssen J, Weyens N, Croes S, Beckers B, Meiresonne L, Van Peteghem P, Carleer R & Vangronsveld J (2015) Phytoremediation of metal contaminated soil using willow: exploiting plant-associated bacteria to improve biomass production and metal uptake. *Int J Phytoremediation* 00-00.

Kaimi, E., Mukaidani, T., & Tamaki, M. (2007). Screening of twelve plant species for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. *Plant production science* 10(2), 211-218.

Kennen, K., & Kirkwood, N. (2015). *Phyto: Principles and Resources for Site Remediation and Landscape Design* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315746661>

Kidd P, Mench M, Álvarez-López V, et al. (2015) Agronomic practices for improving gentle remediation of trace element-contaminated soils. *Int J Phytoremediation*.

Kuppens T, Van Dael M, Vanreppelen K, Thewys T, Yperman J, Carleer R, Schreurs S & Van Passel S (2015) Techno-economic assessment of fast pyrolysis for the valorization of short rotation coppice cultivated for phytoextraction. *Journal of Cleaner Production* 88: 336-344.

Lampis S, Santi C, Ciurli A, Andreolli M & Vallini G (2015) Promotion of arsenic phytoextraction efficiency in the fern *Pteris vittata* by the inoculation of As-resistant bacteria: a soil bioremediation perspective. *Frontiers in plant science* 6:80.

Lee M & Yang M (2010) Rizofiltration using sunflower (*Helianthus annuus* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L. var. *vulgaris*) to remediate uranium contaminated groundwater. *J Hazard Mater* 173: 589-596.

Lin C, Liu J, Liu L, Zhu T, Sheng L & Wang D (2009) Soil amendment application frequency contributes to phytoextraction of lead by sunflower at different nutrient levels. *Environ Exp Bot* 65: 410-416.

Lodewyckx C, Mergeay M, Vangronsveld J, Clijsters H & Van der Lelie D (2002) Isolation, characterization, and identification of bacteria associated with the zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* subsp. *calaminaria*. *Int J Phytoremediation* 4: 101-115.

Lombi E, Zhao F, Dunham S & McGrath S (2001) Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils. *Journal of Environmental Quality* 30: 1919-1926.

Ma Y, Prasad MN, Rajkumar M & Freitas H (2011) Plant growth promoting rizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. *Biotechnol Adv* 29: 248-258.

Mahendra, S. and L.A. -Alvarez-Cohen. 2006. Kinetics of 1,4-Dioxane Biodegradation by Monooxygenase-Expressing Bacteria *Environ. Sci. Technol.* 40, 5435-5442.

Meagher RB, Smith AP, Pischke M, Kim T, Dhankher OP, Heaton ACP (2007) Multigene strategies for engineering the phytoremediation of mercury and arsenic. *Biotechnology and sustainable agriculture 2006 and beyond* p49 doi 10.1007/978-1-4020-6636-1\_4

Mendes R, Garbeva P & Raaijmakers JM (2013) The rizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. *FEMS Microbiol Rev* 37: 634-663.

Mengoni A, Grassi E, Barzanti R, Biondi EG, Gonnelli C, Kim CK & Bazzicalupo M (2004) Genetic diversity of bacterial communities of serpentine soil and of rizosphere of the nickel-hyperaccumulator plant *Alyssum bertolonii*. *Microb Ecol* 48: 209-217.



- Mesa V, Navazas A, González-Gil R, González A, Weyens N, Lauga B, Gallego JLR, Sánchez J & Peláez AI (2017) Use of endophytic and rizosphere bacteria to improve phytoremediation of arsenic-contaminated industrial soils by autochthonous *Betula celtiberica*. *Appl Environ Microbiol*.
- Mezzari, M.P., Zimmermann, D.M.H., Corseuil, H.X., and Nogueira, A.V. (2011). Potential of grasses and rizosphere bacteria for bioremediation of diesel-contaminated soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 35(6), 2227-2236.
- Mleczek M, Gąsecka M, Drzewiecka K, Goliński P, Magdziak Z & Chadzinikolau T (2013) Copper phytoextraction with willow (*Salix viminalis* L.) under various Ca/Mg ratios. Part 1. Copper accumulation and plant morphology changes. *Acta Physiologiae Plantarum* 35: 3251-3259.
- Newman LA & Reynolds CM (2005) Bacteria and phytoremediation: new uses for endophytic bacteria in plants. *Trends Biotechnol* 23: 6-8.
- Nichols, Elizabeth Guthrie, et al. "Phytoremediation of a Petroleum-Hydrocarbon Contaminated Shallow Aquifer in Elizabeth City, North Carolina, USA." *Remediation Journal* 24.2 (2014): 29-46.
- Olsen, P. E., and J. S. Fletcher. 1999. "Field Evaluation of Mulberry Root Structure with Regard to Phytoremediation," *Bioremediation Journal* 3(1): 27–33.
- Page AP, Yergeau E & Greer CW (2015) *Salix purpurea* Stimulates the Expression of Specific Bacterial Xenobiotic Degradation Genes in a Soil Contaminated with Hydrocarbons. *PLoS One* 10: e0132062.
- Pal R & Rai J (2010) The phytoextraction potential of water hyacinth (*E. crassipes*): removal of selenium and copper. *Chem Ecol* 26: 163-172.
- Phillips C, Marden M & Suzanne L (2014) Observations of root growth of young poplar and willow planting types. *New Zealand Journal of Forestry Science* 44: 15.
- Pilon-Smith E, Banuelos G & Parker D (2013) Uptake, metabolism, and volatilization of selenium by terrestrial plants. *Drainage and Salinity in the San Joaquin Valley: Science, Technology and Policy* 147-164.
- Porteous Moore F, Barac T, Borremans B, Oeyen L, Vangronsveld J, van der Lelie D, Campbell CD & Moore ER (2006) Endophytic bacterial diversity in poplar trees growing on a BTEX-contaminated site: the characterisation of isolates with potential to enhance phytoremediation. *Syst Appl Microbiol* 29: 539-556.
- Pulford I, Watson C & McGregor S (2001) Uptake of chromium by trees: prospects for phytoremediation. *Environ Geochem Health* 23: 307-311.
- Quiza L, St-Arnaud M & Yergeau E (2015) Harnessing phytomicrobiome signaling for rizosphere microbiome engineering. *Front Plant Sci* 6: 507.
- Ramos JL, Gonzalez-Perez MM, Caballero A & van Dillewijn P (2005) Bioremediation of polynitrated aromatic compounds: plants and microbes put up a fight. *Curr Opin Biotechnol* 16: 275-281.
- Ramos, J.L., Duque, E., van Dillewijn, P., Daniels, C., Krell, T., Espinosa-Urgel, M., et al. (2010). "Removal of Hydrocarbons and Other Related Chemicals via the Rizosphere of Plants," in *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*, ed. K. Timmis. Springer Berlin Heidelberg), 2575-2581.



Rhee Young J, Hillier S & Gadd Geoffrey M (2012) Lead Transformation to Pyromorphite by Fungi. *Curr Biol* 22: 237-241.

Russell, K. 2005. The Use and Effectiveness of Phytoremediation to Treat Persistent Organic Pollutants. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Technology Innovation and Field Services Division.

Rylott EL & Bruce NC (2009) Plants disarm soil: engineering plants for the phytoremediation of explosives. *Trends Biotechnol* 27: 73-81.

Rylott EL, Lorenz A & Bruce NC (2011) Biodegradation and biotransformation of explosives. *Curr Opin Biotechnol* 22: 434-440.

Rylott EL, Budarina MV, Barker A, Lorenz A, Strand SE & Bruce NC (2011) Engineering plants for the phytoremediation of RDX in the presence of the co-contaminating explosive TNT. *New Phytol* 192: 405-413.

Sessitsch A, Kuffner M, Kidd P, Vangronsveld J, Wenzel WW, Fallmann K & Puschenreiter M (2013) The role of plant-associated bacteria in the mobilization and phytoextraction of trace elements in contaminated soils. *Soil Biol Biochem* 60: 182-194.

Slater H, Gouin T & Leigh MB (2011) Assessing the potential for rhizoremediation of PCB contaminated soils in northern regions using native tree species. *Chemosphere* 84: 199-206.

Sylvestre M, Macek T & Mackova M (2009) Transgenic plants to improve rhizoremediation of polychlorinated biphenyls (PCBs). *Curr Opin Biotechnol* 20: 242-247.

Taghavi S, Barac T, Greenberg B, Borremans B, Vangronsveld J & van der Lelie D (2005) Horizontal gene transfer to endogenous endophytic bacteria from poplar improves phytoremediation of toluene. *Appl Environ Microbiol* 71: 8500-8505.

Tardif S, Yergeau E, Tremblay J, Legendre P, Whyte LG & Greer CW (2016) The Willow Microbiome Is Influenced by Soil Petroleum-Hydrocarbon Concentration with Plant Compartment-Specific Effects. *Front Microbiol* 7: 1363.

Thijs S, Langill T & Vangronsveld J (2017) The Bacterial and Fungal Microbiota of Hyperaccumulator Plants: Small Organisms, Large Influence. *Adv Bot Res*, p. Academic Press.

Thijs S, Sillen W, Rineau F, Weyens N & Vangronsveld J (2016) Towards an Enhanced Understanding of Plant-Microbiome Interactions to Improve Phytoremediation: Engineering the Metaorganism. *Front Microbiol* 7: 341.

Thijs S, Weyens N, Sillen W, Gkorezis P, Carleer R & Vangronsveld J (2014a) Potential for plant growth promotion by a consortium of stress-tolerant 2,4-dinitrotoluene-degrading bacteria: isolation and characterization of a military soil. *Microb Biotechnol* 7: 294-306.

Thijs S, Van Hamme J, Gkorezis P, Rineau F, Weyens N & Vangronsveld J (2014b) Draft Genome Sequence of *Raoultella ornithinolytica* TNT, a Trinitrotoluene-Denitrating and Plant Growth-Promoting Strain Isolated from Explosive-Contaminated Soil. *Genome announcements* 2.3 (2014): e00491-14

Thijs S, Van Dillewijn P, Sillen W, et al. (2014c) Exploring the rizospheric and endophytic bacterial communities of *Acer pseudoplatanus* growing on a TNT-contaminated soil: towards the development of a rizocompetent TNT-detoxifying plant growth promoting consortium. *Plant Soil* 385: 15-36.

Thijs, S., Sillen, W., Truyens, S., Beckers, B., van Hamme, J., van Dillewijn, P., et al. (2018). The Sycamore Maple Bacterial Culture Collection From a TNT Polluted Site Shows Novel Plant-Growth Promoting and Explosives Degrading Bacteria. *Frontiers in Plant Science* 9(1134). doi: 10.3389/fpls.2018.01134.

Van Den Bos, A. 2002. Phytoremediation of Volatile Organic Compounds in Groundwater: Case Studies in Plume Control. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Technology Innovation Office.

van der Lelie D, Barac T, Taghavi S & Vangronsveld J (2005) Response to Newman: New uses of endophytic bacteria to improve phytoremediation. *Trends Biotechnol* 23: 8-9.

Vangronsveld J, Herzig R, Weyens N, Boulet J, Adriaensen K, Ruttens A, Thewys T, Vassilev A, Meers E, Nehnevajova E, van der Lelie D & Mench M (2009) Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environmental Science and Pollution Research* 16: 765-794.

Van Hamme JD, Singh A & Ward OP (2003) Recent Advances in Petroleum Microbiology. *Microbiol Mol Biol Rev* 67: 503-549.

Van Slycken S, Witters N, Meiresonne L, Meers E, Ruttens A, Van Peteghem P, Weyens N, M. G. Tack F & Vangronsveld J (2013) Field Evaluation of Willow Under Short Rotation Coppice for Phytomanagement of Metal-Polluted Agricultural Soils. *Int J Phytoremediation* 15: 677-689.

Viessman, W., G. L. Lewis, and J. W. Knapp. 1989. *Introduction to Hydrology*, 3rd ed. New York: Harper & Row.

Wang, Y. Y., B. M. Biber, and C. Yu. 1993. A Compilation of Radionuclide Transfer Factors for Plants, Meats, Milk, and Aquatic Food Pathways and the Suggested Default Values for the RESRAD Code. ANL/EAIS/TM-103. Argonne, Ill.: Argonne National Laboratory, Environmental Assessment and Information Sciences Division.

Wang X, White JC, Gent MP, Iannucci-Berger W, Eitzer BD & Mattina MI (2004) Phytoextraction of weathered p, p'-DDE by zucchini (*Cucurbita pepo*) and cucumber (*Cucumis sativus*) under different cultivation conditions. *Int J Phytoremediation* 6: 363-385.

Weyens N, van der Lelie D, Taghavi S, Newman L & Vangronsveld J (2009) Exploiting plant-microbe partnerships to improve biomass production and remediation. *Trends Biotechnol* 27: 591-598.

Weyens N, Croes S, Dupae J, Newman L, van der Lelie D, Carleer R & Vangronsveld J (2010) Endophytic bacteria improve phytoremediation of Ni and TCE co-contamination. *Environ Pollut* 158: 2422-2427.

Weyens N, Taghavi S, Barac T, van der Lelie D, Boulet J, Artois T, Carleer R & Vangronsveld J (2009) Bacteria associated with oak and ash on a TCE-contaminated site: characterization of isolates with potential to avoid evapotranspiration of TCE. *Environ Sci Pollut Res Int* 16: 830-843.

- Weyens N, Van der Lelie D, Artois T, Smeets K, Taghavi S, Newman L, Carleer R & Vangronsveld J (2009) Bioaugmentation with engineered endophytic bacteria improves contaminant fate in phytoremediation. *Environ Sci Technol* 43: 9413-9418.
- Weyens N, Truyens S, Dupae J, Newman L, Taghavi S, van der Lelie D, Carleer R & Vangronsveld J (2010) Potential of the TCE-degrading endophyte *Pseudomonas putida* W619-TCE to improve plant growth and reduce TCE phytotoxicity and evapotranspiration in poplar cuttings. *Environ Pollut* 158: 2915-2919.
- Weyens N, Beckers B, Schellingen K, Ceulemans R, van der Lelie D, Newman L, Taghavi S, Carleer R & Vangronsveld J (2015) The Potential of the Ni Resistant TCE-Degrading *Pseudomonas putida* W619-TCE to Reduce Phytotoxicity and Improve Phytoremediation Efficiency of Poplar Cuttings on A Ni-TCE Co-Contamination. *Int J Phytoremediation* 17: 40-48.
- Wiszniewska A, Hanus-Fajerska E, Muszynska E & Ciarkowska K (2016) Natural Organic Amendments for improved Phytoremediation of Polluted Soils: a review of Recent Progress. *Pedosphere* 26(1): 1-12
- White JC, Parrish ZD, Gent MP, Iannucci-Berger W, Eitzer BD, Isleyen M & Incorvia Mattina M (2006) Soil Amendments, Plant Age, and Intercropping Impact,  $\gamma$ -DDE Bioavailability to *Cucurbita pepo*. *Journal of environmental quality* 35: 992-1000.
- White JC, Wang X, Gent MPN, Iannucci-Berger W, Eitzer BD, Schultes NP, Arienzo M & Mattina MI (2003) Subspecies-Level Variation in the Phytoextraction of Weathered p, p  $\gamma$ -DDE by *Cucurbita pepo*. *Environ Sci Technol* 37: 4368-4373.
- Yousaf, S., Afzal, M., Reichenauer, T.G., Brady, C.L., and Sessitsch, A. (2011). Hydrocarbon degradation, plant colonization and gene expression of alkane degradation genes by endophytic *Enterobacter ludwigii* strains. *Environmental Pollution* 159(10), 2675-2683.
- Yousaf, S., Ripka, K., Reichenauer, T.G., Andria, V., Afzal, M., and Sessitsch, A. (2010). Hydrocarbon degradation and plant colonization by selected bacterial strains isolated from Italian ryegrass and birdsfoot trefoil. *J Appl Microbiol* 109(4), 1389-1401.
- Zeeb, B., J. Amphlett, A. Rutter, and K. Reimer. 2006. "Potential for Phytoremediation of Polychlorinated Biphenyl (PCB)-Contaminated Soil," *International Journal of Phytoremediation* 8(3): 199–221.
- Zhu X, Ni X, Liu J & Gao Y (2014) Application of Endophytic Bacteria to Reduce Persistent Organic Pollutants Contamination in Plants. *CLEAN - Soil, Air, Water* 42: 306-310.

# Bijlage 4: Plantenlijsten

**Tabel 13: Plantenlijst organische verontreinigingen**

Latijn	Nederlands	Contaminant	Inheems in	Worteldiepte	Successiestadium	Plantdichtheid
<i>Acer platanoides</i>	Noorse esdoorn	BTEX	Europa	Eerder diep	Bos	
<i>Alnus glutinosa</i>	Zwarte els	Motorolie	Europa en Noord Afrika	Eerder diep	Bos	
<i>Avena sativa</i>	Haver	TPH	Europa	Tot 50 cm	Grasland	
<i>Betula pendula</i>	Ruwe berk	PAK TCE	Europa	Eerder vlak	Bos	
<i>Brassica juncea</i>	Indische mosterd	PAK	Azië	90 tot 120 cm	Pionier	
<i>Brassica napus</i>	Koolzaad	chloorpyrifos	Europa		Pionier	
<i>Bromus inermis</i>	Kweekdravik	TPH	Europa en Azië	?	Grasland	
<i>Chrysanthemum leucanthemum</i>	Gewone margriet	PCB	Europa		Grasland	

Latijn	Nederlands	Contaminant	Inheems in	Worteldiepte	Successiestadium	Plantdichtheid
<i>Cucurbita pepo</i>	Courgette	DDE DDT Chlordaan PCDD PCDF				
<i>Dactylis glomerata</i>	Kropaar	TPH PAK TNT	Europa	?	Grasland	7 tot 9 per m <sup>2</sup>
<i>Daucus carota</i>	Wilde peen	PCB	N Amerika		Grasland	
<i>Elytrigia repens</i>	Kweek	TPH	Europa Azië	15 tot 20 cm	Grasland	
<i>Festuca spp.</i>	Zwenkgras	TPH PAK BTEX	Wereldwijd		Grasland	

Latijn	Nederlands	Contaminant	Inheems in	Worteldiepte	Successiestadium	Plantdichtheid
<i>Festuca arundinacea</i>	Rietzwenkgras	Antraceen Ethyleenglycol Fluorantheen Fenantreen Pyreen TPH PAK TNT PCB	Europa	?	Grasland	6 tot 12 per m <sup>2</sup>
<i>Festuca pratensis</i>	Beemdlangbloem	TPH	Europa	?	Grasland	6 tot 12 per m <sup>2</sup>
<i>Festuca rubra</i>	Rood zwenkgras	TPH PAK	Europa Noord Amerika	?	Grasland	6 tot 12 per m <sup>2</sup>
<i>Helianthus annuus</i>	Zonnebloem	PAK TNT	Amerika	Tot 50 cm	Pionier	3 tot 4 per m <sup>2</sup>
<i>Iris pseudacorus</i>	Gele lis	Atrazine	Europa Afrika Azië		Ruigte	6 tot 9 per m <sup>2</sup>
<i>Juncus effusus</i>	Pitrus	PAK	Wereldwijd	?	Ruigte	

Latijn	Nederlands	Contaminant	Inheems in	Worteldiepte	Successiestadium	Plantdichtheid
<i>Lemna minor</i>	Klein kroos	Demeton-8-methyl Malathion Metolachloor Kopersulfaat Dimethomorph Flazasulfron Isoproturon Glyphosaat	Wereldwijd			
<i>Linum usitatissimum</i>	Vlas	TPH 2,4 D	Europa Azië	1 m	Ruigte	
<i>Lolium perenne</i>	Engels raaigras	TPH PAK BTEX Pentachloorfenol	Europa Azië	25 cm	Grasland	
<i>Lotus corniculatus</i>	Gewone rolklaver	TPH PAK	Europa	Tot 1 m	Grasland	

Latijn	Nederlands	Contaminant	Inheems in	Worteldiepte	Successiestadium	Plantdichtheid
<i>Medicago sativa</i>	Luzerne	MTBE Ethyleenglycol PAK TPH Benzeen DDE	Europa	Tot 4,5 m	Ruigte	
<i>Melilotus officinalis</i>	Akkerhoningklaver	TPH PAK	Europa Azië	Tot 1 m	Grasland	
<i>Miscanthus giganteus</i>	Olifantengras	PAK	Japan	Tot 25 cm	Ruigte	
<i>Phaseolus vulgaris</i>	Gewone boon	TNT DDE	C Amerika		Pionier	
<i>Phragmites australis</i>	Riet	BTEX TPH MTBE Bromoform Chloorbenzeen Chloroform DCE PCE TCE TNT	Europa Azië		Ruigte	3 tot 5 per m <sup>2</sup>



Latijn	Nederlands	Contaminant	Inheems in	Worteldiepte	Successiestadium	Plantdichtheid
<i>Pinus sylvestris</i>	Grove den	TPH	Europa Azië	Tot enkele m	Bos	
<i>Plantago major</i>	Breedbladige weegbree	Imidacloprid	Europa Azië		Grasland	
<i>Platanus occidentalis</i>	Westerse plataan	TCE	Amerika	Eerder diep	Bos	
<i>Poa pratensis</i>	Veldbeemdgras	TPH PAK	Europa		Grasland	
<i>Poaceae</i>	Grassen	BTEX TPH PAK	Wereldwijd	Tot 50 cm	Grasland	
<i>Polygonum persicaria</i>	Perzikkruid	PCB	Eurazië		Pionier	

Latijn	Nederlands	Contaminant	Inheems in	Worteldiepte	Successiestadium	Plantdichtheid
<i>Populus spp.</i>	Populierensoorten en hybriden	BTEX PAK TPH MTBE PCE TCE Pentachloorfenol Trichlorobenzeen Koolstoftetrachloride 1,4 Dioxaan TNT Alachloor Dinoseb Atrazine Dioxaan Metolachloor Metribuzine Chlorpyrifos			Bos	
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Valse acacia	PAK motorolie	N Amerika	Eerder vlak	Bos	
<i>Rumex crispus</i>	Krulzuring	PCB	Eurazië		Ruigte	

Latijn	Nederlands	Contaminant	Inheems in	Worteldiepte	Successiestadium	Plantdichtheid
<i>Salix alba</i>	Schietwilg	BTEX Trifluralin Metalaxyl	Europa Azië	Eerder vlak	Bos	
<i>Salix babylonica</i>	Treurwilg	MTBE TBA	China		Bos	
<i>Salix caprea</i>	Boswilg	PCB	Europa Azië		Bos	
<i>Salix spp.</i>	Wilg	TPH BTEX PAK PCE TCE Chlorpyrifos		Eerder vlak	Bos	
<i>Salix viminalis</i>	Katwilg	PAK	Europa Azië		Bos	
<i>Sambucus nigra</i>	Vlier	Trifluralin Metalaxyl	Europa Azië Afrika		Bos	

Latijn	Nederlands	Contaminant	Inheems in	Worteldiepte	Successiestadium	Plantdichtheid
<i>Secale cereale</i>	Rogge	Pyreen TPH PAK	Azië	(vrij diep)	Grasland	
<i>Solidago spp.</i>	Guldenroede	TPH PAK PCE TCE	Europa N Amerika Z Amerika Azië		Ruigte	
<i>Trifolium pratense</i>	Rode klaver	TPH	Europa		Grasland	
<i>Trifolium repens</i>	Witte klaver	TPH PAK BTEX PCB	Europa		Grasland	
<i>Triticum spp.</i>	Tarwe	TPH 2,4 D	Azië		Grasland	

Latijn	Nederlands	Contaminant	Inheems in	Worteldiepte	Successiestadium	Plantdichtheid
<i>Typha spp.</i>	Lisdodde	Minerale olie Diesel Sulfonaat Chloride Ethoxylaar TNT Atrazine	Europa N Amerika Azië		Ruigte	
<i>Zea mays</i>	Maïs	TPH Sulfonaat Chloride Ethoxylaar TNT Alachlor Atrazine Diazinon Temik	N Amerika C Amerika		Pionier	

**Tabel 14: Plantenlijst anorganische verontreiniging**

Latijn	Nederlands	Contaminant	Inheems in	Wortel-diepte	Successie-stadium	Plant-dichtheid
<i>Arabidopsis halleri</i>	Kruipende steenkers	Cd (hyperaccumulator) Zn (hyperaccumulator)	Europa		Ruigte (stenige substraten)	
<i>Beta vulgaris</i>	Biet	As Cs	mediterraan		Pionier	
<i>Brassica juncea</i>	Indische mosterd	As Cu Cd Cr (VI) Ni (hyperaccumulator) Zn Se 137Cs 238U	Azië	90 tot 120 cm	Pionier	
<i>Brassica napus</i>	Koolzaad	Cd Cu Zn	Europa		Pionier	
<i>Festuca arundinacea</i>	Rietzwenkgras	Zn Se 137Cs	Europa	?	Grasland	6 tot 12 per m <sup>2</sup>

Latijn	Nederlands	Contaminant	Inheems in	Wortel-diepte	Successie-stadium	Plant-dichtheid
<i>Festuca rubra</i>	Rood zwenkgras	134Cs	Europa Noord Amerika	?	Grasland	6 tot 12 per m <sup>2</sup>
<i>Helianthus annuus</i>	Zonnebloem	As Cd Zn Ni I U 226Ra 238U 90Sr 137Cs	Amerika	Tot 50 cm	Pionier	3 tot 4 per m <sup>2</sup>
<i>Linum usitatissimum</i>	Vlas	Cd	Europa Azië	1 m	Ruigte	
<i>Lolium perenne</i>	Engels raaigras	134Cs 58Co	Europa Azië	25 cm	Grasland	
<i>Medicago sativa</i>	Luzerne	Zn Cd Ni	Europa	Tot 4,5 m	Ruigte	
<i>Phaseolus vulgaris</i>	Gewone boon	As	C Amerika		Pionier	

Latijn	Nederlands	Contaminant	Inheems in	Wortel-diepte	Successie-stadium	Plant-dichtheid
<i>Phragmites australis</i>	Riet	Th U 137Cs	Europa Azië		Ruigte	3 tot 5 per m <sup>2</sup>
<i>Populus spp.</i>	Populierensoorten en hybriden	As Zn Cd			Bos	
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Douglas	Cd	N Amerika		Bos	
<i>Pteris cretica</i>	Lintvaren	As (hyperaccumulator)	Europa Azië Afrika		Ruigte/Bos (op stenige substraten)	
<i>Rumex acetosa</i>	Veldzuring	Zn (hyperaccumulator) 137Cs	Europa		Grasland	
<i>Salix spp.</i>	Wilg	Cd Zn 137Cs 90Sr		Eerder vlak	Bos	
<i>Salix viminalis</i>	Katwilg	Cd Zn	Europa Azië		Bos	



Latijn	Nederlands	Contaminant	Inheems in	Wortel-diepte	Successie-stadium	Plant-dichtheid
<i>Sedum alfredii</i>	Sedum	Cd Zn	Azië			
<i>Tagetes</i>	Afrikaantje	As	C Amerika		Pionier	
<i>Trifolium repens</i>	Witte klaver	As 134Cs	Europa		Grasland	
<i>Typha spp.</i>	Lisdodde	226Ra	Europa N Amerika Azië		Ruigte	
<i>Zea mays</i>	Maïs	Cd	N Amerika C Amerika		Pionier	

