

# Een overzicht van technieken en mogelijkheden

## Thermische in-situ sanering van grond en grondwater

**In-situ thermische grond- en grondwatersanering is niets nieuws; al sinds eind jaren '90 worden verontreinigde locaties op deze wijze gesaneerd, vooral in de Verenigde Staten. In Europa lijkt de aandacht voor de techniek pas sinds enkele jaren goed 'op stoom' te komen. In Nederland – oorspronkelijk koploper en saneringsland bij uitstek – lijkt er nog veel onbekendheid te zijn over de techniek en de mogelijkheden.**

Door: Marco van den Brand

### Over de auteur:

Ing. M.L.J. van den Brand MSc, Bedrijfsleider bij HMVT en TRS Europe  
✉marco.vandenbrand@thermalrs.eu

### WAAROM IN-SITU THERMISCH?

Bij in-situ thermische bodemsanering wordt de grond ter plekke – of soms in een depot – gezuiverd. Dit in tegenstelling tot ex-situ thermische reiniging van ontgraven grond in een externe, vaste installatie. Het grote voordeel van de thermische in-situ saneringstechnieken ten opzichte van de meer traditionele technieken is de robuustheid. Bijna volledige vrachtverwijdering en zuivering is mogelijk, ook als er sprake is van puur product. Het grote verschil zit 'm in de raakkans: de warmte bereikt iedere porie en is geen gevaar meer voor voorkeurstromen. Het maakt daarmee ook niet uit of de bodem bestaat uit zand, klei of leem of dat heterogeen is; de warmte komt overal.

Thermische bodemsanering is daarmee vooral een technologie om bronzones effectief te verwijderen en 'eeuwigdurende' beheersmaatregelen te voorkomen. De technieken kunnen ook prima in een bebouwde omgeving worden ingepast of ondergronds worden afgewerkt zonder een eventuele bedrijfsvoering te hinderen.

Er bestaan diverse thermische in-situ saneringstechnieken die een groot scala aan verontreinigingen kunnen aanpakken, variërend van relatief makkelijk te verdampen vluchtige (chloor)koolwaterstoffen tot lastig te verwijderen en zeer persistente stoffen als dioxines, pcb's en zelfs de opkomende per- en polyfluoralkylstoffen (PFAS).

### TECHNIEKEN

Er bestaat een aantal thermische in-situ saneringstechnieken, vrijwel allemaal ooit ontwikkeld in de Verenigde Staten. Grofweg zijn dit de volgende:

- Electrical Resistance Heating (ERH)
- Conductive Heating

- Steam Enhanced Soil Vapor Extraction (stoom gestimuleerde extractie)

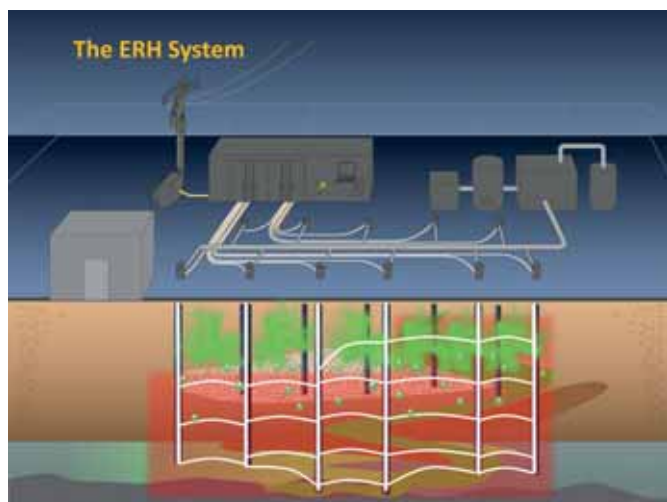
### ELECTRICAL RESISTANCE HEATING (ERH)

Bij ERH wordt de bodem homogeen opgewarmd door een elektrische stroom te laten lopen van de ene naar de andere elektrode. Vandaag de dag worden de drie stroomfasen gesplitst en verdeeld over een groep van steeds 3 elektrodes. De stroom gaat dus van elektrode 1 naar 2, van 2 naar 3 en weer van 3 naar 1. Door de weerstand van de bodemmatrix stijgt de temperatuur. In feite is

Reinigingsrendement thermische techniek veel groter dan bij conventionele in situ techniek

dit net als de werking van een gloeilamp: die wordt ook warm door de weerstand van de gloeidraad. Bij ERH worden elektroden typisch om de 4 à 6 meter afstand van elkaar geplaatst. Dit kunnen stalen pijpen zijn, damwandplanken of koperen platen. De dimensionering is uiteraard per locatie afhankelijk van onder meer geleidbaarheid, verhouding diepte versus oppervlak van het te behandelen volume, grondwaterstanden en -stromingssnelheid.

Door op een locatie een netwerk van elektrodes te plaatsen en dit met behulp van een Power Control Unit van stroom te voorzien, kan de bodem in 50 à 70 dagen worden opgewarmd. Hierbij stijgen de bodem- en grondwatertemperaturen, afhankelijk van de behandeldiepte onder water, soms tot boven de 100°C. Bij dergelijke temperaturen ontstaat 'in-situ stoom'. Deze stoombelletjes kennen een hele sterke opwaartse kracht en zullen zich naar de onverzadigde zone gaan bewegen, waar ze vervolgens worden afgevangen met een stoom- of bodemluchtexttractiesysteem, zie ook figuur 1.



FIGUUR 1: PRINCIPESCHETS VAN ELECTRICAL RESISTANCE HEATING. ELEKTRODES, STOOM-AFVANG, BEKABELING & PIPING, POWER CONTROL UNIT EN LUCHT- EN/OF WATERZUIVERING

Door kookpuntverlaging zullen vluchtige (chlor)koolwaterstoffen eveneens gaan koken en verdampen. Deze stoffen zullen met de in-situ geproduceerde stoom mee naar de onverzadigde zone opstijgen en worden daar afgevangen. Er is sprake van een soort destillatie-proces: de verontreinigingen worden uit de bodem verdampt. Door de bodem lang genoeg op kook-temperatuur te houden kan vrijwel alle aanwezige verontreiniging worden weggenomen. Hoe langer op temperatuur, hoe hoger het verwijderingsrendement.

ERH wordt met name toegepast om vluchtige koolwaterstoffen te verwijderen: 9 van de 10 keer gaat het om puur product van ge-chloreerde koolwaterstoffen. Het grote voordeel van deze techniek ten opzichte van Conductive Heating is dat het proces zelf-regulerend is en er maar heel weinig water verdamppt. ERH heeft vocht nodig om de stroom te geleiden. Als er geen vocht is kan er ook geen stroom lopen. Dit betekent dat wanneer er onverhoopt te veel energie op een elektrode wordt gezet, de directe omgeving van een elektrode wordt 'droog gekookt' en het (uitdamp)proces ook automatisch stopt. Het is daarmee zelfregulerend; je kunt de bodem niet té heet maken en er is geen gevaar voor ongecontroleerde uitdamping. ERH is daarmee een goed te controleren proces, net zoals je een pan kokend water net niet, een beetje en fors kunt laten koken. Dit in tegenstelling tot Conductive Heating, waarbij de bodemtemperaturen lokaal veel warmer dan 100°C worden en de bodem blijft doorkoken door de opgeslagen energie, ook als onverhoopt de afzuiging of energietoevoer stopt.

ERH vraagt slechts weinig bodemvocht voor de geleiding van de stroom. De techniek kan daarmee zowel in de verzadigde als onverzadigde zone worden toegepast. In tegenstelling tot Conductive Heating, wordt het niet zo heet dat alle bodemvocht of grondwater verdamppt. Alleen de in-situ geproduceerde stoom wordt verwijderd, maar dit is slechts ca. 50 m<sup>3</sup> per 1.000 m<sup>3</sup> behandeld bodemvolume. Er is daarmee dan ook weinig instroom van koud omgevingswater, wat ERH één van de meest energie-efficiënte in-situ thermische technieken maakt.

#### CONDUCTIVE HEATING

Bij conductive heating wordt de bodem vanuit een raster van stalen buizen verhit. Deze buizen worden intern verhit door middel van een elektrisch element of extern door middel van een elektrische of gasgestookte heater. Deze buizen kunnen tot vele honderden graden Celcius verhit worden. In tegenstelling tot ERH wordt de bodem vervolgens niet homogeen opgewarmd, maar verspreidt de warmte zich radiaal uit vanuit de 'heater wells'. Bij

Conductive Heating verspreidt de warmte zich dus via de bodemmatrix, het heeft geen vocht nodig om zich te verspreiden. Het kan daarmee ook worden ingezet in kristallijne rotsbodems waar zaklagen zich via scheuren wel in hebben kunnen verspreiden.

Ten opzichte van ERH heeft Conductive Heating daarnaast als voordeel dat de bodem ook boven het kookpunt verwarmd kan worden, tot enkele honderden graden. Met Conductive Heating kunnen dus ook koolwaterstoffen verdampt worden die minder vluchtig zijn, zoals polycyclische koolwaterstoffen (PAK), polychloorbifenylen (PCB) en perfluoralkylstoffen (PFAS), zie ook figuur 2.



FIGUUR 2: TEMPERAATUURBEREIK VAN DE VERSCHILLENDE THERMISCHE TECHNIKEN VERSUS KOOKNIVEAUS STOFGROEPEN.

De nadelen van Conductive Heating zijn onder ERH al aange-stipt. Doordat in ieder geval rondom de heater wells al het grondwater wordt verdampt, is er veel meer instroom en koeling door grondwater dat van buiten de behandelde zone instroomt. Vaak is ook actieve verwijdering van grondwater nodig. De tech-

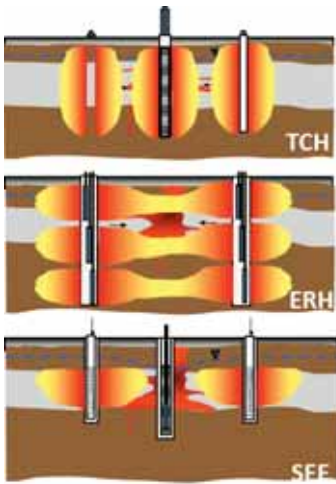
Thermische sanering kost minder energie dan men denkt

nologie vraagt dus meer energie. Daarnaast hoopt zich bij Conductive Heating veel energie op in de bodemmatrix zelf. Mocht nu onverhoopt het proces in storing vallen, blijft door de aanwezige warmte het grondwater koken en verdampen. Dit betekent dat altijd een back-up bodemafzuigstelsel of in ieder geval dieselgenerator nodig is om ongecontroleerde uitdamping naar maaiveld of bebouwing te voorkomen. Verder vraagt Conductive Heating ook een relatief dicht filternetwerk, van 2 à 3 meter onderlinge afstand.

#### STOOM GESTIMULEERDE EXTRACTIE

Bij stoom gestimuleerde extractie wordt via een netwerk van injectiefilters stoom geïnjecteerd en door de bodem naar centraal gelegen extractiefilters geleid. Bij de start van het saneringsproces is de bodem nog koud en condenseert de stoom. Naarmate er lang genoeg energie in de vorm van stoom wordt geïnjecteerd, warmt de bodem rondom het injectiepunt op en verdamppt ook het bodemvocht. Uiteindelijk is het doel om het stoomfront richting de extractiepunten op te schuiven en stoomdoorbraak te krijgen. Op dat moment wordt de bodem doorstoemt.

In tegenstelling tot ERH en Conductive Heating volgt stoom de weg van de minste weerstand. Het gevaar voor voorkeurstroming en het daardoor missen van plekken in de verontreinigde zone ligt daarom op de loer. In geval van een mooi (grof)zandige bodem kan stoom gestimuleerde extractie een prima alternatief zijn



FIGUUR 3: GESCHEMATISEERDE VERWARMING MET DE DRIE TECHNIEKEN..

voor ERH en Conductive Heating. De afstanden tussen injectie- en extractiefilters kunnen veel groter zijn dan bij ERH of Conductive Heating en het is relatief goedkoop. In situaties waar sprake is van een zeer gelaagde bodem, verontreiniging diep onder grondwatervlakte zit, leem en/of klei aanwezig is, heeft stoominjectie beperkingen.

Soms wordt stoom gestimuleerde extractie aan de onderzijde van een met ERH of Conductive Heating behandeld bodemvolume toegepast om te voorkomen dat onderlangs stromend koud

Thermische saneringen: onbekend maakt onbemind

grondwater het verwarmde bodemvolume te veel afkoelt. In situaties waar onder een afsluitende, maar sterk verontreinigde leemlaag een schone maar snel stromende aquifer aanwezig is, kan onder de leemlaag een 'stoomdeken' worden aangelegd.

In figuur 3 worden de verwarmingsprincipes van de drie verschillende in-situ thermische technieken grafisch weergegeven. Hierbij geeft rood de warmere en geel de koudere zones weer tijdens het opwarmproces. Uiteindelijk wordt bij ERH en Conductive Heating het hele bodemvolume rood. Bij stoom is dit zoals beschreven sterk afhankelijk van voorkeurstroming.

**VOOROORDELEN**

Rondom in-situ thermische in-situ technieken bestaan een aantal hardnekkige vooroordelen. Ik behandel er hieronder een aantal.

**Te duur?**

Een veelvoorkomend vooroordeel over in-situ thermische sanering is dat het veel te duur is. De vraag is of appels met appels vergeleken worden. In-situ thermische bodemsanering is zinvol bij de sanering van bronzones waar puur product aanwezig is. Het zijn geen technieken om op pluimen te jagen. Is er geen of slechts een geringe hoeveelheid puur product aanwezig, dan kan uiteraard ook worden volstaan met een klassieke in-situ saneringsaanpak. Als er veel puur product in de bronzone aanwezig is, voldoen de klassieke in-situ saneringen niet. Het afbreukrisico dat nadien puur product achterblijft is dan immers levensgroot en blijft nazorg of beheersing alsnog nodig.

In de tot op heden door ons uitgevoerde projecten stond de klant echter voor de keuze: of eeuwigdurende beheersing, met bijbehorende aansprakelijkheden en kosten, of eenmalig de middelen besteden om een bronzone ook echt schoon te maken en het probleem in een kort tijdsbestek eindig te maken. In al deze gevallen was het in-situ thermisch verwijderen goedkoper dan geïncubateerd eeuwigdurend beheersen, bijvoorbeeld door middel van een geohydrologische beheersmaatregel. Ook toekomstige verbetering van verkoop- of ontwikkelmogelijkheden moeten hierbij in ogenschouw genomen worden.

**Grote Carbon Footprint?**

Een ander veelgehoord vooroordeel is dat in-situ thermische bodemsanering veel energie kost en daarmee een enorme carbon footprint kent. Studies wijzen uit dat dit vaak niet zo is.<sup>1</sup> Er wordt wel veel energie gevraagd om de bodem op te warmen, maar daar staat tegenover dat de projecten relatief kort duren, vaak niet meer dan een half tot één jaar. Als dit wordt afgezet tegen klassieke in-situ sanerings- of beheerstechnieken die jarenlang in bedrijf zijn en die jarenlang transportbewegingen of chemicaliën en afvalverwerking vergen, dan blijkt de carbon footprint uiteindelijk vaak mee te vallen.

**Vernietiging bodemleven?**

Veel mensen verwachten dat door in-situ thermische sanering ook het bodemleven wordt vernietigd. Dit is echter niet het geval, het is heel moeilijk een bodem te steriliseren. Zeker bij ERH overleven de thermofiele bacteriën en als bodem en grondwater weer afkoelen naar temperaturen rondom 30-50°C ontstaan juist ideale biologische omstandigheden. Door de verwarming is tevens het organische stofgehalte in het water gestegen. De uitstroom van dit warme, biologisch actieve water zal tevens positief werken op de biologische afbraak van restverontreinigingen in de pluim.<sup>3</sup>

**PFAS**

Vrijwel onbekend is dat bodems die lokaal sterk verontreinigd zijn met PFAS (in-situ) thermisch gereinigd kunnen worden door middel van Conductive Heating. Onze thermische saneringspartner TRS heeft ontdekt dat wanneer grond tot 350 à 400 °C wordt verwarmd, de PFAS-moleculen samen met de geproduceerde stoom uit de bodem verdampen, zie ook figuur 4. De techniek is

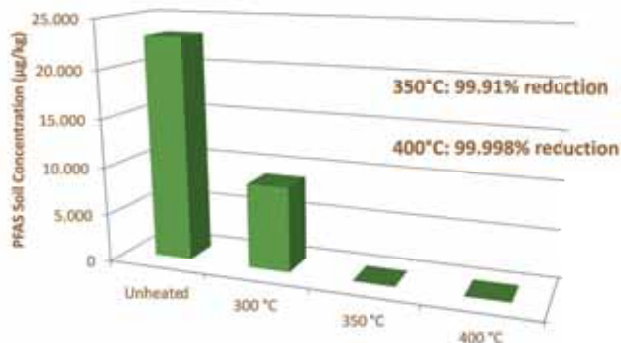
**In-situ thermische verwijdering van Japanse Duizendknoop**

De Japanse Duizendknoop is een agressief woekerende plant, oorspronkelijk uit Japan, die zich in dit deel van de wereld heeft weten te vestigen en die ondertussen veel schade veroorzaakt. De plant blijkt nauwelijks uit te roeien met bestaande bestrijdingstechnieken. Bekend is dat bij ca. 3 dagen verwarming van de grond boven 50°C de plant en wortelresten effectief worden uitgeroeid. In-situ thermische saneringstechnieken zijn daarmee inzetbaar om zowel in-situ als ex-situ in depots grond 'verontreinigd' met Japanse Duizendknoop te saneren.



op bench- en pilotschaal uitgebreid getest waarbij reinigings-rendementen van 99,99 procent bereikt zijn.<sup>2</sup> Binnenkort starten in de Verenigde Staten ook full-scale testprojecten waarin gronddepots op deze wijze worden behandeld. De methode is interessant als er sprake is van forse PFAS-concentraties en hoge lutum- of kleigehaltes en andere technieken, of storten niet toereikend of mogelijk zijn.

De uitkomende PFAS-dampen worden gekoeld en condenseren uit in het mee-verdampte bodemvocht. Het resultaat is dus schone grond en een relatief kleine hoeveelheid met PFAS verontreinigd water. Het water kan eenvoudig met bestaande technieken als actieve kool, ionenwisselaar of de PerfluorAd methode gereinigd worden.



FIGUUR 4: RESTERENDE PFAS CONCENTRATIES IN GROND NA VERWARMING BIJ VERSCHILLENDE TEMPERATUREN.

#### BODEM BREED

Mocht je meer willen weten over de mogelijkheden, voor- en nadelen van in-situ thermische bodemsanerings-methoden, kom



FIGUUR 5: UITVOERING VAN EEN ERH SANERING IN NOORD-FRANKRIJK.

dan naar het Symposium Bodem Breed op 24 november in Zeist. Daar worden de lessons learned van een tweetal uitgevoerde thermische in-situ saneringen gedeeld én zal een presentatie worden gegeven over een proefproject waarin een gronddepot verontreinigd met Japanse Duizendknoop thermisch wordt aangepakt.

#### NOTEN

1. <https://www.thermalrs.com/images/document/upload/pdf/1447540311-EPA-Green-Remediation-factsheet-ISTT.pdf>
2. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rem.21623>, <https://www.thermalrs.com/images/document/upload/pdf/1553736148-TRS-TCH-PFAS-in-Soil-Proof-of-Concept-2019-03-11-dcf.pdf>
3. <https://serdp-estcp.org/Program-Areas/Environmental-Restoration/Contaminated-Groundwater/Persistent-Contamination/ER-200719/ER-200719>