



THERMOPILE[©]

SUSTAINABLE THERMAL DESORPTION



Technische File

V02 – Januari 2011

1. INHOUDSTAFEL

1.	Inhoudstafel	2
2.	Algemene presentatie.....	3
2.1.	Beschrijving van het Thermopile© systeem.....	3
3.	het Proces	4
3.1.	Het reinigen van de grond	4
3.1.1.	Basisprincipes.....	4
3.1.2.	Het verwarmen van de grond	5
3.1.3.	De desorptie van de verontreinigingen	11
3.1.4.	De migratie van verontreinigde gassen in de grond.....	13
3.1.5.	Het afkoelen van de grond.....	13
3.2.	Het reinigen van de verontreinigde gassen	15
3.2.1.	Primaire gas reiniging	15
3.2.2.	Secundaire gas behandeling	16
4.	IMPLEMENTATIE	17
4.1.	Introductie	17
4.2.	Thermopile© In Situ	17
4.3.	Thermopile© Ex-Situ (On site of off site)	17
5.	Controles.....	20
5.1.	proces Controles	20
5.2.	Gas analyses – emissies in de atmosfeer.....	22
6.	Beschikbare installaties.....	23
6.1.	T-Lab 1.....	23
6.2.	T-LAB 2	23
6.3.	T-LAB 3	24
6.4.	T-1.1.	24
6.5.	T-1.2.	25
6.6.	T-2	25

2. ALGEMENE PRESENTATIE

2.1. BESCHRIJVING VAN HET THERMOPILE© SYSTEEM

Thermopile© is een duurzame en innovatieve toepassing van thermische desorptie, ontwikkeld en wereldwijd gepatenteerd door Deep Green (ref: EP04447142.3)

De werking berust, zoals bij klassieke thermische desorptie, op het verhitten van de verontreinigde componenten tot een zodanig hoge temperatuur, dat de organische verontreinigingen verdampen. Deze verontreinigde gassen worden vervolgens in een speciale verbrandingskamer geleid en geoxideerd tot CO₂ en H₂O.

Thermopile© vormt een nieuwe generatie van thermische technologie, dankzij de twee fundamentele principes waarop Thermopile© gebaseerd is:

- ◆ er wordt optimaal gebruik gemaakt van de organische verontreinigingen in de te behandelen bodem: deze verontreinigingen worden als secundaire brandstof in het verhittingsproces gebruikt.
- ◆ de hitte die wordt opgewekt bij de gasbehandeling (in de verbrandingskamer) wordt hergebruikt voor de verdere opwarming van de bodem (in een vrijwel gesloten loop), in plaats van verloren te gaan als uitstoot, zoals bij de traditionele thermische systemen.

Dit systeem is met name efficiënter in het gebruik van brandstof in vergelijking met klassieke thermische desorptie, dankzij het hergebruik van de hete gassen in het circuit en het gebruik van de verontreinigingen in de bodem als brandstof.

Aangezien de grond door middel van conductie wordt verwarmd is diepgaande reiniging mogelijk. Anders dan bij injectie van hete lucht is er geen afhankelijkheid van preferentiele paden in de grond en wordt in alle grondsoorten een uitstekend resultaat bereikt.

Thermopile© is tevens uniek omdat de technologie in-situ kan worden toegepast, dus zonder afgraving, zelfs onder een bestaand gebouw.

Uiteraard kan ook met afgegraven grond worden gewerkt, zowel on-site als off-site.

3. HET PROCES

3.1. HET REINIGEN VAN DE GROND

3.1.1. BASISPRINCIPES

Het reinigings-proces bij toepassing van Thermopile© is gebaseerd op dezelfde principes als bij “klassieke” thermische desorptieën bestaat uit twee fasen:

- ◆ verdampen van de verontreinigingen in de minerale matrix (de bodem) voornamelijk door verhoging van de temperatuur
- ◆ oxideren (transformeren in CO₂ en H₂O) van de verontreinigingen in gas-vorm in een afzonderlijke fase

Deze principes zijn van toepassing in alle thermische desorptie processen, maar bij Thermopile© zijn deze geoptimaliseerd, zodat naast het reinigen van grond, het brandstofverbruik en de emissies worden geminimaliseerd. De hinder naar de omgeving van de verontreinigde lokatie wordt zo ook beperkt: er is immers geen transport, geen stofproductie, beperkte geluidshinder,...

Bij het Thermopile© proces wordt een netwerk van verwarmingsbuizen volgens een vooraf vastgesteld patroon in de bodem geplaatst. Deze buizen zijn opgebouwd uit twee coaxiale stalen pijpen, waarvan de buitenste buis is geperforeerd. Gedurende het verhittingsproces wordt gas (lucht) op hoge temperatuur (700 - 800°C) afkomstig uit de verbrandingskamer door het netwerk geventileerd. De buizen geven hun warmte af aan de bodem en uiteindelijk verdampen de daarin aanwezige volatiele en semi-volatiele verontreinigingen.

Anders dan in de klassieke thermische installaties met een draaitrommeloven, waar de verblijftijd van de grond 15 – 20 minuten bedraagt, duurt de verhitting met het Thermopile© netwerk enkele weken. Omdat echter aanzienlijk grotere hoeveelheden grond gelijktijdig kunnen worden behandeld, is de potentiële verwerkingscapaciteit op maandbasis vergelijkbaar.

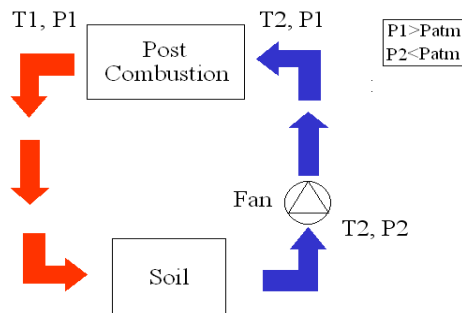
De gedesorbeerde verontreinigingen (gassen) migreren vervolgens naar de verticale buizen door diffusie en convectie. Door de perforaties in de buitenste buis worden de gassen aangetrokken, als gevolg van de negatieve druk die wordt opgewekt (venturi effect). Eenmaal in de verwarmingselementen worden de verontreinigde gassen naar de verbrandingskamer gevoerd, waar ze als brandstof fungeren. De verbrandingskamer is uitgerust met een uitlaat, teneinde de stoichiometrie in het systeem te handhaven. Dit is noodzakelijk aangezien de verbrandingskamer wordt geïnduceerd met een mengsel van brandstof en lucht.

3.1.2. HET VERWARMEN VAN DE GROND

3.1.2.1. VERWARMINGS MECHANISME

Het Thermopile© proces kent een “**uitzettings-/samenpersing**” cyclus van het gas met externe warmte overdracht. De componenten van deze cyclus zijn:

- ◆ een **uitzettings-** en verwarmingsfase van het gas in de verbrandingskamer
- ◆ een **samenpersing-** en afkoelingsfase in de grond



Figuur 1: Gas cyclus

Bij de uitgang van de verbrandingskamer is de temperatuur ongeveer 850°C met een druk die iets boven de atmosferische druk ligt. Gedurende de circulatie in de verwarmingselementen (die in de grond zijn gebracht), verliezen de gassen geleidelijk warmte en verlaagt de druk. Die drukverlaging laat toe dat alle verontreinigde gassen die in de grond zijn ontstaan worden gerecupereerd. (zie figuur). De cyclus wordt gesloten met een terugstroom naar de verbrandingskamer.

De grond zelf wordt verhit door **conductie (geleiding)**. Deze vorm van warmteoverdracht is vrij ongebruikelijk in grondbehandelingstechnieken: de meeste systemen zijn gebaseerd op convectie (fysiek transport van een warmtedragend fluidum in de verontreinigde massa). Het belangrijkste voordeel van geleiding is dat dit ongevoelig is voor grondsoort: thermische conductie varieert bij voorbeeld een factor 2 a 3 tussen zand en klei, terwijl de doorlaatbaarheid van zand een factor 100.000 tot 1.000.000 kan verschillen van klei.)

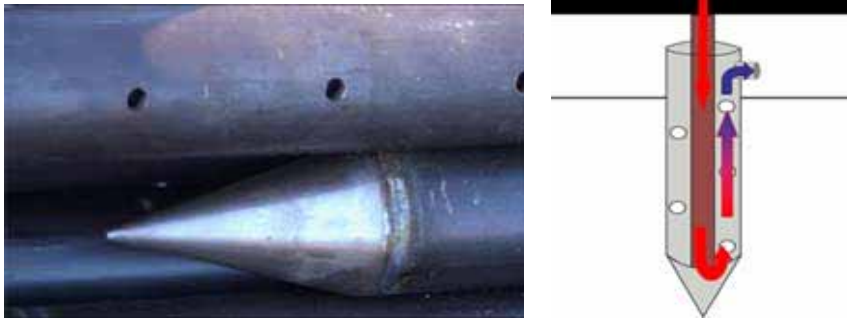
Bij conductie is de tijd benodigd om de gewenste temperatuur te bereiken goed voorspelbaar en kan garantie worden gegeven betreffende de resultaten na reiniging. Deze immers zijn onderhevig aan dezelfde natuurkundige wetmatigheden: temperatuur, druk en verblijftijd.

3.1.2.2. VERWARMINGSELEMENTEN

De verhitting zelf geschiedt door middel van een netwerk van verhittingsbuizen. Dit zijn coaxiale roestvrijstalen buizen, waarin het hete gas circuleert. Deze gassen blijven binnen de buizen: ze komen binnen door de binnenste buis, gaan door deze geheel naar beneden en vervolgens door de ringvormige zone tussen binnenste en buitenste buis terug.

Het is belangrijk vast te stellen dat de hete lucht die in het systeem circuleert nooit in contact komt met de grond. De hete lucht circuleert binnen de buizen en warmt deze op. Dan dragen de buizen, door geleiding, de warmte over op de grond. Daarom is heterogeniteit van de grond nauwelijks van invloed op de werking van het proces.

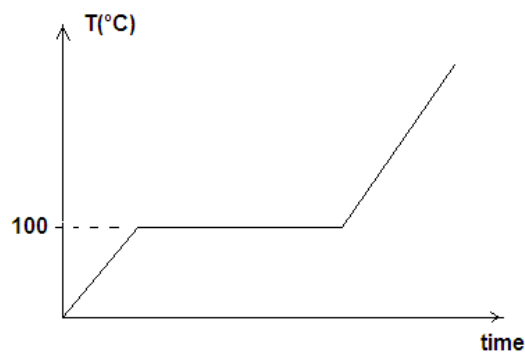
De buitenste buizen zijn geperforeerd teneinde een negatieve druk op te wekken in de omliggende bodem (venturi effect, veroorzaakt door de de snelheid van de gas-circulatie). Op deze manier worden de verontreinigde gassen aangezogen in de buizen en vervolgens naar de verbrandingsunit vervoerd.



Figuur 2: Verwarmingselementen

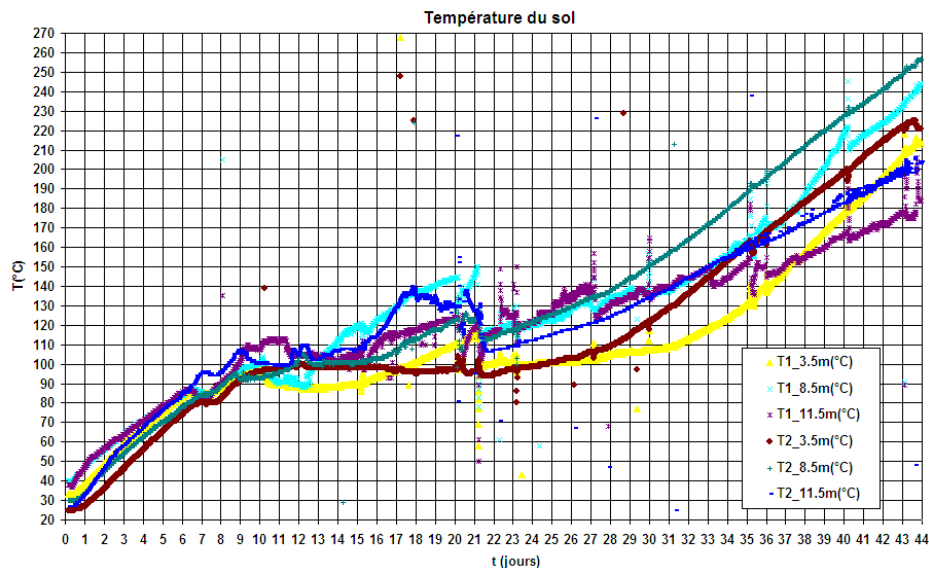
3.1.2.3. TEMPERATUUR VAN DE BODEM

De temperatuur van de bodem gaat geleidelijk omhoog van een initiële 10-12 °C naar de temperatuur die nodig is voor algehele desorptie van alle aanwezige organische verontreinigingen. Deze temperatuur is afhankelijk van de soort verontreinigingen en van de verblijfstijd gedurende het project. Figuur 3 toont een typische evolutie van de temperatuur, gemeten op het koudste punt van de bodem, in functie van de tijd.



Figuur 3: Evolutie van de temperatuur in de bodem ifv de tijd

Figuur 4 geeft de evolutie van de temperatuur weer op diverse lokaties en dieptes in de grond gemeten in de loop van het project in Luik.



Figuur 4: Evolutie van de temperatuur in de bodem ivf de tijd voor een in situ project (Luik).

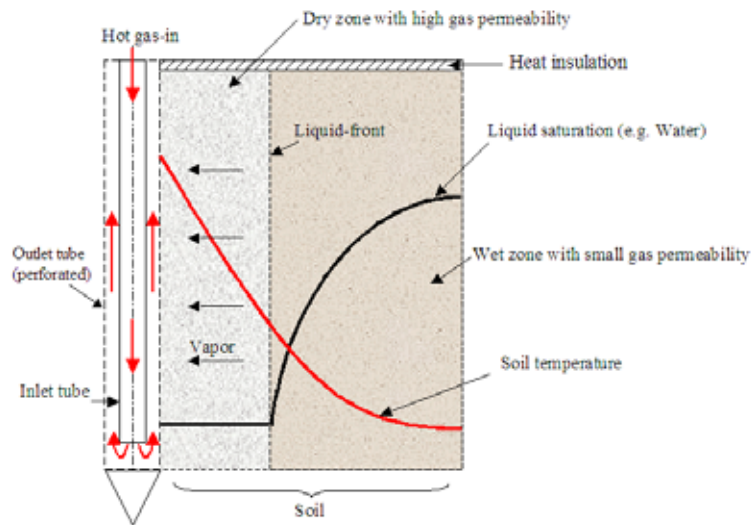
We kunnen duidelijk drie fasen onderscheiden:

- ◆ 1e fase: de temperatuur van de bodem stijgt tot het kookpunt van het grondwater (100°C)
- ◆ 2e fase: tijdens het verdampen van het grondwater blijft de temperatuur stabiel op 100°C
- ◆ 3e fase : de temperatuur stijgt door tot het gewenste niveau, afhankelijk van de te behandelen verontreinigingsparameters

In de eerste fase worden bodem en vloeistoffen (grondwater en verontreinigings-parameters) verwarmd tot het kookpunt van het grondwater. De tijd hiervoor nodig is afhankelijk van de thermische eigenschappen van de bodem en van de hoeveelheid grondwater/bodemvocht die aanwezig is.

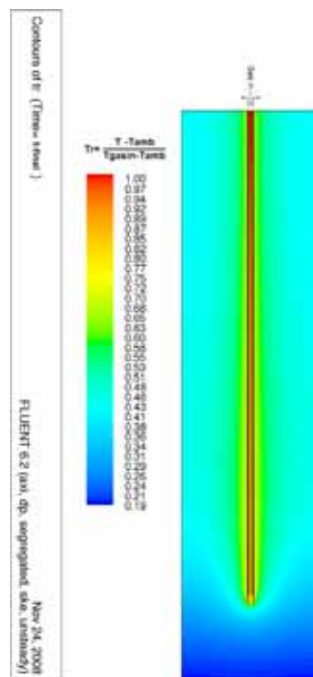
In de tweede fase blijft de temperatuur stabiel op 100°C totdat al het grondwater is verdampt. De snelheid waarmee deze vloeistof/dampfase zich voltrekt, is afhankelijk van de hoeveelheid water in de bodem, het verwarmingsvermogen en de snelheid van de stoom die wordt onttrokken. Zodra al het water is verdampt, stijgt de temperatuur boven de 100°C. Door het stijgen van de bodemtemperatuur, verdampen de organische componenten geleidelijk aan en worden deze gassen naar de openingen in de buitenste verwarmingsbuizen getrokken (door het eerder genoemde venturi effect). Afhankelijk van de hoeveelheid zuurstof die in de grond aanwezig is, vinden oxidatieve en/of pyrolytische reacties plaats. Een grote hoeveelheid van de organische verbindingen (verontreinigingsparameters) wordt zo al in-situ vernietigd, vooraleer het netwerk van buizen bereikt wordt. (zie volgende paragraaf). De resterende verontreinigde gassen worden in de verbrandingskamer vernietigd, waar de temperatuur boven de 850 °C kan stijgen. Figuur 5 geeft de evolutie weer van de verzadiging met vloeistof (water + verontreinigingsparameter) gedurende de reiniging.

Figuur 5 geeft de evolutie weer van de verzadiging met vloeistof (= water + verontreiniging) gedurende de behandeling.



Figuur 5: Interface vloeistof - gas

Dankzij de goed-doorlaatbare zone (de drogere zone rondom de verwarmingsbuis) worden de gassen makkelijker naar de verwarmingsbuizen geleid. Zelfs in zware kleigrond wordt doorlaatbaarheid voor lucht gecreëerd in dit proces. Figuur 6 geeft de typische temperatuurverdeling in de gasfase en de bodem aan op het einde van de reiniging. (gemaakt met CFD software Fluent®).



Figuur 6: Typische temperatuurverdeling van gasfase en bodem

3.1.2.4. FYSISCHE EN CHEMISCHE MECHANISMEN GEDURENDE DE OPWARMING VAN DE BODEM.

Wanneer de bodem wordt verhit, zullen de vluchtige en semi-vluchtige verbindingen (VOC's en SVOC's) in gasvorm overgaan en worden vernietigd door verscheidene mechanismen, waaronder:

- | | | |
|---|--|-------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - Verdamping - Koken van water (H₂O) en verontreiniging(VOC) - Distillatie door de waterdamp (stoom) | <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black; width: 20px; height: 40px; margin: 0 auto;"></div> | <p>≤ 100°C</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> - Koken van de verontreinigde stof (SVOC) - Oxidatie - Pyrolyse / hydrolyse | <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black; width: 20px; height: 40px; margin: 0 auto;"></div> | <p>> 100°C</p> |

De verontreinigingscomponenten worden naar de verwarmingselementen getransporteerd. Tijdens hun migratie door de grond, wordt de gasfase ontleed door oxidatieve en/of pyrolytische reacties. Een substantieel deel van de verontreinigingen wordt vernietigd in de bodem nog voordat de verwarmingselementen wordt bereikt. De reden daarvoor is dat deze verontreinigingen gedurende een lange tijd aan een relatief hoge temperatuur worden blootgesteld. Hoe dichterbij de buis, des te hoger is de temperatuur. Een paar dagen tot enkele weken volstaat om oxidatieve of pyrolytische reacties op te wekken op temperaturen tussen 300°C en 500°C.

3.1.2.5. INSTALLATIE VAN DE VERWARMINGSELEMENTEN

De verwarmingselementen worden geplaatst op een onderlinge afstand van 1 tot 2,5 meter (standaard 1,5 meter). Voor de plaatsing worden diverse boortechnieken gebruikt, afhankelijk van de lokale omstandigheden en de diepte die bereikt moet worden.

Figuur 7 laat een boor-eenheid zien voor ondiepe (< 6 meter) gaten. Dit werktuig werkt met een pneumatische boorkop die in de grond wordt gebracht. Deze techniek kan worden toegepast in ruimtes waarbij de vrije hoogte beperkt is.



Figuur 7: Pneumatische boorkop

Een andere techniek om de boringen uit te voeren is met een hydraulische rupsboormachine. Hierbij kan de verwarmingsbuis rechtstreeks in de grond geboord worden, of bij ondergrondse obstakels een voorboring worden uitgevoerd.

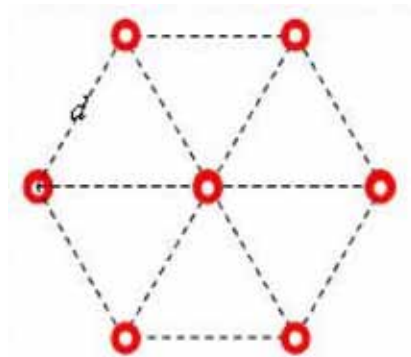
Deze machine vereist weleen werkhoogte van 6m en wordt zodoende gebruikt voor onoverdekte in-situ toepassingen of ex-situ batches.



Figuur 8: Hydraulische boormachine

3.1.2.6. HET NETWERK ONTWERP

Het netwerk van verwarmings buizen wordt aangebracht in de vorm van gelijkzijdige driehoeken, zoals getoond in figuur 9. Deze configuratie maakt een gelijkmatige verwarmings- en verwerkingstijd voor elk element mogelijk voor de gehele te reinigen zone.



Figuur 9: Schema van het netwerk van de verwarmingsbuizen in gelijkzijdige driehoeken

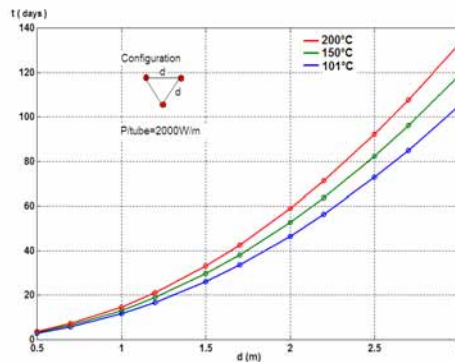
3.1.3. DE DESORPTIE VAN DE VERONTREINIGINGEN

3.1.3.1. DUUR VAN DE OPWARMING VAN DE BODEM

De duur van de opwarming van de bodem is afhankelijk van:

1. het verwarmingsvermogen (temperatuur en snelheid van het gas)
2. afstand tussen de verwarmingsbuizen
3. de te bereiken temperatuur van de grond op het koudste punt (het centrum van elke driehoek)
4. de karakteristieken van de bodem
5. het watergehalte en de verontreinigingsconcentratie

In figuur 10 wordt de relatie getoond tussen verwarmingstijd en de afstand tussen de verwarmingselementen, voor zandgrond met 12 % water en 1% M.O. (Mineralie Olie). Het verwarmingsvermogen is 2000W/ m buis.



Figuur 10 : verwarmingsduur versus afstand tussens de buizen

3.1.3.2. TOEPASSINGEN: VERONTREINIGINGEN

3.1.3.2.1. **Koolwaterstoffen**

Koolwaterstoffen zijn moleculen die voornamelijk bestaan uit Waterstof (H) en Koolstof (C). De temperatuur waarop verdamping plaatsvindt is bij koolwaterstoffen doorgaans evenredig aan het aantal koolstof atomen in de samenstelling. Als vuistregel kan gesteld worden dat hoe meer koolstof atomen aanwezig zijn ("zware koolwaterstoffen"), des te hoger zal het kookpunt zijn. Koolwaterstoffen in verontreinigde bodem gedragen zich verschillend naar gelang hun moleculaire gewicht. Hoe hoger het moleculair gewicht, des te hoger zal de noodzakelijk te bereiken temperatuur zijn, en dus ook hoe hoger moet de verblijftijd zijn voor een volledige desorptie van de koolwaterstoffen.

Onder de koolwaterstoffen wordt veelal onderscheid gemaakt tussen alifatische, mono-aromatische (BTEX) en poly-aromatische (PAK) koolwaterstoffen. Alifatische koolwaterstoffen en BTEX worden veelal geassocieerd met olie-derivaten, terwijl PAK's meer geassocieerd zijn met koolstof-derivaten.

Vele andere soorten koolwaterstoffen kunnen ook aanwezig zijn (zie tabel hieronder).

In elk geval zullen de koolwaterstoffen in een thermisch desorptie proces, dus ook met Thermopile©, verdampen en vervolgens in gasvorm in een verbrandingskamer geoxideerd worden tot CO₂ en H₂O. Bij dit proces wordt energie gegenereerd.

In sommige gevallen kunnen in de bodem andere elementen aanwezig zijn, naast deze koolwaterstoffen zoals zwavel (S) of chlorines, die niet geoxideerd worden tot CO₂ en H₂O. Hierdoor kan een additionele gas behandeling noodzakelijk zijn (zie onder: secundaire gas behandeling), ten einde de emissie-standaarden voor het uitstoten van gassen in de atmosfeer te respecteren.

Tabel 1 toont de verschillende kookpunten (bij atmosferische druk) van de meest voorkomende verontreinigingsparameters in bodem, waarop thermische desorptie kan worden toegepast.

Température d'ébullition de certains contaminants	
HAP	
Naphtalene	218 °C
Acenaphtylene	280 °C
Acenaphtalene	279 °C
Fluorene	296 °C
Phenantrene	340 °C
Antracene	342 °C
Fluoranthene	375 °C
Pyrene	393 °C
Benzo(a)Fluranthene	482 °C
Chryseen	488 °C
Benzo(b)Fluoranthene	480 °C
Benzo(k)Fluoranthene	480 °C
Benzo(a)pyrene	371 °C
Benzo(ghi) perylene	550 °C
Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	530 °C
Hydrocarbures	
Essence	221 °C
Diesel	343 °C
Fioul lourd	443 °C
Autres	
PCB	<350 °C
Phenols	310 °C
TNT	300 °C
Cyanide	430 °C
Mercure	320 °C
Sulphure	414 °C
Solvants chlorés	60 °C

Tabel 1 : Kookpunt van de meest voorkomende verontreinigingen

Opmerking: De in de tabel hierboven weergegeven temperaturen zijn de kookpunten geldig bij atmosferische druk.

3.1.3.2.2. *Andere verontreinigingen*

Net als bij klassieke thermische desorptie worden alle overige verontreinigingen door Thermopile® verwijderd, dat wil zeggen: elke verontreiniging met een kookpunt beneden ongeveer 550 °C. Hun gedrag kan echter gedurende het proces verschillend zijn, afhankelijk van het type verontreiniging.

De zuiver organische verontreinigingen (alleen koolstof en waterstof) zullen niet alleen worden gedesorbeerd, maar ook volledig geoxideerd in de verbrandingskamer. Er zal geen andere uitstoot zijn in de atmosfeer dan CO₂ en H₂O.

Voor gehalogeneerde koolwaterstoffen (gechloreerde oplosmiddelen, PCB's, dioxines, furanen, pesticiden etc.) blijft het principe van desorptie dezelfde: zij zullen verdampen (kookpunten zijn ruim beneden 550 °C). Eenmaal geoxideerd, blijven de halogenen echter in gasvorm aanwezig en daarom is een secundaire behandeling noodzakelijk, voordat uitstoot plaats vindt. (zie hieronder).

Er zijn ook behandelbare anorganische stoffen, zoals cyanides en kwik, maar hun gedrag is erg specifiek. Cyanides desorberen gemakkelijk (afhankelijk van de verbinding hebben ze een kookpunt tussen 300° en 420°C) en worden geoxideerd tot CO₂ en Nox, waarbij een specifieke secundaire behandeling van het gas noodzakelijk is. Verontreiniging met kwik vraagt speciale aandacht en een specifieke unit. Kwik zal desorberen (vrijwel alle vormen van kwik hebben kookpunten beneden 550 °C), maar zal niet worden geoxideerd. Hierdoor is een verdere behandeling van gasfase vereist, waarvoor een specifiek systeem noodzakelijk is.

3.1.4. DE MIGRATIE VAN VERONTREINIGDE GASSEN IN DE GROND

Zodra de verontreinigingsparameters zijn overgegaan in gasfase, migreren ze naar de verwarmingsbuizen doordat een negatieve druk wordt opgewekt door de hoge snelheid waarmee de gassen in het buizenstelsel circuleren (venturi effect). De verontreinigde gassen volgen preferentiële kanalen in de grond, die naar de verwarmingsbuizen leiden. Deze preferentiële kanalen worden gevormd, zelfs in zware klei, door het drogen van de grond, hetgeen scheuren kan veroorzaken. Hierdoor wordt eveneens de doorlaatbaarheid van de bodem voor de gassen bevorderd.

De verdamping van water en verontreiniging veroorzaakt bovendien lokaal een gebied van hogere druk, dat de beweging van de dampen richting gebieden van lagere druk (de verwarmingsbuizen) stimuleert.

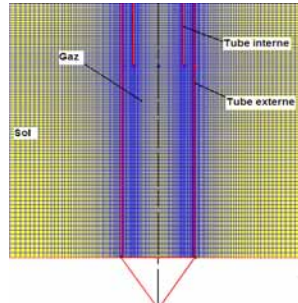
3.1.5. HET AFKOELEN VAN DE GROND

Nadat de grond maximaal tot 400 °C is opgewarmd op de koudste punten en totale desorptie van de verontreinigingen heeft plaats gevonden, wordt de grond gekoeld met koude lucht. Lucht met een temperatuur van 30 °C (maximum temperatuur van omgevingslucht) wordt met behulp van de ventilator van de naverbrander in het buizen netwerk gecirculeerd. Vooraf wordt een simulatiemodel opgesteld ten einde de luchtstroom die nodig is voor snel koelen (een paar dagen) vast te kunnen stellen. Deze berekening wordt met behulp van CFD software gedaan (Fluent®).

Grid:

Systeem: Lucht, buis en bodem rondom (D=1.5m).

Model: 86000 meshes, 2d/axisymmetrisch, onstabiel, turbulente flow/k-? (zie onderstaande figuur).

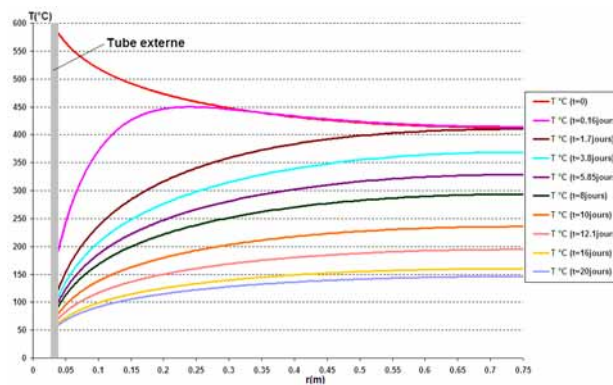


Figuur 11: 2D – asymmetric

Operationiële voorwaarden:

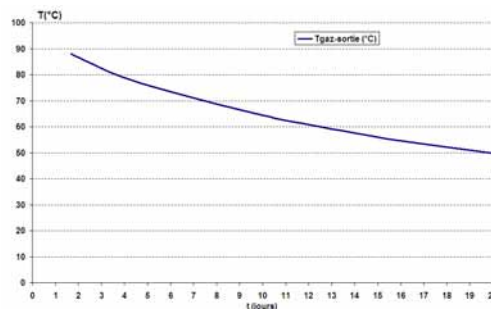
T air (°C) Inlaat buis	U air Inlaat buis (m/s)	Q air (Nm3/h)
30	25	34482
30	35	44000

U air=25m/s at 30°C



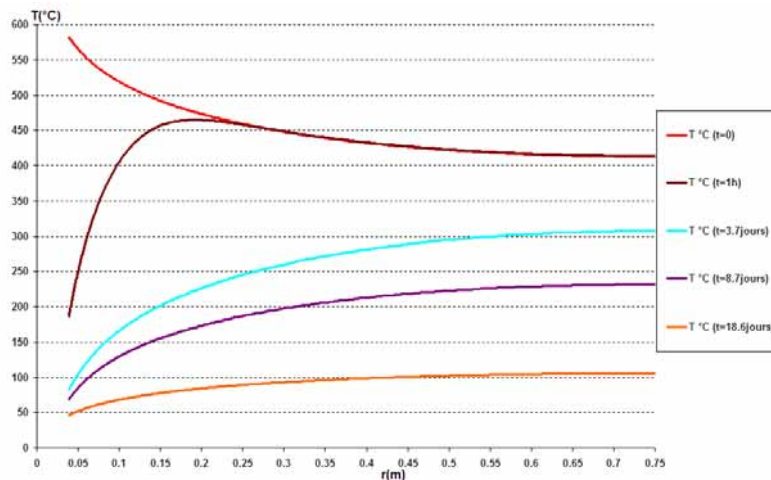
Figuur 12: Temperatuursprofiel ifv de tijd

Figuur 12 toont een temperatuursverlaging tot onder 145°C na 20 days (U_{air} = 25m/s op 30°C),
 Figuur 13 toont de luchttemperatuur in de buizen tijdens de afkoelingsfase i.f.v. de tijd.



Figuur 13: Luchttemperatuur in buizen tijdens de afkoelingsfase

Bij een verhoging van de circulatiesnelheid(en dus ook het luchtdebiet van de afkoeling). Na 18 dagen ($U_{\text{air}} = 35\text{m/s}$ op 30°C) overschijdt de bodemtemperatuur de 105°C niet.



Figuur 14: Evolutie van de bodemtemperatuur ivf de tijd aan 35m/s

3.2. HET REINIGEN VAN DE VERONTREINIGDE GASSEN

3.2.1. PRIMAIRE GAS REINIGING

Bij primaire gas reiniging worden alle organische, gedesorbeerde componenten geoxideerd, voor zover dit nog niet in-situ (in de bodem) of in het buizenstelsel was gebeurd. In de verbrandingskamer worden de koolwaterstoffen uit de gassen omgezet in CO_2 en H_2O .

Voordat de gassen echter de verbrandingskamer bereiken, hebben reeds andere reacties plaats gevonden, zoals hydrolyse en pyrolyse.

Deze reacties kunnen als volgt worden samengevat:

- ◆ Pyrolyse :
 - $\text{C}_x\text{H}_y \Leftrightarrow x\text{C}(\text{coke}) + y/2\text{H}_2$
- ◆ Hydrolysis:
 - $\text{C}_x\text{H}_y + 2x\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow x\text{CO}_2 + (2x+y/2)\text{H}_2$
 - $\text{C}(\text{coke}) + 2\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$
- ◆ Oxidation:
 - $\text{C}(\text{s}) + \text{O}_2 \Leftrightarrow \text{CO}_2$
 - $\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \Leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$
 - $\text{C}_x\text{H}_y + (x+y/4)\text{O}_2 \Leftrightarrow x\text{CO}_2 + y/2\text{H}_2\text{O}$

De volledige oxidatie van de gassen vindt uiteindelijk plaats in de verbrandingskamer. Ten einde 100% efficiëntie in afbraak te verkrijgen moet rekening worden gehouden met de volgende parameters:

- ◆ Temperatuur
- ◆ Verblijftijd
- ◆ Turbulentie

Deze parameters zijn aan elkaar gerelateerd volgens de Kinetische Wet van Arrhenius:

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -Ate^{\frac{-E}{RT}}$$

C/Co: residuele concentratie

t: verblijftijd

T: temperatuur

R: perfecte gas-constante

E: activeringsenergie

A: constante afhankelijk van de soort verontreinigingsparameter

Verblijftijd en temperatuur zijn derhalve afhankelijk van het type verontreinigingsparameter. De installatie en het project zijn altijd gebaseerd op de zwaarste verontreinigingsparameter die aanwezig is. Turbulentie wordt gecreëerd door het specifieke ontwerp van de verbrandingskamer.

3.2.1.1. BELANGRIJKE PARAMETERS EN CONTROLES

De belangrijkste parameters voor de primaire gasbehandeling zijn: temperatuur, verblijftijd en concentratie van zuurstof.

Volledige verbranding wordt gecontroleerd door een CO2 monitoring, waarin aangegeven wordt dat volledige oxidatie van alle organische componenten heeft plaats gevonden, welke resulteert in een succesvolle afsluiting van de primaire gasbehandelingsfase.

3.2.2. SECUNDAIRE GAS BEHANDELING

Afhankelijk van het type verontreiniging dat behandeld wordt kan het nodig zijn een secundaire gasbehandeling uit te voeren. Dit is het geval wanneer elementen als S, Cl, Br, Hg of NOx aanwezig zijn in de bodem en/of in de behandelde gassen uit de verbrandingskamer.

Indien deze elementen de maximum toegestane concentraties voor emissie in de atmosfeer overschrijden, zal een bijkomende behandeling van de gezuiverde gassen nodig zijn. Het is belangrijk vast te stellen dat deze secundaire behandeling alleen van toepassing is op de gezuiverde gassen die de uitlaat verlaten, en niet op de gassen die circuleren in het semi-gesloten netwerk. De orde van grootte van de gas stroom voor de secundaire behandeling varieert van 300 tot 1.500 Nm³/uur. Dit is afhankelijk van het type Thermopile© installatie.

Er bestaan verschillende types van secundaire gasbehandeling en keuze is afhankelijk van de verontreinigingen die aangepakt moeten worden. Het zijn aangetoonde technologieën die vooral toegepast worden in behandelingssystemen voor stofvrije gassen met lage debieten en op normale gemiddelde temperaturen.

Actief kool filters, katalytische oxidatie en gasscrubbing zijn het meest gebruikelijk bij dit soort behandelingen.

4. IMPLEMENTATIE

4.1. INTRODUCTIE

De toepassing van grondreinigings kan op verschillende manier worden uitgevoerd. Doorgaans wordt het volgende onderscheid gemaakt: off-site, on-site, ex-situ en in- situ reiniging.

Voor alle duidelijkheid geven we hier onze definities:

- ◆ **In-situ:** zonder afgraving van de grond
- ◆ **Ex-situ:** de grond wordt afgegraven, en:
 - **On-site:** ter plekke gereinigd, of:
 - **Off-site:** getransporteerd naar een andere lokatie voor verwerking

4.2. THERMOPILE© IN SITU

De Thermopile© in-situ technologie gebruikt verticale verwarmingsbuizen die rechtstreekt in de grond worden ingebracht. Via horizontale buizen wordt dit netwerk verbonden met de verbrandingsunit. (Zie figuur 15).



Figuur 15: Een voorbeeld van Thermopile© in-situ

De in-situ configuratie kan worden toegepast op open terrein, maar ook onder bestaande gebouwen (zonder afgraving, met zeer geringe overlast).

4.3. THERMOPILE© EX-SITU (ON SITE OF OFF SITE)

Thermopile© kan ook worden toegepast op afgegraven grond. In deze configuratie wordt de grond die behandeld moet worden in een daartoe gevormd bassin gestort. Vervolgens is de werkwijze gelijk aan de in-situ operatie.

De hoeveelheid grond die in 1 batch verwerkt kan worden is afhankelijk van het type Thermopile© installatie dat gebruikt wordt (T1 of T2).



Figuur 16: Thermopile© in ex-situ configuratie



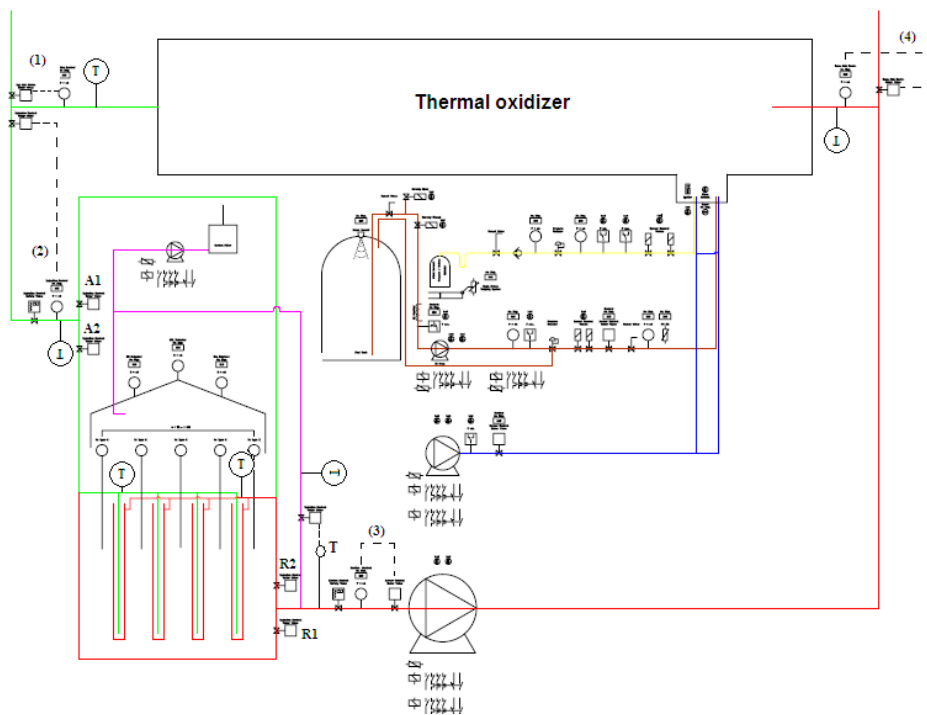
Figuur 17: Thermopile© in ex-situ configuratie, het vullen van het bassin.

In een ex-situ configuratie kunnen door toepassing van meerdere bassins, waarin de vervuilde grond gestort wordt voor behandeling, grote hoeveelheden worden gereinigd, eventueel met meerdere Thermopile© units

5. CONTROLES

5.1. PROCES CONTROLES

De belangrijkste parameter die gedurende het Thermopile© proces voortdurend wordt gemeten is de temperatuur (zowel in de gas-stroom als in de bodem). De drukken, de verbrandingsparameters en andere gemeten parameters worden in het schema van de procescontrole (figuur 18) weergegeven.

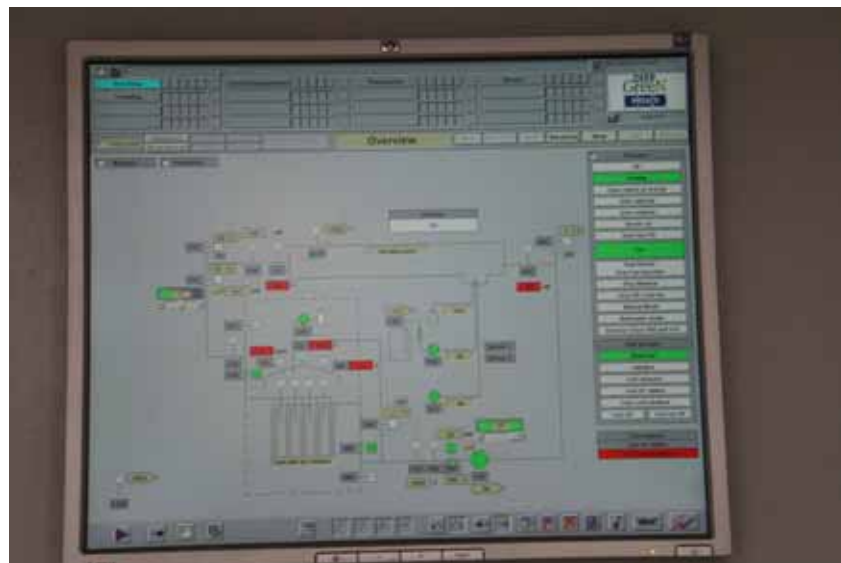
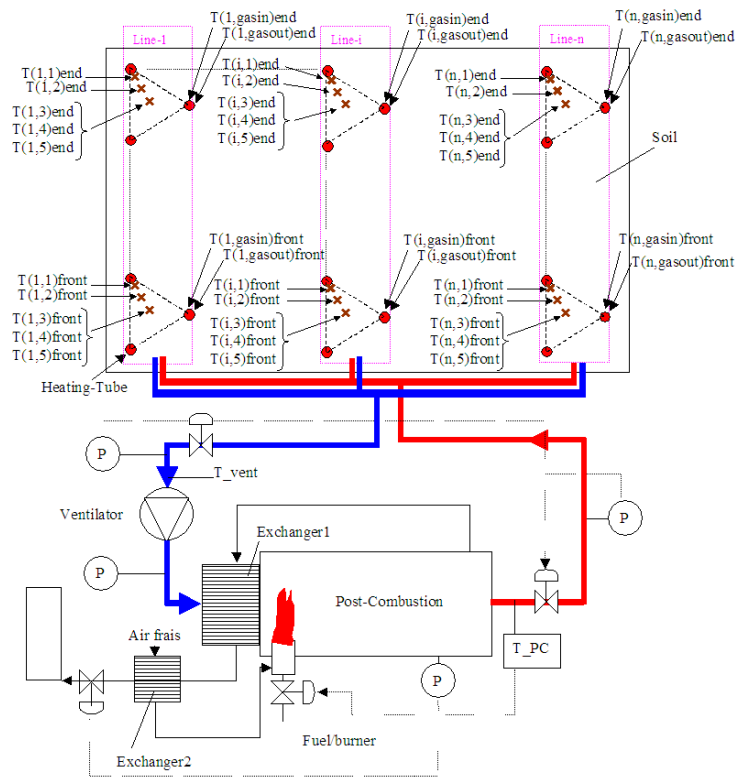


Figuur 18: Procescontrole

In de bodem wordt enkel de temperatuur opgevolgd met thermokoppels die op de ‘koudste’ punten (het midden van de gelijkzijdige driehoek die door drie verwarmingsbuisen wordt gevormd) en op verschillende dieptes worden ingebracht. Op basis van deze parameter kan worden vastgesteld of de reiniging kan worden beëindigd. Figuur 19 toont een schema met mogelijke posities van de thermokoppels.

Bediening van op afstand.

Het proces kan op afstand worden gecontroleerd met een PC of lap-top. Een SMS wordt automatisch verstuurd als er ergens een storing in het proces optreedt. Zo kan gedurende het verwarmingsproces aanwezigheid van mensen op de site beperkt worden.



Figuur 19: positie van de thermokoppels tbv proces monitoring

5.2. GAS ANALYSES – EMISSIES IN DE ATMOSFEER

De in de atmosfeer uitgestoten gassen worden continu (elke 10 minuten) opgevolgd en geanalyseerd. De analyse apparatuur is onderdeel van de Thermopile© installatie en kan de concentraties van de volgende gassen meten: O₂, CO₂, H₂O, NO, NO₂, SO₂.

6. BESCHIKBARE INSTALLATIES

6.1. T-LAB 1



Figuur 20: T-Lab 1 installatie

6.2. T-LAB 2



Figuur 21: T-Lab 2 installatie

6.3. T-LAB 3



Figuur 22: T-Lab 3 installatie

6.4. T-1.1.



Figuur 23: T-1.1 installatie

6.5. T-1.2.



Figuur 24: T-1.2 installatie

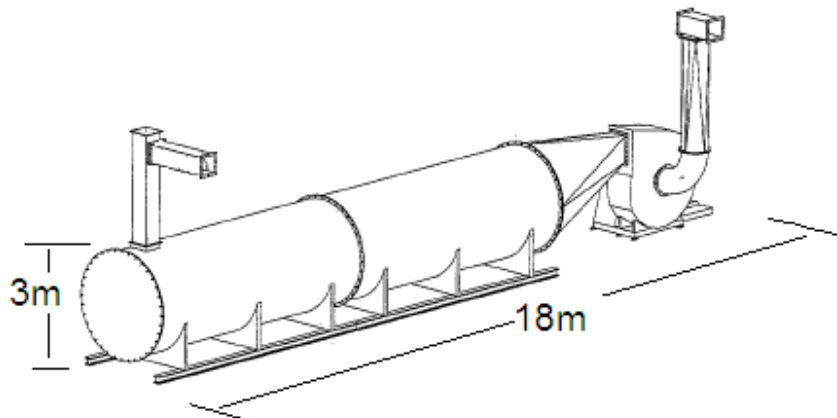
6.6. T-2



Figuur 25: T-2 installatie

Technische specificaties van een Thermopile© T-2 installatie

- ◆ Thermische capaciteit van de verbrandingskamer : 3 MW
- ◆ Verbrandingstemperatuur : >850°C
- ◆ Verblijftijd in de verbrandingskamer : > 2sec.
- ◆ Zuurstofconcentratie in de uitlaatgassen : min 6% - max 11%
- ◆ Uitlaatdebiet : 1500Nm³/h
- ◆ Totaal aantal verticale verbrandingsbuizen per batch : 288 stuks
- ◆ Totale lengte van de verbrandingsbuizen : 1152 m
- ◆ Gemiddeld verbruik (mazout) : 80 à 175 l/h
- ◆ Finaal te bereiken temperatuur (M.O. of gelijkwaardig) : 200 à 250°C (op het koudste punt)
- ◆ Finaal te bereiken temperatuur (PAK's of gelijkwaardig) : 350 à 400°C (op het koudste punt)



Figuur 26: Dimensies van een T-2 installatie

Verbrandingskamer T-2 installatie

Lengte : 12m
Hoogte : 3m
Branders : 2 mazoutbranders (2 x 150 l/h op maximaal vermogen)
Maximale werkingstemperatuur : 900°C