

**CO₂ -calculator voor
bodemsaneringsprojecten –
Fase 1:
voorstel aanpak
Vlaanderen**

**SAMEN MAKEN WE
MORGEN MOOIER**



CO2-calculator voor bodemsaneringsprojecten

**Fase 1: voorstel aanpak
Vlaanderen**



Documentbeschrijving

1. *Titel publicatie*
CO₂-calculator voor bodemsaneringsprojecten Fase 1: voorstel aanpak Vlaanderen

2. *Verantwoordelijke Uitgever*
Danny Wille, OVAM, Stationsstraat 110, 2800 Mechelen
3. *Wettelijk Depot nummer*
D/2011/5024/70

4. *Aantal bladzijden*
69
5. *Aantal tabellen en figuren*
3 tabellen, 5 figuren

6. *Prijs**
n.v.t.
7. *Datum Publicatie*
oktober 2011

8. *Trefwoorden*
bodemsanering, levenscyclusanalyse, CO₂-emissie, duurzaamheid, BATNEEC-afweging

9. *Samenvatting*
Een overzicht wordt gegeven van bestaande literatuur en methoden rond het berekenen van de "CO₂-voetafdruk" van een bodemsanering. Deze wordt gedefinieerd als alle CO₂ die vrijkomt bij uitvoering van de bodemsaneringswerken o.a. door de verbranding van fossiele brandstoffen, elektriciteitsverbruik van pompen, zuiveringsinstallaties, ... en materiaalverbruik voor leidingen, injectie, etc. De CO₂-uitstoot ten gevolge van de productie van graafmachines, vrachtwagens, etc. wordt niet meegenomen. Door de totale CO₂-voetafdruk van verschillende saneringsvarianten te vergelijken, kan worden afgeleid welke de meest "CO₂-vriendelijke" saneringsvariant is. Door na te gaan welke processen/onderdelen binnen de saneringsvariant veel CO₂ uitstoten, kunnen alternatieven worden gezocht. Op deze wijze kan de berekening van de CO₂-uitstoot een rol spelen bij het ontwerpen van 'groenere' saneringsvarianten.

10. *Begeleidingsgroep en/of auteur*
Touchant K., Lookman R., Bronders J. (VITO, auteurs), De Mulder S., Van Gestel G., Bruneel N. (OVAM)

11. *Contactperso(n)en*
Sven De Mulder, Griet Van Gestel, Nick Bruneel

12. *Andere titels over dit onderwerp*
LCA toepassingen in bodemsaneringsprojecten – Literatuurstudie
CO₂-calculator voor bodemsaneringsprojecten – Aanbevelingen voor opname in de MCA

Gegevens uit dit document mag u overnemen mits duidelijke bronvermelding.

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

0 Samenvatting

Bij de keuze van een bodemsaneringstechniek zijn vaak meerdere partijen (o.a. eigenaar van de site, de deskundige, de overheid, aannemers en ev. omwonenden (buurtcomité) betrokken. Tot nog toe werd bij de keuze van de saneringstechniek(en) voornamelijk gekeken naar minimalisatie van de lokale risico's (risicogebaseerde aanpak), de saneringsduur en financiële en technische overwegingen. De ecologische voetafdruk van saneringsprojecten en het gebruik van gerecycleerde materialen en hernieuwbare energie krijgen echter steeds meer aandacht evenals de ontwikkeling van geschikte rekeninstrumenten om dit te begroten. Het doel van deze eerste projectfase was om bestaande informatie te verzamelen en samen te vatten m.b.t. de CO₂-uitstoot ten gevolge van saneringen (de zogenaamde CO₂-voetafdruk).

In voorliggend rapport wordt een overzicht gegeven van bestaande literatuur en methoden rond het berekenen van de zogenaamde "CO₂-voetafdruk" van een bodemsanering. Deze wordt gedefinieerd als alle CO₂ die vrijkomt bij uitvoering van de bodemsaneringswerken o.a. door de verbranding van fossiele brandstoffen en elektriciteitsverbruik van pompen, zuiveringsinstallaties, e.d. en materiaalverbruik voor leidingen, injectie e.d. De CO₂-uitstoot ten gevolge van de productie van graafmachines, vrachtwagens, e.d. wordt niet meegenomen.

Andere milieuparameters, zoals de uitstoot van fijn stof, e.d. worden eveneens buiten beschouwing gelaten. Deze aspecten komen wel aan bod bij de ruimere, parallelle studie die VITO uitvoert rond de toepassing van LCA (LevensCyclus Analyse) in bodemsanering.

Voor de berekening van een CO₂-voetafdruk van een volledig saneringsproject dienen veel gegevens zoals saneringsparameters, basiselementen, conversiefactoren, energie- en brandstofverbruiken van toestellen en machines, ... verzameld en geïnventariseerd te worden en dit vergt een aanzienlijke inspanning. Dit proces kan gestroomlijnd worden door de informatie te organiseren in CO₂-rekentools. Verschillende buitenlandse instanties hebben reeds rekentools ontwikkeld. Een aantal van de beschikbare rekentools zullen in de volgende projectfase nader geëvalueerd worden aan de hand van een gevalstudie. Daarbij zullen de uitgangspunten, de randvoorwaarden, de geselecteerde saneringsparameters en de in te voeren variabelen van de rekenmodellen nader bestudeerd worden en zal nagegaan worden of deze ook van toepassing zijn voor Vlaanderen en/of aangepast dienen te worden.

Uit de literatuurstudie kon ook afgeleid worden dat verschillende CO₂-voetafdrukken berekend en geanalyseerd kunnen worden. Door de totale CO₂-voetafdruk van verschillende saneringsvarianten te vergelijken, kan afgeleid worden welke de meest "CO₂-vriendelijke" saneringsvariant is. Door na te gaan welke processen/onderdelen binnen de saneringsvariant veel CO₂ uitstoten, kunnen alternatieven gezocht worden en op deze wijze kan de CO₂-uitstoot een rol spelen bij het ontwerpen van 'groenere' saneringsvarianten. Hiervoor dient niet alleen de totale CO₂-voetafdruk van een saneringsproject bepaald te worden, maar dient de bijdrage van on-site activiteiten, transport en off-site activiteiten op de CO₂-voetafdruk geanalyseerd te worden en/of de CO₂-voetafdruk per saneringsonderdeel. Aan de hand van een gevoeligheidsanalyse kan ook nagegaan worden aan welke invoervariabelen de CO₂-voetafdruk gevoelig is. In de volgende projectfase zullen ook een aantal aanbevelingen worden geformuleerd over hoe de geselecteerde en eventueel verder geoptimaliseerde rekentool kan worden toegepast binnen de huidige standaardprocedure BSP (Multicriteria-analyse).

Inhoudstafel

0	Samenvatting	5
1	Probleemstelling	9
2	Afleiden CO2-voetafdruk	11
2.1	Stap 1 – Selectie van de saneringsvarianten	11
2.2	Stap 2 – Uitwerken conceptueel ontwerp van elke saneringsvariant	12
2.3	Stap 3 – Inventarisatie energie- en materiaalverbruik en off-site diensten	12
2.4	Stap 4 – Inventariseren van conversiefactoren (CF's)	14
2.5	Stap 5 – Berekening CO2-voetafdruk	15
2.6	Stap 6 – Interpretatiefase	15
3	Bespreking literatuurvoorbeelden	17
3.1	Gemiddeld energieverbruik en gemiddelde CO2-uitstoot van 5 actieve saneringstechnologieën in de US (Draft report US-EPA, 2008)	17
3.2	Bepalen van een site-specifieke CO2-voetafdruk voor bioremediatie, P&T en een hybridevariant (US-EPA, 2010)	19
4	Beschikbare CO2-rekentools	31
4.1	CO2-calculator van Tauw (Nederland)	31
4.2	Rekentool HMVT (Nederland)	31
4.3	Rekenmodule carbon footprint US EPA (draftversie; US)	32
4.4	ROCC (UK)	32
4.5	SiteWise TM (US)	33
4.6	SRT TM (US)	34
4.7	Conclusie rekentool	34
5	Voorstel aanpak CO2-rekentool voor Vlaanderen	37
6	Algemeen besluit Fase 1	39
Bijlage 1:	Lijst van afkortingen	41
Bijlage 2:	Begrippenlijst	43
Bijlage 3:	US EPA CO2-calculator – studie 2008	44
Bijlage 4:	US-EPA ecologische voetafdruk – studie 2010	53
Bijlage 5:	Lijst van tabellen	65
Bijlage 6:	Lijst van figuren	67
Bijlage 7:	Bibliografie	69

1 Probleemstelling

Niettegenstaande het saneren van een verontreinigde bodem de kwaliteit van het lokale milieu zal verbeteren, kan men zich de vraag stellen welke globale impact de sanering in haar geheel heeft op de milieukwaliteit.

Er zijn verschillende mogelijke benaderingen om de milieu-impact van bodemsaneringswerken te begroten, zoals het berekenen van het totale energieverbruik of de totale CO₂-uitstoot.

In opdracht van OVAM werd door VITO in eerste instantie een inventarisatie gemaakt van de bestaande literatuur en methoden rond het berekenen van de "CO₂-voetafdruk" van een bodemsanering. Het berekenen daarvan kan dan een vast onderdeel gaan vormen bij het ontwerp van 'groenere' (duurzamere) saneringsvarianten, en als dusdanig worden ingepast in de bestaande BATNEEC procedure en Multi-criteria-analyse (zie: Standaardprocedure BSP).

De CO₂-voetafdruk kan bepaald worden aan de hand van een CO₂-calculator. Een CO₂-calculator inventariseert en sommeert alle processen die CO₂ vrijzetten tijdens het totale saneringsproject, o.a. CO₂ afkomstig van de verbranding van fossiele brandstoffen tijdens de uitvoering van de sanering.

Aan de hand van een CO₂-calculator kan voor elke uitgewerkte saneringsvariant de te verwachten CO₂-uitstoot geraamd worden. Door de verschillende mogelijke saneringsvarianten qua CO₂-voetafdruk met elkaar te vergelijken, kan de op dit aspect "milieuvriendelijkste" variant worden geselecteerd.

Het rekeninstrument kan ook gebruikt worden in het kader van de beoordeling van eventuele restverontreiniging: levert een voortgezette sanering nog een positief milieu-rendement t.o.v. het achterlaten van een zekere restverontreiniging? Naast de risico-evaluatie en de BATNEEC-evaluatie kan een CO₂-calculator dus een bijkomend hulpmiddel vormen in de onderbouwing van de terugsaneerwaarden en vereiste saneringsinspanning voor een bepaalde bodemverontreinigingssituatie.

In dit rapport wordt in Hoofdstuk 2 aangegeven hoe de CO₂-voetafdruk van een saneringsproject berekend en geïnterpreteerd kan worden. In Hoofdstuk 3 wordt dit in detail toegelicht aan de hand van 2 literatuurvoorbeelden. Verschillende buitenlandse partijen/instanties (EPA (US), Atkins (UK), Tauw (NL), HMMT (Hannover Milieu- en Veiligheidstechniek, NL),) hebben reeds rekentools ontwikkeld voor het berekenen van de CO₂-uitstoot van saneringsvarianten en deze worden besproken in Hoofdstuk 4. Aan de hand van al deze informatie wordt in Hoofdstuk 5 een werkwijze voorgesteld voor de toepassing en verdere uitwerking van een CO₂-rekentool voor Vlaanderen.

2 Afleiden CO₂-voetafdruk

De CO₂-voetafdruk refereert naar het kwantificeren (schatten, berekenen en/of meten) van de CO₂-uitstoot die gepaard gaat met of een gevolg is van een bepaalde activiteit, werking van een installatie, transport, ... De CO₂-uitstoot wordt in verband gebracht met de opwarming van de aarde (dampkring) en dus ook met klimaatverandering.

Tijdens bodemsaneringswerken wordt over het algemeen energie verbruikt (elektriciteit en fossiele brandstoffen) alsook verschillende materialen. Dit veroorzaakt CO₂-emissies. Door verschillende saneringsvarianten op dit aspect door te rekenen voor eenzelfde locatie, wordt de "CO₂-vriendelijkste" variant bekomen. Door na te gaan welke processen/onderdelen binnen de saneringsvariant bv. veel energie vergen, kunnen alternatieven gezocht worden en op deze wijze kan de verwachte CO₂-uitstoot een rol spelen bij het ontwerpen van 'groenere' saneringsvarianten en in de keuze van de "voorkeursvariant".

Door het energieverbruik en de CO₂-emissies van saneringstechnieken te analyseren, kunnen rekentools ontwikkeld worden die de energie-efficiëntie en de uitstoot van CO₂ als gevolg van saneringsactiviteiten begroten.

In onderstaand schema worden de **6 stappen** voor het bepalen en interpreteren van de CO₂-voetafdruk weergegeven. De stappen worden in de volgende paragrafen nader toegelicht.

Stap 1 – Selectie van de saneringsvarianten

- ➔ olijsten saneringsonderdelen

Stap 2 – Conceptueel ontwerp van de geselecteerde saneringstechnologieën uitwerken

- ➔ olijsten saneringsaspecten

Stap 3 – Inventariseren van het energieverbruik, materiaalverbruik en off-site diensten

- ➔ olijsten saneringsparameters en basiselementen

Stap 4 – Inventariseren van de conversiefactoren

- ➔ olijsten conversiefactoren voor de verschillende basiselementen

Stap 5 – Berekening CO₂-voetafdruk

Stap 6 – Interpretatiefase

- ➔ aanduiden en bespreken van de meest CO₂-vriendelijke saneringsvariant
- ➔ bepalen van de bijdrage van on-site en off-site activiteiten en transport
- ➔ bepalen van de bijdrage van de verschillende saneringsonderdelen
- ➔ gevoeligheidsanalyse

2.1 Stap 1 – Selectie van de saneringsvarianten

In deze stap dienen een aantal saneringsvarianten geselecteerd te worden op basis van de vastgestelde verontreinigingssituatie in zowel bodem als grondwater, de (hydro)geologie, ... Er

wordt ook vanuit gegaan dat elke saneringsvariant na sanering de vooropgestelde normen (terugsaneerwaarden) voor bodem en/of grondwater bereikt. Voor de uitwerking van deze stap wordt verwezen naar de standaardprocedure bodemsaneringsproject (OVAM, 2009).

Voor elke saneringsvariant dient aangegeven te worden welke saneringsonderdelen al dan niet meegenomen worden voor het berekenen van de CO₂-voetafdruk. Dit wil zeggen dat aangegeven dient te worden of de installatie- en ontmantelingsfase van de sanering wordt meegenomen, of er al dan niet ontgraving zal plaatsvinden met of zonder off-site storten, of er beton verwijderd dient te worden alvorens de ontgraving/sanering kan plaatsvinden, of er na sanering opnieuw verharding (beton) zal aangebracht worden, of er lange termijn monitoring voorzien wordt, enz.

2.2 Stap 2 – Uitwerken conceptueel ontwerp van elke saneringsvariant

Op basis van stap 1 wordt het conceptueel ontwerp van elke saneringsvariant verder uitgewerkt. Dit wil zeggen dat per saneringsonderdeel de belangrijkste saneringsaspecten geïdentificeerd moeten worden. De inventarisatie omvat, maar is niet beperkt tot volgende saneringsaspecten:

- al dan niet ontgraven van verontreinigde bodem;
- keuze on-site of off-site reinigen van eventueel ontgraven bodem;
- al dan niet plaatsen van injectie- of extractiefilters of drains;
- oppompen van grondwater, bodemplucht, puur product;
- de keuze van zuiveringsinstallatie(s);
- gebruik van reagentia of hulpstoffen (chemicaliën, nutriënten, substraten, ...);
- ...

2.3 Stap 3 – Inventarisatie energie- en materiaalverbruik en off-site diensten

In stap 3 dient het energieverbruik geïnventariseerd en gekwantificeerd te worden alsook het materiaal nodig voor de sanering en de off-site activiteiten.

Hiervoor dient elk saneringsaspect zoals aangebracht in stap 2 verder verfijnd te worden in een aantal saneringsparameters. Deze saneringsparameters dienen vervolgens vertaald te worden in energieverbruik, materiaalverbruik en/of off-site activiteiten aan de hand van een aantal cruciale basiselementen met betrekking tot:

- ➔ keuze van energietypes
 - elektriciteit (grijze stroom, groene stroom, zonne-energie, windenergie, ...)
 - benzine
 - diesel
 - ...
- ➔ gebruikte materialen
 - PVC, HDPE, staal, roestvrij staal;
 - zand en grind (al dan niet 'nieuw gewonnen of gerecycleerd), cement;
 - beton, asfalt, bentoniet, (klei)matten, folies, ...;
 - Granulair Actieve Kool (GAC), al dan niet regenererbaar;
 - melasse, protamylasse, plantaardige olie, kaaswei, (poly)lactaat, ethanol, methanol, glycerol,... (voor in-situ bioremediatie);
 - reagentia (zuren, basen, oxidantia, reductantia,...);
 - ...
- ➔ off-site activiteiten

- vast (niet-gevaarlijk) afval¹
- gevaarlijk afval¹
- laboratoriumanalyses
- off-site grondreinigingstechnieken (biologisch, fysisch-chemisch, thermisch)
- off-site waterbehandeling
- off-site puur-productverwerking
- ...

Stap 3 wordt geïllustreerd aan de hand van het saneringsonderdeel 'onttrekken van grondwater' en de eraan gekoppelde relevante saneringsaspecten, n.l.: het plaatsen van onttrekkingsfilters, het oppompen van grondwater en het transport van materiaal². De saneringsparameters en basiselementen die voor deze saneringsaspecten in de inventarisatietabel opgenomen dienen te worden, zijn:

- ➔ voor het plaatsen van onttrekkingsfilters:
 - aantal te plaatsen onttrekkingsfilters,
 - het gekozen filtermateriaal (bv. HDPE),
 - massa HDPE op basis van het aantal filters en hun lengte en diameter,
 - de wijze waarop de onttrekkingsfilters geplaatst worden (bv. geoprobe),
 - diesilverbruik van de machine,
 - hoeveel dagen deze machines voorzien worden,
 - hoeveel manuren hiervoor nodig zijn.
- ➔ voor het oppompen van het grondwater:
 - keuze van de pomp (diepwell of op maaiveld),
 - het onttrekkingsdebiet (vb. 5 m³/h),
 - de werkingsduur van de pomp (in dagen),
 - de elektriciteitsvoorziening (bv. grijze stroom, zonne-energie, ...),
 - vermogen van de pomp (uitgedrukt in kWh).
- ➔ voor het transporteren (aanvoeren) van materiaal:
 - de transportafstand i.f.v. het aan te voeren materiaal,
 - het aantal ritten,
 - het vervoersmiddel,
 - het brandstofverbruik van het vervoermiddel,
 - het type brandstof (diesel, benzine, ...).
- ➔ Andere saneringsparameters die aan bod komen in andere saneringsaspecten zijn:
 - de hoeveelheid hulpstoffen/chemicaliën (bv. GAC) nodig voor de zuivering van opgepompt grondwater en/of bodemlucht,
 - de hoeveelheid hulpstoffen/chemicaliën (bv. Natriumpermanganaat) die worden geïnjecteerd, in geval van in-situ sanering,
 - de hoeveelheid afval geproduceerd tijdens de sanering,
 - ...

Het detailniveau van de saneringsparameters en de gehanteerde aannames (bv. het aantal onttrekkingsfilters) beïnvloeden de berekende CO₂-voetafdruk sterk, alsook de basiselementen die meegenomen worden voor het bepalen van de CO₂-voetafdruk.

Materialen die on-site toegepast worden (en na sanering niet hergebruikt kunnen worden), worden mee in beschouwing genomen voor het bepalen van de CO₂-voetafdruk, maar de

- 1 Vast of gevaarlijk afval dat on-site ontstaat tijdens de sanering en off-site verwerkt en/of gestort moet worden
- 2 Zuivering van het onttrokken grondwater wordt beschouwd als een apart saneringsonderdeel

fabricage van bijvoorbeeld een graafmachine niet. Het brandstofverbruik voor het transport van de graafmachine naar de site wordt meestal wel meegenomen alsook het brandstofverbruik van de graafmachine tijdens de saneringswerken.

2.4 Stap 4 – Inventariseren van conversiefactoren (CF's)

In stap 4 dienen de geschikte conversiefactoren van de verschillende energietypes, materialen en diensten in kader van de sanering geselecteerd, geïnventariseerd en onderbouwd te worden.

Conversiefactoren definiëren het verband tussen de hoeveelheid van elke type energie, materiaal en/of off-site activiteiten en de overeenstemmende CO₂-emissies, emissies van fijn stof, ... In kader van het bepalen van de CO₂-voetafdruk dienen enkel de conversiefactoren geïnventariseerd te worden met betrekking tot CO₂-emissies (in bepaalde studies ook CO₂-emissiefactoren genoemd).

Door bijvoorbeeld de totale massa PVC te vermenigvuldigen met de conversiefactor van PVC naar CO₂ (CF_{PVC - CO2}) wordt de CO₂-voetafdruk als gevolg van het gebruik van PVC berekend:

$$M_{PVC} \times CF_{PVC - CO_2} = CO_2\text{-voetafdruk}_{PVC}$$

Conversiefactoren zijn terug te vinden in publiek toegankelijke databanken, o.a.:

- ➔ National Renewable Energy Laboratory (NREL) Life-Cycle Inventory Database (NREL LCI)³, U.S.;
- ➔ European Reference Life Cycle Database (EUROPA ELCD)⁴;
- ➔ LCA Food Database⁵, Denemarken;
- ➔ ...

In bepaalde gevallen kunnen conversiefactoren ook site-specifiek zijn, d.w.z. aangepaste waarden op basis van specifieke (niet-standaard) randvoorwaarden, bv. met betrekking tot de gebruikte elektriciteit. De conversiefactoren worden dan site-specifiek afgeleid op basis van de werkelijk ter plaatse gebruikte aard van brandstoffen of elektriciteitsproductiewijze, i.p.v. op basis van landelijke of internationale gemiddelden.

Indien geen conversiefactoren beschikbaar zijn via publiek toegankelijke databanken, kunnen deze bepaald worden op basis van gegevens van de fabrikant(en) en/of door een team van experts.

Sommige rekeninstrumenten nemen naast CO₂ eveneens CH₄ en N₂O mee voor het bepalen van de CO₂-voetafdruk. Koolstofdioxide (CO₂) is het belangrijkste broeikasgas. Andere broeikasgassen die bijdragen aan de opwarming van de dampkring zijn methaan (CH₄), lachgas (N₂O) en de gehalogeneerde fluorkoolwaterstoffen (hfk's), perfluorkoolwaterstoffen (pfk's) en zwavelhexafluoride (SF₆). De uitstoot van broeikasgassen wordt uitgedrukt in CO₂-equivalenten, afgekort CO₂-eq. Dit is CO₂-ekeneenheid om de bijdrage van broeikasgassen aan het broeikaseffect onderling te kunnen vergelijken. Het is gebaseerd op het 'Global Warming Potential' (GWP), dat is de mate waarin een gas bijdraagt aan het broeikaseffect. Zo heeft methaan een GWP van 21 CO₂-eq. Dat houdt in dat 1 kilo methaan over een periode van 100 jaar 21 maal zoveel aan het broeikaseffect bijdraagt als 1 kilo CO₂. N₂O heeft een GWP van 310 CO₂-eq. Het GWP-concept is ontwikkeld door het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

3 www.nrel.gov/lci

4 <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfocenter/datasetArea.vm>

5 www.lcafood.dk

2.5 Stap 5 – Berekening CO₂-voetafdruk

Eens de stappen 3 en 4 zijn doorlopen en alle invoervariabelen (saneringsparameters, basiselementen en conversiefactoren) in de inventarisatietabel zijn ingevoerd, kan de CO₂-voetafdruk berekend worden.

Voor elk type energie, materiaal en off-site activiteit die ter sprake komt in de saneringsvariant kan een CO₂-voetafdruk berekend worden en dit door telkens de geïnventariseerde hoeveelheid te vermenigvuldigen met de overeenkomende conversiefactor (zie stap 4).

Vervolgens kunnen de CO₂-voetafdrukken van de verschillende types energie, de verschillende materialen en de verschillende off-site diensten gesommeerd worden om de totale CO₂-voetafdruk van een sanering (i.e. CO₂-voetafdruk voor het volledige saneringstraject) te bekomen.

Sommige studies berekenen naast de totale CO₂-voetafdruk ook een on-site en off-site CO₂-voetafdruk. De on-site en off-site CO₂-voetafdruk van een sanering wordt dan als volgt berekend:

On-site CO₂-voetafdruk =	CO ₂ -voetafdruk on-site diesilverbranding
	+
	CO ₂ -voetafdruk on-site benzineverbranding
	+
	CO ₂ -voetafdruk broeikasgasemissie t.g.v. on-site processen
Off-site CO₂-voetafdruk =	CO ₂ -voetafdruk off-site diesilverbranding
	+
	CO ₂ -voetafdruk off-site benzineverbranding
	+
	CO ₂ -voetafdruk productie van elektriciteit
	+
	CO ₂ -voetafdruk ten gevolge van materiaalproductie (bv. PVC, HDPE, diesel, benzine, ...)
	+
	CO ₂ -voetafdruk off-site afvalwaterbehandeling
	+
	CO ₂ -voetafdruk voor vast afval
	+
	CO ₂ -voetafdruk voor gevaarlijk afval
	+
	CO ₂ -voetafdruk voor laboratorium analyses

2.6 Stap 6 – Interpretatiefase

Door de totale CO₂-voetafdruk van verschillende saneringsvarianten te vergelijken, kan afgeleid worden welke als meest “CO₂-vriendelijke” saneringsvariant kan worden beschouwd.

Naast het afleiden van de totale CO₂-voetafdruk kan ook de bijdrage van on-site activiteiten, transport en off-site activiteiten op de CO₂-voetafdruk geanalyseerd worden.

Door de CO₂-voetafdruk te bepalen per saneringsonderdeel kunnen de saneringsonderdelen geïdentificeerd worden die het meest bijdragen aan de CO₂-voetafdruk alsook deze die een verwaarloosbaar effect hebben op de CO₂-voetafdruk.

Om de vergelijking tussen saneringsvarianten onderling te vergemakkelijken, gebeurt de evaluatie en interpretatie van deze verschillende CO₂-voetafdrukken meestal aan de hand van grafieken (blok- of taartdiagrammen).

Tenslotte kan ook een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd worden om na te gaan aan welke invoervariabelen de CO₂-voetafdruk gevoelig is. Deze analyse heeft 2 doelen:

- ➔ indien de gevoeligheidsanalyse aantoont dat de voetafdruk gevoelig is voor een bepaalde invoervariabele, dan kan het ontwerp van de sanering daaraan aangepast worden om zo de voetafdruk te verlagen. Indien bijvoorbeeld de transportafstand van het nutriënt bij bioremediatie bepalend is, dan kan voorgesteld worden om een lokaal alternatief te zoeken.
- ➔ indien de gevoeligheidsanalyse aantoont dat de voetafdruk gevoelig is voor een invoervariabele die "onzeker" is (bv. de saneringsduur), dan is de berekende voetafdruk ook onzeker en bemoeilijkt dit het vergelijken van saneringsvarianten.

3 Bespreking literatuurvoorbeelden

In dit hoofdstuk wordt het bepalen van de CO₂-voetafdruk toegelicht aan de hand van 2 literatuurvoorbeelden. Deze voorbeelden geven aan hoe in Vlaamse saneringsprojecten de CO₂-voetafdruk kan toegepast worden, mits aanpassing van een aantal parameters (invoervariabelen) op basis van Vlaamse gegevens.

3.1 Gemiddeld energieverbruik en gemiddelde CO₂-uitstoot van 5 actieve saneringstechnologieën in de US (Draft report US-EPA, 2008)

De consultant EMS (Environmental Managing Support, inc.) heeft voor US-EPA het energieverbruik, de CO₂-uitstoot en de energiekosten van 5 veel voorkomende “actieve” saneringstechnologieën in de US geanalyseerd, nl.: “pump en treat” (P&T), bodemluchtextractie (BLE), multi-fasenextractie (MFE), persluchtinjectie (PLI) en thermische desorptie (TD). Op basis daarvan werd een rekeninstrument (Excel-model⁶) ontwikkeld, dat publiek beschikbaar werd gesteld.

Het doel van deze studie was om voor elke saneringstechnologie het jaarlijks energieverbruik en de jaarlijkse CO₂-uitstoot van een hypothetisch “gemiddeld” saneringsproject te bepalen. Voor elke saneringstechniek werd tevens het gemiddeld aantal saneringsprojecten op jaarbasis in de U.S. bepaald om vervolgens ruwe voorspellingen te maken van het nationale jaarlijkse energieverbruik en de nationale jaarlijkse CO₂-uitstoot van een bepaalde saneringstechnologie. Tenslotte werd ook een voorspelling gemaakt in functie van de saneringsduur van elke saneringstechnologie alsook een prognose van het totale energieverbruik en de totale CO₂-uitstoot van alle saneringsprojecten samen tot 2030.

De eerste versie (draft) van het model maakt voor een aantal variabelen gebruik van nationale gemiddelden en is zo gestructureerd dat een gebruiker andere waarden kan invoeren voor deze variabelen. Daar de rekentool toelaat om een aantal aannames of variabelen site-specifiek aan te passen (bv. het aantal onttrekkingsfilters bij P&T), is de rekentool ook geschikt om een ruwe inschatting te maken van het energieverbruik en de CO₂-uitstoot van een specifiek saneringsproject.

3.1.1 Inventarisatie saneringsparameters

De eerste stap bij het ontwikkelen van de rekentool was het inventariseren van saneringsonderdelen, saneringsaspecten en technische en mechanische componenten (saneringsparameters) die een aanzienlijke hoeveelheid energie vergen (i.e. met een jaarlijks elektriciteitsverbruik van meer dan 1000 kWh/jaar) en dit voor de genoemde 5 technologieën. Dit komt overeen met stappen 2 en 3 uit Afleiden CO₂-voetafdruk.

Er dient opgemerkt te worden dat de saneringsonderdelen, -aspecten en -parameters die in deze studie worden meegenomen beperkt zijn tot de saneringstechnologie zelf. Dit wil zeggen dat ontgraving, de constructie- en ontmantelingsfase, de productie en het transport van materialen nodig voor de sanering (filtermateriaal, ...) en afvalbeheer (bv. afvoer van verontreinigde grond en aanvoer van aanvulgrond) niet werden meegenomen.

Bijlage 3.1 (Engelstalig) is overgenomen uit de studie. Deze bijlage geeft voor elke saneringstechnologie een overzicht van de onderdelen die jaarlijks meer dan 1000 kWh/jaar

6 [Http://www.clu-in.org/greenremediation/subtabb3.cfm](http://www.clu-in.org/greenremediation/subtabb3.cfm)

verbruiken, alsook het energieverbruik en de CO₂-uitstoot van een “gemiddeld” saneringsproject op jaarbasis en in functie van de saneringsduur.

3.1.2 Inventarisatie conversiefactoren

In een tweede stap werden de conversiefactoren voor het berekenen van de CO₂-uitstoot vastgelegd. Dit komt overeen met stap 4 uit Afleiden CO₂-voetafdruk. De enige basiselementen die in deze studie werden meegenomen zijn elektriciteit (grijze stroom) en brandstof (i.e. 2 energietypes). Bijgevolg werden enkel conversiefactoren voor het omzetten van deze energietypes in CO₂-emissies vastgelegd. Verbruik van materialen en off-site diensten werden in deze studie dus niet meegenomen.

Bijlage 3.2 (Engelstalig) geeft de algemene aannames weer voor de saneringsparameters alsook de gehanteerde conversiefactoren.

Een aantal belangrijke algemene aannames in het kader van deze studie, die het elektriciteitsverbruik en de CO₂-uitstoot van een saneringsproject sterk beïnvloeden, zijn specifiek voor de Amerikaanse situatie, n.l.:

12. fossiele bronnen hebben een aandeel van 71% in de elektriciteitsproductie;
13. het elektriciteitsverbruik van de saneringsapparatuur is gebaseerd op het totaal vermogen (kW) en het totaal aantal draaiuren;
14. voor de berekening van de CO₂-uitstoot door elektriciteitsverbruik werd het Amerikaanse gemiddelde gebruikt van 1,37 lbs CO₂-uitstoot per opgewekt kWh⁷. Dit getal wordt regelmatig herzien en aangepast in functie van de regio of de stroombron;
15. voor de berekening van de CO₂-uitstoot door verbruik van fossiele brandstoffen werd de conversiefactor 19,56⁷ gehanteerd voor één gallon (ca. 3,785 liter) benzine en 22,38⁸ voor één gallon diesel;
16. De internationale eenheid voor de rapportage van CO₂-uitstoot is MTCO₂e (metrieke ton (ton) koolstofdioxide-equivalent). Eén ton CO₂ komt dan overeen met 2204,62 lbs CO₂.

3.1.3 Berekenen van energieverbruik en CO₂-uitstoot

In de laatste fase werd de modelstructuur vastgelegd voor het berekenen van het energieverbruik en de CO₂-uitstoot en dit resulteerde voor elk van de 5 technologieën in een aantal werkbladen in een Excel-model (meer informatie betreffende de opbouw van dit model is terug te vinden in Beschikbare CO₂-reken). Deze fase komt overeen met stap 5 uit Afleiden CO₂-voetafdruk.

3.1.4 Interpretatie resultaten

Uit deze studie kan volgende volgorde afgeleid worden voor de 5 technologieën (jaarlijkse verbruiken voor een “gemiddeld” saneringsproject):

- ➔ o.b.v. het jaarlijks energieverbruik:
BLE < P&T ~ PLI < MFE << TD
- ➔ o.b.v. het jaarlijks brandstofverbruik:
PLI ~ TD < BLE < MFE < P&T
- ➔ o.b.v. de jaarlijkse CO₂-uitstoot:
BLE < P&T ~ PLI < MFE << TD

7 DOE energy Information Administration, Electric Power Annual 2005, Table 5.1

8 U.S. DOE, EIA, website. February 2008
<http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/coefficients.html>

TD (Thermische Desorptie) heeft het hoogste energieverbruik en daarom ook de grootste CO₂-uitstoot op jaarbasis, maar er dient opgemerkt te worden dat de saneringsduur van TD meestal kleiner is dan 1 jaar (~ 4 maanden).

3.2 Bepalen van een site-specifieke CO₂-voetafdruk voor bioremediatie, P&T en een hybridevariant (US-EPA, 2010)

In dit recent rapport wordt de ecologische voetafdruk van drie saneringstechnologieën, n.l. in-situ bioremediatie, P&T en een combinatie van beide (hybridevariant), beschreven voor een verontreiniging met VOC's in grondwater (Romic-site, Californië).

De CO₂-uitstoot is één van de 15 bestudeerde milieuparameters in deze studie. Naast CO₂ wordt ook een voetafdruk bepaald voor NO_x, SO_x, PM (fijn stof), niet-gevaarlijk afval, gevaarlijk afval, toxische luchtverontreiniging, Hg, Pb, dioxines, energie, elektriciteit, water algemeen, drinkbaar water en lokaal onttrokken water (winbaar water).

In deze studie werd de CO₂-voetafdruk bepaald per saneringsonderdeel: (1) het bodemonderzoek, (2) de ontgraving, (3) de constructiefase, (4) de exploitatie- en instandhoudingsfase, (5) de lange termijn monitoring en (6) de ontmantelingsfase. Er werden eveneens CO₂-voetafdrukken bepaald in functie van on-site activiteiten, transport en off-site activiteiten.

Eén van de doelstellingen was om het detailniveau, nodig voor het bepalen van de ecologische voetafdruk en dus ook van de CO₂-voetafdruk van een bodemsanering, te achterhalen.

Een aantal belangrijke stappen die in deze studie aan bod komen en die relevant zijn voor het bepalen van de CO₂-voetafdruk zijn:

- ➔ de selectie van geschikte conversiefactoren voor het berekenen van de CO₂-emissies van verschillende energietypes, materialen en diensten bij een sanering;
- ➔ de berekening van de CO₂-voetafdruk voor 3 saneringstechnologieën;
- ➔ het bepalen van de bijdrage van on-site activiteiten (vb. brandstofverbruik), transport (vb. personen, goederen) en off-site activiteiten (vb. afvalbeheer, fabricage van materiaal) op de CO₂-voetafdruk;
- ➔ het identificeren van saneringsonderdelen met een verwaarloosbaar effect op de CO₂-voetafdruk alsook deze met een significant effect op de CO₂-voetafdruk;
- ➔ het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse voor variaties in het ontwerp van de saneringstechnologie, voor conversiefactoren en andere variabelen.

De stappen uit Afleiden CO₂-voetafdruk worden in deze studie toegepast en uitgebreid toegelicht in de volgende paragrafen.

3.2.1 Selectie van de saneringsvarianten (Stap 1)

Romic is een voormalige stortplaats waar zowel de bodem als het grondwater verontreinigd zijn met VOCs (t.g.v. droogkuisproducten, verfverduuners, ...). Als randvoorwaarde werd aangenomen dat elk van de drie geëvalueerde saneringsvarianten (bioremediatie, P&T en de hybridevariant) de vooropgestelde normen voor bodem en grondwater zal hebben bereikt na stopzetting van de sanering.

De saneringsonderdelen die in deze studie werden meegenomen zijn:

- ➔ het bodemonderzoek,
- ➔ de sloopwerken (verwijderen van betonnen verharding),

- ➔ de ontgraving (met off-site storten),
- ➔ het aanbrengen van betonverharding na stopzetting van de sanering,
- ➔ het plaatsen van onttrekkingsfilters,
- ➔ het aanleggen van leidingen (drain),
- ➔ de constructie van de zuiveringsinstallatie(s),
- ➔ de exploitatie en instandhouding van de zuiveringsinstallatie(s),
- ➔ het plaatsen van injectiefilters,
- ➔ de exploitatie en instandhouding van de bioremediatie,
- ➔ de lange-termijn monitoring,
- ➔ en de ontmanteling ("demob").

De cursief weergegeven saneringsonderdelen komen in alle 3 de saneringsvarianten aan bod.

3.2.2 Conceptueel ontwerp van de saneringsvarianten (Stap 2)

Voor elke saneringsvariant werd een conceptueel ontwerp uitgewerkt. Daarbij werden de belangrijkste saneringsaspecten per saneringsonderdeel geïnventariseerd.

Bij het saneringsonderdeel 'ontgraving' komen bv. volgende aspecten aan bod:

- ➔ het ontgraven van verontreinigde grond m.b.v. graafmachines,
- ➔ het off-site afvoeren van afval (verontreinigde grond) m.b.v. vrachtwagens,
- ➔ het aanvoeren van aanvulgrond m.b.v. vrachtwagens,
- ➔ laboratoriumanalyses voor het karakteriseren van het afval,
- ➔ inzet van personeel (transportbewegingen).

3.2.3 Inventarisatie energie- en materiaalverbruik en off-site diensten (Stap 3)

Volgende basiselementen werden in deze studie in beschouwing genomen:

- ➔ 3 types van energie: elektriciteit, benzine en diesel;
- ➔ 12 veelgebruikte materialen: PVC, HDPE, staal, roestvrij staal, zand en grind, cement, beton, bentoniet, gerecycleerd (geregenereerd) granulair actieve kool (GAC) en voor in-situ bioremediatie: melasse, kaaswei en plantaardige olie;
- ➔ 2 soorten water: drinkbaar water en winbaar water;
- ➔ 4 off-site diensten: afvoer van vast afval, afvoer van gevaarlijk afval, laboratoriumanalyses en off-site waterbehandeling in een RWZI.

Voor de inventarisatie van het energie- en materiaalverbruik en de off-site activiteiten werden de saneringsaspecten uit stap 2 verder verfijnd in een aantal saneringsparameters.

De beschouwde saneringsparameters m.b.t. 'ontgraving' waren bijvoorbeeld:

- ➔ het volume (tonnage) ontgraven bodem;
- ➔ type en aantal ingezette graafmachines;
- ➔ aantal operationele dagen van deze graafmachines;
- ➔ het percentage niet-gevaarlijk en gevaarlijk afval;
- ➔ de hoeveelheid niet-gevaarlijk en gevaarlijk afval uitgedrukt in gewicht;
- ➔ de hoeveel afval die off-site afgevoerd dient te worden (uitgedrukt in gewicht);
- ➔ het aantal vrachtwagens nodig voor het afvoeren van afval;
- ➔ het volume (tonnage) aanvulgrond;
- ➔ aantal vrachtwagens nodig voor het aanvoeren van aanvulgrond;
- ➔ aantal mandagen personeel;

➔ aantal te analyseren bodem- en afvalstalen.

Materialen die on-site verbruikt werden, werden in deze studie mee in beschouwing genomen, maar de grondstoffen nodig voor het vervaardigen van een graafmachine en het vervaardigen van de graafmachine zelf niet.

Het transport van machines, materialen, personeel en afval van en naar de site werd wel meegenomen in deze studie en in de inventarisatietabel uitgewerkt onder het aspect 'transport'. De beschouwde saneringsparameters m.b.t. 'transport' zijn:

transportafstanden i.f.v. het aan- of afvoeren van materiaal, afval en personen;

- ➔ het aantal ritten;
- ➔ het type brandstof;
- ➔ het brandstofverbruik i.f.v. het geselecteerde vervoermiddel.

Na inventarisatie en begroting van alle saneringsparameters voor de geselecteerde saneringsvarianten, werden in een samenvattend overzicht het elektriciteitsverbruik, het materiaalverbruik, de inzet van personeel en de hoeveelheid afval geproduceerd per saneringsonderdeel weergegeven, alsook de somming voor de gehele sanering.

Om een idee te krijgen van de opbouw van zo'n inventarisatietabel wordt verwezen naar bijlage 4.1 (Engelstalig). Deze engelstalige bijlage bestaat uit een set van spreadsheets waarbij per saneringsonderdeel de relevante saneringsparameters worden weergegeven alsook het verbruik van brandstof, elektriciteit, water en materialen nodig voor de uitvoering van de geselecteerde saneringstechnologie.

3.2.4 Conversiefactoren (Stap 4)

De conversiefactoren (CO₂-emissiefactoren) die in deze studie gehanteerd werden zijn afkomstig uit publieke databanken en werden als "default" conversiefactoren opgenomen. De publieke databanken zijn NREL LCI (U.S), EUROPA ELCD en LCA Food Database (Denemarken).

Een aantal conversiefactoren werden site-specifiek aangepast bv. deze met betrekking tot de productie van elektriciteit. Deze werd site-specifiek afgeleid op basis van de plaatselijke mix van brandstoffen en niet op basis van de gemiddelde mix van brandstoffen gebruikt voor elektriciteitsproductie in de U.S.

Voor GAC en laboratoriumanalyses werden geen conversiefactoren teruggevonden in de publieke databanken en bijgevolg werden deze afgeleid op basis van gegevens van de fabrikant(en) en/of door een team van experts.

De gehanteerde conversiefactoren worden weergegeven in bijlage 4.2 (Engelstalig), alsook de bronnen en/of databanken.

3.2.5 Berekening CO₂-voetafdruk (Stap 5)

In deze studie werd voor elke saneringsvariant naast de berekening van de totale CO₂-voetafdruk eveneens de CO₂-voetafdruk bepaald voor de on-site activiteiten, transportactiviteiten en off-site activiteiten (i.e. de CO₂-voetafdrukken nodig voor de primaire analyse; zie stap 6).

Vervolgens werd voor elke saneringsvariant de CO₂-voetafdruk bepaald voor volgende 6 saneringsonderdelen: het bodemonderzoek, de ontgraving, de constructiefase, de exploitatie- en instandhoudingsfase, de lange termijn monitoring en de ontmantelingsfase (i.e. de CO₂-voetafdrukken nodig voor de secundaire analyse, zie stap 6).

De CO₂-voetafdruk wordt in deze studie uitgedrukt in CO₂-equivalenten (CO₂-eq.).

3.2.6 Interpretatie CO₂-voetafdrukken (Stap 6)

Het doel van deze studie was niet alleen het bepalen van de totale CO₂-voetafdruk voor verschillende saneringsvarianten, maar tevens om de CO₂-bijdrage van verschillende saneringsactiviteiten en saneringsonderdelen te bepalen en te interpreteren. De interpretatiefase werd opgesplitst in 3 onderdelen zijnde:

- ➔ de primaire analyse (i.e. het analyseren van de bijdrage van on-site activiteiten, transport en off-site activiteiten op de CO₂-voetafdruk);
- ➔ de secundaire analyse (i.e. het identificeren van saneringsonderdelen met een significant effect op de CO₂-voetafdruk);
- ➔ een gevoeligheidsanalyse (i.e. het identificeren van saneringsparameters, conversiefactoren, ... in het ontwerp van de sanering, die een significant effect hebben op de CO₂-voetafdruk).

3.2.6.1 Primaire analyse

In de primaire analyse werden de CO₂-voetafdrukken van de 3 saneringsvarianten onderling vergeleken en werd afgeleid wat de bijdrage was van on-site activiteiten, transport en off-site activiteiten op de totale CO₂-voetafdruk van elke saneringsvariant. Vervolgens werden de CO₂-voetafdrukken (totale, on-site, transport en off-site) van de 3 saneringsvarianten onderling vergeleken. De primaire analyse werd in de studie visueel voorgesteld aan de hand van grafieken (zie Grafiek 1, Bijlage 4.3) en resulteerde in volgende vaststellingen:

- ➔ De totale CO₂-voetafdruk van de saneringsvariant P&T is veel groter dan deze voor de bioremediatievariant of de hybridevariant. Bioremediatie had de laagste CO₂-voetafdruk.
- ➔ De off-site activiteiten (transport niet inbegrepen) zijn in elke saneringsvariant verantwoordelijk voor de grootste CO₂-bijdrage.
- ➔ Hoewel de CO₂-bijdrage ten gevolge van transport voor de 3 saneringsvarianten van dezelfde absolute grootteorde is, is de relatieve bijdrage bij de bioremediatievariant en de hybridevariant groter en dus signifikanter (resp. 26% en 16% van de totale CO₂-voetafdruk) dan bij de P&T-variant (slechts 5% van de totale CO₂-voetafdruk).
- ➔ De CO₂-bijdrage van de on-site activiteiten is voor de 3 saneringsvarianten zo klein in vergelijking met de CO₂-bijdrage van off-site activiteiten dat deze verwaarloosbaar is. De CO₂-uitstoot van deze 3 saneringsvarianten veroorzaakt m.a.w. geen lokaal effect, maar wel een regionaal/globaal effect.

Voor de saneringsvarianten bioremediatie en P&T werd een grafiek opgesteld die het on-site en off-site verbruik van de basiselementen – n.l. de geselecteerde energietypes, materialen en off-site diensten - weergeeft.

Voor bioremediatie werd (Grafiek 2, Bijlage 4.3) vastgesteld dat:

- ➔ het off-site diesilverbruik (i.e. voor transport), de productie van melasse en kaaswei voor injectie en laboratoriumanalyses een grote CO₂-bijdrage leveren. Deze 4 elementen behoren tot de off-site CO₂-voetafdruk;
- ➔ het on-site diesilverbruik van machines (boor- en graafmachines, ...) een kleinere maar nog steeds significante bijdrage levert. Dit element maakt deel uit van de on-site CO₂-voetafdruk.
- ➔ Het off-site diesilverbruik leverde de grootste CO₂-bijdrage en werd verder geanalyseerd. Uit deze analyse bleek dat het transporteren van gevaarlijk afval (verontreinigde bodem) uit het saneringsonderdeel “ontgraven”, verantwoordelijk was voor 40% van het off-site diesilverbruik.

Voor laboratoriumanalyses werd in geen enkele databank een conversiefactor teruggevonden en bijgevolg werd deze bepaald door een team van experts. De kans dat de werkelijke CO₂-

bijdrage van laboratoriumanalyses groter of kleiner is, is reëel. Bij het afleiden van een conversiefactor voor laboratoriumanalyses veronderstelden de experts dat 10% van de labokosten kan toegewezen worden aan het verbruik van elektriciteit en diesel. Vervolgens rekenden ze deze kost om naar een hoeveelheid elektriciteit en diesel. De CO₂-uitstoot voor de productie van elektriciteit en diesel is gekend en zo werd een conversiefactor voor laboratoriumanalyses bekomen.

Voor P&T werd (Grafiek 3; Bijlage 4.3) vastgesteld:

- ➔ dat het gebruik van GAC de grootste CO₂-bijdrage levert, gevolgd door off-site afvalwaterbehandeling in een RWZI en elektriciteitsproductie;
- ➔ dat alle andere elementen voor de P&T-variant verwaarloosbaar zijn in relatie tot deze 3 aangehaalde elementen (GAC-verbruik, afvalwaterbehandeling en elektriciteitsproductie).

De conversiefactoren voor GAC en afvalwaterbehandeling in een RWZI werden bepaald door een team van experts en bijgevolg kan de werkelijke CO₂-bijdrage van deze basiselementen in werkelijkheid groter of kleiner zijn.

Wanneer de grafieken voor bioremediatie en P&T onderling vergeleken worden, werd vastgesteld:

- ➔ dat de schaal van de X-as voor P&T 15 keer groter was dan deze voor bioremediatie (dit is logisch daar de totale CO₂-voetafdruk voor P&T immers veel groter was dan deze voor bioremediatie);
- ➔ dat ondanks het feit dat de grootteorde van off-site diesilverbruik en laboratoriumanalyses dezelfde was voor beide varianten, hun bijdrage verwaarloosbaar werd geacht bij P&T en als belangrijk aanzien bij bioremediatie.

Tenslotte werd in de studie ook een vergelijking gemaakt van de sanerings- en herontwikkelingsduur, het transport van en naar de site (aantal ritten en de afgelegde afstanden) en het aantal mandagen nodig voor on-site werken (zie Tabel 1).

Variant	Duur (jaren)		Aantal ritten		Afstand (km)	
	Sanering	Herontw.	Lichte vrachtw.	Zware vrachtw.	Lichte vrachtw.	Zware vrachtw.
Hybride	30	10	2916	1462	262589	1125947
Bio*	10	10	1312	922	184793	623652
P&T	40	3	2841	1680	387539	1112429

* *Bioremediatievariant*

Tabel 1: Overzicht saneringsduur, transport en mandagen voor de 3 saneringsvarianten

3.2.6.2 Secundaire analyse

De secundaire analyse had tot doel om voor de saneringsvarianten bioremediatie en P&T de saneringsonderdelen te identificeren die het meest bijdragen aan de CO₂-voetafdruk, alsook deze die een verwaarloosbaar effect hebben op de voetafdruk.

Bij de bioremediatievariant leverde de exploitatie- en instandhoudingsfase (O&M) de grootste CO₂-bijdrage. De bijdrage van ontgraving, constructie en lange-termijn monitoring was kleiner maar nog steeds significant. De bijdragen van de overige saneringsonderdelen, n.l. het bodemonderzoek en de ontmanteling waren verwaarloosbaar t.o.v. de overige onderdelen. Dit werd visueel weergegeven door middel van Grafiek (heropgenomen in Bijlage 4.3).

Ook bij de P&T-variant was de exploitatie- en instandhoudingsfase verantwoordelijk voor de grootste CO₂-bijdrage. Dit is logisch daar tijdens de primaire analyse reeds werd vastgesteld dat de grootste CO₂-bijdragen veroorzaakt werden door het verbruik van GAC, off-site afvalwaterbehandeling in een RWZI en elektriciteitsverbruik. De bijdragen van de overige saneringsonderdelen waren verwaarloosbaar.

3.2.6.3 Gevoelighedsanalyse

Tenslotte werd een gevoelighedsanalyse uitgevoerd om na te gaan voor welke saneringsparameters en/of conversiefactoren de CO₂-voetafdrukken gevoelig zijn. Dit kan door de impact op de CO₂-uitstoot te bestuderen voor mogelijke aanpassingen zoals wijzigingen van saneringsparameters, wijzigingen van conversiefactoren, variaties in reis- en transportafstanden, variaties in ontgravingsvolumes, het gebruik van beton, het verlengen van de saneringsduur van de P&T en het reduceren van de monitoringsfrequentie bij lange-termijn monitoring.

Wijziging van saneringsparameters

Het veranderen van een aantal saneringsparameters in de bioremediatievariant zijnde het gebruik van ter plaatse onttrokken grondwater in plaats van drinkbaar water en het gebruik van plantaardige olie voor injectie in plaats van melasse en kaaswei resulteerde in volgende vaststellingen voor de bestudeerde site:

- ➔ het gebruik van onttrokken water in plaats van drinkbaar water had een verwaarloosbaar effect op de CO₂-uitstoot;
- ➔ het gebruik van plantaardige olie in plaats van melasse en kaaswei had een positief (verlagend) effect op de CO₂-uitstoot.

Hoewel de CO₂-uitstoot voor de productie van plantaardige olie groter is dan deze voor eenzelfde massa melasse, was de CO₂-voetafdruk voor de saneringsvariant gebaseerd op plantaardige olie in dit geval lager wegens:

1. de hogere dichtheid van plantaardige olie, waardoor minder massa diende te worden geïnjecteerd (3x minder dan voor melasse);
2. het feit dat er minder massa geïnjecteerd dient te worden, maakt dat er minder massa geproduceerd moet worden en dat er ook minder massa aangevoerd dient te worden. Het feit dat er minder massa aangevoerd dient te worden vertaalt zich in minder dieselproductie en minder dieselvebranding als gevolg van transport van nutriënten.
3. het verschil in afstand waarover de substraattypes vervoerd moeten worden (afstand tussen leverancier en saneringslocatie).

De injectiefrequentie bleek weinig impact te hebben op de CO₂-uitstoot, zolang de geïnjecteerde massa dezelfde bleef.

In de studie werd ook nagegaan wat de impact was van het halveren van de conversiefactoren voor melasse en kaaswei op de CO₂-voetafdruk (variant 1) alsook de impact van het halveren van de geïnjecteerde massa van beide nutriënten (variant 2). De resultaten worden samengevat in Tabel 2.

	CO ₂ t.g.v. nutriëntproductie en transport (kg)	Afname CO ₂ in E* (%)	Afname CO ₂ in T° (%)	CO ₂ -bijdrage t.g.v. nutriëntproductie en transport (%)
				E*
Origineel	1483	-	-	92
Variant 1	933	33	19	88
Variant 2 [§]	727	46	26	85

[§]: gebaseerd op originele conversiefactoren

* E = Exploitatie- en instandhoudingsfase

°T = Totaal (i.e. voor alle saneringsonderdelen samen)

Tabel 2: Impact van conversiefactoren en geïnjecteerde massa op de CO₂-voetafdruk

Door een aantal saneringsparameters te veranderen in de P&T-variant werden volgende 5 P&T-varianten bekomen:

- ➔ P&T-variant 1
originele variant met luchtstripper, effluent nazuiveringsstap met waterzijdige GAC, lozen van behandeld water op RWZI, gasfase-effluentbehandeling. Het elektriciteitsverbruik werd site-specifiek afgeleid o.b.v. de plaatselijke mix van brandstoffen);
- ➔ P&T-variant 2
idem variant 1, maar zonder waterzijdige GAC (er wordt een luchtstripper met hogere capaciteit, i.e. verhoogde lucht/water verhouding, ingezet);
- ➔ P&T-variant 3
idem variant 2, maar het behandeld water wordt geloosd op oppervlaktewater i.p.v. op een RWZI;
- ➔ P&T-variant 4
idem variant 3, waarbij de elektriciteit afkomstig is van hernieuwbare energie (er wordt geen CO₂-uitstoot verondersteld);
- ➔ P&T-variant 5
idem variant 3, waarbij de 'default' conversiefactor gehanteerd werd voor de productie van elektriciteit (i.e. gebaseerd op de gemiddelde brandstofmix in de US).

Het vergelijken van de CO₂-voetafdrukken van deze P&T-varianten resulteerde in volgende vaststellingen:

- ➔ het vervangen van de luchtstripper door een nazuivering met waterzijdige GAC door één zonder waterzijdige GAC verlaagt de CO₂-uitstoot sterk;
- ➔ een bijkomende daling in CO₂-uitstoot werd bekomen door het behandelde water te lozen op oppervlaktewater i.p.v. op de riolering;
- ➔ de CO₂-uitstoot daalde nog verder door over te schakelen op hernieuwbare energie;
- ➔ de grootteorde van vermindering in CO₂-uitstoot is voor deze 3 maatregelen (GAC, lozen op oppervlaktewater en hernieuwbare energie) gelijkaardig;
- ➔ het gebruik van de 'default' conversiefactor m.b.t. de productie van elektriciteit i.p.v. de site-specifieke conversiefactor, heeft een negatief (verhogend) effect op de CO₂-uitstoot. Hieruit werd afgeleid dat de CO₂-voetafdruk zeer gevoelig is aan deze conversiefactor.

Zoals reeds vermeld werd in deze studie niet alleen de CO₂-voetafdruk bepaald, maar werd op een gelijkaardige wijze ook de voetafdruk bepaald voor 14 andere milieuparameters. Een belangrijke vaststelling hieromtrent die het vermelden waard is, is dat het effect van een inspanning om de CO₂-voetafdruk te verlagen ook een impact (positief/negatief) heeft op de voetafdruk van de andere milieuparameters. Ook de grootteorde van de impact zal naargelang de milieuparameter verschillen. In een LCA-analyse worden al deze milieuparameters meegenomen en worden deze bovendien verder vertaald in 4 effecten zijnde de humane gezondheid, de kwaliteit van het ecosysteem, uitputting van niet-hernieuwbare grondstoffen en klimaatverandering.

De vergelijking van de originele P&T-variant (P&T-variant 1), P&T-variant 4 en bioremediatie leidde tot de vaststelling dat de CO₂-voetafdruk voor de originele P&T-variant veel groter was dan deze voor P&T-variant 4 en de originele bioremediatievariant. Hoewel de laagste CO₂-voetafdruk berekend werd voor bioremediatie, was het verschil met de P&T-variant 4 beperkt, gegeven de inherente onzekerheid en variatie voor een aantal saneringsparameters en conversiefactoren.

Wijzigen van conversiefactoren

Zoals reeds werd aangetoond beïnvloeden sommige saneringsparameters de CO₂-voetafdruk sterker dan andere.

Voor de bioremediatievariant werd reeds vastgesteld dat de productie van de te injecteren nutriënten een belangrijke impact heeft op de CO₂-voetafdruk. Indien hiervoor sterk verschillende conversiefactoren beschikbaar zijn, dan kan de keuze van de conversiefactor de CO₂-uitstoot sterk beïnvloeden.

Zoals reeds werd aangegeven in Tabel 2 daalt de CO₂-voetafdruk voor het saneringsonderdeel 'exploitatie en instandhouding' met 33% door de conversiefactoren voor melasse en kaaswei te halveren en ook de totale CO₂-voetafdruk daalt hierdoor met 19%. Sommige relevante conversiefactoren voor de bioremediatievariant zoals de conversiefactor voor GAC, laboratoriumanalyses en afvalwaterbehandeling in een RWZI, werden in deze studie bepaald door experts op basis van een aantal aannames. De werkelijke conversiefactoren kunnen dus significant verschillen van deze gehanteerd in de studie en kunnen bijgevolg ook een significant effect hebben op de CO₂-voetafdruk.

De CO₂-voetafdruk van verschillende saneringsonderdelen en basiselementen (zijnde energietypes, materialen en off-site diensten) kan gebruikt worden om een CO₂-vriendelijkere saneringsvariant te ontwerpen.

Onjuiste conversiefactoren kunnen echter leiden tot verkeerde conclusies m.b.t. CO₂-bijdragen en dus ook tot verkeerde en/of onnodige maatregelen.

Variaties in reis- en transportafstanden

In de primaire analyse werd reeds aangetoond dat ondanks het feit dat de CO₂-bijdrage ten gevolge van transport voor bioremediatie en P&T van dezelfde grootteorde is, de CO₂-bijdrage bij de bioremediatievariant een belangrijkere rol speelt (26% van de totale CO₂-voetafdruk) dan bij de P&T-variant (slechts 5% van de totale CO₂-voetafdruk). Het aanbrengen van een aantal wijzigingen in de originele P&T-variant suggereerde dat transport ook bij P&T een rol kan spelen (de impact van het vervangen van waterzijdig GAC). Grafiek 5 in Bijlagen 4.3 illustreert de CO₂-bijdrage ten gevolge van transportactiviteiten voor het saneringsonderdeel 'exploitatie en instandhouding' (O&M) en dit voor de bioremediatievariant en de P&T-variant 4.

Voor bioremediatie werd afgeleid dat 27% van de CO₂-voetafdruk voor het O&M-onderdeel te wijten is aan off-site dieselproductie en off-site dieselverbruik voor het transport van materialen, in het bijzonder nutriënten voor injectie. Daar ook in andere saneringsonderdelen (constructiefase en lange termijn monitoring) diesel verbruikt wordt voor transport, vertegenwoordigt dit 15 % van de totale CO₂-voetafdruk (i.e. CO₂-voetafdruk voor het volledige saneringstraject). Door de transportafstand naar de onderzoekslocatie te verkleinen (lokale/regionale verkoper van nutriënten) of door het gebruik van een brandstof-efficiëntere transportmethode, kan de CO₂-voetafdruk sterk verlaagd worden.

Voor P&T-variant 4 werd afgeleid dat slechts 3% van de CO₂-voetafdruk voor het E&I-onderdeel te wijten is aan off-site dieselproductie en off-site dieselverbruik voor het transport van GAC voor recyclage. Het benzineverbruik voor het wekelijks transport van personeel voor de controle en instandhouding van de sanering vertegenwoordigt ~ 13% van de CO₂-voetafdruk voor het E&I-onderdeel en minder dan 8 % voor de totale CO₂-voetafdruk. Het inzetten van een wagen met een laag brandstofverbruik voor het pendelen van en naar de onderzoekslocatie in plaats van een lichte vrachtwagen, kan de CO₂-uitstoot verder verlagen. Deze bevinding zou niet teruggevonden zijn indien enkel de originele P&T-variant geëvalueerd zou worden, daar het benzineverbruik dan slechts 1,5% van de CO₂-voetafdruk voor het E&I-onderdeel vertegenwoordigt en de CO₂-bijdrage ten gevolge van dieselproductie en dieselverbruik voor het transport van GAC veel groter is. Alle aandacht zou in de originele P&T-variant gaan naar het gebruik van GAC, het lozen van behandeld water op de riolering en elektriciteitsverbruik.

Uit deze vaststellingen blijkt dat de CO₂-voetafdruk soms wel en soms niet gevoelig is aan het brandstofverbruik voor transport, en dit naargelang de saneringstechnologie en het conceptueel ontwerp van de sanering. Ongeacht of de CO₂-voetafdruk gevoelig is aan deze parameter, heeft de CO₂-bijdrage van transportactiviteiten de potentie groot te zijn. Op basis hiervan werd in de

studie gesteld dat tijdens de ontwerpfase van de sanering beter rekening houdt met een hoge CO₂-bijdrage in plaats van met grote procentuele bijdragen.

Variaties in het volume ontgraven bodem en beton

Het saneringsonderdeel 'ontgraven' domineert de CO₂-voetafdruk in de 3 bestudeerde alternatieven. Dit komt omdat de ontgraven verontreinigde bodem beschouwd wordt als gevaarlijk afval en er bijgevolg veel diesel verbruikt wordt voor het transport van de verontreinigde grond naar de bergingsinstallatie voor gevaarlijk afval (grote transportafstand tussen de onderzoekslocatie en de bergingsinstallatie).

De CO₂-voetafdruk ten gevolge van off-site dieselverbruik voor transport bleek 60 keer groter te zijn dan de CO₂-voetafdruk voor het ontgravingsproces zelf (on-site dieselverbruik) en 4 keer de CO₂-voetafdruk geassocieerd met het storten van afval op de stortplaats voor gevaarlijke afvalstoffen.

Bijgevolg kan geconcludeerd worden dat de CO₂-voetafdruk van het saneringsonderdeel 'ontgraven' zeer gevoelig is aan de hoeveelheid te transporteren ontgraven bodem, de afstand tot de bergingsinstallatie/stort en het transportmiddel. Het ontgravingsproces van bodem en beton, de staalname voor het analyseren van de bodem (bepalen verontreinigingsgraad) en het opvullen van de ontgraving hebben daarentegen slechts een kleine bijdrage. Ook de totale CO₂-voetafdruk (volledig saneringsproject) was gevoelig aan het te ontgraven bodemvolume.

De hoeveelheid te verwijderen beton was klein in vergelijking met het te ontgraven bodemvolume (slechts 9 % van de totale massa gevaarlijk afval). Indien het beton op de site zelf of in de buurt hergebruikt kan worden, dan werd een daling van de CO₂-uitstoot van 7 à 8 % verwacht daar het beton dan niet als gevaarlijk afval gestort moet worden en dus niet naar de bergingsinstallatie getransporteerd moet worden en er is ook minder aanvulzand nodig. Het brandstofverbruik voor het breken van het beton voor hergebruik op de site is veel lager dan dat voor het transport naar een bergingsinstallatie.

Het verlengen van de tijdsduur van P&T

Daar het saneringsonderdeel 'exploitatie en instandhouding' de grootste CO₂-bijdrage levert, zal het verlengen van de saneringsduur van de P&T-variant van 40 naar 100 jaar zich vertalen in een evenredige toename van zowel de CO₂-voetafdruk voor dit onderdeel als de totale CO₂-voetafdruk en dit met een factor 2,5.

Ook andere aspecten bij P&T hebben een impact op de totale CO₂-uitstoot. Tijdens de sanering kan vastgesteld worden dat de influentconcentraties van zuiveringsinstallaties hoger/lager zijn dan verwacht en meer/minder grondwater onttrokken dient te worden om te voldoen aan de saneringsdoelstelling en/of lozingsnormen. Beide aspecten kunnen het elektriciteitsverbruik beïnvloeden van extractiepompen en de lucht stripper, alsook het GAC-verbruik (lucht- en waterzijdige GAC) en dit resulteert dan in een stijging of daling van de CO₂-voetafdruk.

Het reduceren van de monitoringsfrequentie bij lange-termijn monitoring

Laboratoriumanalyses bleken de belangrijkste CO₂-bijdrage te leveren voor het saneringsonderdeel 'lange-termijn monitoring'. Door de monitoringsfrequentie te laten dalen van 4 keer per jaar naar 2 keer per jaar wordt de CO₂-voetafdruk voor het saneringsonderdeel 'LTM' bijna gehalveerd, daar het aantal te analyseren stalen gehalveerd wordt.

De totale CO₂-voetafdruk van de bioremediatievariant zou hierdoor met ~ 8% dalen en deze van de originele P&T-variant met ~ 1,5 %.

Er wordt nogmaals op gewezen dat de conversiefactoren voor laboratoriumanalyses door experts werden afgeleid, speciaal voor deze studie.

3.2.6.4 Algemene vaststelling gevalstudie

De vaststellingen die uit bovenstaande gedetailleerde interpretatie kunnen afgeleid worden, worden opgesplitst in vaststellingen die enkel relevant zijn voor de bestudeerde site en algemene vaststellingen die volgens de onderzoekers in de studie van toepassing zijn voor alle saneringsprojecten. De onderzoekers merkten wel op dat deze algemene vaststellingen kunnen wijzigen of verfijnd worden aan de hand van gelijkaardige analyses uitgevoerd voor andere gevalstudies en andere saneringstechnologieën.

Vaststellingen relevant voor de bestudeerde site

De observaties zijn gebaseerd op de resultaten voor de saneringsvarianten voor de bestudeerde Romic-site. De analyseresultaten van de CO₂-voetafdruk zijn sterk afhankelijk van de site-specifieke aannames en bijgevolg kunnen de vaststellingen in deze studie niet zomaar vertaald worden naar de CO₂-voetafdruk in het algemeen of naar andere sites, zelfs niet als dezelfde saneringstechnieken aangewend worden.

1. De totale CO₂-voetafdruk van bioremediatie < hybridevariant < P&T.
2. De on-site CO₂-voetafdrukken van de 3 varianten waren van dezelfde grootteorde, maar zeer klein in vergelijking met de CO₂-bijdrage van off-site activiteiten. De CO₂-uitstoot van deze 3 varianten veroorzaakt dus geen lokaal effect, enkel een globaal effect.
3. De grootste CO₂-bijdragen bij bioremediatie werden veroorzaakt door het off-site dieselvebruik (i.e. voor transport), de productie van nutriënten voor injectie en laboratoriumanalyses.
4. De grootste CO₂-bijdragen bij de P&T- en de hybridevariant werden veroorzaakt door dat het gebruik van GAC, off-site afvalwaterbehandeling en elektriciteits-productie.
5. Het saneringsonderdeel 'ontgraven' werd gedomineerd door de CO₂-uitstoot t.g.v. het dieselvebruik voor transport van ontgraven bodem naar het grondreinigings-centrum (GRC) of de bergingsinstallatie, gevolgd door de CO₂-uitstoot t.g.v. het afvalbeheer/afvalbehandeling in het GRC en de CO₂-uitstoot t.g.v. de productie van beton voor het aanbrengen van verharding. Het on-site dieselvebruik had maar een minimale CO₂-bijdrage. On-site reinigen en hergebruiken van de ontgraven bodem en/of het scheiden van niet-gevaarlijk en gevaarlijk afval zou de CO₂-voetafdruk aanzienlijk kunnen verlagen.
6. De CO₂-bijdrage van transportactiviteiten is voor bioremediatie en P&T van dezelfde grootteorde. Toch speelt deze CO₂-bijdrage bij bioremediatie een belangrijkere rol dan bij P&T, daar deze bij P&T overschaduwd worden door andere sanerings-aspecten met een grotere CO₂-bijdrage. Aanpassingen aan het saneringsontwerp zoals het inzetten van voertuigen met een lager brandstofverbruik hebben eenzelfde verlagend effect op de CO₂-uitstoot (uitgedrukt in gewicht), maar de procentuele bijdrage hiervan is groter bij bioremediatie dan bij P&T.
7. De CO₂-bijdrage voor het transporteren van de nutriënten (in casu melasse en kaaswei) en de CO₂-bijdrage voor het produceren van deze nutriënten waren van dezelfde grootteorde. Het lokaal aanwenden van nutriënten kan de CO₂-voetafdruk verlagen als gevolg van een afname van de transportafstand.
8. In het ontwerp van de bioremediatievariant was de te injecteren massa kaaswei kleiner dan deze van melasse en ook de transportafstand naar de site was kleiner voor kaaswei dan voor melasse. De CO₂-voetafdruk voor het produceren van kaaswei is echter groter dan deze voor het produceren van melasse. Er is een afweging nodig tussen de CO₂-voetafdruk t.g.v. het transporteren van nutriënten en de CO₂-voetafdruk voor het produceren van de nutriënten.
9. De CO₂-voetafdruk voor het saneringsonderdeel 'exploitatie- en instandhouding' was in de 3 saneringsvarianten het grootst. Bij P&T was dit het enige sanerings-onderdeel met een relevante bijdrage. Bij bioremediatie hadden de sanerings-onderdelen 'ontgraven', 'LTM' en 'constructie' ook een belangrijke bijdrage. De saneringsonderdelen 'bodemonderzoek' en 'ontmanteling' hadden in geen enkele variant een belangrijke bijdrage.

10. Het saneringsonderdeel 'constructie' leverde in de 3 saneringsvarianten de grootste procentuele bijdrage aan de on-site CO₂-voetafdruk, maar de procentuele bijdrage aan de off-site CO₂-voetafdruk en totale CO₂-voetafdruk was veel lager.
11. Het vervangen van melasse en kaaswei door plantaardige olie zou de totale CO₂-voetafdruk sterk verlagen als gevolg van de CO₂-voetafdruk voor de productie van de nutriënten en de CO₂-voetafdruk voor het transport. Dit was enkel een illustratie daar er geen pilootproef met plantaardige olie was uitgevoerd.
12. Door het ontwerp van de originele P&T-variant aan te passen (o.a. verandering van de luchtstripper met een verlenging van het GAC-verbruik), kon de CO₂-voetafdruk verlaagd worden en werd het verschil met de bioremediatievariant veel kleiner. Dus het ontwerp van een P&T-variant beïnvloedt de CO₂-voetafdruk van de sanering evenveel als de keuze tussen het implementeren van P&T of bioremediatie.
13. Het gebruik van hernieuwbare energie zou de CO₂-voetafdruk van P&T verder verlagen, waardoor de voetafdrukken voor de meeste parameters bijna gelijkaardig zouden zijn aan deze van de bioremediatievariant.
14. Met betrekking tot transport- en werkkosten werd bovendien vastgesteld dat bij de hybridevariant meer transportbewegingen van en naar de site nodig zijn en meer mandagen nodig waren dan bij P&T of bioremediatie.

Algemene vaststellingen in kader van bodemsaneringsprojecten

1. Zowel on-site saneringsactiviteiten, transport, als off-site saneringsactiviteiten leveren elk een belangrijke CO₂-bijdrage.
2. Het off-site transport van afval (grond, beton, ...) naar een GRC heeft een veel grotere CO₂-bijdrage dan de off-site verwerking van het afval zelf.
3. Indien al het materiaal nodig voor de sanering lokaal kan aangewend worden en indien een saneringsbedrijf uit de buurt wordt aangeduid voor het uitvoeren van de saneringswerken (plaatsing en onderhoud van de opstelling), dan blijft de CO₂-uitstoot ten gevolge van transport beperkt daar de transportafstanden beperkt blijven.
4. Het ontwerp van de sanering is even belangrijk als de keuze van de saneringstechniek zelf. Het optimale ontwerp (i.e. meest CO₂-vriendelijk) is sterk afhankelijk van site-specifieke omstandigheden. Aangezien het ontwerp van een sanering pas in detail wordt uitgewerkt nadat een saneringstechnologie geselecteerd werd, wordt voorgesteld om via een gevoeligheidsanalyse na te gaan aan welke veranderingen in het ontwerp de saneringsvariant gevoelig is.
5. Het bepalen van CO₂-voetafdrukken kan de selectie van een sanerings-technologie, het ontwerp en de implementatiefasen beïnvloeden.
6. De CO₂-voetafdruk kan ook aangeven welke saneringsonderdelen en/of -processen een belangrijke impact hebben en zo kan nagegaan worden hoe het ontwerp van de saneringsvariant kan aangepast worden om een CO₂-vriendelijkere variant te bekomen.
7. Saneringsaspecten met een procentueel kleine bijdrage aan de totale CO₂-voetafdruk worden overschaduwd door deze met een grote procentuele CO₂-bijdrage. Saneringsaspecten met een kleine bijdrage krijgen hierdoor weinig aandacht, ondanks het feit dat aanpassingen aan zulke saneringsaspecten een aanzienlijke verlaging van de CO₂-voetafdruk teweeg kunnen brengen. Het toepassen van CO₂-vriendelijke saneringsmaatregelen waar mogelijk, zal de CO₂-bijdrage van alle saneringsaspecten (grote of kleine bijdrage) ten goede komen. Bv. het inzetten van brandstofefficiëntere voertuigen.
8. De kwaliteit van de CO₂-voetafdrukken is afhankelijk van de ingevoerde informatie met betrekking tot het saneringsontwerp (i.e. beschouwde saneringsonderdelen), de saneringsaspecten en de saneringsparameters. Sommige invoervariabelen liggen voor de hand, maar voor sommige aspecten vb. saneringsduur, veranderingen van influentconcentraties, ... is het niet altijd mogelijk om dit juist in te schatten. Een gevoeligheidsanalyse kan deze variaties in beeld brengen.
9. De kwaliteit van de CO₂-voetafdrukken is eveneens afhankelijk van de keuze van de conversiefactoren, indien meerdere conversiefactoren beschikbaar zijn.

10. Bij de keuze van de saneringsvariant komt bescherming van mens en milieu op de eerste plaats. Omwille van onzekerheden met betrekking tot de kwaliteit van de CO₂-voetafdruk (zie punten 8 en 9), dient voorzichtig omgegaan te worden met dit aspect bij de selectie van de meest geschikte saneringsvariant. De CO₂-voetafdruk is slechts één van de criteria die de keuze van de saneringsvariant mee sturen.
11. Tijdens de studie zijn een aantal belangrijke vragen naar boven gekomen met betrekking tot het afleiden van de CO₂-voetafdruk van nutriënten voor injectie in de bodem, o.a. melasse (bijproduct suikerraffinaderij) en kaaswei (bijproduct kaasproductie):
 - Moet de volledige CO₂-voetafdruk voor de productie van kaas of suiker in rekening gebracht worden voor zowel het eindproduct als de bijproducten (melasse en kaaswei)?
 - Of dients slechts een bepaald percentage in rekening gebracht te worden voor de bijproducten (evt. gebaseerd op de kostprijs, daar vele bijproducten op verschillende wijze toegepast kunnen worden en dus niet aanzien worden als afval)?
 - Een andere mogelijke aanpak om de CO₂-voetafdruk van materialen of grondstoffen te bepalen is na te gaan in welke mate ze ook zouden kunnen dienen voor andere doeleinden (bv. Voeding).
12. De CO₂-uitstoot is niet enkel te wijten aan energie- en materiaalverbruik. Ook emissies bij behandelingsprocessen of off-site diensten (afvalbeheer) kunnen een belangrijke CO₂-bijdrage leveren. De aanwezigheid van andere broeikasgassen zoals N₂O, CFC's, ... resulteert in een extra bijdrage aan de CO₂-voetafdruk.
13. De bijdrage van het bodemonderzoek en de ontmantelingsfase is veel kleiner dan deze van de constructiefase, de exploitatie- en instandhoudingsfase of LTM. De exploitatie- en instandhoudingsfase domineert meestal de CO₂-voetafdruk. Bijgevolg zal de bijdrage van dit saneringsonderdeel bepalen of bijvoorbeeld de relatieve bijdrage van de constructiefase al dan niet belangrijk is.
14. Het is aan te raden om voor een saneringsvariant opgebouwd uit verschillende saneringsonderdelen deze afzonderlijk te bestuderen.
15. Wanneer materialen die veel gebruikt worden in saneringsvarianten op een CO₂-vriendelijkere wijze geproduceerd worden, komt dit de CO₂-voetafdruk van een saneringsproject ten goede.
16. Het effect van een maatregel om de CO₂-voetafdruk te verlagen heeft ook een impact (positief/negatief) op de voetafdruk van andere milieuparameters. Ook de grootteorde van de impact zal verschillen naargelang de milieuparameter.
17. Om de CO₂-voetafdruk van een saneringsproject te bepalen dienen een groot aantal variabelen geïnventariseerd te worden en dit vergt een aanzienlijke inspanning. Het proces kan gestroomlijnd worden door deze informatie te organiseren in een CO₂-rekeninstrument.

4 Beschikbare CO₂-rekentools

Om de CO₂-voetafdruk van een saneringsproject te bepalen, dient een groot aantal invoervariabelen (saneringsparameters, basiselementen en conversiefactoren) geïnventariseerd te worden en dit vergt een aanzienlijke inspanning.

Dit proces kan vereenvoudigd en geuniformiceerd worden door deze informatie te genereren en organiseren met behulp van een "CO₂-rekentool".

CO₂-rekentools zijn erop gericht om op een relatief snelle manier een inschatting te maken van de te verwachten uitstoot van koolstofdioxide (CO₂) en dit voor het volledige saneringstraject en de daartoe behorende saneringsonderdelen.

Verschiede buitenlandse instanties c.q. bedrijven (US-EPA, Atkins (UK), Tauw en HMVT (Nederland),) hebben reeds rekentools ontwikkeld om de CO₂-uitstoot van saneringsvarianten te begroten en te vergelijken. Deze rekentools worden in de volgende paragrafen kort toegelicht.

4.1 CO₂-calculator van Tauw (Nederland)

De calculator van Tauw is opgemaakt in Excel⁹ en bestaat uit een invoerscherm, 3 databanken met o.a. de conversiefactoren, een berekeningsscherm en een uitvoerscherm. In het uitvoerscherm worden de resultaten zowel in tabelvorm als grafisch weergegeven.

De saneringsonderdelen die aan bod komen zijn: ontgraven, grondwater onttrekken, grondwater zuiveren, PLI en BLE, MFE, ISCO, biostimulatie, thermische in-situ sanering en tenslotte nog toezicht en nazorg.

Per saneringsonderdeel worden vervolgens de belangrijkste saneringsaspecten weergegeven en per saneringsaspect dienen door de deskundige de nodige saneringsparameters ingevoerd te worden. Wanneer alle invoervariabelen gekwantificeerd zijn, kan de CO₂-voetafdruk van de saneringsvariant geëvalueerd en geïnterpreteerd worden aan de hand van het uitvoerscherm.

De rekentool heeft 2 doelen: (1) het kwantificeren van de duurzaamheid van verschillende saneringstechnieken en (2) de inzet van duurzame energiebronnen bij conventionele saneringstechnieken. De mogelijke inzet van alternatieve energiebronnen (zonne-energie, windenergie) bij de huidige bodemsaneringstechnieken is een middel om de duurzaamheid van conventionele saneringen te verbeteren en wordt door Tauw nader onderzocht.

4.2 Rekentool HMVT (Nederland)

Ook HMVT heeft voor het berekenen van de CO₂-belasting van saneringen een CO₂-model¹⁰ ontwikkeld. HMVT stelt een basismodel (via het internet) beschikbaar waarmee een eerste inschatting kan gemaakt worden. De berekeningen en gehanteerde conversiefactoren zijn echter niet zichtbaar en dus ook niet wijzigbaar. Via deze tool wordt geen informatie bekomen met betrekking tot de impact van de verschillende saneringsonderdelen op de CO₂-voetafdruk. Een meer uitgebreide versie van de rekentool is mogelijk ook beschikbaar.

⁹ Beschikbaar voor download op:

http://www.begripinbodem.nl/index.php?page=bodemwatersanering_en_grondwatersanering_duurzame_bodemsanering

¹⁰ [http://www.hmvt.nl/gfx/content/CO₂_v0.5.swf](http://www.hmvt.nl/gfx/content/CO2_v0.5.swf)

4.3 Rekenmodule carbon footprint US EPA (draftversie; US)

Zoals reeds aangegeven in § Gemiddeld energieverbruik en gemiddelde CO₂-uitstoot van 5 actieve saneringstechnologieën in de US (Draft report US-EPA, 2008) heeft ook USEPA (2008) het energieverbruik, de CO₂-uitstoot en de energiekosten van saneringstechnologieën geanalyseerd en een rekeninstrument (Excel-model¹¹) ontwikkeld. In deze tool worden de vijf technologieën P&T, bodemluchtexttractie, multi-fase-extractie, persluchtinjectie en thermische desorptie beschouwd. De eerste versie (draftversie) van het model maakt voor een aantal variabelen gebruik van nationale gemiddelden en is zo gestructureerd dat een gebruiker andere factoren kan invoeren voor deze variabelen.

Voor elk van de 5 technologieën werden zeven werkbladen opgemaakt. De eerste 3 werkbladen geven het aantal projecten weer waar de technologie in het verleden en heden is toegepast alsook een prognose tot 2030. In werkbladen 4 en 5 wordt resp. het elektriciteitsverbruik en het verbruik van fossiele brandstoffen en de ermee gepaard gaande CO₂-emissies berekend in functie van de saneringsduur van de saneringstechnologie. Werkblad 6 geeft het totale energieverbruik (elektriciteit en brandstoffen) alsook de totale CO₂-uitstoot weer voor de saneringstechniek voor een periode van 23 jaar (i.e. 2008 tot 2030). In werkblad 7 wordt het energieverbruik en de CO₂-uitstoot uit werkblad 6 vermenigvuldigd met het gemiddeld aantal jaarlijks te verwachten projecten tot 2030. Werkblad 8 tenslotte is een referentietabel met gegevens specifiek voor de technologie.

4.4 ROCC (UK)

ROCC¹² (Remediation Options Carbon Calculator) is een te betalen webgebaseerde rekentool - ontwikkeld door Atkins (UK) - voor het berekenen van de CO₂-uitstoot van saneringstechnieken op basis van het te saneren verontreinigd volume, transport van goederen, emissies van de installatie en het brandstofverbruik van gespecialiseerde zuiveringsinstallaties.

Het staat toe om de CO₂-voetafdruk te bepalen van volgende vijf saneringstechnieken: ontgraven in combinatie met off-site transport, bodemwassen, bioremediatie, thermische desorptie en stabilisatie.

Tot op heden is het moeilijk voor deskundigen en aannemers om de CO₂-voetafdruk van saneringsprojecten adequaat te berekenen. CO₂-emissiefactoren (conversiefactoren) in verband met transport van voertuigen, bouwvoertuigen en saneringsapparatuur zijn niet direct beschikbaar in het publieke domein. ROCC heeft deze emissiefactoren samengevat en stelt de gebruiker in staat om de CO₂-voetafdruk van verschillende saneringsvarianten eenduidig te vergelijken. Er werd samengewerkt met leveranciers van saneringstechnologieën om het energieverbruik en de CO₂-uitstoot van verschillende saneringstechnieken zo goed mogelijk in kaart te brengen.

De tool berekent de directe CO₂-uitstoot van:

- ➔ voertuigen die worden gebruikt voor het vervoer van hulpmiddelen en afval, uitrusting en bouw materieel;
- ➔ bouwvoertuigen ingezet tijdens de sanering;
- ➔ chemicaliën gebruikt tijdens de sanering;
- ➔ gespecialiseerde apparatuur.

In ROCC kan een deskundige de geselecteerde technieken, eigenschappen van de locatie en de bodemmassa op eenvoudige wijze ingeven. Reisafstanden voor het vervoer van materiaal worden in deze tool berekend met behulp van de Microsoft MapPoint Web Service en dit zorgt voor nauwkeurige up-to-date reisroutes via de ROCC interface. Dit betekent dat gebruikers de

11 <http://www.clu-in.org/greenremediation/subtab> b3.cfm

12 <http://atkinsrocc.com/Public/Default.aspx>

stad/postcode van de site invoeren en de bestemming van een bepaald onderdeel en de route wordt automatisch berekend en gebruikt om de geassocieerde CO₂-uitstoot te berekenen. Verder wordt automatisch informatie verschaft over bv. de beschikbare stortplaatsen voor gevaarlijk afval. Na voltooiing van de invoergegevens wordt een overzicht gegeven van de invoergegevens en de berekende CO₂-uitstoot van elke saneringsvariant.

ROCC zorgt voor een duidelijke en objectieve meting van de CO₂-uitstoot van saneringsvarianten en stelt de deskundige in staat om aan te geven welke saneringsaspecten een belangrijke impact hebben op de CO₂-uitstoot. De deskundige kan vervolgens aangeven op welke manier het saneringsproject, de logistiek en de processen kunnen aangepast worden om de CO₂-uitstoot en de energie-efficiëntie te verbeteren. Het kan tevens de keuze van de saneringstechniek mee beïnvloeden.

4.5 SiteWise TM (US)

Het rekeninstrument SiteWise¹³ is ontwikkeld door de U.S. Navy, USACE¹⁴ en Battelle en berekent de ecologische voetafdruk van een saneringsvariant op basis van de uitstoot van broeikasgassen (CO₂-emissie), energieverbruik, luchtverontreiniging (o.a. NO_x-, SO_x- en PM-uitstoot), waterverbruik en de veiligheid. Voor de beoordeling wordt elk saneringsvariant opgedeeld in 4 modules (saneringsfasen), namelijk: sanerings-onderzoek (RI), saneringconstructies (RAC), saneringsoperatie (RA-O) en lange-termijn monitoring (LTM). Vervolgens wordt de voetafdruk van elke module individueel berekend. De verschillende voetafdrukken worden gecombineerd om de totale voetafdruk van de saneringsvariant te bepalen. Deze aanpak vergemakkelijkt de identificatie van activiteiten met een grote ecologische voetafdruk.

De beschouwde invoergegevens zijn:

- ➔ productie van materiaal nodig voor de sanering;
- ➔ transport van de nodige materialen naar de site;
- ➔ de uit te voeren werkzaamheden op de site;
- ➔ beheer van afval geproduceerd tijdens de sanering.

Materiaalgebruik komt slechts in aanmerking indien de materialen volledig verbruikt worden. Zo wordt bv. de voetafdruk van polyvinylchloride (PVC) voor leidingen mee beschouwd omdat het wordt gebruikt voor de installatie. Echter, de ecologische voetafdruk voor de productie van gebruikte apparatuur of de productie van voertuigen gebruikt voor transport wordt niet beschouwd. Aan de hand van de vergelijkende analyse van maximaal zes saneringsvarianten kan de meest geschikte variant (CO₂-vriendelijkste) geselecteerd worden. Het kan ook gebruikt worden als onderdeel van optimalisatiestudies.

Het Excel-model bestaat uit 6 mappen (1 per saneringsvariant) en elke map bevat de berekeningsbladen voor de 4 saneringsfasen (RI, RAC, RA-O en LTM), alsook een invoerblad en een blad met een samenvatting van de resultaten voor die saneringsvariant. Daarnaast zijn ook tabellen met de gehanteerde default-waarden voor de berekeningen opgenomen (i.e. de conversiefactoren). De gebruiker kan zelf (indien gewenst) de waarden aanpassen met site-specifieke gegevens. Tenslotte is er nog het blad dat een globaal overzicht geeft van de verschillende varianten.

¹³ www.ert.org

¹⁴ U.S. Army Corps of Engineers

4.6 SRT TM (US) ¹⁵

Het rekeninstrument SRT (Sustainable Remediation Tool) is ontwikkeld door AFCEE¹⁶ en partners en berekent de CO₂-, NO_x-, SO_x- en PM10-uitstoot, het totale energieverbruik, verandering in grondstoffen, de technologische kosten en de veiligheid van sanerings-technieken op basis van informatie ingegeven door de gebruiker. SRT werd ontwikkeld om toekomstige saneringswerken op een bepaalde locatie te evalueren, als middel om bestaande saneringstechnieken te optimaliseren of om saneringsvarianten onderling te vergelijken. Het model bevat 8 technologieën, waarvan drie voor bodem (ontgraving, bodemluchtextractie en thermische behandeling) en vijf voor grondwater (P&T, in-situ gestimuleerde biodegradatie, in-situ chemische oxidatie (ISCO), permeabele reactieve schermen (PRB) en lange-termijn monitoring (LTM) in combinatie met monitoring van natuurlijke attenuatie (MNA)).

Het in Excel opgemaakte model heeft een getrapte structuur gebaseerd op risico gebaseerde saneringsmaatregelen (RBCA). In Stap 1 zijn de berekeningen gebaseerd op vuistregels die op grote schaal worden gebruikt voor saneringen. Stap 2 bevat meer gedetailleerde berekeningen en integreert site-specifieke factoren. Een gebruiker kan kiezen voor Stap 1 in plaats van Stap 2 als een snelle evaluatie volstaat of indien gedetailleerde site-specifieke gegevens ontbreken.

Het model bestaat uit 3 schermen: een invoerscherm, een technologiescherm en een outputscherm. Het invoerscherm verzamelt algemene informatie, zoals een beschrijving van de aanwezige verontreiniging in bodem en grondwater en site specifieke informatie. In het technologiescherm dient de gebruiker gegevens in te voeren met betrekking tot het ontwerp van de sanering, de gebruikte materialen en grondstoffen en energieverbruik. Het outputscherm geeft tenslotte een overzicht van de resultaten. De resultaten worden gepresenteerd in zowel een niet genormaliseerd formaat als een genormaliseerd kostengebaseerd formaat. De niet-genormaliseerde resultaten worden uitgedrukt in eenheden (bv. de uitstoot van koolstofdioxide wordt gegeven in ton), terwijl de genormaliseerde resultaten worden uitgedrukt in Amerikaanse dollar. Naast directe invoergegevens bevat het model ook default waarden of berekende waarden op basis van vuistregels of algoritmen. De meeste variabelen kunnen worden aangepast door de gebruiker indien meer site-specifieke gegevens beschikbaar zouden zijn.

4.7 Conclusie rekentool

Bij vergelijking van de verschillende beschikbare calculators kunnen volgende algemene vaststellingen gedaan worden:

- ➔ Sommige rekentools (SRT en SiteWise) beschouwen naast CO₂ ook andere milieuparameters. Aangezien dit geen extra inspanning vergt (het aantal invoervariabelen wijzigt nauwelijks of niet), de resultaten per parameter voorgesteld worden en bijgevolg de CO₂-uitstoot afzonderlijk geïnterpreteerd kan worden, wordt dit niet beschouwd als een nadeel (eerder een voordeel).
- ➔ De gehanteerde saneringstechnologieën verschillen per rekentool (zie Tabel).

¹⁵ www.afcee.af.mil/resources/technologytransfer/programsandinitiatives/sustainableremediation/srt/index.asp

¹⁶ Air Force Center for Engineering and the Environment

Saneringstechnologie	Rekentools				
	Tauw	HMVT	US EPA	ROCC	SiteWise
Ontgraven	X			X	
P&T	X		X		
PLI	X		X		
BLE	X		X		
MFE	X		X		
ISCO	X		X		
Biostimulatie	X			X	
TD	X			X	
Toezicht en nazorg	X				
Bodemwassen				X	
Stabilisatie				X	
LTM					
MNA					

Tabel 3: Samenvatting gehanteerde saneringstechnologieën in de 6 rekentools

- ➔ De rekentool van HMVT heeft als nadeel dat het noch saneringstechnologieën, noch saneringsonderdelen opneemt. In het rekeninstrument dient onmiddellijk het totale verbruik ingevoerd te worden van water, elektriciteit, gas, diesel, chemicaliën, ...), nodig voor de totale sanering. Ook wordt gevraagd om aan te geven op welke wijze de ontgraven verontreinigde bodem behandeld zal worden. In principe zou de totale CO₂-uitstoot van deze rekentool gelijkaardig moeten zijn aan deze van de andere rekentools, maar de kans dat een bepaald saneringsaspect of -parameter niet in rekening wordt gebracht is groter dan bij de andere rekentools. Bovendien geeft de HMVT-rekentool geen informatie vrij m.b.t. de gehanteerde conversiefactoren en bijgevolg zijn deze dus ook niet wijzigbaar.
- ➔ In het rekenmodel Sitewise is geen voorgeprogrammeerd invoerschema beschikbaar per saneringstechnologie. De deskundige geeft wel de mogelijkheid om aan de hand van een algemeen overzicht van saneringsparameters voor 4 saneringsonderdelen (bodemonderzoek, constructie, exploitatie en LTM) 6 saneringsvarianten op te stellen. Hij doet dit door voor elke saneringsvariant de relevante saneringsparameters in te vullen. In dit rekenmodel worden tevens de broeikasgassen CH₄ en N₂O meegenomen en uitgedrukt in CO₂-eq. De CO₂-voetafdruk geeft in dit geval niet alleen de CO₂-uitstoot ten gevolge van de sanering weer, maar ook de bijdrage van de CH₄- en N₂O-uitstoot aan de opwarming van de aarde.
- ➔ De rekentool van de US EPA heeft als nadeel dat het geen materiaalverbruik meeneemt, enkel energieverbruik (brandstof en elektriciteit).

Zowel in de rekentool van Tauw als deze van SRT komen een groot aantal saneringstechnologieën aan bod. De rekentool van Tauw heeft een aantal voordelen, namelijk:

- ➔ de meest courante saneringstechnologieën en -onderdelen zijn opgenomen in de CO₂-rekentool en worden op een overzichtelijke wijze weergegeven;
- ➔ per saneringsonderdeel wordt duidelijk aangegeven voor welke sanerings-parameters waarden dienen ingevoerd te worden en/of een keuze gemaakt moet worden uit keuzelijsten. Ook worden de saneringsparameters met een doorslaggevende impact op de CO₂-uitstoot in de tool duidelijk aangeduid;
- ➔ er zijn databladen beschikbaar die de vaste parameters (o.a. conversiefactoren, energieverbruiken, ...) weergeven;
- ➔ ook het rekenblad kan geraadpleegd worden (formules zijn niet zichtbaar);
- ➔ de resultaten worden weergegeven in het uitvoerscherm aan de hand van overzichtelijke tabellen en grafieken;

- de tool is gratis beschikbaar in het Nederlands, neemt de saneringstechnieken in beschouwing die relevant zijn voor Vlaanderen en de saneringsparameters worden uitgedrukt in standaard (SI) eenheden.

Een aspect dat bij alle rekentools nagegaan dient te worden is of de gehanteerde aannames, conversiefactoren en energie- en brandstofverbruiken van o.a. pompen en machines ook gelden voor Vlaanderen en/of deze eventueel aangepast dienen te worden, b.v. op basis van informatie beschikbaar binnen VITO (CO₂-uitstoot van machines, voertuigen, elektriciteitsverbruik, ...). Ook de uitgangspunten en randvoorwaarden van de CO₂-rekenmodellen dienen nagegaan te worden.

Hieronder worden de uitgangspunten en randvoorwaarden van het CO₂-model van Tauw opgelijst en wordt voorgesteld hoe deze geëvalueerd kunnen worden:

- in de berekeningen worden gemiddelde waarden gehanteerd voor energiespecificaties van machines en materiaal indien hiervoor waardevoorken beschikbaar zijn;
→ Zo zal bv. het brandstofverbruik variëren naargelang de graafmachine en bijgevolg werd in het rekenmodel van Tauw een gemiddelde waarde gehanteerd. Mogelijke aanpassingen voor de specifieke situatie in Vlaanderen dienen te worden nagegaan.
- de samenstelling van en dus ook de CO₂-uitstoot ten gevolge van stroomverbruik is gebaseerd op de Nederlandse situatie van 2007 en 2008. Deze waarden kunnen wijzigen in de tijd, ook van land tot land.
→ Er dient nagegaan te worden of de samenstelling van de stroom in Vlaanderen sterk verschillend is van deze in Nederland en/of dit aangepast dient te worden in het rekenmodel van Tauw.
- per activiteit kan slechts één vorm van energie gekozen worden waardoor een combinatie van verschillende energievormen dus niet mogelijk is;
→ Stel dat er 2 types machines worden ingezet, waarvan 1 diesel verbruikt en de andere benzine, dan dient er in het rekenmodel een keuze gemaakt te worden. Er dient dus overlegd te worden of deze aanname volstaat voor het rekenmodel van Vlaanderen. Ev. dient nagegaan te worden bij welke aspecten dit een probleem zou kunnen vormen en vervolgens kan via een gevoeligheidsanalyse nagegaan worden wat de impact hiervan is op de totale CO₂-uitstoot.
- CO₂-uitstoot ten gevolge van de productie van de machines zelf wordt niet meegenomen in de rekentool, enkel het energieverbruik tijdens de sanering (elektriciteit en brandstof) zelf;
→ Dit geldt voor alle CO₂-rekentools.
- De conversiefactoren voor de verschillende basiselementen (energietypes en materialen) worden in dit model "PER-waarden" genoemd. Deze zijn gebaseerd op normale productieprocessen en gebruik van grijze stroom of fossiele brandstoffen. Indien bij het productieproces van een bepaald materiaal hernieuwbare energie werd ingezet, dient in het rekenmodel de absolute hoeveelheid van dat materiaal aangepast te worden door een relatieve hoeveelheid in te voeren die dezelfde factor lager ligt als de factor tussen de CO₂-emissie per kWh van grijze stroom/ fossiele brandstoffen en de alternatieve energiebron.
→ De impact op de CO₂-voetafdruk dient nagegaan te worden aan de hand van een gevoeligheidsanalyse.

5 Voorstel aanpak CO₂-rekentool voor Vlaanderen

In de volgende projectfase zullen een aantal van de hoger beschreven beschikbare CO₂-rekentools verder worden getest aan de hand van een gevalstudie. Na toepassing van de geselecteerde rekentools op de gevalstudie zullen de uitkomsten van de verschillende tools onderling vergeleken en geëvalueerd worden.

Indien de berekende CO₂-voetafdrukken voor de verschillende CO₂-calculatoren sterk zouden verschillen, zal getracht worden om de redenen hiervoor te achterhalen. Uit de literatuurvoorbeelden (Hoofdstuk 3) kon al afgeleid worden dat aannames m.b.t. de saneringsparameters, basiselementen en conversiefactoren (de invoervariabelen) een belangrijke impact hebben op de berekende CO₂-voetafdruk.

Indien vergelijkbare CO₂-voetafdrukken worden verkregen met de verschillende CO₂-calculatoren, wordt voorgesteld om de CO₂-rekentool van Tauw verder te evalueren en te implementeren. Zoals aangegeven in § 4.7 houdt een evaluatie van de CO₂-rekentool van Tauw in dat de uitgangspunten, de randvoorwaarden, de geselecteerde saneringsparameters en de in te voeren variabelen nader bestudeerd zullen worden. Zo zal bijvoorbeeld nagegaan worden of de gehanteerde conversiefactor voor de berekening van de CO₂-uitstoot ten gevolge van stroomverbruik ook van toepassing is voor Vlaanderen en of deze al dan niet aangepast dient te worden. Ook zal nagegaan worden of de informatie m.b.t. de CO₂-uitstoot van machines, de CO₂-uitstoot van off-road en on-road voertuigen aangepast dient te worden op basis van informatie beschikbaar binnen VITO.

Indien in Vlaanderen andere conversiefactoren, uitgangspunten en randvoorwaarden van toepassing zouden zijn, zal nagegaan worden of dit al dan niet kan opgenomen/toegevoegd worden in/aan de bestaande CO₂-rekenmodule van Tauw.

Indien aanpassingen aan het CO₂-model van Tauw nodig zijn op basis van “Vlaamse” gegevens en indien blijkt dat deze niet ingevoerd/aangepast kunnen worden, kan door VITO een aangepast CO₂-rekenmodel ontwikkeld worden met een gelijkaardige opzet als het CO₂-model van Tauw.

6 Algemeen besluit Fase 1

Bij de keuze van een bodemsaneringstechniek zijn vaak meerdere partijen (o.a. eigenaar van de site, de deskundige, de overheid, aannemers en ev. omwonenden (buurtcomité) betrokken. Tot nog toe werd bij de keuze van de saneringstechniek(en) voornamelijk gekeken naar minimalisatie van de lokale risico's (risicogebaseerde aanpak), de saneringsduur en financiële en technische overwegingen. De ecologische voetafdruk van saneringsprojecten en het gebruik van gerecycleerde materialen en hernieuwbare energie krijgen echter steeds meer aandacht evenals de ontwikkeling van geschikte rekeninstrumenten om dit te begroten. Het doel van deze eerste projectfase was om bestaande informatie te verzamelen en samen te vatten m.b.t. de CO₂-uitstoot ten gevolge van saneringen (de zogenaamde CO₂-voetafdruk).

Aan de hand van de literatuurstudie konden 6 stappen gedefinieerd worden die doorlopen moeten worden bij de berekening en de interpretatie van de CO₂-voetafdruk van saneringsprojecten, namelijk:

- Stap 1 – Selectie van de saneringsvarianten
- Stap 2 – Uitwerken conceptueel ontwerp saneringstechnologie(en)
- Stap 3 – Inventarisatie van het energie- en materiaalverbruik en off-site diensten
- Stap 4 – Inventarisatie van de conversiefactoren
- Stap 5 – Berekenen van de CO₂-voetafdruk
- Stap 6 – Interpretatiefase

Uit de literatuurstudie kon afgeleid worden dat verschillende CO₂-voetafdrukken berekend en geanalyseerd kunnen worden. Door de totale CO₂-voetafdruk van verschillende saneringsvarianten te vergelijken, kan afgeleid worden welke de meest "CO₂-vriendelijke" saneringsvariant is. Door na te gaan welke processen/onderdelen binnen de saneringsvariant veel CO₂ uitstoten, kunnen alternatieven gezocht worden en op deze wijze kan de CO₂-uitstoot een rol spelen bij het ontwerpen van 'groenere' saneringsvarianten. Hiervoor dient niet alleen de totale CO₂-voetafdruk van een saneringsproject bepaald te worden, maar dient de bijdrage van on-site activiteiten, transport en off-site activiteiten op de CO₂-voetafdruk geanalyseerd te worden en/of de CO₂-voetafdruk per saneringsonderdeel. Aan de hand van een gevoeligheidsanalyse kan nagegaan worden aan welke invoervariabelen de CO₂-voetafdruk gevoelig is.

Voor de berekening van een CO₂-voetafdruk van een volledig saneringsproject dient veel informatie zoals saneringsparameters, basiselementen, conversiefactoren, energie- en brandstofverbruiken van toestellen en machines, ... verzameld en geïnventariseerd te worden en dit vergt een aanzienlijke inspanning.

Dit proces kan gestroomlijnd worden door de informatie te organiseren in CO₂-rekentools. CO₂-rekentools zijn erop gericht om op een relatief snelle manier een inschatting te maken van de te verwachten uitstoot van koolstofdioxide (CO₂) en dit voor het volledige saneringstraject en de daartoe behorende saneringsonderdelen.

Verschiedende buitenlandse partijen (US-EPA, Atkins (UK), Tauw en HMVT (Nederland),) hebben hiervoor reeds rekentools ontwikkeld. Een aantal van de beschikbare rekentools worden in de volgende projectfase nader geëvalueerd aan de hand van een gevalstudie. Daarbij zullen de uitgangspunten, de randvoorwaarden, de geselecteerde saneringsparameters en de in te voeren variabelen van de rekenmodellen nader bestudeerd worden en zal nagegaan worden of deze ook van toepassing zijn voor Vlaanderen en/of aangepast dienen te worden.

Ten slotte zullen aanbevelingen worden geformuleerd over hoe de geselecteerde en eventueel verder geoptimaliseerde rekentool kan worden toegepast binnen de huidige standaardprocedure BSP (Multicriteria-analyse).

Bijlage 1: Lijst van afkortingen

BATNEEC	Best Available Technology Not Entailing Excessive Cost
BLE	Bodempluchtexttractie
BSP	Bodemsaneringsproject
CO ₂ -eq	CO ₂ equivalenten
GAC	Granulair Actieve Kool
GWP	Global Warming Potential = potentieel vermogen tot opwarming van de aarde
ISCO	In Situ Chemische Oxidatie
LTM	Lange-termijn Monitoring
MFE	Multi-Fasen Extractie
MNA	Monitoring Natuurlijke Attenuatie
MTCO ₂ e	Metrieke Ton (ton) koolstofdioxide-equivalent
P&T	Pump en Treat
PLI	PersLuchtInjectie
PRB	Permeabele Reactieve Barrière
RWZI	RioolWaterZuiveringsInstallatie
TD	Thermische Desorptie
CF	ConversieFactor
PVC	PolyVinylChloride
Hfk	Fluorkoolwaterstoffen
Pfk	Perfluorkoolstoffen
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
EMS	Environmental Managing Support, inc.
MT	Metric Tons
Lbs	Pounds
GRC	GrondReinigingsCentrum
RI	Remedial Investigation
RAC	Remedial Action Construction
RA-O	Remedial Action Operation
SRT	Sustainable Remediation Tool
AFCEE	Air Force Center for Engineering and the Environment
RBCA	Risk-based Corrective Action

Bijlage 2: Begrippenlijst

Basiselementen

Het volledige bodemsaneringsproces wordt vertaald in energieverbruik, materiaalverbruik en/of off-site activiteiten aan de hand van basiselementen bv. elektriciteit, benzine en diesel als energietypes, veelgebruikte materialen, n.l. PVC, HDPE, staal, roestvrij staal, zand en grind, cement, beton, bentoniet, granulair actieve kool (GAC), organische substraten of zuurstofdonoren (in-situ bioremediatie),... en/of aan de hand van off-site activiteiten (vast (niet-gevaarlijk) afval, gevaarlijk afval, laboratoriumanalyse en off-site waterbehandeling in een RWZI, ...).

Conversiefactoren

Conversiefactoren zetten de hoeveelheid van elke type energie, materiaal of off-site activiteit om in milieuparameters (CO₂-emissies, uitstoot van fijn stof, ...). Voor de bepaling van de CO₂-voetafdruk dienen alle conversiefactoren geïnventariseerd te worden met betrekking tot CO₂-emissies (ook CO₂-emissiefactoren genoemd).

Saneringsaspecten

Elk saneringsonderdeel van een saneringsvariant is opgebouwd uit een aantal saneringsaspecten zoals bv. het plaatsen van filters voor het onttrekken van grondwater, het aan- en afvoeren van grond en materiaal, het onttrekken van grondwater m.b.v. pomp(en), ...

Saneringsonderdeel

Elke saneringsvariant kan opgedeeld worden in een aantal saneringsonderdelen. Volgende saneringsonderdelen komen vaak aan bod: ontgraven, constructie- en ontmantelingsfase, exploitatie en instandhouding van de sanering, lange termijn monitoring, afvalbeheer, ...

Saneringsparameters

Elk saneringsaspect dient verder verfijnd te worden in saneringsparameters zoals bv. het aantal onttrekkingsfilters, de hoeveelheid van een bepaald materiaal, ...

Saneringsvariant

De saneringsvariant geeft aan welke saneringstechnologie tijdens het saneren van de verontreinigde site zal toegepast worden.

Bijlage 3: US EPA CO₂-calculator – studie 2008

Bijlage 3.1: Energieverbruik en CO₂-uitstoot van een “gemiddeld” saneringsproject

" Typical" P&T System							
<i>Estimated Electricity Consumption and CO2 Emissions</i>							
Major Energy-Consuming Treatment Components	Ave. No. of Treatment Components	Annual Electricity Use (kWh)	Estimated CO2 Emission Annually (MT) *	Average Duration (years)	Electricity Use over Project Duration (kWh)	Estimated CO2 Emission over Project Duration (lbs) *	Estimated CO2 Emission over Project Duration (MT) *
Extraction pumps	9	645.972	401	30	19.379.160	26.549.449	12.043
Aboveground pump/treat house	1	18.022	11	30	540.660	740.704	336
Aboveground transfer system	1	46.653	29	30	1.399.590	1.917.438	870
Aboveground treatment system	1	144.395	90	30	4.331.850	5.934.635	2.692
Data monitoring/processing	1	50.000	31	30	1.500.000	2.055.000	932
Total E		905.042	562		27.151.260	37.197.226	16.872
<i>Estimated Fuel Consumption and Cost and Fuel CO2 Emissions</i>							
Major Energy-Consuming O&M Activities	Ave. No. of Items	Annual Fuel Consumption (Gallons)	Estimated CO2 Emission Annually (MT) *	Average Duration (years)	Fuel Use Over Project Duration (Gallons)	Estimated CO2 Emission Over Project Duration (lbs) *	Estimated CO2 Emission Over Project Duration (MT) *
Annual Fuel Consump, field activities	1	4.000	35,66	30	120.000	2.347.680	1.065
Total F		4.000	36		120.000	2.347.680	1.065
CO2-total = Total E+ Total F			598				17.937

"Typical" BLE System							
Estimated Electricity Consumption and Cost and CO2 Emissions							
Major Energy-Consuming Treatment Components	Ave. No. of Treatment Components	Annual Electricity Use (kWh)	Estimated CO2 Emission Annually (MT) *	Average Duration (years)	Electricity Use over Project Duration (kWh)	Estimated CO2 Emission over Project Duration (lbs) *	Estimated CO2 Emission over Project Duration (MT) *
Vacuum blower	1	107.661	66,90	3	322.983	442.487	200,71
Aboveground treatment shed	1	1.802	1,12	3	5.406	7.406	3,36
Off-gas treatment system	1	89.717	55,75	3	269.151	368.737	167,26
Data monitoring/processing	1	32.967	20,49	3	98.901	135.494	61,46
Total E		232.147	144		696.441	954.124	433
Estimated Fuel Consumption and Cost and Fuel CO2 Emissions							
Major Energy-Consuming O&M Activities	Ave. No. of Items	Annual Fuel Consumption (Gallons)	Estimated CO2 Emission Annually (MT) *	Average Duration (years)	Fuel Use Over Project Duration (Gallons)	Estimated CO2 Emission Over Project Duration (lbs) *	Estimated CO2 Emission Over Project Duration (MT) *
Annual Fuel Consump, field activities	1	2.000	17,75	3	6.000	117.384	53
Total F		2.000	18		6.000	117.384	53
CO2-total = Total E+ Total F			162				486

"Typical" MFE System								
<i>Estimated Electricity Consumption and Cost and CO2 Emissions</i>								
Major Energy-Consuming Treatment Components	Ave. No. of Treatment Components	Annual Electricity Use (kWh)	Estimated CO2 Emission Annually (MT) *	Average Duration (years)	Electricity Use over Project Duration (kWh)	Estimated CO2 Emission over Project Duration (lbs) *	Estimated CO2 Emission over Project Duration (MT) *	
Extraction pumps	10	1.435.493	892,05	3	4.306.479	5.899.876	2.676,14	
Vacuum blower	1	107.661	66,90	3	322.983	442.487	200,71	
Aboveground treatment shed	1	3.604	2,24	3	10.812	14.812	6,72	
Off-gas treatment system	1	89.717	55,75	3	269.151	368.737	167,26	
Data monitoring/processing	1	32.967	20,49	3	98.901	135.494	61,46	
Total E		1.669.442	1037,43		5.008.326	6.861.407	3112,29	
<i>Estimated Fuel Consumption and Cost and Fuel CO2 Emissions</i>								
Major Energy-Consuming O&M Activities	Ave. No. of Items	Annual Fuel Consumption (Gallons)	Estimated CO2 Emission Annually (MT) *	Average Duration (years)	Fuel Use Over Project Duration (Gallons)	Estimated CO2 Emission Over Project Duration (lbs) *	Estimated CO2 Emission Over Project Duration (MT) *	
Annual Fuel Consump, field activities	1	3.952	35,07	3	11.856	231.951	105	
Total F		3.952	35		11.856	231.951	105	

"Typical" PLI System							
<i>Estimated Electricity Consumption and CO2 Emissions</i>							
Major Energy-Consuming Treatment Components	Ave. No. of Treatment Components	Annual Electricity Use (kWh)	Estimated CO2 Emission Annually (MT) *	Average Duration (years)	Electricity Use over Project Duration (kWh)	Estimated CO2 Emission over Project Duration (lbs) *	Estimated CO2 Emission over Project Duration (MT) *
Injection well condensor	1	717.742	446,02	3	2.153.226	2.949.920	1.338
Vacuum blower	1	107.661	66,90	3	322.983	442.487	201
Aboveground treatment shed	1	1.802	1,12	3	5.406	7.406	3
Off-gas treatment system	1	89.717	55,75	3	269.151	368.737	167
Data monitoring/processing	1	32.067	19,93	3	96.201	131.795	60
Total E		948.989	590		2.846.967	3.900.345	1.769
<i>Estimated Fuel Consumption and Cost and Fuel CO2 Emissions</i>							
Major Energy-Consuming O&M Activities	Ave. No. of Items	Annual Fuel Consumption (Gallons)	Estimated CO2 Emission Annually (MT) *	Average Duration (years)	Fuel Use Over Project Duration (Gallons)	Estimated CO2 Emission Over Project Duration (lbs) *	Estimated CO2 Emission Over Project Duration (MT) *
Annual Fuel Consump, field activities	1	1.976	17,54	3	5.928	115.975	53
Total F		1.976	18		5.928	115.975	53
CO2-total = Total E+ Total F			607				1.822

"Typical" TD System							
Estimated Electricity Consumption and Cost and CO2 Emissions							
Major Energy-Consuming Treatment Components	Ave. No. of Treatment Components	Annual Electricity Use (kWh)	Estimated CO2 Emission Annually (MT) *	Average Duration (years)	Electricity Use over Project Duration (kWh)	Estimated CO2 Emission over Project Duration (lbs) *	Estimated CO2 Emission over Project Duration (MT) *
Rotary dryer	1	112.743.975	70061,62	0,33	37.543.744	51.434.929	23.330,52
Off-gas treatment system	1	192.527	119,64	0,33	64.111	87.833	39,84
Data monitoring/processing	1	32.967	20,49	0,33	10.978	15.040	6,82
Total E		112.969.469	70.202		37.618.833	51.537.801	23.377
Estimated Fuel Consumption and Cost and Fuel CO2 Emissions							
Major Energy-Consuming O&M Activities	Ave. No. of Items	Annual Fuel Consumption (Gallons)	Estimated CO2 Emission Annually (MT) *	Average Duration (years)	Fuel Use Over Project Duration (Gallons)	Estimated CO2 Emission Over Project Duration (lbs) *	Estimated CO2 Emission Over Project Duration (MT) *
Annual Fuel Consump, field activities	1	1.976	17,54	0,33	658	12.873	6
Total F		1.976	18		658	12.873	6
CO2-total = Total E+ Total F			70.219				23.383

Bijlage 3.2: aannames en conversiefactoren

Environmental Management Support, Inc. (EMS)

General Assumptions:

[1] To facilitate analysis, this draft assumes all electricity for treatment systems are supplied by public utility.

[2] Exclusions from this analysis include:

- Fossil fuel used for containment, periodic sampling, transportation, or disposal of contaminated media or treatment products or for routine field activities;
- Air emissions from treatment systems (typically containing contaminants at concentrations below regulatory thresholds);
- Field trials during remediation design;
- Installation of treatment systems.
- Consideration will be given to including construction and installation activities at a later date.

[3] CO₂ emissions are based on the U.S. average: 1.37 lb of CO₂ emitted per kWh generated (DOE Energy Information Administration, Electric Power Annual 2005, Table 5.1); commonly reported as "million metric ton" using conversion of U.S. (short) ton equivalent to 0.90718474 metric ton.

[4] Electricity costs are based on the U.S. DOE Energy Information Administration's November 2007 all-sector rate of \$0.0914/kWh, as if December 2007. All costs are expressed in 2007 dollars. When used for budgeting purposes, forecasted inflation rates may be added to these estimates.

[5] All costs are in constant 2007 dollars. Actual costs in the future are likely to be higher, and forecasted inflation can be built into these calculations.

[7] This analysis assumes fossil sources account for 71% of U.S. electricity demand. Source: U.S. Energy Information Administration, DOE, "Net Generation by Energy Source by Type of Producer," October 22, 2007. <http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/epa/epat1p1.html>. DOE publishes averages of this value by region, and specific sites of local areas can have different values. Other values may be used in the model, simply by changing the figure in the "Key Inputs" table below.

[8] Electricity requirements of equipment are estimated at 0.7456 kW per unit of horsepower (U.S. EPA Climate Change Division, www.epa.gov/climatechange/emissions/ ("Unit Conversions," November 2004).

[9] "Major energy-consuming treatment components" of a remediation system are considered those with an annual electricity consumption greater than 1,000 kWh/year.

[10] Energy consumption of activities within treatment structures (such as lighting, air control, computer systems, and portable equipment) is based on a (2003) estimated energy intensity of 8.2 kWh per square foot of "service" building (U.S. DOE Energy Information Administration, Table C21, 2006).

[11] This analysis assumes 24 hr/day continuous system operation less 5% for repair and maintenance. It does, not reflect other scheduled or unscheduled suspensions of operations.

[12] This analysis does not account for operating efficiency of treatment systems, which can be highly variable.

[13] This analysis assumes projects described in primary information sources did not undergo RSE optimization, and does not consider current or future RSE optimization.

[14] This analysis does not account for site-specific differences in geology/hydrogeology, contaminant types, climate, restoration goals, or proximity of electrical components.

[15] This analysis does not account for energy-consumption reductions attributed to combined technology applications with shared below-ground components and/or above-ground treatment processes.

Key Inputs		
	Value	Source
Average duration of operations	Varies with technology	See individual technology tabs
Average period in design and installation	Varies with technology	See individual technology tabs
Future installations of a technology	Varies with technology	See individual technology tabs
CO2 emitted per kWh generated (lbs)	1,37	EIA 2005, Electric Power Annual 2005. Table 5.1
Current electricity cost per kWh (\$)	0,0914	EIA, Feb. 2008. Data for Dec. 2007
Pounds per metric ton	2204,62	
Transmission and distribution losses, U.S. average. Multiplier to reflect an average loss of 9%.	1,0989	EIA, "Annual Energy Review 2006," page 221.
Correction	1	
1.5-hp consumption per year (kWh)	10.766	Equip. requirements estimated at 0.7456 kW per unit of horsepower (U.S. EPA Climate Change Division, www.epa.gov/climatechange/emissions , (Nov. 2004) plus an adjustment for electricity transmission and distribution losses (1.0989).
5-hp consumption per year (kWh)	35.887	0.7456 KW/HP as above
7.5-hp consumption per year (kWh)	53.831	0.7456 KW/HP as above
10-hp consumption per year (kWh)	71.775	0.7456 KW/HP as above
15-hp consumption per year (kWh)	107.661	0.7456 KW/HP as above
20-hp consumption per year (kWh)	143.549	0.7456 KW/HP as above
100-hp consumption per year (kWh)	717.742	0.7456 KW/HP as above
Energy consumption of conventionally-constructed 2,000-sf building (kWh)	18.022	e.g., lighting, air control, computer systems, portable equipment, based on a 2003 estimate of 8.2 kWh per square foot of "service" building (EIA, Table C21, 2006).
CO2 emitted per gallon of gasoline consumed (lbs)	19,56	U.S DOE, EA, web site. February 2008. http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/coefficients.html
CO2 emitted per gallon of diesel consumed (lbs)	22,38	U.S DOE, EA, web site. February 2008. http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/coefficients.html
Average fuel price for gasoline	3,02	U.S EA web site, January 2008. Price as of 12/07. All grades plus taxes. http://www.eia.doe.gov/oil_gas/petroleum/data_publications/wrgp/mogas_home_page .
Average fuel price for diesel	3,29	U.S EA web site, January 2008. http://www.eia.doe.gov/oil_gas/petroleum/data_publications/wrgp/mogas_home_page.html
Annual fuel consumption for routine field activities	2.000,00	Assume 38-gal used each week by one Ford F350 truck for mechanical monitoring, sampling, equip. repair, etc.

Bijlage 4: US-EPA ecologische voetafdruk – studie 2010

Bijlage 4.1: Inventarisatietabel

Deze bijlage is te groot om op te nemen in het document en wordt toegevoegd als afzonderlijke bijlage in pdf-formaat.

Deze bijlage is ook terug te vinden op volgende website - <http://www.clu-in.org/greenremediation/romic/>

Bijlage 4.2: Conversiefactoren

[illegible]

Material/Fuel/Service	CO ₂ e Emitted	Assumptions	Source
diesel	22,5 lbs/gal	The reference provides CO ₂ e emitted as 10.15 kg of CO ₂ per gallon. This converts to 22.3 pounds per gallon. Additionally, N ₂ O and CH ₄ emissions are provided as g/gal. Values are converted to lbs/gal using a global warming potential (GWP) of 1 for carbon dioxide, 21 for methane, and 310 for nitrous oxide	Climate Leader GHG Inventory EPA-430--K-08-004, May 2008
gasoline	19,6 lbs/gal	The reference provides CO ₂ e emitted as 19.4 kg of CO ₂ per gallon. This converts to 22.3 pounds per gallon. Additionally, N ₂ O and CH ₄ emissions are provided as g/gal. Values are converted to lbs/gal using a global warming potential (GWP) of 1 for carbon dioxide, 21 for methane, and 310 for nitrous oxide.	Climate Leader GHG Inventory EPA-430--K-08-004, May 2008
natural gas	12 lbs/ccf	NREL LCI reported output in kg and input in m3. The units were converted from kg/m3 to lbs per 100 cubic feet (ccf) and rounded to two significant digits. Outputs for carbon dioxide and fossil methane were used to calculate CO ₂ e. Nitrous oxide was not included as an output. Methane was assigned a global warming potential equal to 21 times that of CO ₂ .	NREL LCI File: SS_Natural gas, combusted in industrial boiler.xls
PVC for resin only pipe extrusion not included	4,1 lbs/lb	EUROPA ELCD - Sum of total global warming potential for carbon dioxide, methane, and nitrous oxide released to atmosphere. A global warming potential of 21 is used for methane and a global warming potential of 310 is used for nitrous oxide. Results converted to pounds of carbon dioxide equivalents per pound of product.	Primary NREL file for electricity: polyvinyl chloride resin, at plant file Secondary NREL files for electricity: Ethylene dichloride-vinyl chloride monomer, at plant; Ethylene, at plant; Chlorine, PVC producer average, at plant; Oxygen, liquid, at plant. EUROPA file location: Suspension Polymerisation PVC: http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/html/processes/129b8f8d-7667-41bc-91f4421bfcdcf8c3_02.00.000.html
HDPE for resin only pipe extrusion not included	1,9 lbs/lb	EUROPA ELCD	EUROPA file location: Polyethylene high density granulate (PE-HD) ; production mix, at plant: http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/html/processes/0704c700-2fb0-43c5-8803bed8a6f1b968_02.00.000.html

Material/Fuel/Service	CO ₂ e Emitted	Assumptions	Source
Steel excludes forming or casting into final product	1,1 lbs/lb	EUROPA ELCD	Conversion numbers were based upon an average of the following three files, EUROPA file locations: Steel hot rolled section: http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/html/processes/f9d4581e-14de-417e8f9f-6c74e6f14051_02.00.000.html Steel hot rolled coil: http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/html/processes/119e8cc1-0859-45ca-8f6393a8a518ffd2_02.00.000.html Steel rebar: http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/html/processes/268a11fb-baf2-4b9e-886738bea0e76ef6_02.00.000.html
Stainless Steel excludes forming or casting into final product	3,4 lbs/lb	EUROPA ELCD	EUROPA file location: Stainless Steel: http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/html/processes/119e8cc1-0859-45ca-8f6393a8a518ffd2_02.00.000.html
Gravel/sand	6,7 lbs/ton	EUROPA ELCD	EUROPA file Location: Gravel 2/32: http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/html/processes/898618b2-3306-11dd-bd110800200c9a66_02.00.000.html
Cement Grout	1800 lbs/dry-ton	EUROPA ELCD	Primary NREL LCI Files: -SS_portland cement, at plant.xls EUROPA file location: Portland Cement: http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/html/processes/600573dd-dfa5-44e5-b4588727e793ffd7_02.00.000.html
Concrete	335 lbs/tons		
Bentonite LCI data not available, Sand/gravel data used as a proxy	6,7 lbs/ton	EUROPA ELCD	EUROPA file Location: Gravel 2/32: http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/html/processes/898618b2-3306-11dd-bd110800200c9a66_02.00.000.html
Regenerated GAC (including production of original virgin GAC)	2 lbs/lbs	Calculated using information from the cited reference. See support file for calculations.	Use of Adsorbents for the Removal of Pollutants from Wastewaters, by Gordon McKay, published by CRC Press, 1995, ISBN 0849369207
Bioinjection (Molasses)	0,4 lbs/lbs	See attached support file titled "Derivation of Molasses Values from LCA Food"	Nielsen PH, Nielsen AM, Weidema BP, Dalgaard R and Halberg N (2003). LCA food data base. www.lcafood.dk Sugar Production based on Danisco Sugar Author: Per H. Nielsen July 2003

Material/Fuel/Service	CO ₂ e Emitted	Assumptions	Source
Bioinjection (Cheese Whey Solids)	1,1 lbs/lbs	See attached support file titled "Derivation of Cheese Whey Values from LCA Food"	Nielsen PH, Nielsen AM, Weidema BP, Dalgaard R and Halberg N (2003). LCA food data base. www.lcafood.dk Andersen M and Jensen JD (2003). Marginale producenter af udvalgte basislevnedsmidler (in Danish) Udkast d. 5. februar 2003
Bioinjection (Vegetable oil)	3,51 lbs/lbs	As calculated using NREL LCI with the following exceptions: - oil assumed to come from soybeans grown in the U.S. instead of palm kernels - assume NREL process for palm kernel oil is appropriate for soybean oil - no ocean freight transport assumed - soy beans are 20% oil and palm kernels are 50% oil such that 50/20 times more mass of soybeans is needed in the NREL calculations.	Nielsen PH, Nielsen AM, Weidema BP, Dalgaard R and Halberg N (2003). LCA food data base. www.lcafood.dk Landbrugets rådgivningscenter (2000). Tal fra Fodermiddeltabellen, Raport nr. 91. In Danish. Weidema BP (1999). System expansions to handle co-products of renewable materials. Presentation Summaries of the 7th LCA Case Studies Symposium SETAC-Europe, 1999. Pp. 45-48. pdf. Weidema B (2003). Market information in life cycle assessments. Technical report, Danish Environmental Protection Agency (Environmental Project no. 863).
Diesel produced	2,7 lbs/gal	EUROPA ELCD	Primary NREL LCI File: -SS_crude oil, in refinery.xls Secondary NREL LCI File: -SS_crude oil, at production.xls EUROPA file location: Diesel at refinery: http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/html/processes/244524ed-7b85-4548-b345f58dc5cf9dac_02.00.000.html
gasoline produced	4,4 lbs/gal	EUROPA ELCD	Primary NREL LCI File: -SS_crude oil, in refinery.xls Secondary NREL LCI File: -SS_crude oil, at production.xls EUROPA file location: Gasoline at refinery: http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/html/processes/5f62ed77-85d0-4c99-8d2cbe56951d8fb3_02.00.000.html
natural gas produced	2,2 lbs/ccf	EUROPA ELCD	EUROPA file location: Natural Gas at consumer: http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/html/processes/3d602e55-aaa2-44e3-adb940f49eb1a915_02.00.000.html
Solid waste disposal does not include transport	25 lbs/ton	EUROPA ELCD	EUROPA ELCD file location: Inert waste disposal: http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasets/html/processes/64197304-3307-11dd-bd110800200c9a66_02.00.000.html Inert waste used so that methane and carbon dioxide from decomposing waste is not included.

Material/Fuel/Service	CO ₂ e Emitted	Assumptions	Source
Hazardous waste disposal does not include transport	27,5 lbs/ton		
Laboratory Analysis	1,3 lbs/\$	Assume 10% of each dollar is spent on energy (50% electricity and 50% diesel fuel) whether that energy be directly used or used in the manufacturing of bottleware, preservatives, or other disposable supplies. Calculate footprint using values for electricity production, diesel use, and diesel production).	

Opmerking: in deze tabel is electriciteit niet opgenomen (hiervoor wordt doorverwezen naar het originele document)

Bijlage 4.3: Grafieken CO₂-emmissies

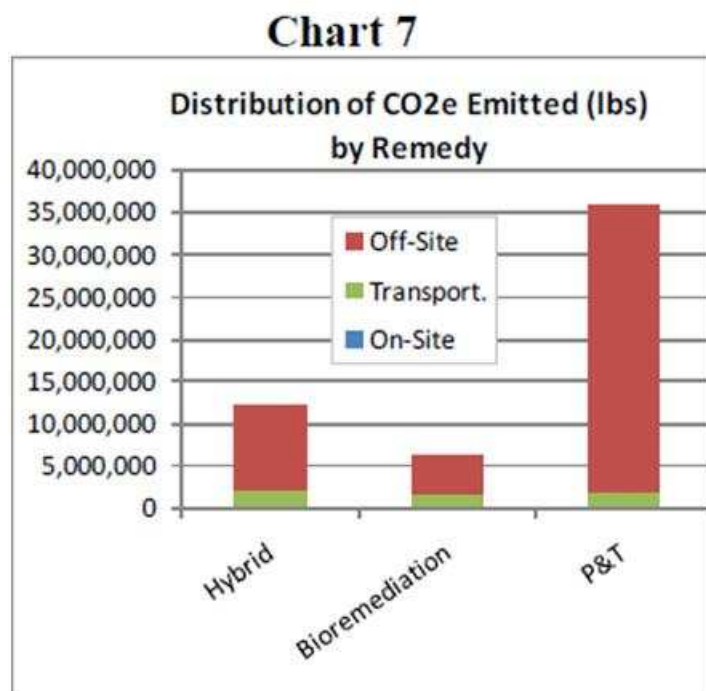
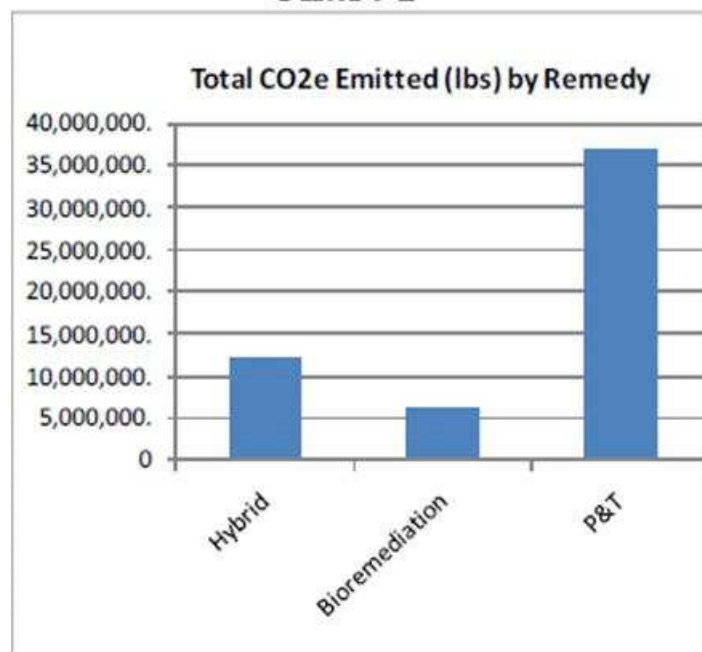
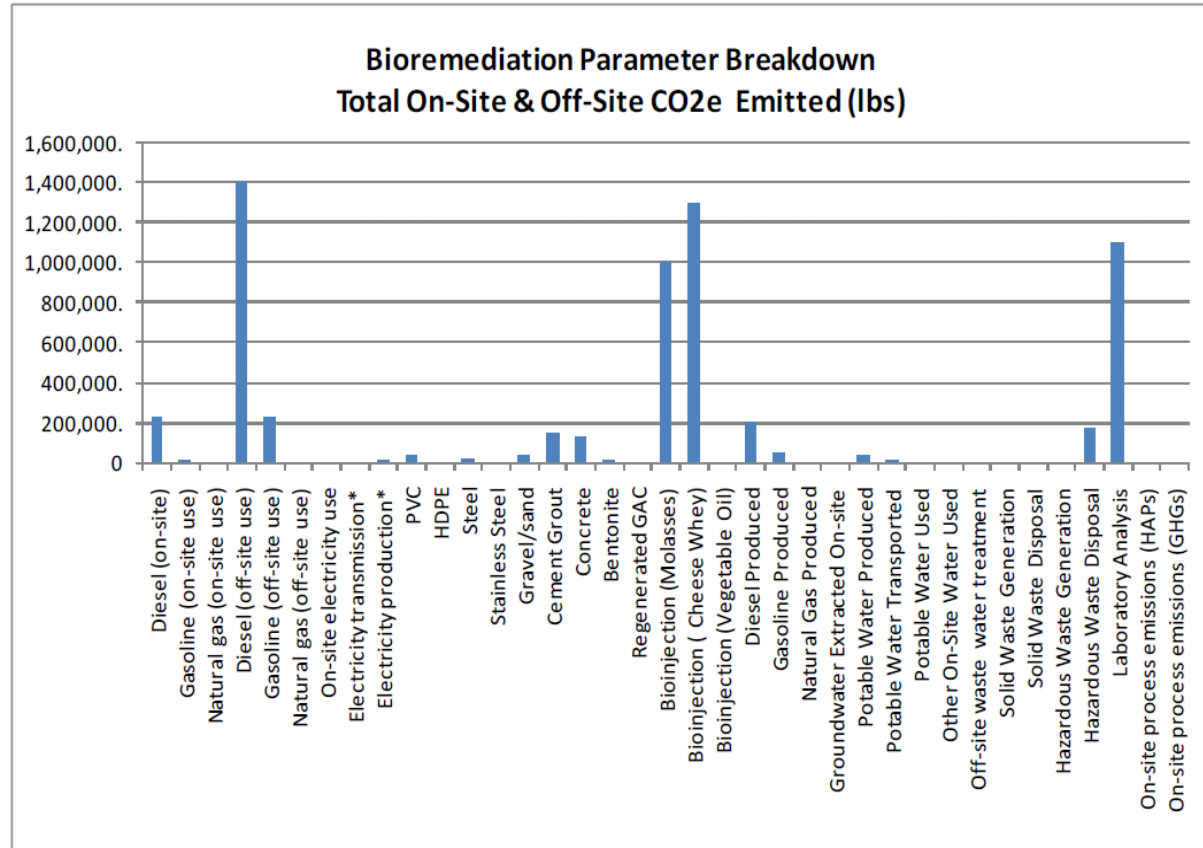


Chart 1



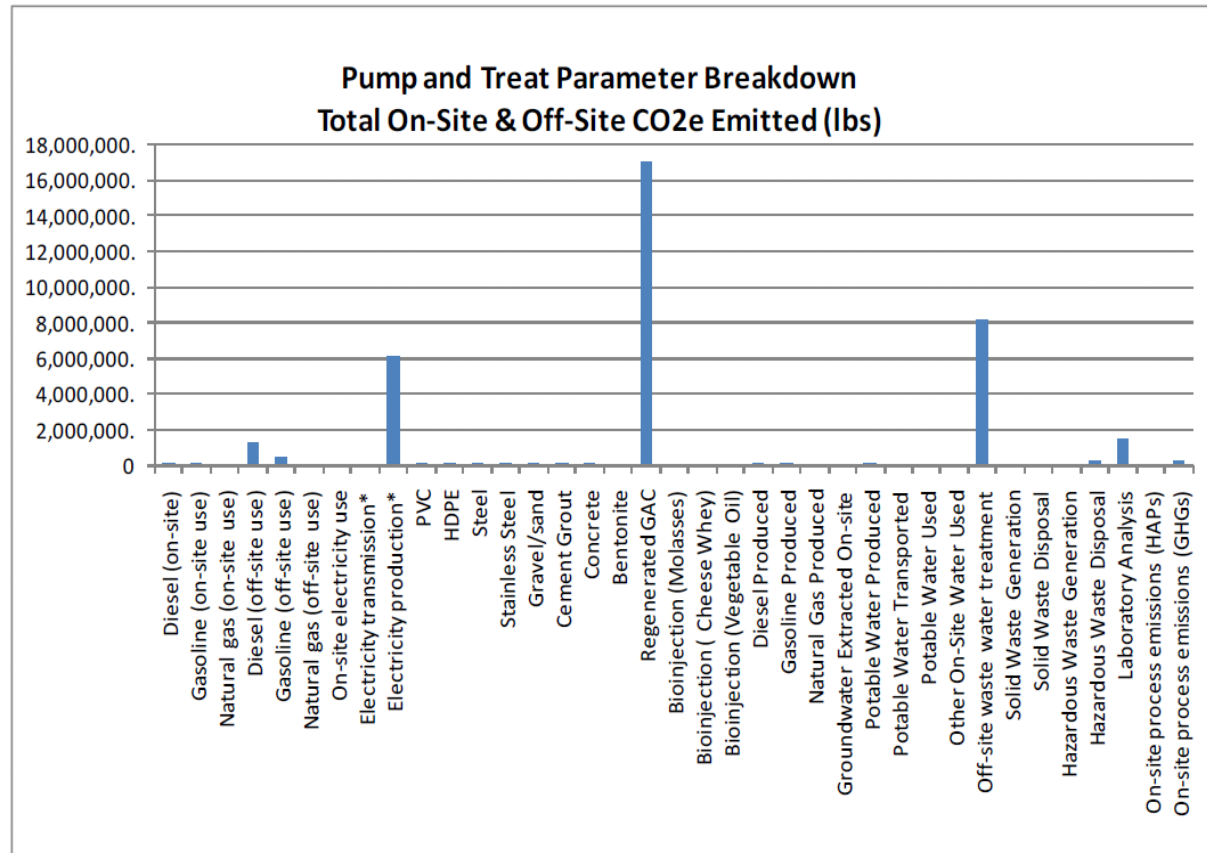
Figuur 1: Weergave totale CO2-emissie per saneringsvariant (links) en CO2-bijdrage van on-site activiteiten, transport en off-site activiteiten (rechts)

Chart 10



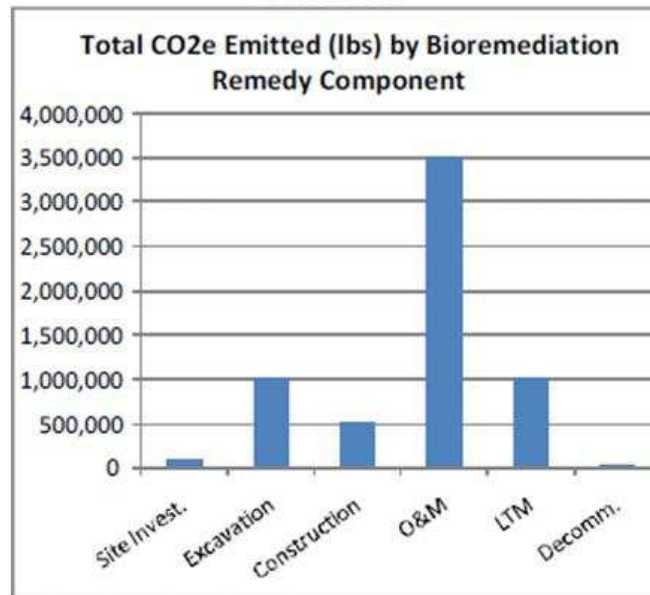
Figuur 2: Weergave on-site en off-site verbruik van basiselementen(zijnde de energietypes, materialen en off-site diensten) voor de saneringsvariant bioremediatie

Chart 11



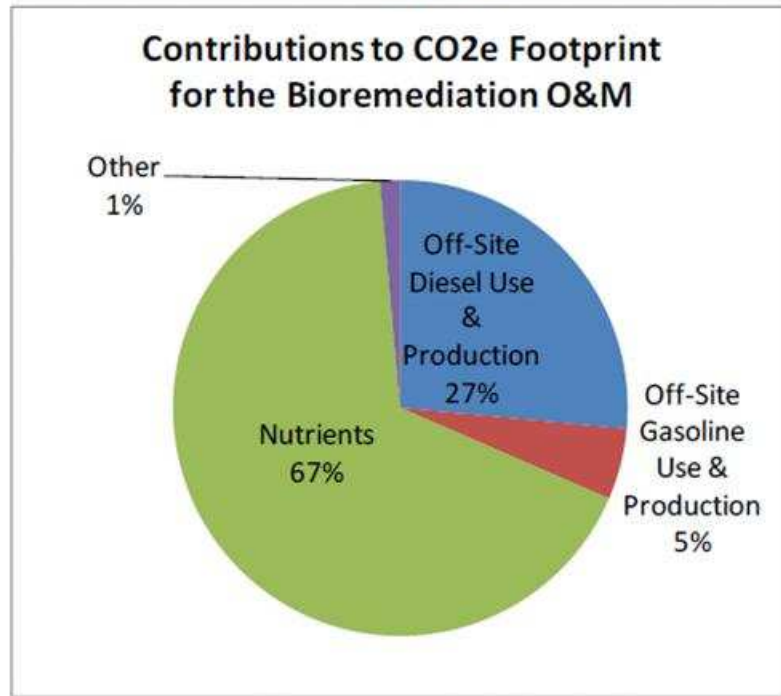
Figuur 3: Weergave on-site en off-site verbruik van basiselementen(zijnde de energietypes, materialen en off-site diensten) voor de saneringsvariant P&T.

Chart 13



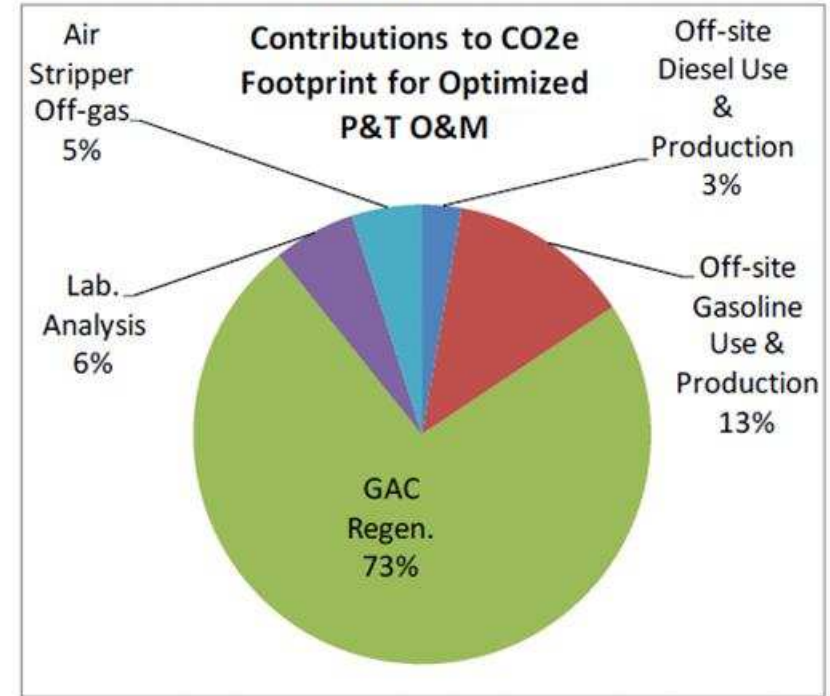
Figuur 4: CO₂-bijdrage verschillende saneringsonderdelen voor de saneringsvariant bioremediatie

Chart 28



Total Bioremediation O&M
CO₂e Footprint - 3,500,000 lbs

Chart 29



Total Optimized P&T O&M
CO₂e Footprint - 3,800,000 lbs

Figuur 5: CO₂-bijdrage transportactiviteiten voor het saneringsonderdeel 'exploitatie en instandhouding' (links: bioremediatie; rechts: P&T-variant).

Bijlage 5: Lijst van tabellen

Tabel 1: Overzicht saneringsduur, transport en mandagen voor de 3 saneringsvarianten	23
Tabel 2: Impact van conversiefactoren en geïnjecteerde massa op de CO2-voetafdruk	24
Tabel 3: Samenvatting gehanteerde saneringstechnologieën in de 6 rekentools	35

Bijlage 6: Lijst van figuren

Figuur 1: Weergave totale CO2-emissie per saneringsvariant (links) en CO2-bijdrage van on-site activiteiten, transport en off-site activiteiten (rechts)	60
Figuur 2: Weergave on-site en off-site verbruik van basiselementen(zijnde de energietypes, materialen en off-site diensten) voor de saneringsvariant bioremediatie	61
Figuur 3: Weergave on-site en off-site verbruik van basiselementen(zijnde de energietypes, materialen en off-site diensten) voor de saneringsvariant P&T.	62
Figuur 4: CO2-bijdrage verschillende saneringsonderdelen voor de saneringsvariant bioremediatie	63
Figuur 5: CO2-bijdrage transportactiviteiten voor het saneringsonderdeel 'exploitatie en instandhouding' (links: bioremediatie; rechts: P&T-variant).	64

Bijlage 7: Bibliografie

OVAM (2009). Standaardprocedure Bodemsaneringsproject.

USEPA (2008): Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions at Superfund Cleanups. US Environmental Protection Agency, Draft prepared for Office of Superfund Remediation and Technology Innovation. http://www.clu-in.org/greenremediation/docs/SF_Energy_Carbon_Footprint.pdf

USEPA (2010): Environmental footprint analysis of three potential remedies Former Romic Environmental technologies corporation facility East Palo Alto, California. US Environmental Protection Agency. <http://www.cluin.org/greenremediation/romic/index.cfm>