

227

**Riina Penttinen**

# Maaperän ja pohjaveden kunnostus

Yleisimpien menetelmien esittely

ISBN 952-11-0943-2  
ISSN 1455-0792

Painopaikka: Oy Edita Ab  
Helsinki 2001

## ALKUSANAT

Maaperän ja pohjaveden pilaantuminen on kasvava huolenaihe myös Suomessa. Markkinoilla on nykyisin useita maaperän ja pohjaveden kunnostusmenetelmiä, joiden käyttökelpoisuus kulloisenkin kohteen kunnostamiseen riippuu monista tekijöistä. Tässä julkaisussa esitellään Suomessa yleisimmin käytössä olevia kunnostusmenetelmiä. Tavoitteena ei ole antaa suosituksia eri menetelmien soveltuvuudesta.

Teos on julkaistu vain sähköisenä versiona. Tavoitteena on päivittää sitä tarpeen mukaan, esimerkiksi uuden kunnostusmenetelmän tultua markkinoille.

Julkaisun laatimisen on rahoittanut ympäristöministeriö. Teoksen kirjoittaja kiittää rahoittajaa ja kaikkia teoksen valmistumista edistäneitä tahoja kuten tietoja menetelmistään antaneita yrityksiä sekä käsikirjoituksen kommentoijia. Virpi Nikulaisen ja Jukka Puustisen tekemä menetelmäkuvausten pohjatyö on ollut kirjoitustyössä suurena apuna. Siitä heille erityiskiitokset.

Helsingissä elokuussa 2001



# SISÄLLYS

1. JOHDANTO .....	7
1.1. Maaperän ja pohjaveden pilaantuminen .....	7
1.2. Maaperän ja pohjaveden kunnostaminen .....	7
1.3. Pilaantuneen maan ja pohjaveden kunnostusmenetelmät .....	8
1.4. Kirjallisuus .....	9

## KUNNOSTUSMENETELMÄT

1. Luontainen biohajoaminen .....	10
2. Bioventing, biologinen ilmahuuhtelu .....	12
3. Tehostettu biologinen puhdistus .....	14
4. Huokosilmäkäsittely .....	16
5. Fytoremediaatio .....	18
6. Peltohajotus, peltokäsittely, öljypelto .....	20
7. Kompostointi (aumakompostointi) .....	22
8. Bioreaktorit .....	24
9. Maan pesu .....	26
10. Maan huuhtelu .....	28
11. Elektrokineettiset menetelmät .....	30
12. Poltto / terminen käsittely .....	32
13. Terminen desorptio / terminen käsittely .....	34
14. Kiinteytys / stabilointi .....	36
14a. Bitumistabilointi .....	38
14b. Sementtistabilointi, ekobetonointi .....	39
15. Eristys .....	40
16. Kaatopaikkakäsittely .....	42
17. Pump&treat, pohjaveden pumppaus käsiteltäväksi .....	44
18. Pohjaveden ilmastus .....	46
19. Reaktiiviset seinämät .....	48



# 1. JOHDANTO

## 1.1. Maaperän ja pohjaveden pilaantuminen

Maaperän pilaantuminen on yksi vakava ympäristön pilaantumisen muoto. Ensimmäinen kattava selvitys maaperän pilaantumisen laajuudesta Suomessa tehtiin vuosina 1989-1994, jolloin toteutettiin nk. SAMASE-projekti (saastuneiden maa-alueiden selvitys) (Puolanne ym. 1994). Siinä koottiin tiedot noin 10 000 pilaantuneeksi epäillystä maa-alueesta. Todellisen pilaantuneiden alueiden määrän arvioitiin kuitenkin olevan kaksin-kolminkertainen. Nykyisin ympäristöhallinnon rekistereissä on noin 20000 pilaantuneeksi epäiltyä aluetta (Haavisto 2001). Pilaantuneiksi epäiltyjen alueiden tila on suurimmassa osassa kohteista selvittämättä, joten tietoa pilaantuneiden alueiden laajuudesta tai pilaantuneisuuden asteesta ei ole.

Maaperän ja pohjaveden pilaaminen on kielletty lainsäädännöllä. Maaperän pilaamisesta on säädetty aikanaan jätehuoltolaissa (32 §, roskaamiskielto) ja jätelaissa (22 §, maaperän saastuttamiskielto). Pohjaveden pilaaminen oli aiemmin kielletty vesilaissa (22 §). Kiellot on siirretty nykyiseen ympäristönsuojelulakiin (7 ja 8 §).

Maaperän tai pohjaveden pilaantumista voivat aiheuttaa erilaiset epäorgaaniset tai orgaaniset aineet, joita joutuu maaperään ympäristölle tai terveydelle vaarallisia tai haitallisia määriä. Suomessa yleisimpiä maaperää pilanneita aineita ovat raskasmetallit, öljy-yhdisteet ja klooratut hiilivety-yhdisteet. Polttoaineiden lisäaineena käytettävä MTBE aiheuttaa pohjavedessä maku- ja hajuhaittoja.

Maaperässä tapahtuu erilaisia fysikaalisia, kemiallisia ja biologisia ilmiöitä. Haitta-aineiden ja maaperän ominaisuuksista kuten aineen tiheydestä, liukoisuudesta, haihtuvuudesta ja biohajoavuudesta, maalajista sekä maan pH:sta, hapetus-pelkistys -olosuhteista ja kosteudesta riippuen haitta-aineet kulkeutuvat eri kohteissa eri tavoin<sup>1</sup>. Tämä vaikuttaa mm. pilaantumisen laajuuteen ja kunnostusmenetelmän valintaan.

## 1.2. Maaperän ja pohjaveden kunnostaminen

Lainsäädännössä ei ole määritelty, milloin maaperä tai pohjavesi on niin pilaantunut, että alue tulee kunnostaa. Käytännössä pilaantuneen maaperän kunnostustarve on useimmiten määritetty SAMASE-projektin loppuraportissa esitettyjen aine- ja yhdistekohtaisten ohje- ja raja-arvojen perusteella. Assmuth (1997) tarkisti 15 aineen osalta pitoisuusrajoja ja ehdotti niihin muutoksia. Valtioneuvoston asetus maa-alueen maaperän pilaantuneisuuden selvittämisestä ja puhdistustarpeen arvioinnista on valmisteilla. Siihen on sisällytetty mm. päivitettyt ohjearvot ja niiden soveltamisohjeet. Pohjavesialueita on kunnostettu lähinnä silloin, kun pilaantuminen on uhannut talousveden puhtautta ja turvallisuutta. Talousveden laadusta on säädetty sosiaali- ja terveysministeriön päätöksellä (no. 74/1994, uudistettu 461/2000).

Kunnostustarpeen ja -tavoitteiden arvioinnin ja päätöksenteon yleistyvä apuväline on riskinarviointi. Sen avulla pyritään määrittämään pilaantumisesta aiheutuvat uhkatekijät pilaantuneella alueella ja mahdollisesta kunnostuksesta syntyvien pilaantuneiden maamassojen sijoituspaikalla (Sorvari ja Assmuth 1999). Maaperän pilaantumisesta voi aiheutua terveysriskejä ihmisille, ekologisia riskejä ympäristössä, aineellisia riskejä esimerkiksi rakennuksille ja taloudellisia riskejä maankäytön rajoituksista tai maaperän kunnostamisen kustannuksista. Myös esteettiset ja psykologiset riskit sekä muut sekundääriset riskit ovat mahdollisia (Sorvari ja Assmuth 1998).

Maaperän kunnostus tulee useimmiten ajankohtaiseksi silloin, kun alueen käyttötarkoitus on muuttumassa tai maan pilaantumisesta on todettu aiheutuvan esimerkiksi välitön pohjaveden pilaantumisriski tai haitta ympäristön asukkaiden terveydelle. SAMASE-projektin jälkeen Suomessa kunnostettujen pilaantuneiden maiden lukumäärä kasvoi selvästi (Pyy 2000). Siihen

---

<sup>1</sup> Haitallisten aineiden maaperäkäyttäytymisestä, ks. esim. Dragun 1998

saakka pilaantuneita alueita oli kunnostettu lähinnä onnettomuuksien yhteydessä ympäristövahinkojen torjuntatöinä. Viimeisten parinkymmenen vuoden aikana Suomessa on kunnostettu yli 1000 kohdetta (öljyvahinkojen jälkitorjuntatyöt pois lukien). Tällä hetkellä vuosittain kunnostettavien kohteiden määrän on arvioitu olevan 150-200. Kunnostetuista kohteista noin puolet on erilaisia polttoaineen jakelu-, kuljetus- ja varastointialueita. Myös kaatopaikat ja entiset saha- ja kyllästämoalueet ovat olleet yleisiä kohteita. Jatkossa mm. romuttamoiden ja korjaamoiden, metalliteollisuuslaitosten, kemiallisten pesuloiden ja ampumaratojen kunnostaminen työllistää entistä enemmän.

Pilaantuneen maaperän kunnostuskustannukset vaihtelevat suuresti kohteesta riippuen. Vaihtelu johtuu pilaantumisen aiheuttaneesta haitta-aineesta, pilaantumisen laajuudesta ja käytetystä kunnostusmenetelmästä. Suomessa ei ole tehty kattavaa kustannusselvitystä toteutuneiden pilaantuneiden maiden kunnostuksista. Valtion osittain rahoittamissa hankkeissa (146 valmista hanketta) kunnostustöiden kustannusten keskiarvo oli 720 000 mk ja mediaani 400 000 mk (Pyy 2000). Muutama suuri kohde nostaa kunnostuskustannusten keskiarvoa. Kahdessa kolmasosassa toteutuneista töistä kustannukset ovat jääneet alle 500 000 mk. Pilaantuneiden huoltoasema- ja polttoaineen jakelupisteiden kunnostuskustannukset ovat vaihdelleet 40 000-1 200 000 mk.

Vallitsevan käytännön mukaan pilaantuneita maita kunnostetaan 'aiheuttaja maksaa' -periaatteella, jolloin pilaantumisen aiheuttaja vastaa myös kunnostuksesta ja siitä aiheutuvista kuluista. Joskus aiheuttajaa ei kuitenkaan tiedetä tai saada vastuuseen pilaamisesta. Pilaaja voi osoittautua myös varattomaksi. Tällöin apua kunnostuksen rahoittamiseen ja suorittamiseen voi saada valtion jätehuoltotöiden tai SOILI-ohjelman<sup>2</sup> kautta.

### 1.3. Pilaantuneen maan ja pohjaveden kunnostusmenetelmät

Pilaantuneen maaperän kunnostusmenetelmiä on viime aikoina kehitetty runsaasti. Maaperän rakenteesta, haitta-aineista ja niiden määrästä riippuen eri menetelmät soveltuvat eri tavoin eri kohteisiin. Siksi kunnostusmenetelmä on valittava aina kohdekohtaisesti. Menetelmät perustuvat joko fysikaalisiin, kemiallisiin tai biologisiin reaktioihin. Osa menetelmistä ei tähtää haitta-aineen hävittämiseen, vaan tavoitteena on estää sen leviämistä ja näin poistaa tai vähentää pilaantumisen aiheuttamaa ympäristö- ja terveyshaittaa. Kunnostaminen voi tapahtua *in situ* (maata tai pohjavettä siirtämättä), *on site* (paikan päällä) tai *off site* (maa tai pohjavesi siirretään muualle käsiteltäväksi). Ympäristönsuojelulainsäädännön mukaan kunnostaminen tulee suorittaa parasta käyttökelpoista tekniikkaa käyttäen ja siten, ettei toiminnasta aiheudu muuta ympäristön pilaantumista.

Tässä julkaisussa esitellään yleisimpiä Suomessa käytössä olevia maaperän ja pohjaveden kunnostusmenetelmiä. Tavoitteena ei ole antaa kattavaa selvitystä menetelmien teknisistä yksityiskohdista. Tavoitteena ei myöskään ole antaa suosituksia eri menetelmistä ja niiden soveltuvuudesta. Julkaisu sopii parhaiten käytettäväksi silloin, kun tehdään alustavaa valintaa käyttökelpoisten kunnostusmenetelmien kesken tarkempaa jatkosuunnittelua varten.

Julkaisussa esitellyt menetelmät ovat:

- Luontainen biohajoaminen
- Bioventing, biologinen ilmahuuhtelu
- Huokosilmakäsittely
- Fytoremediaatio
- Peltohajotus (peltokäsittely, öljypelto)
- Kompostointi (aumakompostointi)
- Bioreaktorit
- Maan pesu
- Maan huuhtelu
- Elektrokineettiset menetelmät
- Poltto
- Terminen desorptio
- Kiinteytys / stabilointi
  - Bitumistabilointi
  - Sementtistabilointi, ekobetonointi
- Eristys
- Kaatopaikkakäsittely
- Pump&treat, pohjaveden pumppaus käsiteltäväksi
- Pohjaveden ilmastus
- Reaktiiviset seinämät

---

<sup>2</sup> Ks. esim. <http://www.oil-gas.fi>



Lisätietoja menetelmistä ja niiden soveltuvuudesta eri tilanteisiin antavat mm. teoksessa mainitut maaperän ja pohjaveden kunnostusta suorittavat yritykset, kunnostuksia suunnittelevat konsulttiyritykset ja alueelliset<sup>3</sup> sekä kunnalliset ympäristöviranomaiset<sup>4</sup>. Julkaisussa on myös annettu kirjallisuus- ja internetviitteitä.

Lisätietoja pilaantuneen maaperän kunnostamisesta ja siihen liittyvästä lainsäädännöstä löytyy myös mm. ympäristöhallinnon kotisivuilta osoitteista:

<http://www.vyh.fi/tila/maapera/sama.htm>

<http://www.vyh.fi/hoito/sama/kunnostu.htm>

#### 1.4. Kirjallisuus (johdanto)

- Assmuth, T. 1997. Selvitys ja ehdotuksia ympäristövaarallisten aineiden pitoisuuksien ohjearvoista maaperässä - tiedolliset perusteet, määrittelyperiaatteet, soveltaminen, kehittäminen. Helsinki, Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristökeskuksen moniste 92. 56 s. ISBN 952-11-0161
- Haavisto, T. 2001. Pilaantuneet maat Suomessa - katsaus 1999. Suomen ympäristökeskus. Luonnos.
- Jätehuoltolaki 673/78
- Jätelaki 1072/93
- Puolanne, J., Pyy, O. & Jeltsch, U (toim.) 1994. Saastuneet maa-alueet ja niiden käsittely Suomessa. 157 s. + 15 liit. Ympäristöministeriö, ympäristönsuojeluosasto, muistio 5. ISBN 951-47-4823-9
- Pyy, O. 2000. Pilaantuneiden maiden ja vanhojen kaatopaikkojen kunnostusohjelma vuosille 2000-2004. Helsinki, Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristökeskuksen moniste 193. 26 s. + 4 liit. ISBN 952-11-0768-5
- Sorvari, J. & Assmuth, T. 1998. Saastuneiden alueiden riskinarviointi - mitä, miksi, miten. 113 s. + 8 liit. Helsinki, Suomen ympäristökeskus, ympäristöopas 50. ISBN 952-11-0408-2
- Sorvari, J. & Assmuth T. 1999. Saastuneiden maa-alueiden kohdekohtainen riskinarviointi - tilanne Suomessa. Helsinki, Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristökeskuksen moniste 147. ISBN 952-11-0449-X
- Sosiaali- ja terveysministeriö. 1994. Päätös talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista. No 74/1994. Helsinki.
- Sosiaali- ja terveysministeriö. 2000. Asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista. No 461/2000. Helsinki.
- Ympäristönsuojelulaki 86/2000

---

<sup>3</sup>Alueellisten ympäristökeskusten yhteystiedot: <http://www.vyh.fi/aluek.htm>

<sup>4</sup>Kuntien yhteystiedot: <http://www.kuntaliitto.fi>

# 1. Luontainen biohajoaminen

*in situ*

Natural attenuation (NA), intrinsic remediation, bioattenuation, intrinsic bioremediation

## Periaate:

*Maaperän annetaan puhdistua hyväksyttävälle tasolle maaperässä luontaisesti tapahtuvien biologisten, kemiallisten ja fysikaalisten prosessien vaikutuksesta. Menetelmää voidaan soveltaa biohajoavilla orgaanisilla yhdisteillä kuten öljyhiilivedyillä ja klooratuilla liuottimilla pilaantuneiden maiden ja pohjavesien puhdistamiseen.*

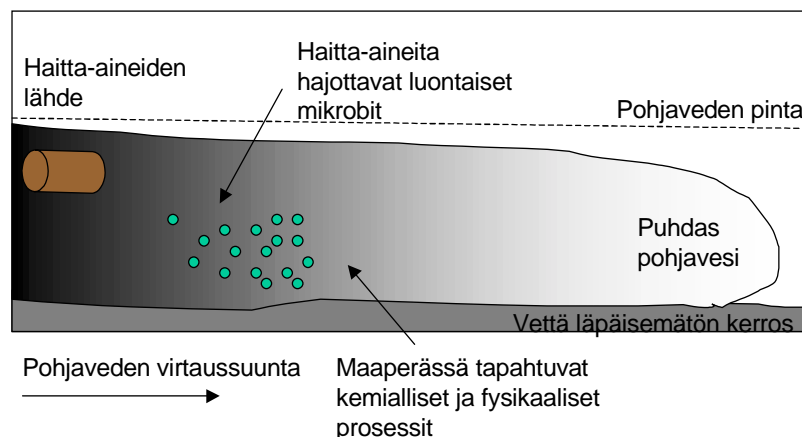
Luontaisen biohajoamisen soveltaminen vaatii huolellista seuranta ja prosessin hallintaa. Päätaavoitteena on arvioida, väheneekö haitta-aineiden pitoisuudet luontaisten prosessien vaikutuksesta riittävän nopeasti. Mallintamisen lisäksi on haitta-ainepitoisuuksia seurattava maaperä- ja pohjavesinäytteillä, joilla voidaan osoittaa, että puhdistumista todella tapahtuu. Haitta-aineet eivät saa levitä tai kulkeutua eikä ihmisten tai ympäristön altistumista tapahtua.

Maaperässä haitta-aineiden kulkeutumiseen vaikuttavat erilaiset prosessit. Helposti liikkuvat haitta-aineet sekoittuvat nopeasti huokoskaasuun ja pinta-, orsi- ja pohjavesiin ja ne ovat suhteellisen alttiita maassa tapahtuville luontaisille prosesseille, jotka pienentävät niiden pitoisuuksia. Suurimolekyyliset orgaaniset yhdisteet ovat usein vaikeasti hajoavia ja sitoutuvat maapartikkeleihin. Siksi luontaiset puhdistumisprosessit eivät juurikaan vaikuta niiden pitoisuuksiin. Olosuhteet voivat muuttua esimerkiksi maan pH:n muuttuessa tai maata kaivettaessa rakennustoimenpiteiden yhteydessä. Tällöin altistumista voi tapahtua myös maan pölyämisen kautta.

Luontainen puhdistumista voidaan vain harvoin harkita pilaantuneiden pintamaiden kunnostamisessa, sillä maan pintakerroksessa haitta-aineiden kulkeutumiseen vaikuttavat monet tekijät. Helposti liikkuvat, sitoutumattomat haitta-aineet hajoavat, haihtuvat tai huuhtoutuvat. Maapartikkeleihin sitoutuneet haitta-aineet puolestaan poistuvat luonnollisten prosessien vaikutuksesta hyvin hitaasti, jos lainkaan. Kuitenkin maan pinnalla tuulen ja veden aikaansaama eroosio voi kuljettaa partikkeleihin sitoutuneita haitta-aineita.

Maaperässä tapahtuvat luontaisten prosessien, biohajoamisen, adsorboitumisen ja kemiallisten reaktioiden tulisi pienentää haitta-aineiden pitoisuudet hyväksyttävälle tasolle. Luontaisen puhdistumisen soveltaminen vaatii kuitenkin aina kohdekohtaista harkintaa ja muun muassa seuraavien vaatimusten tulee toteutua:

- mahdollisesti altistuvat kohteet on kyettävä suojaamaan puhdistumisen aikana,
- kohteen geologisten ja geokemiallisten olosuhteiden tulee tukea biohajoamista,
- haitta-aineiden määrän on todistettavasti vähennyttävä kohtuuajassa maaperässä,
- laboratorio- ja kenttäkokeiden on tuettava mallintamalla saatuja tuloksia ja
- mikäli kohteessa on pysyviä yhdisteitä, on niiden leviäminen ja kulkeutuminen estettävä kunnostuksen aikana ja sen jälkeen.



LUONTAISEN BIOHAJOAMISEN PERIAATE

<b>Soveltuvuus:</b>	
<b>Orgaaniset haitta-aineet:</b> - biologisesti hajoavat yhdisteet, mm. osa öljyhiilivedyistä  <b>Epäorgaaniset haitta-aineet:</b> - ei sovellu	<b>Maalaji</b> - Hiekka x - Siltti (x) - Savi (x) - Moreeni (x) - Orgaaninen maa (multa, turve) x
<b>Menetelmän tekniset rajoitukset:</b> - Kohteen huolellinen selvittäminen ja pitkäaikainen seuranta saattaa tulla kalliimmaksi kuin aktiivinen kunnostus. - Haitta-aineiden hajoamisen alkamiseen saattaa kulua pitkäkin aika, jonka aikana haitta-aineet ehtivät kulkeutua kauas. Aina luontaista biohajoamista ei tapahdu, ja tällöin joudutaan turvautumaan muihin menetelmiin. - Kloorattujen liuottimien biohajoaminen tapahtuu usein hapettomissa olosuhteissa. Hapellisissa olosuhteissa tapahtuva hajoaminen vaatii yleensä sopivan kometaoliittisen aineen (esim. propaani tai ammoniakki). - Haitta-aineiden hajoamis- ja muuntumistuotteet voivat olla alkuperäisiä yhdisteitä haitallisempia. - Kohteissa, joissa maaperä on heterogeeninen tai kallioperä ruhjeinen, epäonnistumisen riski on suuri. - Haitta-aineet voivat kulkeutua alueelta eroosion, huuhtoutumisen tai haihtumisen kautta ennen kuin ne ovat hajonneet tai muuntuneet. - Menetelmän käyttö rajoittaa kohteen pohjaveden käyttömahdollisuuksia usein pitkäksi aikaa. - Mikäli maaperässä tai pohjavedessä vapaana olevien haitta-aineiden määrä on suuri, saattaa olla tarpeellista poistaa niistä osa, jotta luontainen puhdistuminen on mahdollista kohtuujassa. - Puhdistumisen edetessä tapahtuva maaperän hapetus-pelkistysolosuhteiden muuttuminen saattaa vaikuttaa metallien sitoutumiseen.	
<b>Käsittelykustannus:</b> ei tiedossa	
<b>Käsittelyn kesto:</b> pitkä	
<b>Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:</b>  Luontaista biohajoamista kunnostusratkaisuna ei ole sovellettu käytännössä Suomessa. Muun muassa Suomen ympäristökeskuksessa ja Valtion teknillisessä tutkimuslaitoksessa soveltuvuutta tutkitaan parhaillaan.  Suomen kylmän ilmaston katsotaan hidastavan luontaista biohajoamista. Syvemmillä maaperässä ja pohjavedessä lämpötila on tasainen (noin + 5-10 °C) läpi vuoden. Tutkimuksissa on saatu todisteita siitä, että orgaanisten yhdisteiden biohajoamista voi tapahtua vailleissäkin olosuhteissa. Hajotuksen käynnistyttyä se voi olla yhtä nopeaa kuin lämpimissä olosuhteissa. Suomessa maaperän epätasainen rakenne ja kallioperän ruhjeisuus vaikeuttavat pohjaveden virtauksen mallintamista.	
<b>Lisätietoja:</b>  <b>kirjallisuus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ASTM E 1943-98. Standard guide for remediation of ground water by natural attenuation at petroleum release sites.</li> <li>• FTRT. 2001. Natural attenuation. Www-dokumentti, saatavissa: <a href="http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_4.html">http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_4.html</a></li> <li>• United States Environmental Protection Agency. 1996. A citizen's guide to natural attenuation. EPA 542-F-96-015. 4 s. Saatavissa: <a href="http://www.clu-in.org/products/citguide/">http://www.clu-in.org/products/citguide/</a></li> </ul> <b>yrietykset</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ei Suomessa</li> </ul>	

## 2. Bioventing, biologinen ilmahuuhdtelu

*in situ*

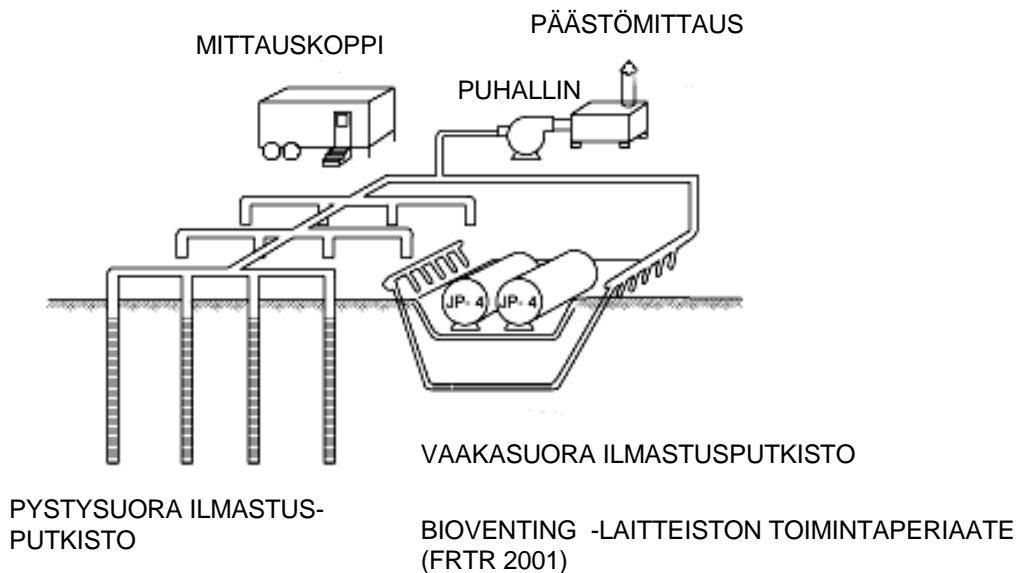
### Bioventing

#### Käsittelyn periaate:

*Pilaantuneeseen maaperään pohjaveden pinnan yläpuoliseen kerrokseen johdetaan happea tai ilmaa. Happipitoisuuden noustessa maaperässä tapahtuva biohajoaminen nopeutuu.*

Bioventing on lupaava uusi teknologia, joka tehostaa luontaista *in situ* biohajoamista. Maaperän happipitoisuutta nostetaan injektoimalla pohjavesikerroksen yläpuolelle ilmaa tai happea. Happipitoisuuden parantaminen voidaan myös aikaansaada imemällä maaperästä alipaineimulla ilmaa pois. Menetelmien yhdistelmiä voidaan myös käyttää (ks. bioslurping s. xx).

Bioventingiä voidaan käyttää yhdisteille, jotka hajoavat hapellisissa olosuhteissa. Menetelmä eroaa huokosilmäkäsittelystä siten, että bioventing -menetelmässä ilma johdetaan maahan alhaisella paineella, jotta mikrobiaktiivisuus lisääntyisi. Maaperään johdettu ilma myös kuljettaa haihtuvia yhdisteitä biologisesti aktiiviseen kerrokseen.



#### Soveltuvuus:

##### Orgaaniset haitta-aineet:

- aerobisesti biohajoavat yhdisteet lähinnä: polttoaineet, PAH-yhdisteet ja mahdollisesti myös klooratut liuottimet

##### Epäorgaaniset haitta-aineet:

- ei sovellu

##### Maaperä:

- Hiekka	x
- Siltti	x
- Savi	-
- Orgaaninen maa-aines	x
- Moreeni	(x)

**Menetelmän tekniset rajoitukset:**

- Korkea pohjavedenpinta, huonosti läpäisevä tai heterogeeninen maaperä (esim. savimaat, moreeni) vaikeuttavat ilman liikkumista maaperässä.
- Ei sovellu pilaantuneen pintamaan (noin alla 0,6 m) tai kohteen, jossa pohjavedenpinta on korkealla (noin 3 m) käsittelyyn, ellei maan pintakerrosta eristetä haihtumisen estämiseksi.
- Rakennetuilla alueilla saattaa rakennusten kellareihin kerääntyä kaasuja. Ongelmaa voidaan lieventää ilman keräysjärjestelmien ja suojakaivojen sekä -rakennelmien avulla.
- Maasta ilmaan kulkeutuvien päästöjen tarkkailu on yleensä tarpeellista.
- Mikrobiologiset prosessit saattavat olla hitaita ja niiden käynnistymisessä saattaa olla pitkäkin viive. Biologista hajoamista ei aina syystä tai toisesta tapahdu lainkaan.
- Korkeat haitta-ainepitoisuudet voivat olla mikrobeille toksisia estäen siten biohajoamisen.
- Useiden kloorattujen yhdisteiden biohajoaminen on hidasta tai sitä ei tapahdu ellei saatavilla ole sopivaa kometabiiliittista yhdistettä. Klooratut yhdisteet saattavat myös hajota helpommin anaerobisesti.
- Alhainen lämpötila saattaa hidastaa biohajoamista, mutta myös onnistuneita biohajoamiseen perustuneita maaperän kunnostusprojekteja kylmissä olosuhteissa on tehty.

**Käsittelykustannukset:**

Kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat haitta-aine ja sen pitoisuus, maaperän läpäisevyys, ilman injektointikaivojen määrä ja sijoittelu, pumppausnopeus ja poistoilman käsittely. Käyttökustannukset ovat alhaiset. Menetelmän käyttö vaatii säännöllistä huoltoa ja pitoisuuksien tarkkailua.

**Käsittelyn kesto:** keskipitkä - pitkä (kuukausista vuosiin)

**Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:**

USA:ssa The U.S. Air Force Bioventing Initiative on testannut menetelmää useissa eri olosuhteissa. Alustavat kokeet on suoritettu noin 120 kohteessa ja toiminnassa on noin 100 pilottilaitteistoa. USAssa teknologia hyväksytty 30 osavaltiossa ja kaikilla 10 EPA:n alueella.

Suomessa on toteutettu joitakin koekohteita.

**Uusia mahdollisuuksia / sovellutuksia**

Bioremediaatiota on kokeellisella asteella käytetty myös epäorgaanisilla yhdisteillä pilaantuneen maaperän kunnostamiseen. Menetelmät perustuvat biologisen toiminnan aikaansaamaan haitta-aineiden hapetusasteen muutokseen, joka voi edistää yhdisteiden adsorboitumista, kertymistä ja ottoa.

**Lisätietoja:**

## kirjallisuus

- Anderson, W.C. (ed.) 1995. Bioremediation. Innovative site remediation technology, vol 1. WASTECH, American Academy of Environmental Engineers. USA. Useita sivunumerojaksoja.
- FRTR. 2001. Bioventing. Www-dokumentti, saatavissa [http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4\\_1.html](http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_1.html)

## yritykset

- Doranova Oy

### 3. Tehostettu biologinen puhdistus

*in situ*

Enhanced bioremediation, biostimulation, bioaugmentation, enhanced biodegradation

#### Periaate:

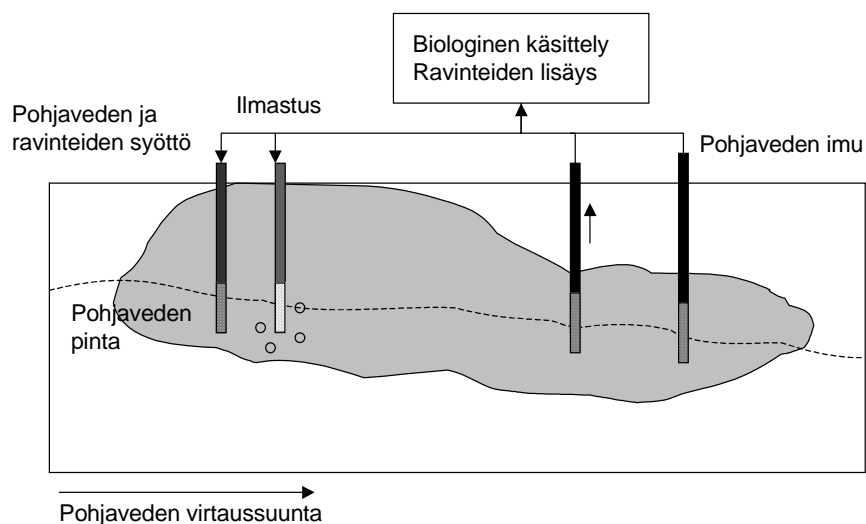
*Tehostetussa biologisessa puhdistuksessa tavoitteena on optimoida haitta-aineiden luonnollista biologista hajoamista maaperässä. Menetelmässä hyödynnetään maaperän ja pohjaveden luontaista mikrobikantaa.*

Tehostetussa biologisessa puhdistuksessa syötetään happea (öljyhiilivedyt) tai elektronidonoreita (klooratut hiilivedyt) maaperään. Mikro-organismit tarvitsevat kasvaakseen myös sopivasti ravinteita (fosfori ja typiyhdisteet). Hapen tai elektronidonorin ja ravinteiden syöttö maaperään voidaan toteuttaa injektointikaivojen kautta. Pilaantunutta pohjavettä voidaan myös pumpata maan pinnalle, jossa siihen lisätään ravinteet tai elektronidonori ja syötetään takaisin maaperään. Tarvittaessa maaperään syötetään ilmaa.

Jokaisella haitta-aineryhmällä on niille ominaiset hajoamisolosuhteet. Useimmat öljytuotteet ja PAH-yhdisteet hajoavat aerobisissa olosuhteissa, kun taas monet klooratut yhdisteet, kuten PCE ja TCE pelkistyvät anaerobisissa olosuhteissa. Tehostettu biologinen puhdistus soveltuu mm. dieselöljyn, bensiinin, öljyn, kreosoottien, PAH-yhdisteiden ja kloorattujen hiilivetyjen pilaaman maan kunnostukseen. Parhaiten menetelmä soveltuu suhteellisten alhaisten haitta-ainepitoisuuksien käsittelyyn.

Kunnostus suoritetaan erilaisten kaivojen ja putkilinjojen avulla. Ne sijoitetaan kokonaan maan alle, jolloin ne ovat suojassa jäätymiseltä ja mekaanisilta vaurioilta. Pintamaa voidaan maisemoida ja käyttää sopivalla tavalla. Jokainen kunnostus räätälöidään olosuhteisiin sopivaksi. Tarkka kunnostusprosessien seuranta mahdollistaa prosessien säätötoimenpiteet. Tarvittaessa kunnostusta voidaan jatkaa vähemmän intensiivisellä kunnostusjaksolla.

*In situ* -menetelmää on järkevää käyttää maaperän kunnostukseen siellä, missä kaivaminen on teknisesti hankalaa ja kallis toteuttaa, kuten rakennusten tai muiden rakenteiden ympäristössä tai alla, kovan pintamateriaalin alla, syvällä maaperässä ja laajoissa pilaantumistapauksissa. Tehostetun biologisen puhdistuksen avulla saavutetaan samalla käsittelyllä sekä maaperän että pohjaveden puhdistuminen. Kunnostuksen aikana alueella tapahtuvat toiminnot voivat jatkua tavalliseen tapaan. Oikein suunniteltuina asennustyöt voidaan suorittaa vähäisin häiriöin. Varsinainen kunnostusvaihe ei aiheuta häiriötä ympäristöön. Suhteellisen pienistä pohjaveden pumppausmääristä johtuen maaperän painuminen ei ole todennäköistä. Jos asennusvaiheen aikana todetaan, että pilaantumisen laajuus poikkeaa huomattavasti esitutkimusten tuloksista, järjestelmää voidaan laajentaa kattamaan koko pilaantunut alue. In-situ kunnostus voidaan integroida ja toteuttaa kohteen rakennustyön yhteydessä.



TEHOSTETUN BIOLOGISEN PUHDISTUKSEN PERIAATE

<b>Soveltuvuus:</b>	
<b>Orgaaniset haitta-aineet:</b> mm. dieselöljy, bensiini, öljy, kreosottiöljy, PAH-yhdisteet ja klooratut hiilivedyt	<b>Maaperä:</b> - Hiekka x - Siltti (x) - Savi - - Moreeni (x) - Orgaaninen maa (multa, turve) x
<b>Epäorgaaniset haitta-aineet:</b> ei sovellu	
<b>Menetelmän tekniset rajoitukset:</b> - Ei sovellu yhdisteille tai aineille, jotka eivät ole biohajoavia - Maaperän ja pohjaveden alhainen lämpötila Suomessa hidastaa usein hajotustoimintaa. - Haitta-aineiden huono biosaatavuus, esimerkiksi sitoutuminen maaperän partikkeleihin, voi hidastaa hajotustoimintaa. - Mikrobit voivat muuntaa haitta-aineita haitallisempaan muotoon. - Haitta-aineet voivat esiintyä mikrobeille myrkyllisissä pitoisuuksissa. - Ravinneliuosten injektointi ja pohjaveden kierrätys saattaa huuhtoa haitta-aineita laajentaen pilaantuneen alueen kokoa. - Biomassan kasvu tai raudan saostuminen voi aiheuttaa injektointikaivojen tai maahuokosten tukkeutumista. - Ei sovellu alueille, joissa maaperä on hyvin tiivis.	
<b>Käsittelykustannus:</b> riippuu kohteesta. Käyttökustannukset alhaiset, noin 10 -15 000 mk/kk	
<b>Käsittelyn kesto:</b> pitkä	
<b>Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:</b>  Menetelmä soveltuu Suomen olosuhteisiin. Ongelmana saattaa muodostua kuten muidenkin biologisten <i>in situ</i> -menetelmien osalta maaperän ja pohjaveden alhainen lämpötila, joka hidastaa biologista toimintaa ja hajotusnopeutta. Suomessa maaperä on usein hyvin heterogeeninen, mikä saattaa vaikeuttaa kunnostuksen suunnittelua ja vesi- ja ilmavirtojen hallintaa.  Suomessa ainakin Doranova Oy suorittaa maaperän ja pohjaveden puhdistusta tehostettua biologista hajoamista käyttäen.	
<b>Lisätietoja:</b>  <b>kirjallisuus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Anderson, W.C. (ed.) 1995. Bioremediation. Innovative site remediation technology, vol 1. WASTECH, American Academy of Environmental Engineers. USA. Useita sivunumerojaksoja.</li> <li>FRTR. 2001. Enhanced bioremediation. Www-dokumentti, saatavissa <a href="http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_2.html">http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_2.html</a></li> <li>Relander, A., Aho, J. &amp; Korkealaakso, J. 1999. Saastuneen maaperän ja pohjaveden <i>in situ</i> -puhdistusmenetelmät. VTT tiedotteita.</li> <li>Soesilo, J.A. &amp; Wilson, S.R. 1997. Site remediation, planning and management. CRC Lewis Publishers, Boca Raton. S. 326-328.</li> </ul> <b>yritykset</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Doranova Oy</li> </ul>	

#### 4. Huokosilmäkäsittely

*in situ, ex situ*

soil vapour extraction (SVE), *in situ* soil venting, *in situ* volatilization, enhanced volatilization, soil vacuum extraction

##### Periaate:

*Huokosilmäkäsittely on maan kyllästymättömän vyöhykkeen in situ -käsittelymenetelmä, jossa alipaineen avulla maasta poistetaan haihtuvia ja eräitä puolihaihtuvia yhdisteitä. Maasta poistuva kaasu johdetaan käsiteltäväksi esim. aktiivihiihiisuodatuksella tai katalyyttisellä poltolla.*

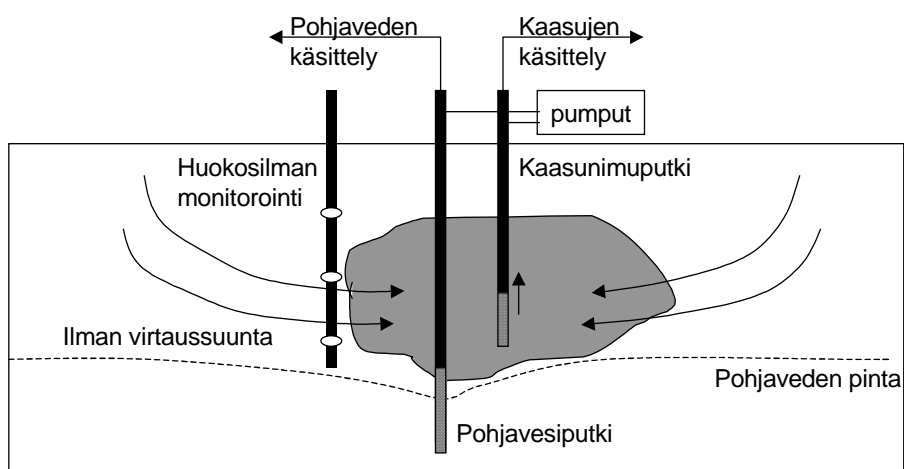
Huokosilmäkäsittelyä voidaan käyttää, kun kyllästymättömän kerroksen paksuus on yli 1,5 metriä. Sitä on onnistuneesti käytetty jopa lähes 100 metrin syvyydessä. Kaasunimuputkisto voidaan asentaa joko pysty- tai vaakatasoisesti. Mikäli pohjaveden pinta on korkealla, voidaan sitä pumppauksella alentaa kyllästymättömän kerroksen paksuuden lisäämiseksi. Pilaantuneen vyöhykkeen ollessa syvällä huonosti läpäisevässä maaperässä tai maan kyllästyneessä vyöhykkeessä voidaan haitta-aineiden haihtumista ja liikkuvuutta parantaa ilman injektoinnilla (vrt. air sparging ks. s. xx). Maan pinnalle voidaan asettaa haitta-aineiden haihtumista estämään esim. tiivis geomembraanikerros, jonka vaikutuksesta myös imukaivojen vaikutusalue laajenee.

Huokosilmäkäsittely soveltuu suhteellisen helposti haihtuville ja suhteellisen alhaisen vesiliukoisuuden omaaville aineille. Puolihaihtuvien yhdisteiden huokosilmäkäsittelyä voidaan tehostaa lämpökäsittelyllä injektioimalla pilaantuneen alueen alapuoliseen maakerrokseen kuumaa ilmaa tai höyryä. Maata voidaan lämmittää myös elektromagneettisesti tai sähkövastuksen tai radioaaltojen avulla. Maaperän lämmitys tehostaa haitta-aineiden desorptiota ja höyrystymistä sekä nopeuttaa puhdistusprosessia. Lämpökäsittelyllä tehostettu huokosilmäkäsittely on teknisesti muuten vastaavanlainen kuin normaali huokosilmäkäsittely, mutta kaasunimuputkiston tulee olla lämmönkestävästä materiaalista valmistettu.

Huokosilmäkäsittely *in situ* soveltuu erityisesti rakennetulle alueelle, jossa maan kaivu alueen käytön vuoksi ei ole mahdollista.

Huokosilmäkäsittelyä voidaan soveltaa myös *ex situ*, jolloin pilaantunut maa kaivetaan ylös ja läjitetään. Kaasunimuputket asennetaan läjitettyyn kasaan. Menetelmää sovellettaessa tulee ottaa huomioon ja estää haitta-aineiden mahdollinen haihtuminen kaivun, läjittämisen ja putkiston asentamisen aikana. Menetelmän toimivuutta rajoittavat samat maaperän ominaisuudet kuin *in situ* huokosilmäkäsittelyyn, eli runsas hieno- tai orgaanisen aineksen määrä, maan suuri kosteus ja tiiviys. Menetelmä on myös runsaasti tilaa vaativa. Käsittelykentällä tulee olla sellaiset pohjarakenteet, että pohja- tai pintavesien pilaantumista ei pääse tapahtumaan. Suotovesien keräys, tarkkailu ja tarvittaessa käsittely tulee järjestää.

Dual phase extraction on huokosilmäkäsittelyn sovellutus, jossa ilman lisäksi maasta imetään haitta-aineita sisältävää pohjavettä.



HUOKOSILMAKÄSITTELYN PERIAATE



<b>Soveltuvuus:</b>	
<p><b>Orgaaniset haitta-aineet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- helposti haihtuvat orgaaniset yhdisteet</li> <li>- puoli haihtuvat orgaaniset yhdisteet (vaatii haihtumisen tehostamista lämmittämällä)</li> </ul> <p><b>Epäorgaaniset haitta-aineet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ei sovellu</li> </ul>	<p><b>Maaperä:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hiekka, sora x</li> <li>- Siltti (x)</li> <li>- Savi (x)</li> <li>- Moreeni x</li> <li>- Ogaaninen (turve, multa) (x)</li> </ul>
<p><b>Menetelmän tekniset rajoitukset:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kunnostuskustannukset nousevat, mikäli maaperän hienoainespitoisuus ja kosteus ovat suuria, sillä tällöin tarvitaan voimakkaampaa alipainetta. Hyvin tiivis maaperä voi myös estää menetelmän käytön.</li> <li>- Jos maaperän läpäisevyys tai kerrostuneisuus vaihtelee paljon, tulee kaasunimua ja sen tehokkuutta tarkkailla huolellisesti, sillä alueelta tuleva kaasuvirta saattaa olla epätasaista.</li> <li>- Jos maaperän orgaanisen aineksen määrä on suuri tai kosteus on erittäin alhainen, on maan sorptiokapasiteetti suuri. Tämä hidastaa haitta-aineiden vähenemistä.</li> <li>- Huokosilmäkäsittelyssä syntyvä poistoilma vaatii yleensä käsittelyä (esim. aktiivihilikäsittely tai katalyyttinen poltto)</li> <li>- Poistoilman käsittelyssä mahdollisesti syntyvät jätevedet tai kiinteät jätteet vaativat asianmukaisen käsittelyn. Käytetty aktiivihili voidaan myös regeneroida ja käyttää uudelleen.</li> <li>- Huokosilmäkäsittely ei sovellu pohjavesikerrokseen. Kyllästymättömän kerroksen paksuutta voidaan kuitenkin keinotekoisesti suurentaa pohjaveden pintaa alentamalla.</li> <li>- Maaperän jäännöspitoisuuksia on tarkkailtava. Maapartikkeleihin tiukasti adsorboituneet tai absorboituneet orgaaniset yhdisteet voivat olla vaikeasti analysoitavissa, mikä saattaa vääristää tuloksia.</li> <li>- Imuputkisto saattaa tukkeutua ja vaatii huoltoa erityisesti pitkäkestoisissa käsittelyissä.</li> </ul>	
<p><b>Käsittelykustannus:</b></p> <p>Huokosilmäkäsittelyn kustannukset noin 5000-10000 mk/kk ilman kaasujen käsittelyä (yksi yhtenäinen alue, noin 10 aaria). Aktiivihiliisuodatuksella tai katalyyttisellä poltolla varustettuna noin 15 000-25 000 mk/kk.</p>	
<p><b>Käsittelyn kesto:</b> keskinkertainen - pitkä. Tyypillinen käsittely kestää noin 0,5-1 vuoden.</p>	
<p><b>Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:</b></p> <p>Vakiintunut menetelmä huoltoasemakiinteistöjen kunnostamiseen. Myös klooratuilla liuottimilla pilaantuneita alueita on kunnostettu huokosilmaimun avulla. Polttoaineen jakelun aiheuttamia pilaantuneen maaperän kunnostusta esim. käytöstä poistetuilla huoltoasemakiinteistöillä huokosilmaimun ja katalyyttisen polton/aktiivihiliisuodatuksen avulla suorittavat useat yritykset (ks. alla).</p>	
<p><b>Lisätietoja:</b></p> <p>kirjallisuus</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anderson, W.C. (ed.) 1994. Vacuum vapor extraction. Innovative site remediation technology, vol 8. WASTECH, American Academy of Environmental Engineers. USA. Useita sivunumerojaksoja.</li> <li>• FRTR. 2001. Soil vapour extraction. Www-dokumentti, saatavissa <a href="http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_9.html">http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_9.html</a></li> <li>• U.S. EPA. 1996. A citizen's guide to soil vapor extraction and air sparging. EPA 542-F-96-008. Saatavissa myös: <a href="http://www.clu-in.org/products/citguide/">http://www.clu-in.org/products/citguide/</a></li> </ul> <p>yrietykset</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Doranova Oy</li> <li>• Ekokem Oy.</li> <li>• Nordic Envicon Oy</li> <li>• PTI-Soil Oy</li> <li>• Golder Associates Oy</li> </ul>	

## 5. Fytoremediaatio

*in situ*

Phytoremediation, vegetation-enhanced bioremediation

### Periaate

*Fytoremediaatiossa käytetään kasveja pilaantuneen maaperän, pohjaveden tai sedimentin kunnostamiseen. Haitta-aineet voivat olla orgaanisia tai epäorgaanisia.*

Fytoremediaatiota on sovellettu muun muassa teollisuuden ja kunnallisten jätevesien käsittelyssä vuosikymmenien ajan. Myöhemmin menetelmää on käytetty pilaantuneen maan ja pohjaveden kunnostamiseen. Myös mm. kaatopaikkojen suotovesien puhdistamista kasvillisuuden avulla on käytetty. Useilla metalleilla, pestisideillä, liuottimilla, räjähteillä, raakaöljyllä ja PAH-yhdisteillä pilaantuneiden alueiden kunnostamista fytoremediaation avulla pidetään mahdollisena.

Fytoremediaation etuna ovat alhaiset pääoma- ja käyttökustannukset, positiiviset maisemalliset vaikutukset, haitta-aineiden liukoisuuden pieneneminen ja maan stabiloituminen. Sitä voitaneen soveltaa mm. lievästi pilaantuneilla laajoilla alueilla. **Menetelmä on kuitenkin yhä kehityksen alla eikä se ole yleisesti sovellettavissa**, tarkemmin ks. alla menetelmän tekniset rajoitukset.

Eri fytoremediaatiomenetelmät perustuvat:

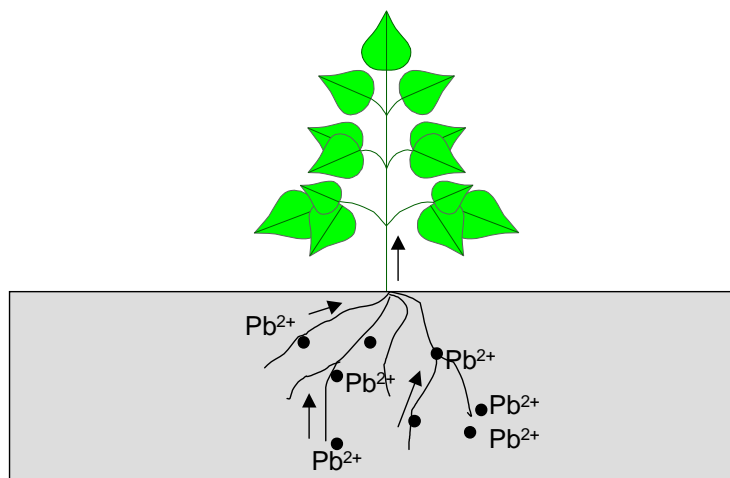
- ritsosfääriin (kasvien juurivyöhykkeen) kohonneeseen biologiseen aktiivisuuteen, joka nopeuttaa orgaanisten haitta-aineiden biologista hajoamista,
- kasvien kykyyn kerätä itseensä haitta-aineita (yleensä raskasmetallit)
- kasvien kykyyn ottaa maasta haitta-aineita ja muuntaa tai hajottaa niitä haitattomaan muotoon ja /tai
- juuriston eroosiota ja haitta-aineiden liikkuvuutta vähentävään vaikutukseen.

**Tehostettu ritsosfäärihajoaminen** tapahtuu maaperässä kasvien juuriston välittömässä läheisyydessä. Juurten erittämät luontaiset yhdisteet tarjoavat mikro-organismille ravinteita ja tehostavat niiden biologista aktiivisuutta. Kun kasvien juuret kuolevat ja hajoavat, jää maaperään huokostilaa, jossa vesi ja ilma pääsee kulkemaan. Tämä vaikuttaa positiivisesti maan kosteus- ja happitilanteeseen ja parantaa biohajoamisolosuhteita.

**Fytoakkumulaatiossa** kasvit ottavat haitta-aineita juurillaan ja keräävät ne varteensa ja lehtiinsä. Eräät kasvit keräävät metalleja juuriinsa ja nk. hyperakkumuloijakasvit voivat poistaa ja varastoida merkittäviä määriä metallisia haitta-aineita. Tällaisia kasveja voidaan esimerkiksi käyttää suodattamaan metalleja jätevesistä tai pilaantuneesta maasta. Kun kasvi ei enää kerää haitta-aineita ts. se tulee metalleilla kyllästyneeksi, voidaan kasvit kerätä pois ja istuttaa uusia tilalle. Haitta-aineita sisältävät kasvit tulee jatkokäsitellä.

**Fytodegradaatiossa** kasvit hajottavat haitta-aineita kudoksissaan. Kasvit erittävät hajoamista katalysoivia entsyymejä kuten dehalogenaasi- ja oksygenaasientsyymiä. Tutkimukset ovat käynnissä aromaattisilla että klooratuilla alifaattisilla yhdisteillä pilaantuneiden maiden kunnostamisessa.

**Fytostabiloinnissa** haitta-aineiden liukoisuus ja kulkeutuminen vähenee kasvin maaperässä aiheuttamien muutosten vuoksi. Kasvit mm. erittävät erilaisia maaperän pH:en vaikuttavia yhdisteitä. pH:n noustessa useimpien raskasmetallien liukoisuus vähenee. Kasvit myös lisäävät maan orgaanisen aineksen määrää. Juuristo sitoo maata ja vähentää tuuli- ja vesieroosion myötä tapahtuvaa maapartikkeleihin sitoutuneiden haitta-aineiden kulkeutumista. Juuristo myös vähentää veden imeytymistä maahan, jolloin haitta-aineiden liukeneminen pienenee.



FYTOAKKUMULAATION PERIAATE

<b>Soveltuvuus:</b>	
<p>Orgaaniset haitta-aineet:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- BTEX</li> <li>- klooratut liuottimet</li> <li>- PAH-yhdisteet</li> <li>- räjähdysaineet kuten nitrotolueeni</li> <li>- liialliset ravinteet (N, P)</li> </ul> <p><b>Epäorgaaniset haitta-aineet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Raskasmetallit (esim. Pb, Ni, Cu, Zn, Fe, Mn, Al)</li> </ul>	<p><b>Maaperä:</b></p> <p>riippuu käytettävän kasvin kasvuvuatuksista</p>
<p><b>Menetelmän tekniset rajoitukset:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Menetelmä ei ole yleisesti käytössä vaan siihen liittyy useita rajoituksia ja kysymyksiä. Suomessa on tehty vasta alustavia tutkimuksia soveltamisesta.</li> <li>- Käsittelyaika pitkä, useimmiten vuosia tai vuosikymmeniä. Näin ollen ei sovellu kiireellisille tapauksille.</li> <li>- Käsittelykerroksen syvyyttä rajoittaa ritsosfäärin syvyys. Yleensä menetelmä on käyttökelpoinen vain maan pintakerroksessa.</li> <li>- Käsitteltävän maan on sovelluttava kasvin kasvualustaksi. Esim. maalaji tai maan liiallinen tiiviys voi heikentää kasvukykyä.</li> <li>- Haitta-aineiden suuret pitoisuudet voivat olla kasveille toksisia, jolloin menetelmän toimivuus kärsii.</li> <li>- Vuodenajat ja kasvukauden pituus rajoittavat toimintaa.</li> <li>- Menetelmää sovellettaessa tulee käyttää paikallisissa olosuhteissa hyvin kasvavia kasveja. Siten esimerkiksi amerikkalaiset tai keskieurooppalaiset tutkimustulokset eri kasvilajien soveltuvuudesta eivät ole suoraan yleistettävissä Suomeen.</li> <li>- Saattaa aiheuttaa haitta-aineiden siirtymistä esimerkiksi maasta ilmaan.</li> <li>- Ei ole tehokas voimakkaasti (esim. PCB:t) tai heikosti sitoutuneille yhdisteille.</li> <li>- Hajoamistuotteiden toksisuutta ja biosaatavuutta ei aina tunneta.</li> <li>- Menetelmän käyttö vaatii kunnossapitoa kuten lannoitusta ja sadonkorjuuta. Lisäksi haitta-aineita keränneet kasvit tulee käsitellä (useimmiten polttamalla).</li> <li>- Geeniteknologiaan ja geneettisesti muunneltujen kasvien käyttöön liittyy useita lainsäädännöllisiä ja eettisiä ongelmia.</li> </ul>	
<p><b>Käsittelykustannukset:</b> kustannukset alhaisia, mikäli ei oteta huomioon maankäytöstä aiheutuvia epäsuoria kustannuksia.</p>	
<p><b>Käsittelyn kesto:</b> pitkä (usein vuosikymmeniä)</p>	
<p><b>Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:</b></p> <p>Suomessa ei varsinaista kunnostettua kohdetta, alustavia tutkimuksia tehty mm. Kuopion ja Helsingin yliopistossa sekä Maatalouden tutkimuskeskuksessa.</p>	
<p><b>Lisätietoja:</b></p> <p>kirjallisuus</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cunningham S.D., Berti W.R. and Huang J.W. 1995. Remediation of contaminated soils and sludges by green plants. In Hinchee R.E., Means J.L. and Burris D.R. (eds.) Bioremediation of Inorganics. pp 33-54. Battelle Press. Columbus OH.</li> <li>• FRTR. 2001. Phytoremediation. Www-dokumentti, saatavissa <a href="http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_5.html">http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_5.html</a></li> <li>• Suthersan, S. S. 1997. Remediation engineering, design concepts. CRC Lewis Publishers, Boca Raton. Pp. 255-264.</li> <li>• U.S. EPA. 1998. A Citizen's Guide to Phytoremediation. EPA 542-F-98-011. Saatavissa myös: <a href="http://www.clu-in.org/products/citguide/">http://www.clu-in.org/products/citguide/</a></li> </ul> <p>yrietykset</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ei suomalaisia yrityksiä</li> </ul>	

## 6. Peltohajotus, peltokäsittely, öljypelto

Landfarming, land treatment

*ex situ, in situ*

### Periaate

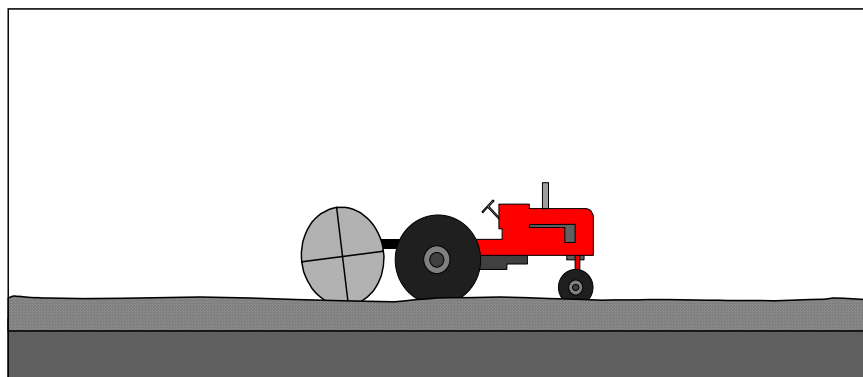
*Peltokäsittely on yksinkertainen, maanpinnan muokkaukseen perustuva menetelmä, jolla voidaan käsitellä lähinnä suhteellisen helposti hajoavia aineita. Peltokäsittely voidaan suorittaa in situ tai ex situ.*

Vaikka maan muokkaus tehostaa mikrobien toimintaa, ei peltohajotuksen teho ole esim. kompostoinnin veroinen. Kokemukset peltokäsittelystä Suomessa kuten muuallakin maailmassa liittyvät etupäässä öljyisten lietteiden jätehuoltoon. Polttonesteillä (esim. dieselöljy) ja kreosoottiöljyllä pilaantuneita maa-aineksia on myös käsitelty.

Menetelmän eräänä periaatteellisena erona muihin on se, että peltoaluetta tai vastaavaa käytetään saasteaineiden hävitykseen pyrkimättäkään alustan täydelliseen puhdistukseen. Jos alustaa käytetään toistuvasti samaan tarkoitukseen, kuten öljylietteillä on tehty, kertyy hitaimmin hajoavista yhdisteistä tavallisesti käsittelykerrokseen bitumiainesta ja mikrobitoiminnan tuottamaa ns. 'biologista pikeä'. Se voi aikaa myöten muodostua maaperän käyttöä rajoittavaksi tekijäksi. Suomen oloissa on arvioitu, että öljyistä jätettä voidaan levittää 10-25 kg neliometriä kohden, kun lisäysten väli on neljä kasvukautta.

Peltokäsittelyssä mikrobit ovat peräisin käsiteltävästä aineksestä ja käsittelyalustana toimivasta maaperästä. Hajotustoimintaa on optimoitava ajoittaisella maan muokkauksella (maanviljelyssä käytetyt laitteet), pH:n säädöllä (esim. kalkitus) ja lannoituksella. Usein myös kosteutta tulee säätää kastelun avulla. Apuaineina voidaan käyttää myös kunnallista jätevesilietettä tai jotain muuta orgaanista jätettä. Ravinteiden (N-P-K) oikeat suhteet saadaan parhaiten selvillä määrittämällä ne laboratoriokeinein. Peltokäsittelylle löytyy myös hyvin seikkaperäisiä ohjeita.

Peltokäsittelyaluetta valittaessa on kiinnitettävä erityistä huomiota pohjaveden suojeluun sekä estettävä alueelta mahdolliset tulevien valumavesien pääsy pintavesiin. Käsittelyalueen pohjan on oltava niin tiivis, että veden ja haitta-aineiden kulkeutuminen pohjaveteen estyy. Savimaa tai sopiva eristekerros hiekkaisen käsittelykerroksen alla ovat mahdollisia ratkaisuja. Valumavesien keräilystä ja käsittelystä on myös huolehdittava. Menetelmä ei sovellu helposti haihtuville yhdisteille ilmapäästöjen vuoksi.



PELTOKÄSITTELYN PERIAATE

<b>Soveltuvuus:</b>													
<p><b>Orgaaniset haitta-aineet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- lähinnä osa öljyhiilivedyistä</li> <li>- ei sovellu helposti haihtuville yhdisteille</li> </ul> <p><b>Epäorgaaniset haitta-aineet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ei sovellu</li> </ul>	<p><b>Maaperä:</b></p> <table> <tr><td>- Hiekka</td><td>X</td></tr> <tr><td>- Siltti</td><td>X</td></tr> <tr><td>- Savi</td><td>X</td></tr> <tr><td>- Moreeni</td><td>X</td></tr> <tr><td>- Orgaaninen maa</td><td>X</td></tr> <tr><td>- Sedimentti</td><td>X</td></tr> </table>	- Hiekka	X	- Siltti	X	- Savi	X	- Moreeni	X	- Orgaaninen maa	X	- Sedimentti	X
- Hiekka	X												
- Siltti	X												
- Savi	X												
- Moreeni	X												
- Orgaaninen maa	X												
- Sedimentti	X												
<p><b>Menetelmän tekniset rajoitukset:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vaatii paljon tilaa.</li> <li>- Biologiseen hajoamiseen vaikuttavia tekijöitä kuten lämpötilaa ja sademäärää ei voida juuri kontrolloida, mikä hidastaa käsittelyä.</li> <li>- Ei sovellu epäorgaanisten haitta-aineiden käsittelyyn.</li> <li>- Ei sovellu haihtuvien yhdisteiden käsittelyyn. Niitä sisältävät maat tulee esikäsitellä, jottei haitta-aineiden haihtumista ilmaan pääse tapahtumaan.</li> <li>- Käsittelyaika on pitkä ja maaperän puhdistumistaso jää usein alhaiseksi.</li> <li>- Menetelmän käyttö saattaa erityisesti maaperää muokatessa aiheuttaa pölyämistä. Pölyn leviämistä ympäristöön tulee kontrolloida esim. kastelun avulla.</li> <li>- Käsiteltävän aineksen mahdollisesti sisältämät metalli-ionit saattavat olla mikrobeille toksisia häiriten hajotustoimintaa tai kulkeutua suotovesien mukana ympäristöön.</li> <li>- Valumavesien keräily ja puhdistus on järjestettävä.</li> <li>- Käsiteltävän maakerroksen paksuutta rajoittavat maanmuokkausmenetelmät (yleensä muokattavissa oleva maakerros korkeintaan 0,5 m).</li> </ul>													
<p><b>Käsittelykustannukset:</b> alhaiset</p>													
<p><b>Käsittelyn kesto:</b> pitkä</p>													
<p><b>Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:</b></p> <p>Suomessa Fortum Oil &amp; Gas Oyj. on käsitellyt öljyistä materiaalia jalostamoalueensa öljypellolla. Tulokset ovat olleet vaihtelevia. Ongelmana on ollut mm. kesäisin pellon liiallinen kuivuminen, jonka seurauksena mikrobien hajotustoiminta on pysähtynyt.</p>													
<p><b>Lisätietoja:</b></p> <p><b>Kirjallisuus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anderson, W.C. 1995. Bioremediation. Innovative site remediation technology, vol 1. WASTECH, American Academy of Environmental Engineers. USA. Useita sivunumerojaksoja</li> <li>• FRTR. 2001. Landfarming. Www-dokumentti, saatavissa <a href="http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_15.html">http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_15.html</a></li> <li>• FRTR. 2001. Landtreatment. Www-dokumentti, saatavissa <a href="http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_3.html">http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_3.html</a></li> <li>• Hasenson B. 1984. Peltokäsittely soveltuu hyvin öljyisten jätteiden hävittämiseen. Jäte ja Ympäristö, no. 1, s. 8-10.</li> <li>• Huesemann, M.H. 1994. Guidelines for land-treating petroleum hydrocarbon-contaminated soils. Journal of Soil Contamination, 3 (3), pp 299-318.</li> </ul> <p><b>Yritykset</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Suomessa ei urakointia suorittavia yrityksiä</li> </ul>													

## 7. Kompostointi (aumakompostointi) Composting

ex situ

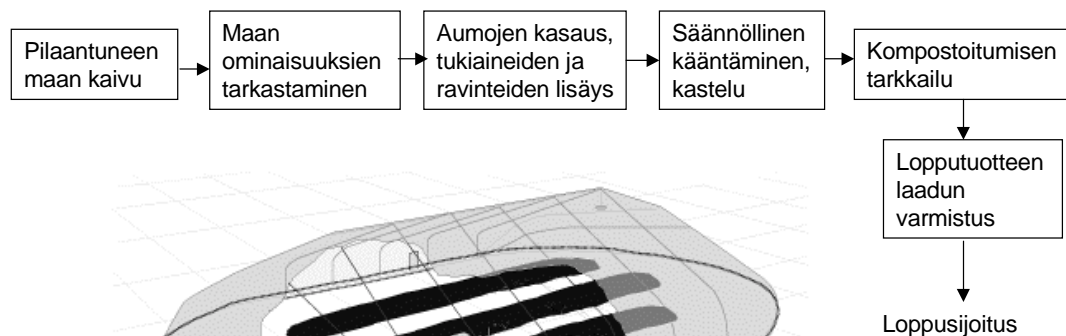
### Periaate

Kompostoinnissa orgaanisia haitta-aineita hajotetaan mikrobitoiminnan avulla. Pilaantunut maa-aines kaivetaan ja sijoitetaan kompostointiaumoihin, -altaisiin tai bioreaktoreihin. Ilmavuuden parantamiseksi kompostoitavaan massaun sekoitetaan kuohkeuttavia aineita, esim. puun kuorta tai lastuja tai olkia.

Aumojen huolellinen hoito ja haitta-aineiden hajoamisen seuranta ovat olennainen osa prosessia, pelkkä läjittäminen ei ole kompostoimista. Kompostin riittävä hapensaanti varmistetaan kääntämällä aumat säännöllisin väliajoin tai asentamalla kompostiin ilmastointi- tai huokosimputkia, joiden avulla kompostia voidaan myös lämmittää. Tarpeen mukaan komposti varustetaan kastelulaitteilla ja lämpöä eristävillä ja tasaisemman kosteuden takaavilla kerroksilla. Katteilla edistetään tasaisten olosuhteiden muodostumista auman sisälle. Kompostimassaan on yleensä syytä lisätä ravinteita prosessin nopeuttamiseksi. Myös pH:n säätö voi olla tarpeen.

Kompostointi tulee suorittaa vettä läpäisemättömällä kentällä tai vastaavalla alueella, joka suojaa alueen pohjavettä. Kompostin suotovedet on otettava talteen ja tarvittaessa käsiteltävä. Myös ilmapäästöjä tulee tarkkailla. Menetelmä ei sovellu helposti haihtuvien yhdisteiden käsittelyyn. Mikäli kompostoitava materiaali sisältää haihtuvia öljyhiilivetyjä (esim. diesel), on aumojen intensiivistä kääntämistä vältettävä aivan kompostoinnin alkuvaiheessa. Pienimolekyylisimmät (haihtuvimmat) yhdisteet hajoavat aumoissa suhteellisen nopeasti (2-4 viikossa). Haihtumista voidaan vähentää peittämällä komposti esim. muovilla. Kompostointi voidaan myös suorittaa hallissa tai muussa katetussa tilassa, jossa on ilmapäästöjen keräily ja käsittelyjärjestelmä.

Kompostointi soveltuu hyvin suhteellisen helposti hajoavien öljyhiilivetyjen käsittelyyn. Tavanomainen aumakompostointi kestää ulkona Suomen oloissa vähintään kuukausia, usein vuosia. Kompostoitumista tehostavin toimenpitein käsittelyaika lyhenee. Öljytuotteista hitaimmin hajoavia ovat öljypiki (bitumi) ja vastaavat suurimolekyylisiä yhdisteitä sisältävät aineet. PAH-yhdisteitä sisältävien kreosottiöljyjen ja kloorifenoleiden kompostoituminen on melko vaikeaa ja kompostoitumisaika pitkä.



KOMPOSTOINNIN PERIAATE  
(FRTR 2001)

### Soveltuvuus:

#### Orgaaniset haitta-aineet:

- biohajoavat orgaaniset yhdisteet kuten poltto- ja voiteluaineet, kreosottiöljyt ja kloorifenolit
- ei sovellu helposti haihtuville yhdisteille

#### Epäorgaaniset haitta-aineet:

- ei sovellu

#### Maaperä:

- |                  |   |
|------------------|---|
| - Hiekka         | x |
| - Siltti         | x |
| - Savi           | x |
| - Moreeni        | x |
| - Orgaaninen maa | x |
| - Sedimentti     | x |

**Menetelmän tekniset rajoitukset:**

- Ei sovellu epäorgaanisille haitta-aineille eikä sellaisille orgaanisille yhdisteille, jotka eivät ole biohajoavia.
- Öljyhiilivedyt kompostoituvat yleensä helpoimmin, PAH-yhdisteitä sisältävät maat hitaimmin.
- Ei sovellu helposti haihtuville yhdisteille.
- Kompostoinnin suorittaminen vaatii suhteellisen paljon tilaa.
- Suotovesien keräys ja tarvittaessa käsittely on suoritettava.
- Kompostoinnista ei saa aiheutua ilmapäästöjä. Ilmapäästöjen tarkkailu ja käsittely järjestettävä tarvittaessa.
- Komposti vaatii huolellista hoitoa.
  - Pohjaveden pinnan alapuolisen maan kaivaminen on vaikeaa. Lisäksi aiheutuu riski pohjaveden (lisä)pilaantumisesta. Mikäli pilaantunut alue ulottuu pohjaveden pinnan alapuolelle tulee tarvittaessa järjestää pohjaveden pumppaus ja käsittely.

**Käsittelykustannukset:** riippuvat haitta-aineista ja niiden pitoisuuksista:

- öljyiset maat yleensä noin 150-300 mk/t, mutta voi kohota jopa 500 mk/t
- kloorifenolipitoiset maat noin 400-500 mk/t
- PAH-pitoiset maat noin 500-600 mk/t

**Käsittelyn kesto:** keskipitkä - pitkä

**Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:**

Öljyisten maiden kompostointia harjoittaa suurin osa alueellisista kaatopaikoista. Myös esim. PTI-Soil käsittelee öljyhiilivedyjä sisältäviä maita lähinnä Pohjois-Suomessa, jossa kaatopaikoilla ei ole kompostointimahdollisuuksia.

Klooratuilla liuottimilla ja kreosoottiöljyillä pilaantuneiden maiden kompostointi on harvinaisempaa. Virkkalan saastuneen maan käsittelykeskuksessa (Soilrem Oy) kompostoidaan öljyillä, kreosootilla ja kloorifenoleilla pilaantuneita maita. Käsittelykapasiteetti on 36 000 t/a. Kompostoitavat massat kasataan aumaksi. Sen sisään asennetaan huokosimuputkisto, jonka avulla imetään haihtuvia yhdisteitä. Samalla kompostin ilmanvaihto tehostuu. Putkiston avulla kompostia voidaan myös lämmittää, mikä tehostaa haihtumista ja biologista hajoamista. Virkkalassa kompostointi tapahtuu kentällä peitetyissä aumoissa.

Nordic Envicon Oy käsittelee tehostetulla aumakompostoinnilla mm. raskailla öljyhiilivedyjillä ja kreosoottiöljyillä pilaantuneita maita. Kompostoitumista tehostetaan lämpökäsittelyllä, mikä varmistaa kompostin toimimisen myös kylmässä. Kompostointi voidaan suorittaa *on site* tai *ex situ* esim. kaatopaikka-alueella.

**Lisätietoja:****kirjallisuus**

- FRTR. 2001. Composting. Www-dokumentti, saatavissa [http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4\\_13.html](http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_13.html)
- Pasanen, J. 1991. Öljyisen maan ja jätteen mikrobiologinen puhdistus. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja, sarja A 76. Helsinki.
- Puustinen, J., Jørgensen, K., Strandberg, T. & Suortti, A.-M. 1995. Bioremediation of oil contaminated soil from service stations. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja, sarja A 208. Helsinki.

**yrietykset**

- alueelliset kaatopaikat
- Nordic Envicon Oy
- Virkkalan saastuneen maan käsittelykeskus, Soilrem Oy

## 8. Bioreaktorit Bioreactors

*ex situ*

### Periaate

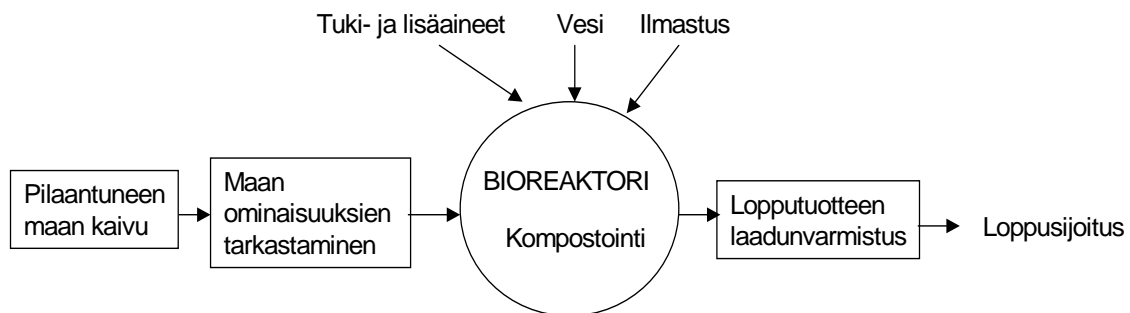
*Bioreaktorit ovat suljettuja kompostointilaitteistoja, joissa orgaanisten haitta-aineiden biologinen hajoaminen tapahtuu. Suljetun systeemin ansiosta kompostointi on helposti hallittavissa.*

Bioreaktoreiksi voidaan luokitella kosteudeltaan kompostikuivaa massaa käsittelevät **rumpukompostorit** ja **lietereaktorit**, joissa puhdistettava maa-aines on suspendoitu veteen. Bioreaktorit ovat täyssekoitteisia suljettuja systeemejä, joissa hajotusolosuhteet voidaan lämpötilan, happipitoisuuden, kosteuden ja ravinteiden osalta säätää muita biologisia menetelmiä paremmin. Bioreaktoreissa saavutetaan myös hyvä kontakti haitta-aineiden ja mikrobien välille. Hajoaminen on aumamenetelmään verrattuna oleellisesti nopeampaa, minkä vuoksi laitteita voidaan käyttää erityisesti vaikeasti hajotettavien aineiden käsittelyyn.

**Rumpukompostorissa** sekoitus tapahtuu pyörimisliikkeen avulla. Laitteet ovat usein jatkuvatoimisia. Kompostiseos syötetään rumpun toiseen päähän, josta massat etenevät pyörimisliikkeen ja laitteen sisärakenteiden ansiosta rumpun läpi ja ulos systeemistä. Hajotusteholtaan rummut ovat tehokkaita. Maa-ainesten käsittelyssä niiden rajoittavaksi tekijäksi muodostuu helposti mekaaninen kestävyys. Ongelmana saattaa olla myös hienojakoisen maa-aineksen tiivistyminen.

**Märkäreaktoreissa (lietereaktoreissa)** sekoitus tapahtuu sekä liikkuvien lapojen että ilmastuksen avulla. Reaktoriltaat voivat olla rakenteeltaan hyvin erilaisia. Yksinkertaisimmillaan reaktori on maahan kaivettu ja muovilla tiivistetty oja, jonka alkupää toimii ilmakompressorien avulla biomassaa kasvattavana täyssekoitusreaktorina ja loppupää tulppavirtausreaktorina. Toisaalta reaktori voi olla monimutkainen, erilaisia sekoitussäiliöitä ja reaktioaltaita sisältävä suljettu laitos, jolla voidaan käsitellä useampia eri kemikaaleja sisältävää maata samalla kertaa. Reaktorien yhteydessä on helppo käyttää erilaisia tehosteita kuten otsonia ja entsyymilisäyksiä. Märkäreaktoreja on käytetty useimmin panosluonteisesti, koska käsittelyaika on tyypillisesti useita päiviä tai viikkoja tehden jatkuvatoimisen prosessin epäkäytännölliseksi.

Bioreaktoreista on kehitetty myös staattinen versio, jonka mekaaninen kestävyys on parempi kuin liikkuvia osia sisältävien reaktorien (ks. Käyttö ja soveltuvuus Suomessa).



BIOREAKTORIN TOIMINTAPERIAATE

### Soveltuvuus:

#### Orgaaniset haitta-aineet:

- biohajoavat orgaaniset yhdisteet, kuten öljyhiilivedyt, kloorifenolit, PAH-yhdisteet

#### Epäorgaaniset haitta-aineet:

- ei sovellu

#### Maaperä:

- Hiekka	x
- Siltti	x
- Savi	x
- Moreeni	x
- Orgaaninen maa	x
- Sedimentti	x



**Menetelmän tekniset rajoitukset:**

- Soveltuu suhteellisen huonosti pohjaveden pinnan alapuolisiin maakerroksiin, sillä niiden kaivu on vaikeaa. Pohjaveden pinnan alapuolella tapahtuva kaivu lisää myös huomattavasti pohjaveden pilaantumisriskiä.
- Ei sovellu epäorgaanisten haitta-aineiden käsittelyyn
- Pyörivien rumpukompostoreiden rakenteet kestävät huonosti raskaiden maamassojen käsittelyä.
- Pyörivässä rumpukompostorissa hienojakoinen maa-aines saattaa tiivistyä liikaa.
- Kompostista suotautuvien vesien talteenotto ja käsittely on järjestettävä
- Pohjaveden pinnan alapuolisen maan kaivaminen on vaikeaa. Lisäksi aiheutuu riski pohjaveden (lisä)pilaantumisesta. Mikäli pilaantunut alue ulottuu pohjaveden pinnan alapuolelle tulee tarvittaessa järjestää pohjaveden pumppaus ja käsittely.

**Käsittelykustannukset:** noin 200 mk/t

**Käsittelyn kesto:** keskipitkä (viikkoja)

**Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:**

Merinonita Oy on kehittänyt staattisen bioreaktorin, jossa voidaan käsitellä öljyisiä maita. Öljypitoisuus voi olla jopa 10 %, mutta yleisimmin käsitellyt pitoisuudet ovat olleet noin 2000-5000 ppm. Tällöin käsittelyaika on noin 2 viikkoa. Keskimäärin menetelmällä kompostoituminen tapahtuu noin 6 kertaa nopeammin verrattuna tavanomaiseen aumakompostointiin. Bioreaktoriin sisältyy ilmastus-, lämmitys- ja kastelujärjestelmät. Lisäksi reaktorissa on vesien talteenotto- sekä kierrätysjärjestelmä. Lämmityksen ja lämpöeristyksen ansiosta kompostoituminen on mahdollista myös talvella. Bioreaktori on päältä täytettävässä, siirrettävässä kontissa ja sen toiminta on automaattisesti ohjattavissa. Bioreaktorin kehitystyötä jatketaan ja kloorattujen yhdisteiden sekä kreosoottiöljyjen kompostoimista tutkitaan parhaillaan. Staattisen menetelmän etuna on, ettei siihen kohdistu vastaavanlaista räsitusta kuin pyöriviin kompostointilaitteistoihin. Käsittelykustannukset ovat 190 mk/t

**Lisätietoja:**

## kirjallisuus

- Anderson, W.C. 1995. Bioremediation. Innovative site remediation technology, vol 1. WASTECH, American Academy of Environmental Engineers. USA. Useita sivunumerojaksoja
- Pasanen, J. 1991. Öljyisen maan ja jätteen mikrobiologinen puhdistus. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja, sarja A 76. Helsinki.

## yritykset

- Merinonita Oy

## 9. Maan pesu Soil washing

*ex situ*

### Käsittelyn periaate:

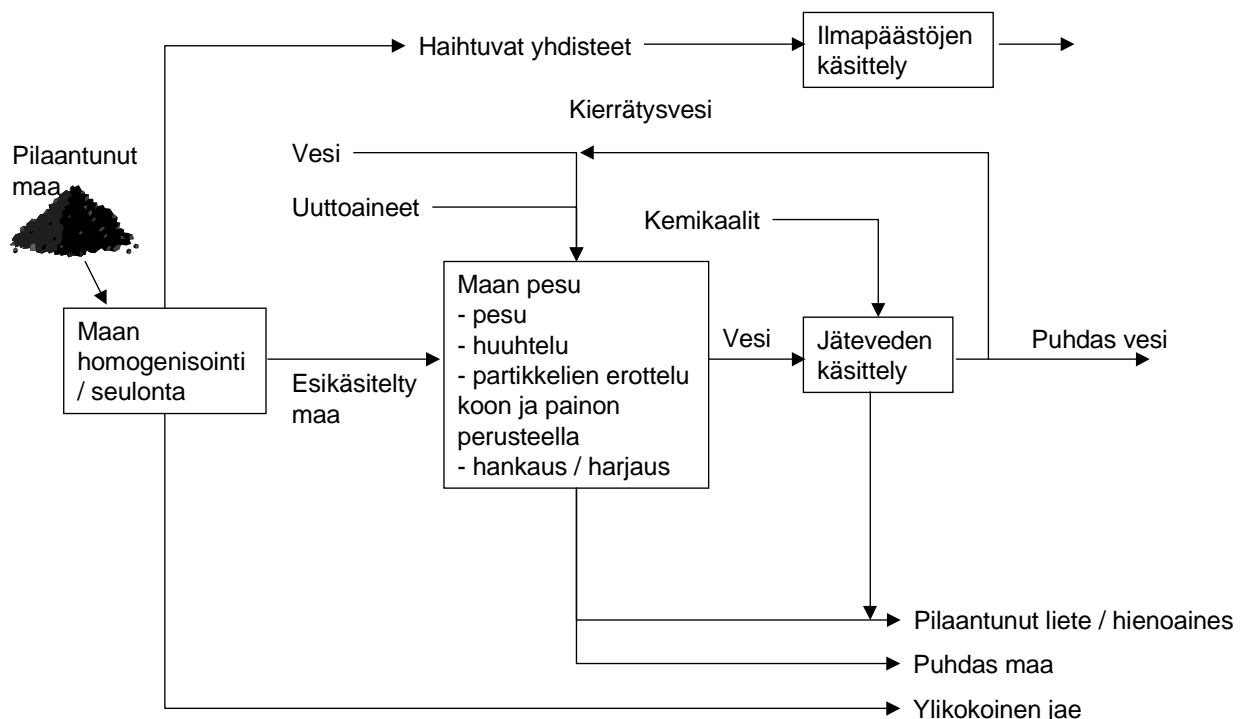
Partikkeleihin sitoutuneet haitta-aineet erotetaan maa-aineksesta veden avulla. Pesutehoa voidaan parantaa uuttoliuosten, pinta-aktiivisten aineiden, pH:n säätäjien tai kelatoivien yhdisteiden avulla. Pesun avulla saadaan erotettua haitta-aineet sisältävä likainen jae eli pesurejeki ja puhdas jae.

Useimmat orgaaniset ja epäorgaaniset haitta-aineet sitoutuvat maaperän savi- ja silttihiukkasiin sekä orgaaniseen ainekseen. Savi ja siltti puolestaan sitoutuvat karkeampiin maa-aineksiin pääasiassa tiivistymisen ja adheesion kautta. Pesuprosesseilla voidaan erotella hienot maahiukkaset raskaammista, jolloin myös haitta-aineet konsentroituvat pienempään määrään maata. Erottelu voi tapahtua partikkelien kokoon, ominaispainoon tai pintaominaisuuksiin tai näiden yhdistelmiin perustuen. Partikkelien fysikaalisia ominaisuuksia hyödyntävien tekniikoiden lisäksi haitta-aineiden erottelu ja konsentroiminen voi perustua niiden liukenemiseen tai suspendoitumiseen pesuliuokseen. Pilaantuneen maan pesu tapahtuu yleensä erillisissä pesulaitteistoissa, jotka voivat olla siirrettäviä tai kiinteitä. Laitteistojen kapasiteetit vaihtelevat noin 5-40 t/h. Siirrettävää käsittelylaitteistoa käytettäessä tulee käsittelyalueella olla tiivis asfaltti- tai vastaava kerros, jolla estetään pesuvesien kulkeutuminen ympäristöön.

Pesua voidaan pitää esikäsittelymenetelmänä ja pesurejeki ja -vesi vaativat yleensä jatkokäsittelyä vaihtoehtoisilla menetelmillä (esim. rejektin terminen käsittely). Puhdas maa voidaan usein palauttaa takaisin kohteeseen. Suomessa kuitenkin on käsittelyjen jakeiden sijoittamista rajoitettu.

Maan pesu tapahtuu *ex situ* ja se soveltuu parhaiten hiekkamaille, joiden hienoainespitoisuus on 5-30 %.

Pesutehoa voidaan myös parantaa kuumentamalla vesi. Tällöin haihtuvat yhdisteet irtoavat tehokkaasti maaperästä. Höyrystynyt vesi ja haitta-aineet vaativat jälkikäsittelyn, esim. jälkipolton.



TYYPILLINEN MAAN PESU -PROSESSI  
(FRTR 2001)

<b>Soveltuvuus:</b>													
<p><b>Orgaaniset haitta-aineet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- öljyhiilivedyt</li> <li>- PCB, PCP</li> <li>- pestisidit</li> <li>- kreosootit</li> </ul> <p><b>Epäorgaaniset haitta-aineet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- raskasmetallit</li> <li>- syanidit</li> </ul>	<p><b>Maaperä:</b></p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding-left: 20px;">- Hiekka</td> <td style="text-align: right; padding-right: 20px;">x</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">- Siltti</td> <td style="text-align: right;">-</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">- Savi</td> <td style="text-align: right;">-</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">- Moreeni</td> <td style="text-align: right;">x</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">- Orgaaninen maa-aines</td> <td style="text-align: right;">-</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">- Sedimentti</td> <td style="text-align: right;">(x)</td> </tr> </table>	- Hiekka	x	- Siltti	-	- Savi	-	- Moreeni	x	- Orgaaninen maa-aines	-	- Sedimentti	(x)
- Hiekka	x												
- Siltti	-												
- Savi	-												
- Moreeni	x												
- Orgaaninen maa-aines	-												
- Sedimentti	(x)												
<p><b>Menetelmän tekniset rajoitukset:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Esikäsitelymenetelmä, jonka avulla pilaantuneen maan määrä pienenee alkuperäisestä. Pesurejektin ja -veden jatkokäsittely yleensä tarpeellista.</li> <li>- Pesussa käsitellyille maille on Suomessa asetettu rajoituksia. Esimerkiksi sijoittaminen tärkeälle pohjavesialueelle, hyvin läpäisevälle maalle tai kosketuksiin pinta- tai pohjaveden kanssa on kielletty.</li> <li>- Monimutkaisille ja epätasaisesti maahan jakautuneille haitta-aineyhdistelmille on vaikea kehittää yhtä sopivaa pesuliuosta, joten tällaisille maille saattaa vaiheittainen pesu olla tarpeellinen.</li> <li>- Maissa, joissa on korkea kationinvaihtokapasiteetti, haitta-aineet ovat tehokkaasti sitoutuneet maahan. Tämä heikentää pesutulosta.</li> <li>- Käsiteltävässä maassa tulisi olla vähintään 50 % hiekkaa ja soraa. Maan suuri savi- tai silttipitoisuus vaikeuttaa menetelmän soveltamista.</li> <li>- Vaikka menetelmä soveltuukin bensiinillä ja dieselöljyllä pilaantuneelle maalle, saattavat muut menetelmät olla tehokkaampia/ edullisempia.</li> <li>- Pohjaveden pinnan alapuolisen maan kaivaminen on vaikeaa. Lisäksi aiheutuu riski pohjaveden (lisä)pilaantumisesta. Mikäli pilaantunut alue ulottuu pohjaveden pinnan alapuolelle tulee tarvittaessa järjestää pohjaveden pumppaus ja käsittely.</li> </ul>													
<p><b>Käsittelykustannukset:</b></p> <p>Ekokem: noin 300 mk/t</p> <p>Lohja Rudus: noin 150-200 mk/t (pesukustannusten eriyttäminen vaikeaa, sillä pesurejektit yleensä jatkokäsitellään)</p>													
<p><b>Käsittelyn kesto:</b> lyhyt</p>													
<p><b>Käyttö ja soveltuvuus Suomessa</b></p> <p>Lohja Ruduksen Virkkalan maanpuhdistuskeskus: orgaanisia ja epäorgaanisia haitta-aineita sisältävä hiekkamaa, käsittelykapasiteetti 5-10 tonnia/h.</p> <p>Ekokemillä käytettävissä siirrettävä maanpesulaitos, jonka käsittelykapasiteetti on 7-10 t/h.</p>													
<p><b>Lisätietoja:</b></p> <p><b>kirjallisuus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anderson, W.C. (ed.). 1993. Soil washing/soil flushing. Innovative site remediation technology, vol 3. WASTECH, American Academy of Environmental Engineers. USA. Useita sivunumerojaksoja.</li> <li>• FRTR. 2001. Soil washing. Www-dokumentti, saatavissa <a href="http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_21.html">http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_21.html</a></li> </ul> <p><b>yritykset</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lohja Rudus Oy</li> <li>• Ekokem Oy</li> </ul>													

## 10. Maan huuhtelu

Soil flushing

*in situ, on site*

### Periaate:

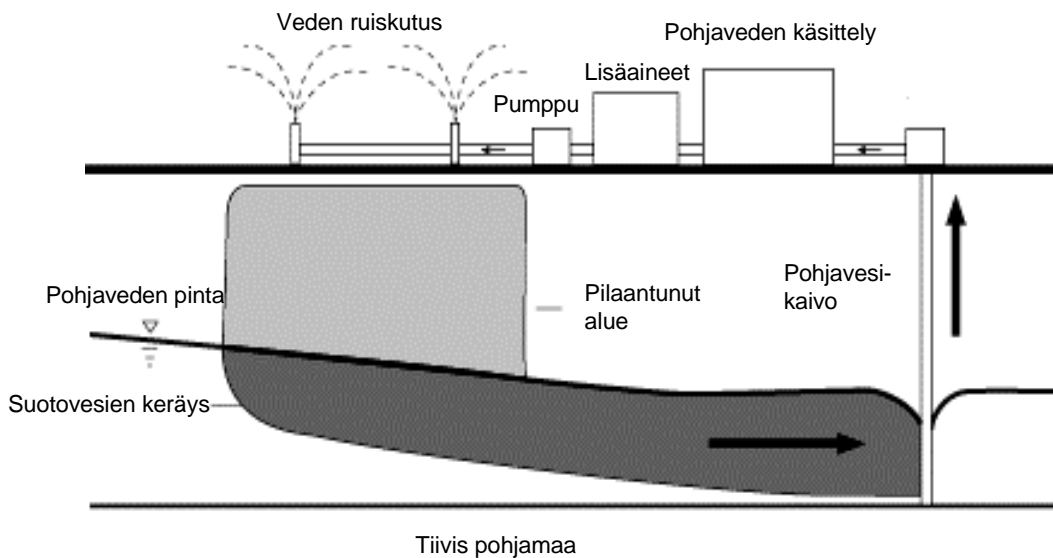
*Maahan tai pohjaveteen johdetaan imeyttämällä tai injektoimalla vettä, jossa voi olla myös haitta-aineen liukoisuutta lisäävää ainetta. Pohjaveden pinnan noustessa pilaantuneeseen maakerrokseen haitta-aineet irtoavat pohjaveteen, joka johdetaan käsiteltäväksi.*

Veden haitta-aineiden irrottavaa vaikutusta voidaan tehostaa esimerkiksi lisäämällä veteen helposti sekoittuvaa orgaanista liuotinta kuten alkoholia. Seosta johdetaan joko maaperän kyllästymättömään tai pohjavesikerrokseen tai molempiin. Liuotinhuuhtelua voidaan käyttää joko haitta-aineiden lähteen tai siitä kauemmas kulkeutuneen haitta-aineen (pluumin) käsittelyssä. Haitta-aineiden liukenemisen lisäksi maan huuhtelulla voi olla orgaanisten yhdisteiden biologista hajoamista tehostava vaikutus.

Haitta-aineita ja liuotinta sisältävä vesi tulee pääsääntöisesti käsitellä. Useimmiten se pumpataan maan pinnalle esim. aktiivihiilisuodattukseen perustuvaan käsittelylaitokseen, josta se voidaan johtaa ympäristöön tai jatkokäsittelyyn kunnalliseen jätevesilaitokseen. Puhdistettu vesi voidaan myös kierrättää kunnostusprosessissa. Suurin kustannus maan huuhtelussa syntyy lisäaineiden erottelusta kierrätystä varten.

Huuhtelunesteiden käsittelystä syntyy lietettä ja kiinteää jätettä, kuten käytettyjä aktiivihiilisuodattimia, jotka tulee käsitellä asianmukaisesti. Myös haihtuvien yhdisteiden aiheuttamia ilmapäästöjä tulee tarkkailla ja tarvittaessa kontrolloida. Maaperään tai pohjaveteen mahdollisesti jäävien huuhteluaineiden merkittävyys tulee arvioida kohdekohtaisesti.

Maan huuhtelu on vasta kehittyvä tekniikka, josta ei ole käyttökokemusta Suomessa. Vaarana on pilaantuneen alueen laajeneminen, ks. tarkemmin alla tekniset rajoitukset ja soveltuvuus Suomessa.



TYYPILLINEN MAAN HUUHTELU -PROSESSI  
(FRTR 2001)

<b>Soveltuvuus:</b>	
<p><b>Orgaaniset haitta-aineet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- VOC- ja SVOC-yhdisteet</li> <li>- polttoaineet</li> <li>- pestisidit</li> </ul> <p><b>Epäorgaaniset haitta-aineet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- metallit</li> <li>- radioaktiiviset aineet</li> </ul>	<p><b>Maaperä: (karkearakeiset maalajit)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hiekka, sora x</li> <li>- Siltti (x)</li> <li>- Savi -</li> <li>- Moreeni (x)</li> <li>- Sedimentti -</li> </ul>
<p><b>Menetelmän tekniset rajoitukset:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Menetelmän käyttökelpoisuus tulee testata kohdekohtaisesti. Se riippuu mm. maaperän läpäisevyydestä, maan rakenteesta, pH:sta, kationinvaihtokapasiteetista ja puskurikyvystä sekä orgaanisen aineen määrästä (TOC).</li> <li>- Soveltuu yllä mainituille orgaanisille yhdisteille, mutta on näille kustannuksiltaan ja tehokkuudeltaan useimmiten huonompi kuin useat vaihtoehtoiset menetelmät.</li> <li>- Soveltuu karkearakeisille maalajeille. Maaperän huono vedenläpäisevyys ja heterogeenisyys heikentää menetelmän käyttökelpoisuutta.</li> <li>- Lisäaineet voivat kiinnittyä maahan ja huonontaa maan läpäisevyyttä.</li> <li>- Huuhtelunesteiden reaktiot maapartikkeleiden kanssa voivat vähentää haitta-aineiden liikkuvuutta.</li> <li>- Maaperään johdettavien lisäaineiden käyttö on kyseenalaista ja vaikeuttaa kunnostushankkeelle vaadittavan ympäristöluvan saamista. Liuotinten käyttö lisää myös työturvallisuusriskiä. Menetelmää tulee käyttää ainoastaan, jos huuhteluneste ja siihen liuenneet haitta-aineet pystytään kontrolloimaan ja käsittelemään.</li> <li>- Haitta-aineita sisältävän nesteen käsittely ja lisäaineiden erottelu saattaa muodostaa suurimman osan menetelmän kustannuksista.</li> <li>- Kyseessä on uusi tekniikka, josta on vasta vähän käytännön kokemuksia.</li> </ul>	
<p><b>Käsittelykustannus:</b> riippuu erityisesti käytetyistä lisäaineista ja niiden määrästä. USAssa karkeitä arvioita muutamasta sadasta markasta tuhansiin markkoihin /m<sup>3</sup></p>	
<p><b>Käsittelyn kesto:</b> lyhyt - keskinkertainen</p>	
<p><b>Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:</b></p> <p>Suomessa ei tiettävästi ole käytetty maan huuhtelua. Menetelmä saattaa olla vaikeasti sovellettavissa Suomen maaperäolosuhteiden vuoksi. Hyvin vettä läpäisevät, tasaisesti kerrostuneet hiekka-alueet ovat suhteellisen harvinaisia.</p> <p>Ongelmia muodostunee myös lainsäädännön ja lupamenettelyn kanssa. Ympäristöluvan saaminen voi olla vaikeaa, erityisesti mikäli käytetään liuottimia tehostamaan haitta-aineiden liukenemistä. Erityisesti tärkeillä pohjavesialueilla pohjaveden pilaantumisriski on suuri. Tällaisilla alueilla ei menetelmää tulisi käyttää.</p>	
<p><b>Lisätietoja:</b></p> <p><b>kirjallisuus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anderson, W.C. (ed.). 1993. Soil washing/soil flushing. Innovative site remediation technology, vol 3. WASTECH, American Academy of Environmental Engineers. USA. Useita sivunumerojaksoja.</li> <li>• FRTR. 2001. Soil flushing. Www-dokumentti, saatavissa <a href="http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_8.html">http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_8.html</a></li> <li>• U.S. EPA. 1996. A citizen's guide to soil flushing. EPA 542-F-96-006. Saatavissa myös: <a href="http://www.clu-in.org/products/citguide/">http://www.clu-in.org/products/citguide/</a></li> </ul> <p><b>yritykset</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ei Suomessa</li> </ul>	

## 11. Elektrokineettiset menetelmät

*in situ, on site, ex situ*

Electrokinetic separation, electrokinetic remediation, electrokinetics, electromigration

### Periaate

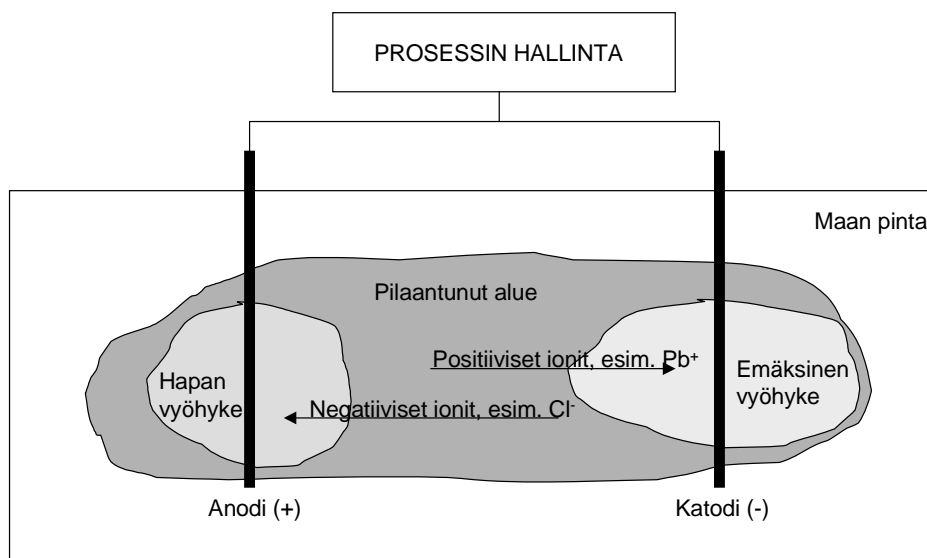
Elektrokineettisellä käsittelyllä voidaan sähkökemiallisten ja -kineettisten prosessien avulla poistaa metalleja ja polaarisia orgaanisia haitta-aineita maasta, liejusta, lietteestä tai sedimentistä. Menetelmä soveltuu erityisesti savimaiden ja muiden sellaisten materiaalien käsittelyyn, joiden läpäisevyys on alhainen.

Elektrokineettinen menetelmä perustuu maahan asetettuihin elektrodihin, anodiin ja katodiin, joiden välillä kulkee heikko tasavirta. Sähkövirta mobilisoi varautuneita aineita ja aiheuttaa niiden siirtymisen kohti elektrodia. Metallit, ammonium-ionit ja positiivisesti varautuneet orgaaniset yhdisteet kulkeutuvat kohti katodia ja anionit kuten kloridi, syanidi, fluoridi, nitraatti ja negatiivisesti varautuneet orgaaniset yhdisteet kohti anodia.

Sähkövirta luo happaman vyöhykkeen anodin ja emäksisen vyöhykkeen katodin ympärille. Happamuus lisää hiukkasiin sitoutuneiden metallien liukoisuutta ja nopeuttaa niiden siirtymistä kohti katodia. Haitta-aineiden kulkeutumiseen vaikuttavat pääasiassa elektromigraatio ja elektro-osmoosi. Elektromigraatiolla tarkoitetaan ionien kulkeutumista kohti elektrodia, elektro-osmoosissa puolestaan ioneja sisältävä vesi liikkuu elektrodia kohti. Ionien liikkeen suunta ja nopeus riippuvat niiden varauksesta, koosta ja polaarisuudesta sekä elektro-osmoosin aikaansaaman vesivirran voimakkuudesta. Ionien lisäksi vesi kuljettaa varauksettomia orgaanisia ja epäorgaanisia aineita.

Elektrokineettisessä menetelmässä haitta-aineet voidaan poistaa maaperästä esimerkiksi pumppaamalla vettä elektrodien läheisyydestä tai saostamalla tai kompleksoimalla ioneja. Haitta-aineiden poistamista käytetään yleensä, kun on kysymyksessä metalleilla pilaantunut maaperä. Orgaanisten yhdisteiden ollessa kyseessä voidaan elektrokineetiikkaa käyttää biologisen hajotuksen tehostuskeinona. Tällöin haitta-aineita ei poisteta maasta, vaan sähkövirran avulla aikaan saadaan haitta-aineiden irtoaminen maapartikkeleista, jolloin ne ovat paremmin mikrobin saatavilla ja hajotettavissa. Tällöin puhutaan bioelektrokineetiikasta. Haitta-aineiden leviämistä voidaan estää muuttamalla elektrodien polaarisuutta, jolloin haitta-aineet kulkevat edes-takaisin käsittelyalueella.

Elektrokineetiikkaa voidaan käyttää tapauksesta riippuen joko *in situ*, *on site* tai *ex situ*. *in situ* -käsittelyssä on haitta-aineiden leviämistä ympäristöön tarkkailtava. Sovellettaessa *on site* tai *ex situ* tulee käsittelyalustan olla tiivis. Mahdollisten suotovesien talteen otto ja tarvittaessa käsittely on järjestettävä. Menetelmä on yhä kehitysvaiheessa eikä sen asema maaperän puhdistusmenetelmän ole vakiintunut.



<b>Soveltuvuus:</b>	
<p><b>Orgaaniset haitta-aineet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- polaariset orgaaniset yhdisteet</li> </ul> <p><b>Epäorgaaniset haitta-aineet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- anionit kuten kloridi, nitraatti, syanidi, fluoridi, nitraatti</li> <li>- kationit kuten ammoniumioni, raskasmetallit</li> </ul>	<p><b>Maaperä:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hiekka</li> <li>- Siltti</li> <li>- Savi</li> <li>- Moreeni</li> <li>- Orgaaninen maa</li> <li>- Sedimentti</li> </ul>
<p><b>Menetelmän tekniset rajoitukset:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Menetelmän tehokkuus vähenee huomattavasti maan kosteuspitoisuuden laskiessa alle 10 %. Teho on parhaimmillaan kosteuspitoisuuden ollessa noin 15 %.</li> <li>- Maassa olevat metalliset tai eristävää materiaalia olevat kappaleet voivat vaikuttaa maan sähkönjohtokykyyn. Maaperän ominaisuudet tulisi määrittää ennen kunnostusta.</li> <li>- Menetelmä ei ole tehokas alueilla, joilla on voimakkaasti maan sähkönjohtokykyyn vaikuttavia tekijöitä, esim. malmiesiintymiä.</li> <li>- Elektrodiin tulisi olla inertistä materiaalista kuten hiilestä, grafiitista tai platinasta valmistettuja. Metalliset elektrodit liukenevat helposti elektrolyysin vaikutuksesta ja aiheuttavat korroosiotuotteiden joutumista maahan.</li> <li>- Elektrokineettikka on tehokkainta savimaissa savipartikkelien negatiivisen pintavarausvuoksi. Hiukkasten pintavaraus voi kuitenkin muuttua huokosnesteiden pH:n ja haitta-aineiden adsorboitumisen vaikutuksesta.</li> <li>- Hyvin happamat tai emäksiset olosuhteet ja hapetus-pelkistysolojen muutokset voivat heikentää menetelmän tehokkuutta. Toisaalta alhainen pH voi auttaa metallien poistamista.</li> <li>- Orgaanisten aineiden kulkeutuminen elektro-osmoosilla on mahdollista vain mikäli orgaaninen aine on liuennut tai dispergoitunut maaperän huokosveteen.</li> <li>- Hapetus-pelkistysreaktioissa voi muodostua ei-toivottuja tuotteita kuten kloorikaasua.</li> </ul>	
<p><b>Käsittelykustannukset:</b> riippuvat mm. sähkön hinnasta. USAssa kustannuksiksi arvioitu noin 100-1200 mk/t maata, keskiarvon ollessa noin 500 mk/t (sähkön hinta noin 25 p/kWh).</p>	
<p><b>Käsittelyn kesto:</b> lyhyt - keskipitkä</p>	
<p><b>Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:</b></p> <p>Suomessa Osmos Group Oy:llä on käytössä elektrokineettiseen menetelmään perustuva maan käsittelylaitteisto. Tähän mennessä yritys on käsitellyt bensiinillä ja dieselillä pilaantuneita maita muutamassa pilottiluonteisessa kohteessa. Menetelmää voidaan käyttää myös muiden orgaanisten yhdisteiden kuten kreosoottiöljyn käsittelyyn. Pesuun yhdistettynä voidaan sitä käyttää myös raskasmetalleille. Menetelmä soveltuu kaikenlaiselle maalle. Menetelmän toimittajan mukaan se soveltuu erityisesti tiiviille savi- tai vastaavalle maaperälle, jolle esim. huokosilmäkäsittely ei sovellu. Menetelmän sähkönkulutus on 100-150 kWh/m<sup>3</sup> riippuen maan tiiveydestä.</p>	
<p><b>Lisätietoja:</b></p> <p>kirjallisuus</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• FRTR. 2001. Electrokinetic separation. Www-dokumentti, saatavissa <a href="http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_6.html">http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_6.html</a></li> <li>• Relander, A., Aho, J. &amp; Korkealaakso, J. 1999. Saastuneen maaperän ja pohjaveden <i>in situ</i> -puhdistusmenetelmät. VTT tiedotteita.</li> <li>• Latostenmaa, P. ym. 2000. Maaperä puhtaaksi sähköllä. Ympäristö ja terveys-lehti 9/2000, ss. 21-25.</li> </ul> <p>yritykset</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Osmos Group Oy</li> </ul>	

## 12. Poltto / terminen käsittely

Incineration, thermal destruction

ex situ

### Periaate

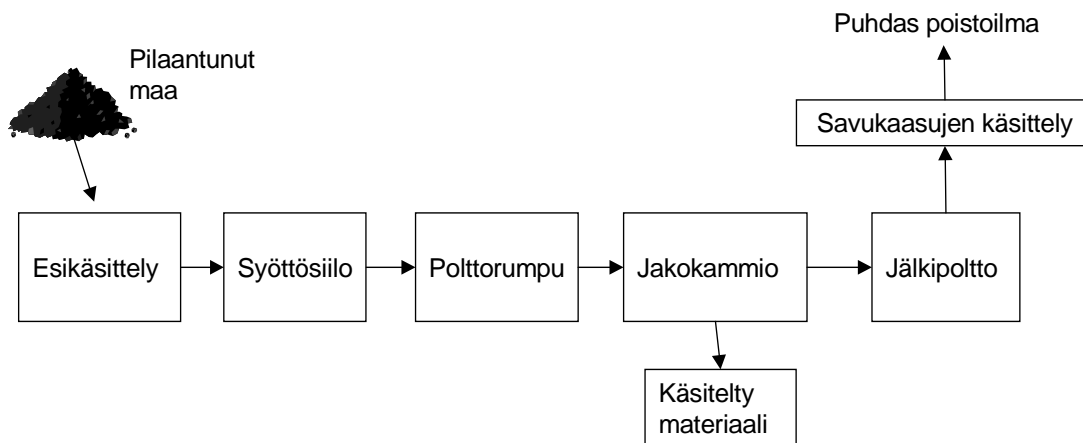
Korkeaa lämpötilaa käytetään haihduttamaan ja tuhoamaan hapellisissa olosuhteissa haitta-aineita pilaantuneesta maasta.

Huonosti haihtuvien orgaanisten aineiden poistuminen maaperästä tapahtuu vasta yli 700 °C asteen lämpötilassa. Tällöin myös maan sisältämä humus yleensä palaa kokonaan tai hiiltyy. Korkeita lämpötiloja voidaan käyttää mm. orgaanisilla haitta-aineilla kuten dioksiineilla ja PCB:llä pilaantuneiden maiden kunnostamiseen sekä ongelmajätteiden tuhoamiseen. Poltossa käytetään usein apupolttoaineita palamisen aloittamisessa ja ylläpitämisessä. Tehokkaissa ja hyvin suunnitelluissa polttolaitteistoissa poistoteho ylittää 99,99 % ongelmajätteille ja 99,9999 % poistoteho voidaan saavuttaa PCB:n ja dioksiinien osalta. Poistokaasut ja palamisjätteet vaativat jatkokäsittelyä. Maailmalla on useita eri tyyppisiä polttolaitteistoja on käytössä, kuten:

- kiertopeti (Circulating Bed Combustor, CBC)
- leijupeti (Fluidized Bed)
- infrapunapoltto (Infrared Combustion)
- kiertouuni (Rotary Kilns)

Suomessa Ekokem Oy:llä on käytössään kaksi polttomenetelmää: massapoltto ja tehopolttto. Massapoltossa haitta-aineet höyrystetään 500-800 °C:n lämpötilassa, josta ne johdetaan jälkipolttoon (yli 1000 °C). Massapoltto soveltuu orgaanisilla haitta-aineilla mm. voitelu- tai polttoöljyllä tai kloorifenoleilla pilaantuneille maille. Stabiloinnin esikäsittelynä käytettynä se soveltuu myös maille, jotka ovat pilaantuneet sekä epäorgaanisilla että orgaanisilla haitta-aineilla.

Tehopolttto (yli 1300 °C) soveltuu maille, jotka ovat vaikeasti pilaantuneita esim. dioksiineilla ja furaaneilla, PCB:llä, PAH-yhdisteillä tai orgaanisilla torjunta-aineilla. Tehopolttto soveltuu myös kohteisiin, joissa maaperää ovat pilanneet sekä epäorgaaniset että orgaaniset haitta-aineet. Tehopolton lopputuotteena syntyvää kuonaa voidaan hyötykäyttää esimerkiksi kaatopaikkojen rakennusmateriaalina.



TYYPILLINEN POLTTOPROSESSI



<b>Soveltuvuus:</b>													
<p><b>Orgaaniset haitta-aineet:</b> - riippuu käsittelylämpötilasta, periaatteessa kaikki orgaaniset haitta-aineet</p> <p><b>Epäorgaaniset haitta-aineet:</b> - Korkeassa lämpötilassa (tehopoltto) voidaan käsitellä epäorgaanisia haitta-aineita</p>	<p><b>Maaperä:</b></p> <table> <tr><td>- Hiekka</td><td>x</td></tr> <tr><td>- Siltti</td><td>x</td></tr> <tr><td>- Savi</td><td>(x)</td></tr> <tr><td>- Moreeni</td><td>x</td></tr> <tr><td>- Orgaaninen aines</td><td>x</td></tr> <tr><td>- Sedimentti</td><td>x</td></tr> </table>	- Hiekka	x	- Siltti	x	- Savi	(x)	- Moreeni	x	- Orgaaninen aines	x	- Sedimentti	x
- Hiekka	x												
- Siltti	x												
- Savi	(x)												
- Moreeni	x												
- Orgaaninen aines	x												
- Sedimentti	x												
<p><b>Menetelmän tekniset rajoitukset:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Raskasmetalleja sisältävien ja ongelmajätteeksi luokiteltavien maamassojen polttokäsittely edellyttää EU:n ongelmajätteen polttodirektiivin (tarkista nimi) mukaista laitostekniikkaa.</li> <li>- Kloorattuja yhdisteitä sisältävien maiden käsittely vaatii dioksiinien syntymisvaaran vuoksi korkealuokkaista päästöjen puhdistustekniikkaa.</li> <li>- Poltettavan massan raekoko ja materiaali on rajoitettua, mikä saattaa vaikuttaa menetelmän soveltuvuuteen ja kustannuksiin.</li> <li>- Savimaa paakkuuntuu helposti kuumennettaessa. Paakut voivat tukkia käsittelylaitteistoa ja heikentää käsittelytehoa. Ongelmaa voidaan helpottaa teknisin ratkaisuin.</li> <li>- Kiinteä orgaaninen aines (esim. puu) palaa hitaasti ja pidentää käsittelyaikaa.</li> <li>- Kiviä, metallinkappaleita, kaapeleita tms. sisältävä käsiteltävä materiaali vahingoittaa helposti käsittelylaitteistoa.</li> <li>- Käsiteltävän massan sisältämät raskasmetallit saattavat aiheuttaa sen, että pohjatuhka tulee stabiloida</li> <li>- Haihtuvien raskasmetallien (lyijy, kadmium, elohopea ja arseeni) vuoksi poistokaasut tulee puhdistaa.</li> <li>- Metallit voivat reagoida syöttövirrassa (feed stream) muiden aineiden kuten kloorin tai rikin kanssa muodostaen alkuperäisiä helpommin haihtuvia ja haitallisempia yhdisteitä. Yhdisteet ovat kuitenkin useimmiten lyhytikäisiä välituotteita, jotka voidaan poistaa tarkoitukseen soveltuvalla laitteistolla.</li> <li>- Natrium ja kalium muodostavat alhaisen sulamispisteen omaavaa tuhkaa, joka saattaa takertua tiilivuoraukseen ja tahrata kaasuputkistoa.</li> <li>- Käsitellyn materiaalin loppusijoitukselle voidaan antaa rajoituksia.</li> <li>- Pohjaveden pinnan alapuolisen maan kaivaminen on vaikeaa. Lisäksi aiheutuu riski pohjaveden (lisä)pilaantumisesta. Mikäli pilaantunut alue ulottuu pohjaveden pinnan alapuolelle tulee tarvittaessa järjestää pohjaveden pumppaus ja käsittely.</li> </ul>													
<p><b>Käsittelykustannukset:</b> Ekokem Oy: massapoltto noin 400 mk/t, tehopoltto noin 1800 mk/t</p>													
<p><b>Käsittelyn kesto:</b> nopea</p>													
<p><b>Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:</b></p> <p>Suomessa Ekokem Oy:llä suorapolttainen massapolttolaitteisto. Haitta-aineet höyrystyvät ja palavat osittain keskilämpötilauunissa (450-800 °C), jonka jälkeen ne johdetaan jälkipalotilaan (noin 1100 °C). Kapasiteetti on 3-10 t/h, riippuen käsiteltävän materiaalin ominaisuuksista ja haitta-ainepitoisuuksista.</p> <p>Tehopoltolla (yli 1300 °C) Ekokem Oy voi käsitellä vaikeasti pilaantuneita maita. Soveltuu kohteisiin, joissa maaperä on pilaantunut esim. dioksiineilla, furaaneilla, PCB:llä, PAH-yhdisteillä tai öljyillä. Soveltuu myös maamassoille, joissa on sekä epäorgaanisia että orgaanisia haitta-aineita.</p>													
<p><b>Lisätietoja:</b></p> <p><b>kirjallisuus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anderson, W.C (ed.). 1994: Thermal destruction. Innovative site remediation technology, vol 7. WASTECH, American Academy of Environmental Engineers. USA. Useita sivunumerojaksoja.</li> <li>• Federal Remediation Technologies Roundtable. 2001. Incineration. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide Version 3.0. Www-dokumentti, saatavissa <a href="http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_26.html">http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_26.html</a></li> </ul> <p><b>yritykset</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ekokem Oy</li> </ul>													

### 13. Terminen desorptio / terminen käsittely

Thermal desorption

ex situ

#### Periaate

Terminen desorptio on fysikaalinen menetelmä, jossa haitta-aineet erotetaan käsiteltävästä materiaalista lämmittämällä sitä. Tavoitteena ei ole orgaanisten aineiden tuhoaminen. Käsittelylämpötila ja -aika valitaan siten, että orgaaniset yhdisteet haihtuvat, mutta eivät hapetu. Termistä desorptiota voidaan pitää esikäsitteilymenetelmänä, jonka jälkeen haihtuneet haitta-aineet johdetaan jatkokäsittelyyn.

Termistä desorptiota voidaan suorittaa kolmessa erityyppisessä laitteistossa:

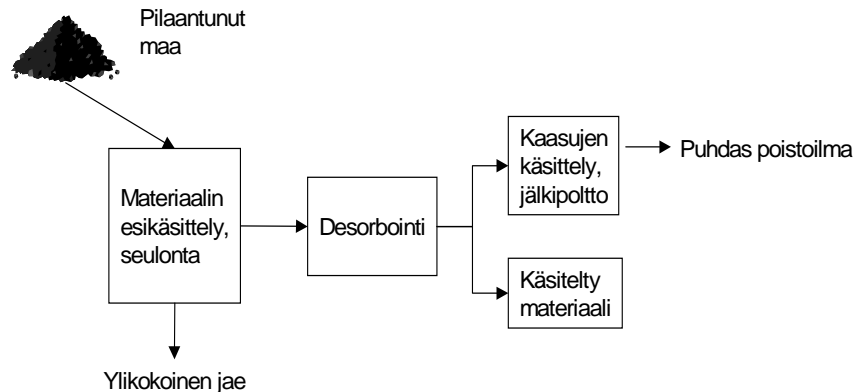
- 1) Suora poltto: pilaantunut maamassa on suorassa kontaktissa avoliekkien kanssa, joiden tarkoituksena on pääasiassa irrottaa haitta-aineita maaperästä samalla kun osa haitta-aineista myös hapettuu.
- 2) Epäsuora poltto: a) Suoralämmitteinen rumpukuivain lämmittää ilmavirtaa. Se johdetaan käsiteltävään materiaaliin, jossa se irrottaa veden ja orgaaniset haitta-aineet.  
b) Höyrykehitin tulistaa veden höyryksi. Tulistettu höyry johdetaan käsiteltävään materiaaliin, jossa se irrottaa veden ja orgaaniset aineet.
- 3) Epäsuoralämmitteinen: ulkopuolelta lämmitettävä rumpukuivain haihduttaa vettä ja orgaanisia yhdisteitä käsiteltävästä materiaalista inerttiin kantajakaasuun. Haitta-aineita sisältävä kaasu puhdistetaan.

Kaikissa termodesorptiomenetelmissä poistokaasut tulee käsitellä hiukkas- ja haitta-ainepäästöjen kontrolloimiseksi. Hiukkaspäästöt puhdistetaan perinteisillä hiukkassuodattimilla tai pesureilla. Haitta-aineet poistetaan joko kondensoimalla ja aktiivihiihikäsittelmällä kaasut, tuhoamalla ne jälkipolttolaitteistossa tai hapettamalla ne katalyyttisesti.

Terminen desorptio voidaan jakaa korkealämpödesorptioon (high temperature thermal desorption, HTTD) ja matalalämpödesorptioon (low temperature thermal desorption, LTTD).

Korkealämpödesorptiossa käsiteltävä materiaali lämmitetään 320-560 °C:ksi. Menetelmää voidaan käyttää käsiteltävän materiaalin ominaisuuksista riippuen yhdessä polton, kiinteytyksen/stabilisoinnin tai deklorinaation kanssa. Korkealämpödesorption kohdehaitta-aineita ovat puolihaihtuvat yhdisteet ja joissain tapauksissa PAH:t, PCB:t ja torjunta-aineet. Myös VOC-yhdisteitä ja polttoaineita voidaan käsitellä, mutta menetelmän kustannustehokkuus saattaa olla alhainen näiden yhdisteiden osalta. Myös haihtuvia metalleja saatetaan käsitellä korkealämpödesorptiolla.

Matalalämpödesorptiossa käsiteltävä materiaali lämmitetään 90-320 °C:ksi. Menetelmää on käytetty mm. öljyhiilivetyjen poistamiseen erityyppisistä maamassoista. Sillä voidaan käsitellä myös puolihaihtuvia yhdisteitä, mutta käsittelyteho voi olla alentunut. Matalalämpödesorptiolla käsitelty maamassa säilyttää fysikaaliset ominaisuutensa. Käsittelylämpötila-alueen alapäässä myös maan orgaaniset ainekset säilyvät vahingoittumina, mikä helpottaa maan biologisen toiminnan palautumista.



TYYPILLINEN TERMODESORPTIOPROSESSI

#### Soveltuvuus:

##### Orgaaniset haitta-aineet:

- haihtuvat orgaaniset yhdisteet
- puolihaihtuvat orgaaniset yhdisteet
- mahdollisesti myös PAH:t, PCB:t ja torjunta-aineet

##### Epäorgaaniset haitta-aineet:

- pääsääntöisesti ei sovellu

##### Maaperä:

- Hiekka x
- Siltti x
- Savi x
- Moreeni x
- Orgaaninen maa-aines x
- Sedimentti x

**Menetelmän tekniset rajoitukset:**

- Käsiteltävän massan partikkelikoolle ja materiaalille on rajoituksia, mikä saattaa vaikuttaa menetelmän soveltuvuuteen ja käsittelykustannuksiin.
- Runsaasti savea, silttiä ja humusta sisältävät maat pidentävät reaktioaikaa sitomalla haitta-aineita tiukasti.
- Käsiteltävän massan kuivaus saattaa olla tarpeellista sopivan kosteuspitoisuuden saavuttamiseksi. Käsiteltävän massan suuri kosteuspitoisuus pidentää käsittelyaikaa ja lisää energiantarvetta.
- Hiovia ainesosia sisältävä massa (esim. kivinen materiaali) saattaa vahingoittaa käsittelylaitteistoa
- Raskasmetalleja sisältävästä massasta syntyy yleensä kiinteää, jatkokäsittelyä kuten stabilisoimista vaativaa jätettä.
- Räjähdyksvaaran vuoksi voi hapellisissa olosuhteissa suoritettavassa termodesorptiossa haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuus käsiteltävässä materiaalissa olla korkeintaan 2-3 painoprosenttia.
- Käsitellyn materiaalin loppusijoittamiselle voidaan antaa rajoituksia.
- Pohjaveden pinnan alapuolisen maan kaivaminen on vaikeaa. Lisäksi aiheutuu riski pohjaveden (lisä)pilaantumisesta. Mikäli pilaantunut alue ulottuu pohjaveden pinnan alapuolelle tulee tarvittaessa järjestää pohjaveden pumppaus ja käsittely.

**Käsittelykustannukset:**

Greensoil Oy 300-550 mk/t

Savatererra Oy: hiekka ja moreenimaat 250- 400 mk / tn, muut + 100 mk / tn

**Käsittelyn kesto:** nopea

**Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:**

Greensoil Oy:llä on Turussa Topinojan kaatopaikka-alueella termodesorptioperiaatteella toimiva pilaantuneen maan käsittelylaitos. Lupaehtojen mukaisesti laitoksessa voidaan käsitellä öljy- ja PAH-yhdisteillä pilaantuneita maita korkeintaan 30 000 t/vuosi. PAH-yhdisteiden pitoisuuden on oltava alle 10 000 mg/kg. Halogenoituja yhdisteitä sisältäviä massoja ei ole lupa käsitellä ja raskasmetallien pitoisuuksien tulee alittaa pilaantuneen maaperän arvioinnissa käytettävät raja-arvot. Käsitellyt massat sijoitetaan pääsääntöisesti tavanomaisen jätteen kaatopaikalle. Mikäli käsiteltäväksi kuitenkin otetaan maamassoja, joiden raskasmetallipitoisuudet ylittävät raja-arvot, tulee maat käsittelyn jälkeen stabiloida. Laitoksella voidaan käsitellä termisesti myös öljyhiilivetyjen adsorboimiseen käytettyjä aktiivihiihiisuodattimia (20 t/vuosi). Laitoksella on toimintaseisokki kylmimpänä vuodenaikana, mutta sillä on maiden välivarastointikenttä, joten maita voidaan vastaanottaa jatkuvasti. Kerrallaan voidaan varastoida 5000 t maata.

Savatererra Oy: llä on siirrettävä laitteisto, jossa maa puhdistetaan tulistetun höyryn ( 250 – 600 C ) avulla. Laitteisto voidaan siirtää pilaantuneelle alueelle. Laitteisto vaatii 25\*35 m alueen toimiessaan. Savaterralla on myös pilaantuneidenmaiden vastaanottoalue Pornaisissa. Vuonna 2002 vastaanottoalueita on useampia. Käsittelykapasiteetti on 20 – 40 tn/h. Koetoimintavaiheessa olevassa laitteistossa on käsitelty öljy-yhdisteillä pilaantuneita maita, mutta tavoitteena on laajentaa käsittelyn soveltuvuutta myös muihin haitta-aineisiin.

**Lisätietoja:****Kirjallisuus:**

- Anderson, W.C. (ed.) 1993. Thermal desorption. Innovative site remediation technology, vol 6. WASTECH, American Academy of Environmental Engineers. USA. Useita sivunumerojaksoja.
- Federal Remediation Technologies Roundtable. 2001. Thermal desorption. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide Version 3.0. Www-dokumentti, saatavissa [http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4\\_29.html](http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_29.html)

**Yritykset:**

- Greensoil Oy
- Savatererra Oy

## 14. Kiinteytys / stabilointi

on site (in situ, ex situ)

Solidification/stabilization, s/s, waste fixation

Periaate:

Päinvastoin kuin useimmissa kunnostusmenetelmissä kiinteytys/stabilointi -menetelmissä ei käsiteltävän materiaalin haitta-ainepitoisuutta pyritä pienentämään, vaan haitta-aineiden kulkeutumista ja leviämistä ympäristöön ja siten niiden haitallisuutta vähennetään sitomalla ne maa-ainekseen. Menetelmät voivat perustua sekä fysikaalisiin että kemiallisiin ilmiöihin.

Kiinteytys ja stabilointi ovat läheisiä termejä ja usein niitä käytetään synonyymeinä. Kiinteytyksellä kuitenkin tarkoitetaan prosesseja, joissa sideaine kapseloi haitta-aineet estäen niiden kulkeutumisen. Stabiloinnilla tarkoitetaan prosesseja, joilla haitta-aineiden aiheuttamaa riskiä pienennetään muuntamalla ne vähemmän liukoiseen, kulkeutuvaan tai toksiseen muotoon. Käsiteltävän materiaalin fysikaalista olomuotoa ei välttämättä muuteta.

Kiinteytyksessä/stabiloinnissa tyypillisesti pilaantuneeseen maahan lisätään sideainetta kuten sementtiä, bitumia (sementti- ja bitumistabilointi, ks. tarkemmin alla), kalkkia, bentoniittia, silikaatteja tai orgaanisia polymeerejä. Myös teollisuuden jätteitä ja sivutuotteita, esimerkiksi lentotuhka tai masuunikuona, hyödyntäviä kiinteytys/stabilointi -menetelmiä on viime aikoina kokeiltu. Koska pilaantuneiden maamassojen ominaisuudet vaihtelevat kohteittain, on ennen kiinteytyksen/stabiloinnin suorittamista poikkeuksetta etsittävä kullekin maamassalle sopiva sideaineiden sekoitussuhde eli tehtävä reseptointi. Lisäksi kiinteytetylle/stabiloidulle massalle on tehtävä liukoisuustesti, jolla varmistetaan, että haitta-aineita ei liukene yli sallitun määrän. Reseptointi ja liukoisuustestin suorittaminen voivat olla aikaa vieviä ja niille on hyvä varata 0,5-1 vuotta. Itse kiinteytys/stabilointi -prosessi on nopea.

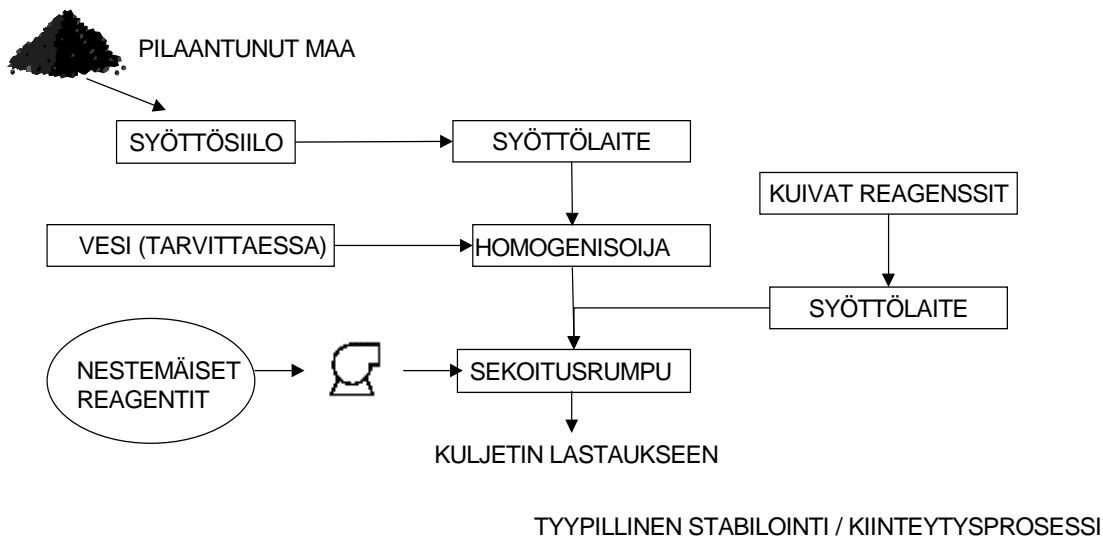
Yleensä kiinteytys/stabilointi suoritetaan on site tai ex situ, mutta myös in situ menetelmiä on kehitetty. Kiinteytys/stabilointi -menetelmiä voidaan käyttää ainoana käsittelymenetelmänä tai muiden menetelmien yhteydessä. Esimerkiksi termisessä käsittelyssä tai pesussa voi syntyä kiinteytettäväksi/stabiloitavaksi soveltuvia massoja. Kiinteytettyä/stabiloitua materiaalia voidaan mm. sideaineesta riippuen käyttää esimerkiksi tie- tai kaatopaikkarakenteissa.

Epäorgaanisilla sideaineilla tapahtuva kiinteytys/stabilointi soveltuu parhaiten epäorgaanisia haitta-aineita kuten raskasmetalleja, asbestia ja epäorgaanisia syanideja sisältäville hiekka- tai soramaille. Bitumistabilointi soveltuu haihtumattomille orgaanisille haitta-aineille ja kationisen emulsion ansiosta myös happamille jätteille.

Muita sovellutuksia:

- **vitriifikaatio** (vitrification / molten glass)

vitriifikaatio on terminen käsittelyprosessi, jossa haitta-aineet sidotaan lasimaiseen muotoon. Vitriifikaatioprosessit voivat perustua sähköiseen, termiseen tai plasmareaktioon. Menetelmällä on USA:ssa lähinnä stabiloitu ydinjätteitä. Energianlähteenä on käytetty ydinvoimaloiden ylijäämäenergiaa. Vitriifikaatio ei ole käytössä Suomessa.



<b>Soveltuvuus:</b>													
<p><b>Orgaaniset haitta-aineet:</b> - riippuu sideaineesta</p> <p><b>Epäorgaaniset haitta-aineet:</b> - Raskasmetallit - Asbesti - Epämetallit - Syanidit (epäorgaaniset)</p>	<p><b>Maaperä:</b></p> <table> <tr><td>- Hiekka</td><td>x</td></tr> <tr><td>- Siltti</td><td>x</td></tr> <tr><td>- Savi</td><td>x</td></tr> <tr><td>- Moreeni</td><td>x</td></tr> <tr><td>- Orgaaninen maa (multa, turve)</td><td>x</td></tr> <tr><td>- Sedimentti</td><td>x</td></tr> </table>	- Hiekka	x	- Siltti	x	- Savi	x	- Moreeni	x	- Orgaaninen maa (multa, turve)	x	- Sedimentti	x
- Hiekka	x												
- Siltti	x												
- Savi	x												
- Moreeni	x												
- Orgaaninen maa (multa, turve)	x												
- Sedimentti	x												
<p><b>Menetelmän tekniset rajoitukset/haittapuolet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Stabiloidulle massalle tulee tehdä liukoisuustesti. Epäorgaanisille aineille on käytössä hollantilainen diffuusiokoe NEN 7345. Orgaanisten haitta-aineiden stabiloinnin testaamisen ongelmana on, ettei niille soveltuvaa liukoisuustestiä ole.</li> <li>- Ympäristötekijät voivat vaikuttaa liukoisuuteen pitkällä aikavälillä</li> <li>- Eräissä menetelmissä käsiteltävän massan tilavuus kasvaa huomattavasti (-&gt;2-kertaiseksi)</li> <li>- Tietty haitta-aineet eivät sovellu käsiteltäväksi yhdessä. Menetelmän soveltuvuus ja sopiva 'sideaineresepti' testattava yleensä tapauskohtaisesti.</li> <li>- Eräät aineet kuten alumiini ja ammonium voivat reagoida emäksisen sideaineen kanssa aiheuttaen räjähdysvaaran. Syanidit voivat puolestaan happamien sideaineiden kanssa reagoidessaan muodostaa myrkyllisiä kaasuja.</li> <li>- Kylmissä olosuhteissa on varmennettava myös stabiloidun/kiinteitetyn massan pakkasenkestävyys.</li> <li>- Menetelmän pitkäaikaista suorituskykyä ei ole testattu monille haitta-aineille / haitta-aineyhdistelmille.</li> <li>- Stabilointi voidaan periaatteessa suorittaa myös in situ. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin laadunvarmennus mm. stabiloidun massan tasaisuuden suhteen. In situ -käsittelyssä voi myös helposti jäädä esimerkiksi tiiviydeltään muuta materiaalia heikompia saumakohtia.</li> <li>- Pohjaveden pinnan alapuolisen maan kaivaminen on vaikeaa. Lisäksi aiheutuu riski pohjaveden (lisä)pilaantumisesta. Mikäli pilaantunut alue ulottuu pohjaveden pinnan alapuolelle tulee tarvittaessa järjestää pohjaveden pumppaus ja käsittely.</li> </ul>													
<p><b>Käsittelykustannus:</b> suoritustavasta riippuen noin 150-350 mk/t</p>													
<p><b>Käsittelyn kesto:</b> nopea, sekoitussuhteen reseptointi voi olla aikaa vievä</p>													
<p><b>Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:</b></p> <p>Suomessa käytössä bitumi- ja sementtistabilointi, ks. tarkemmin alla. Näiden lisäksi Nordic Envicon Oy stabiloi kemiallisesti mm. kyllästämöalueiden CCA-yhdisteillä (kromi, kupari ja arseeni) lievästi pilaantuneita massoja. Stabiloidut massat on sijoitettu kaatopaikalle.</p>													
<p><b>Lisätietoja:</b></p> <p><b>kirjallisuus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anderson, W.C. (ed.) 1994. Stabilization/solidification. Innovative site remediation technology, vol 4. WASTECH, American Academy of Environmental Engineers. USA. Useita sivunumerojaksoja.</li> <li>• FRTR. 2001. Solidification/stabilization. Www-dokumentti, saatavilla <a href="http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_10.html">http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_10.html</a></li> </ul> <p><b>yrietykset</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nordic Envicon Oy</li> <li>• Lemminkäinen</li> <li>• Lohja Rudus</li> <li>• Ekokem</li> </ul>													

**14a. Bitumistabilointi**  
Bituminization*on site, ex situ, (in situ)***Periaate:**

Menetelmässä pilaantunut maa-aines sekoitetaan bitumiin, joka kapseloi haitta-aineet estäen niiden kulkeutumisen. Bitumi voi olla kuumaa bitumiemulsiota tai vaahdotettua bitumia. Suomessa on käytössä kylmäasfalttitekniikkaan perustuva bitumistabilointimenetelmä.

Esikäsitelyn avulla voidaan maasta poistaa esim. haihtuvia yhdisteitä, joille bitumistabilointi ei sovellu. Myös runsaasti savea, humusta tai kiviä sisältävää maata voidaan esikäsitellä murskaamalla tai seulomalla.

Bitumistabilointi voidaan suorittaa *ex situ* tai *in situ*, riippuen pilaantuneen maakerroksen paksuudesta. Stabiloitua bitumia voidaan käyttää rakennemateriaalina esim. kenttä rakenteissa.

**Soveltuvuus:****Orgaaniset haitta-aineet:**

- keskiraskaat ja raskaat öljyhiilivedyt
- kreosoottijy
- ei VOC-yhdisteitä

**Epäorgaaniset haitta-aineet:**

- raskasmetallit

**Maaperä:**

- Hiekka x
- Siltti x
- Savi (x)
- Moreeni x
- Orgaaninen (turve, multa) (x)
- Sedimentti (x)

**Menetelmän tekniset rajoitukset:**

- Soveltuu parhaiten karkearakeiselle ja kuivalle maa-ainekselle.
- Märkä maa-aines tulee esikäsitellä esim. kuivattamalla tai kalkitsemalla.
- Ei sovellu runsaasti savea tai humusta sisältävälle maalle. Runsaasti kiviä, humusta tai savea sisältävä maa voidaan esikäsitellä seulomalla tai murskaamalla.
- Ei sovellu helposti haihtuville yhdisteille. Haihtuvat yhdisteet voidaan esikäsitellä esimerkiksi katalyyttisen polton avulla.
- Soveltuvuus testattava laboratoriokeuin kohdekohtaisesti.

**Käsittelykustannukset:** noin 200-350 mk/t**Käsittelyn kesto:** nopea, sekoitussuhteen reseptointi ja liukoisuustestien tekeminen voivat olla aikaa vieviä.**Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:**

Lemminkäinen Oy käyttää kylmäasfalttitekniikkaan perustuvaa bitumistabilointia (Ekostab B). Menetelmällä on kunnostettu mm. Vainikkalan junaonnettomuuden vuoksi aiheutunut raakaöljyllä pilaantunut maaperä. Ennen stabilointia maasta poistettiin haihtuvia yhdisteitä, jotka käsiteltiin katalyyttisellä poltolla. Stabiloitu massa käytettiin konttialueen ja tien päällystyksen rata-alueella.

**Lisätietoja:**

kirjallisuus

- vrt. edellä

yritykset

- Lemminkäinen Oy

**14b. Sementtistabilointi, ekobetonointi** *on site, ex situ*  
Cement stabilization

**Periaate:**

Sementtistabiloinnissa pilaantunut maa-aines sekoitetaan sementin, veden ja lisäaineiden kanssa massaksi, joka kovettuessaan estää haitta-aineiden leviämisen. Sementin korkea pH vähentää erityisesti useimpien metallien liukenemistä. Sementin lisäksi seokseen voidaan tarvittaessa lisätä myös muita seosaineita, esim. lentotuhkaa, savea tai kalkkia. Pilaantunut maa esikäsitellään tarvittaessa murskaamalla ja/tai seulomalla.

Sementtistabilointi on yleisimmin käytetty stabilointi/kiinteytysmenetelmä, joka otettiin alunperin käyttöön ydinjätteiden käsittelymenetelmäksi 1950-luvulla. Sementtistabilointi soveltuu pääasiassa epäorgaanisille haitta-aineille kuten raskasmetalleille ja tyypillisiä kunnostuskohteita ovat arseenilla, kromilla ja kuparilla pilaantuneet kyllästämöalueet. Menetelmä voidaan käyttää myös orgaanisilla yhdisteillä pilaantuneiden maiden kunnostamiseen, mutta ongelmana on mm. sopivien liukoisuustestien puuttuminen. Maaperän korkea orgaanisen aineksen määrä vaikeuttaa menetelmän käyttöä.

Stabilointi on yleensä mahdollista siirrettävän laitteiston avulla kunnostettavassa kohteessa tai sen välittömässä läheisyydessä. Stabiloitua maata voidaan hyödyntää rakennemateriaalina esim. kaatopaikkojen kenttä- ja tierakenteissa tai kompostikentillä.

**Soveltuvuus:**

**Orgaaniset haitta-aineet:**

- soveltuu periaatteessa, ongelmana liukoisuustestin puuttuminen

**Epäorgaaniset haitta-aineet:**

- raskasmetallit kuten lyijy, arseeni, kupari, kromi ja nikkeli  
- asbesti

**Maaperä:**

- Hiekka	x
- Siltti	x
- Savi	x
- Moreeni	x
- Orgaaninen aines	x
- Sedimentti	x

**Menetelmän tekniset rajoitukset:**

- ks. edellä yleiset stabiloimiseen liittyvät rajoitukset
- Ei sovellu haihtuville orgaanisille haitta-aineille.
- Ei sovellu runsaasti orgaanista materiaalia sisältävälle maaperälle. Maa voidaan tarvittaessa esikäsitellä.
- Maaperän suuri kosteuspitoisuus nostaa käsittelykustannuksia, sillä maa joudutaan esikäsittelemään kuivaamalla tai käyttämään runsaasti sideainetta.
- Jokaiselle kohteelle on laadittava oma 'reseptinsä'.

**Käsittelykustannukset:**

- Virkkalan käsittelyasema, vastaanottomaksu 300-400 mk/t
- on site -käsittely alk. 150 mk/t

**Käsittelyn kesto:** nopea, sekoitussuhteen reseptointi ja liukoisuustestin suorittaminen voi olla aikaa vievä

**Soveltuvuus ja käyttö Suomessa:**

Suomessa pilaantuneen maan sementtistabilointia tarjoavat mm. Lohja Rudus Oy (Ekobetoni), Ekokem Oy ja Lemminkäinen Oy (Ekostab C).

**Lisätietoja:**

kirjallisuus

- vrt. edellä

yrietykset

- Ekokem Oy
- Lemminkäinen Oy
- Lohja Rudus Oy

## 15. Eristys Encapsulation

*in situ, ex situ*

Periaate:

*Eristyksellä estetään maaperän sisältämien haitta-aineiden leviäminen ja kulkeutuminen ympäristöön. Eristäminen ei poista haitta-aineita maaperästä ja ne muodostavat edelleen tietyn ympäristöriskin esimerkiksi mikäli eristysrakente jostain syystä vaurioituu.*

Menetelmässä pilaantunut maa-aines eristetään ympäristöstä *in situ* tai se siirretään ja käsitellään *ex situ* niin, että sade-, pinta- ja pohjaveden pääsy pilaantuneeseen maahan estyy. Samalla rajoitetaan ilman pääsyä kohteeseen ja vähennetään jätteen tai haitta-aineen reagoitua hapen kanssa. Myös eläinten ja ihmisten mahdollisuus joutua suoraan kosketukseen haitta-aineen tai jätteen kanssa estyy. Eristettävän kohteen pinta- ja pohjavesien hallinta on osa kunnostusratkaisua. Eristysratkaisuja käytetään myös kaatopaikoilla estämään jätteiden sisältämien haitta-aineiden kulkeutuminen ympäristöön.

Eristäminen soveltuu parhaiten haitta-aineille, joiden liikkuvuus on alhainen. Yleisimmin eristystä käytetään läjitettävissä maita, jotka ovat pilaantuneet epäorgaanisilla aineilla kuten metalleilla ja syanideilla. Menetelmä soveltuu myös asbestilla pilaantuneille maa-aineksille.

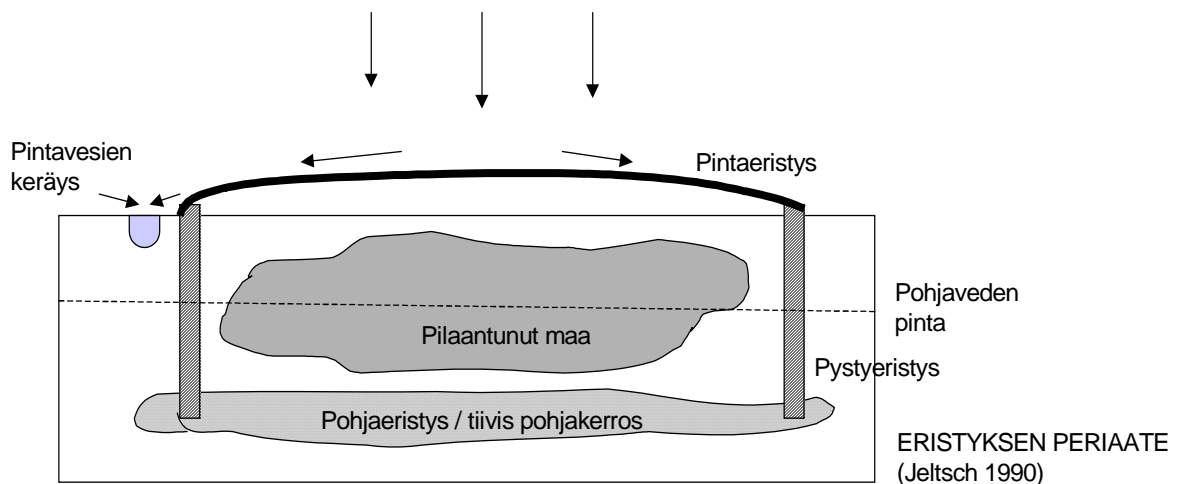
Eristysmateriaaleina voidaan käyttää joko luonnon- tai synteettisiä materiaaleja. Viime aikoina eristämässä on alettu hyödyntää myös teollisuudessa syntyviä jätemateriaaleja (ks. alla).

Pintaeristyksessä tarkoitus on ensisijaisesti estää sadevesien imeytyminen maa-ainekseen. Pintaeristystä käytetään kohteissa, joissa sadevesi muuten huuhtoisi mukaansa haitta-aineita ja suotovesi kuormittaisi ympäristöä haitallisesti. Pystyeristyksen tehtävänä on eristää pilaantunut kohde maaperässä virtaavasta ja pohjavedestä sekä estää likaisen suotoveden pääsy ympäristöön. Pystyeristys myös rajoittaa kaasupäästöjä, muuttaa pohjaveden virtausta ja pinnan tasoa sekä lisää maan vakavuutta. Ellei pilaantuneen maaperän alla ole tiivistä ja eristävää maakerrosta tai kallioperää, voidaan pohjamaan tiiveyttä parantaa tai tehdä tiivis pohja keinotekoisesti, mikäli se on haitta-aineiden kulkeutumisen kannalta perusteltua. Pohjamaan tiivistys tehdään usein injektioimalla maahan sementtiä tai bentoniittia.

Jos pilaantunut maa kaivetaan läjitettäväksi *ex situ*, tulee käsittelypaikalle pääsääntöisesti tehdä pohjaeristys, joka estää pilaantuneen maa-aineksen joutumisen kosketukseen pohjaveden kanssa.

### Yleisimmät eristemateriaalit Suomessa

- sementti
- bentoniitti tai bentoniitin ja maa-aineksen seos
- savi
- muovista tai kumista valmistetut geomembraanit
- kivihillen lentotuhka (esim. kaatopaikkojen pintarakenteissa)
- kuituliete metsäteollisuudesta (kaatopaikkojen pintarakenteet, kehitystyö pohjarakenteiden osalta käynnissä)
- siistausjäte metsäteollisuudesta (kaatopaikkojen pintarakenteet)





<b>Soveltuvuus:</b>	
<p><b>Orgaaniset haitta-aineet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- soveltuvuus rajoitettu, esim. klooratut liuottimet saattavat läpäistä eristeet</li> </ul> <p><b>Epäorgaaniset haitta-aineet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- raskasmetallit</li> <li>- asbesti</li> <li>- epämetallit</li> <li>- syanidit</li> </ul>	<p><b>Maaperä:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hiekka x</li> <li>- Siltti x</li> <li>- Savi x</li> <li>- Moreeni x</li> <li>- Orgaaninen maa (multa, turve) x</li> <li>- Sedimentti x</li> </ul>
<p><b>Menetelmän tekniset rajoitukset:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Menetelmä soveltuu huonosti orgaanisille, erityisesti helposti kulkeutuville haitta-aineille.</li> <li>- Ei sovellu haihtuville yhdisteille.</li> <li>- Eristäminen ei poista haitta-aineita maaperästä, vaan se rajoittaa niiden kulkeutumista.</li> <li>- Eristemateriaalien tulee kestää murtumattomana kauan, jopa satoja vuosia. Pitkäaikaiskestävyyden testaaminen on kuitenkin vaikeaa.</li> <li>- Biologinen toiminta, kemialliset reaktiot ja fysikaaliset prosessit voivat vaikuttaa eristeen tiivyyteen.</li> <li>- Eriste tulee olla rakennettu siten, ettei se ole kasvien juurien ulottuvissa.</li> <li>- Suotovesien tarkkailu on järjestettävä.</li> <li>- Pohjaveden pinnan alapuolisen maan kaivaminen on vaikeaa. Lisäksi aiheutuu riski pohjaveden (lisä)pilaantumisesta. Mikäli pilaantunut alue ulottuu pohjaveden pinnan alapuolelle tulee tarvittaessa järjestää pohjaveden pumppaus ja käsittely.</li> </ul>	
<p><b>Käsittelykustannus:</b> vaihtelee tapauskohtaisesti</p>	
<p><b>Käsittelyn kesto:</b> nopea, huom! Ei poista haitta-aineita ja eristerakenteen tulee kestää tiiviinä kauan, periaatteessa ikuisesti.</p>	
<p><b>Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:</b></p> <p>Yleisesti käytetty menetelmä mm. kaatopaikkarakenteissa. Pilaantuneiden maiden kohteissa eristystä on käytetty ja tullaan käyttämään mm. entisten kaatopaikka- ja ampumarata-alueiden kunnostamisessa.</p>	
<p><b>Lisätietoja:</b></p> <p>kirjallisuus</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Jeltsch, U. 1990. Saastuneiden maa-alueiden kunnostusmenetelmät</li> <li>• Järvinen, H.-L. 1996. Saastuneiden maiden tutkiminen ja kunnostus.</li> <li>• Mroueh, U.-M., Mäkelä, M., Wahlström., M., Kauppila, J., Sorvari, J., Heikkinen, P., Salminen, R., Juvankoski, M. &amp; Tammirinne, M. 2000. Sivutuotteet maarakenteissa. Käyttökelpoisuuden osoittaminen. Tekes, Teknologiakatsaus 93/2000.</li> <li>• Mäkelä, H. &amp; Höynälä, H. Sivutuotteet ja uusiomateriaalit maarakenteissa. Materiaalit ja käyttökohteet. Tekes, Teknologiakatsaus 91/2000.</li> </ul> <p>yritykset</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Suomessa useita eristerakenteita urakoivia yrityksiä</li> </ul>	

**16. Kaatopaikkakäsittely**  
Excavation, Retrieval, and Off-Site Disposal

*ex situ*

**Periaate:**

*Pilaantunut maa-aines kaivetaan ja välivarastoidaan tai sijoitetaan kaatopaikalle.*

Pilaantuneen maa-aineksen kaivua ja sijoittamista kaatopaikalle ei voida varsinaisesti pitää maaperän kunnostusmenetelmänä. Erityisesti lievästi pilaantuneiden maiden osalta se on kuitenkin Suomessa yleisin käsittelymenetelmä.

Maata kaivettaessa tulee ottaa huomioon ympäristö- ja työsuojelulliset tekijät. Haitta-aineiden leviäminen ympäristöön mm. haihtumisen, pölyämisen tai vesien mukana on estettävä. Mikäli kohteessa on runsaasti haihtuvia yhdisteitä, on niiden pääsy ilmakehään estettävä esim. peittämällä kaivualue suodattimin varustetulla ilmastetulla teltalla, jonka sisällä työskenneltäessä on työsuojeluun kiinnitettävä erityistä huomiota. Hengityssuojaimia ja muuta suojavarustusta on tarpeen mukaan käytettävä. Pilaantuneen maa-aineksen kaivu liittyy kaatopaikkakäsittelyn lisäksi myös moneen muuhun kunnostusmenetelmään.

Kaivettu pilaantunut maamassa luokitellaan jätteeksi ja sen sijoittamista säädellään etenkin jätelain ja valtioneuvoston kaatopaikkapäätöksen perusteella. Sääöksillä pyritään estämään haitallisten aineiden leviäminen ympäristöön ja ympäristö- ja terveyshaittojen aiheutuminen.

Toisinaan pilaantuneita massoja joudutaan välivarastoimaan ennen niiden lopullista käsittelyä. Pääsääntöisesti välivarastointia pitäisi kuitenkin välttää. Yli 3 vuoden (vuoden 2002 alusta 1 vuoden) pituinen välivarastointi katsotaan kaatopaikkasijoittamiseksi ja sijoitusalueen tulee täyttää kaatopaikoille asetetut vaatimukset. Pilaantuneen maan välivarastointiin muulla kuin oman kiinteistön alueella vaaditaan ympäristölupa.

**Soveltuvuus:**

**Orgaaniset haitta-aineet:**

- lähes kaikki

**Epäorgaaniset haitta-aineet:**

- lähes kaikki

**Maaperä:**

- Hiekka	x
- Siltti	x
- Savi	x
- Moreeni	x
- Orgaaninen maa	x
- Sedimentti	x

**Menetelmän tekniset rajoitukset:**

- Kaatopaikkasijoittaminen ei varsinaisesti ole maaperän kunnostusmenetelmä
- Kaatopaikkoja, niiden perustamista ja hoitoa sekä niille sijoitettavia jätteitä koskevat yleiset määräykset on annettu jätelaissa 1072/93 ja valtioneuvoston päätöksessä no. 861/1997
- Kaatopaikan rakenteiden tulee olla sellaiset, että haitta-aineiden leviäminen ympäristöön ei ole mahdollista.
- Suotovesien tarkkailu ja tarvittaessa talteenotto ja käsittely on järjestettävä.
- Mm. klooratut liuottimet saattavat ainakin pitkällä aikavälillä läpäistä eristekerrokset.
- Haihtuvien yhdisteiden sijoittaminen kaatopaikoille
- Pohjaveden pinnan alapuolisen maan kaivaminen on vaikeaa. Lisäksi aiheutuu riski pohjaveden (lisä)pilaantumisesta. Mikäli pilaantunut alue ulottuu pohjaveden pinnan alapuolelle tulee tarvittaessa järjestää pohjaveden pumppaus ja käsittely.

**Käsittelykustannukset:**

vaihtelee kaatopaikoittain, yleensä alle 200 mk/t

**Käsittelyn kesto:** nopea (HUOM! ei varsinainen käsittelymenetelmä)

**Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:**

Maamassojen kaivu ja loppusijoittaminen kaatopaikoille on yleisin lievästi pilaantuneiden maiden käsittelytapa. Useimmilla kaatopaikoilla on lupa ottaa vastaan lievästi pilaantuneita maita ja niitä on sijoitettu yhdyskuntajätteen joukkoon ja käytetty mm. yhdyskuntajätteen peitemassoina.

Maamassojen, joiden haitta-ainepitoisuudet ylittävät raja-arvot, vastaanotto tavanomaisen jätteen kaatopaikoille on yleensä kielletty. Erityisjätteen kaatopaikkoja, joilla on lupa vastaanottaa voimakkaasti pilaantuneita maita on mm. Outokummussa. Useilla teollisuuslaitoksilla on teollisuusjätteen kaatopaikkoja, joille voidaan sijoittaa esimerkiksi teollisuusalueilla tapahtuneiden onnettomuuksien yhteydessä syntyneitä pilaantuneita maamassoja.

Kaatopaikkasijoitus on usein kustannuksiltaan edullisin käsittelyvaihtoehto erityisesti lievästi pilaantuneiden maiden osalta, minkä vuoksi sitä on käytetty runsaasti. Voimakkaasti pilaantuneiden maamassojen kaatopaikkakäsittely on huomattavasti kalliimpaa, sillä erityisjätteen kaatopaikoilla vaatimukset mm. eristekerrosten tiivyyden ja suotovesien käsittelyn osalta ovat huomattavasti tiukemmat kuin yhdyskuntajätteen kaatopaikoilla. Myös erityisjätteen kaatopaikan hoito- ja tarkkailukustannukset ovat usein korkeammat kuin yhdyskuntajätteen kaatopaikoilla.

**Lisätietoja:****Kirjallisuus:**

- Järvinen H.-L. ym. 1996. Saastuneiden maiden tutkiminen ja kunnostus. Teknologian kehittämiskeskus, Tekes. Teknologia katsaus 47. Helsinki.
- Nikulainen, V. & Kalevi, K. 1997. Saastuneen maa-alueen tutkimuksen ja kunnostuksen työsuojeluopas. Suomen ympäristökeskus. Ympäristöopas 17. Helsinki.
- Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista no. 861/1997

**Yritykset:**

- maan kaivua suorittavat useat urakoitsijat
- kaatopaikat

## 17. Pump&treat, pohjaveden pumppaus käsiteltäväksi Pump-and-treat

on site, ex situ

### Periaate

*Pilaantunut pohjavesi pumpataan maan pinnalla sijaitsevaan käsittelylaitokseen puhdistettavaksi, jonka jälkeen vesi palautetaan takaisin maaperään tai johdetaan pintavesiin tai jatkokäsittelyyn kunnalliselle jätevedenpuhdistamolle. Veden käsittelymenetelmä riippuu sen sisältämistä haitta-aineista.*

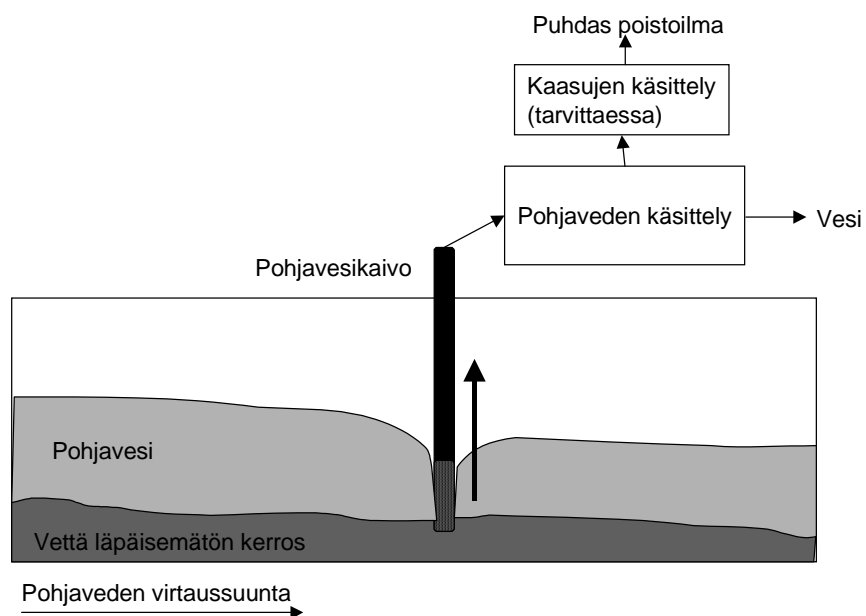
Pump&treat -menetelmät ovat yleisimpiä pilaantuneen pohjaveden käsittelymenetelmiä ja vasta viime vuosina on uusia pohjaveden käsittelymenetelmiä kehitetty korvaamaan näitä. Pump&treat -menetelmiä käytetään estämään haitta-aineiden leviäminen pohjaveden mukana laajemmalle alueelle (suojapumppaus) ja poistamaan haitta-aineet pohjavedestä. Olennaisena osana kunnostustyötä on haitta-aineiden lähteen poistaminen. Tämä saattaa vaatia esimerkiksi pilaantuneiden maamassojen vaihtoa tai kunnostamista muilla menetelmillä.

Pump&treat -menetelmien käyttö vaatii hyvää kohteen geohydrologisten olosuhteiden tuntemista. Väärin sijoitetuilla pohjavesikaivoilla ei haitta-aineita saada poistettua, vaan pilaantunut alue saattaa levitä. Pump&treat -menetelmät eivät sovellut haitta-aineille, jotka sitoutuvat tiukasti maapartikkeleihin eivätkä kulkeudu pohjaveden mukana.

Pilaantunut pohjavesi voidaan käsitellä usealla eri menetelmällä. Eri käsittelymenetelmien soveltuvuus kuhunkin kohteeseen riippuu erityisesti haitta-aineesta. Eri menetelmiä voidaan myös yhdistää. Yksi yleisimmistä on orgaanisia yhdisteitä adsorboiva **aktiivihiiisuodatus**, joka soveltuu erityisesti hiilivetyjen, puolihaittuvien yhdisteiden ja räjähteiden käsittelyyn. Muita pohjaveden käsittelymenetelmiä on muun muassa:

- **kiintoaineen erotus** (partikkeleihin sitoutuvat haitta-aineet kuten metallit)
- **saostus / selkeytys** (haitalliset metallit, radionuklidit),
- **bioreaktorit** (biologisesti hajoavat yhdisteet kuten hiilivedyt),
- **strippaus eli haihdutus** (helposti haihtuvat yhdisteet),
- **gravitaatioerotukset** (öljyt, klooratut liuottimet),
- **kemiallinen hapetus** (orgaaniset yhdisteet, mm. BTEX, klooratut liuottimet)
- **ioninvaihto** (esim. metalli-ionit, muut epäorgaaniset ionit kuten nitraatti, sulfaatti, syanidit, orgaaniset hapot)

Pumpattu vesi voidaan toimittaa myös sellaisenaan käsiteltäväksi ongelmajätelaitokselle.



PUMP&TREAT -MENETELMIEN PERIAATE

<b>Soveltuvuus:</b>	
<b>Orgaaniset haitta-aineet:</b> - riippuen käsittelymenetelmästä  <b>Epäorgaaniset haitta-aineet:</b> - riippuen käsittelymenetelmästä	<b>Maaperä:</b> - Hiekka x - Siltti (x) - Savi (x) - Moreeni x - Orgaaninen maa x - Sedimentti x
<b>Menetelmän tekniset rajoitukset:</b> - Pohjaveden pumppaus ei sovellu haitta-aineille, joiden sitoutumiskapasiteetti on suuri. Pohjaveden pumppaus ei aina poista kaikkia haitta-aineita. - Käsittelyaika on yleensä pitkä (vuosia) ja käsittelykustannukset voivat muodostua suuriksi. - Tärkeää kunnostamisessa on haitta-aineiden lähteen poistaminen. - Mikäli käsittelyä suunniteltaessa epäonnistutaan haitta-aineiden kulkeutumisen mallintamisessa, kulkeutuvat ne pohjavesikaivojen ohitse ja pilaantuneen pohjaveden alue laajenee. - Pohjaveden pumppaus ei sovellu pohjavesiesiintymille, joissa pohjaveden virtausnopeus on alhainen (alle 5-10 cm/s). - Pump&treat -menetelmien asennus- ja käyttökustannukset ovat suhteellisen korkeat. Lisäkustannuksia seuraa esim. käytetyn aktiivihiihlen tai muiden syntyvien jätteiden käsittelystä. - Pohjavesikaivojen tukkeutuminen biologisen toiminnan tai kemiallisen saostumisen (esim. rauta ja mangaani) vuoksi on yleinen ongelma, joka voi häiritä käsittelyä. Pohjavesikaivojen tulee olla asennettu siten, että ne voidaan tarvittaessa puhdistaa.	
<b>Käsittelykustannukset:</b> 10 000 - 15 000 mk /kk (yksi yhtenäinen alue, noin 10 aaria)	
<b>Käsittelyn kesto:</b> Keskipitkä - pitkä	
<b>Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:</b>  Pohjaveden käsittely pump&treat -menetelmillä on Suomessakin ollut vallitseva menettelytapa. Kunnostusta suorittaa useat yritykset, joista useimmat käyttävät aktiivihiihli-suodatukseen perustuvaa käsittelymenetelmää. Vain harvat yritykset käsittelevät kloorattuja liuottimia.  Myös Suomessa on havaittu pohjaveden pump&treat -käsittelyn heikkoudet: käsittelyn pitkäkestoisuus ja lopputuloksen epävarmuus.	
<b>Lisätietoja:</b>  <b>kirjallisuus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Federal Remediation Technologies Roundtable. 2001. Ground Water Pumping. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide Version 3.0. Www-dokumentti. Saatavissa: <a href="http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_58.html">http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_58.html</a></li> <li>Suthersan, S.S. 1997. Remediation engineering, design concepts. Pump and treat systems. CRC Lewis Publishers. Boca Raton. Pp. 265-299.</li> </ul> <b>yrietykset</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Doranova Oy: useita menetelmiä</li> <li>Ekokem: useita menetelmiä</li> <li>Nordic Envicon Oy: aktiivihiihli-suodatus, bioreaktori</li> <li>IP-tekniikka: aktiivihiihli-suodatus</li> <li>PTI-Soil: aktiivihiihli-suodatus</li> </ul>	

## 18. Pohjaveden ilmastus

*in situ*

Air sparging, air stripping, In-situ air sparging, in-situ aeration

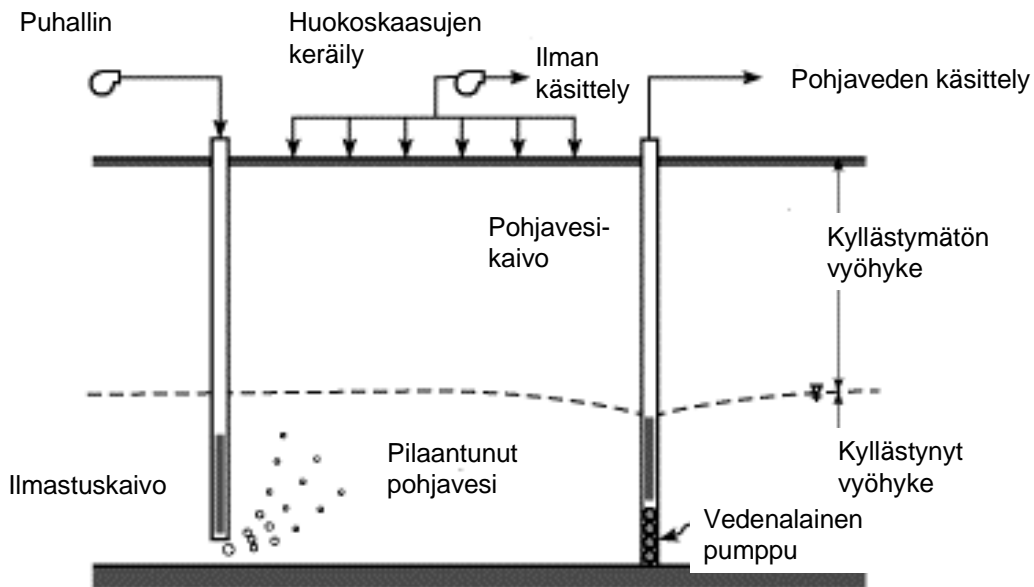
### Periaate:

*Pohjavettä ilmastetaan, jotta haihtuvien yhdisteiden poistuminen maaperästä nopeutuisi.*

Pohjaveden ilmastus eli stripping on *in situ* menetelmä, jossa paineistettua ilmaa injektoidaan pilaantuneeseen pohjavesikerrokseen. Ilmakuplat kulkeutuvat maahuokosten välissä pysty- ja vaakasuuntaisesti irrottaen maassa ja pohjavedessä olevia haitta-aineita, jotka kulkeutuvat ilmakuplien tai jatkuvan ilmavirran mukana ylös kohti maan kyllästymätöntä kerrosta. Injektoitavan ilman virtausnopeus pidetään suurena, jotta pohjaveden ja maaperän välinen kontakti kasvaisi ja haitta-aineiden irtoaminen tehostuisi. Pohjaveden ilmastuksen ohella käytetään usein huokosilmatekniikkaa poistamaan helposti haihtuvia orgaanisia yhdisteitä kyllästymättömästä kerroksesta.

Pohjaveden ilmastus voi myös lisätä pohjavedessä ja maassa tapahtuvaa biologista hajoamista. Ilman ohella pohjaveteen voidaan lisätä metaania tehostamaan kloorattujen hiilivetyjen kometaabolista hajoamista. Myös ravinteiden avulla voidaan biohajoamista tehostaa. Lyhyellä aikavälillä haihtuminen on kuitenkin yleensä haitta-aineita merkittävämmiin poistava tekijä kuin biohajoaminen. Kun menetelmä on suunniteltu biohajoamisen tehostamiseen voidaan sitä kutsua myös termillä biosparging. Tähdittäessä biologisen hajotuksen tehostamiseen injektoitavan ilman virtausnopeus pidetään suhteellisen alhaisena.

Pohjaveden ilmastus on ollut käytössä 1980-luvun puolivälistä lähtien. Sen etuna on mm. suhteellisen alhaiset käyttökustannukset. *in situ* -menetelmänä sitä voidaan käyttää myös rakennetulla alueella. Pohjaveden ilmastukseen liittyy kuitenkin useita epävarmuustekijöitä kuten kohdekohtaiset monimutkaiset maaperän fysikaaliset, kemialliset ja biologiset prosessit, jotka vaikuttavat haitta-aineiden kulkeutumiseen ja hajoamiseen.



POHJAVEDEN ILMASTUKSEN TOIMINTAPERIAATE  
(FRTR 2001)

<b>Soveltuvuus:</b>	
<b>Orgaaniset haitta-aineet:</b> - helposti haihtuvat orgaaniset yhdisteet - polttoaineet  <b>Epäorgaaniset haitta-aineet:</b> - ei sovellu	<b>Maaperä:</b> - Hiekka x - Siltti (x) - Savi (x) - Moreeni (x) - Orgaaninen maa (multa, turve) x - Sedimentti -
<b>Menetelmän tekniset rajoitukset:</b>  - Maaperän kyllästyneessä kerroksessa ilman virtaus saattaa olla epätasaista, mikä aiheuttaa kaasujen epätasaista kulkeutumista. - Haitta-aineiden syvyysuuntainen jakautuminen ja kohteen geologiset ominaisuudet on tunnettava ja otettava huomioon ilmastussysteemiä suunniteltaessa. - Ilman injektointikaivojen sijainti ja syvyys tulee suunnitella kohdekohtaisesti olosuhteisiin sopiviksi - Maaperän heterogeenisyys saattaa aiheuttaa sen, että injektoitu ilma ei ulotu kaikkiin pilaantuneen kohteen osiin. Tämä heikentää puhdistumistulosta. - Menetelmä ei sovellu hyvin tiiviiseen maaperään. - Menetelmä ei sovellu haihtumattomille ja biohajoamattomille haitta-aineille. - Kohteessa tai sen välittömässä läheisyydessä olevat rakennukset ja rakenteet voivat olla vaarassa maaperän rakenteessa tapahtuvien muutosten vuoksi. - Kontrollioimattomat haihtuvat haitta-aineet voivat kulkeutua rakennusten kellarikerrokseen tms.	
<b>Käsittelykustannus:</b> noin 20 000 - 40 000 mk/kk (yksi yhtenäinen alue, noin 10 aaria)	
<b>Käsittelyn kesto:</b> keskipitkä - pitkä (yleensä muutamia vuosia)	
<b>Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:</b>  Melko yleinen menetelmä mm. polttoaineilla pilaantuneiden huoltoasematonttien kunnostuksessa.	
<b>Lisätietoja:</b>  kirjallisuus <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anderson, W.C. (ed.) 1994. Vacuum vapor extraction. Innovative site remediation technology, vol 8. WASTECH, American Academy of Environmental Engineers. USA. Useita sivunumerojaksoja.</li> <li>• Suthersan 1997. Remediation engineering, design concepts. CRC Lewis Publishers. Boca Raton. Pp. 273-279.</li> </ul> yritykset <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ekokem Oy</li> <li>• Doranova Oy</li> </ul>	

## 19. Reaktiiviset seinämät

*in situ*

Reactive barriers, permeable (reactive) walls/barriers/gates, treatment walls

### Periaate

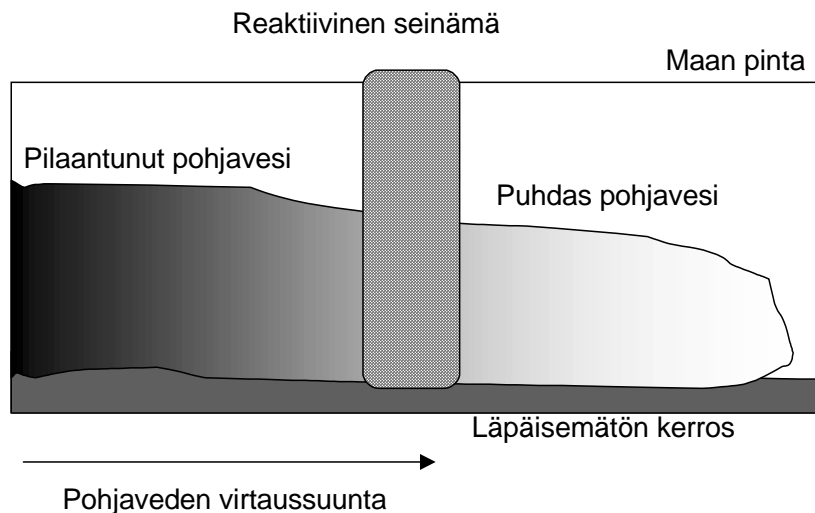
*Pilaantunut pohjavesi virtaa maaperään asennetun reaktiivisen seinämän läpi. Seinämässä tapahtuvat kemialliset, fysikaaliset ja/tai biologiset prosessit poistavat tai hajottavat haitta-aineita tai muuttavat niitä ympäristölle haitattomampaan muotoon.*

Perinteiset 'pump&treat' -menetelmät on useissa tapauksissa todettu epäsoviviksi pilaantuneen pohjaveden käsittelymenetelmiksi, sillä pohjaveden puhdistuminen on hidasta. Tällöin käsittelyajat muodostuvat pitkiksi ja käsittelykustannukset kohoavat. Reaktiiviset seinämät ovat suhteellisen uusia ja monessa suhteessa lupaavia pilaantuneen pohjaveden käsittelymenetelmiä. Niiden soveltuvuus on osoitettu kenttämittakaavassa useille yksittäisille haitta-aineille ja suhteellisen helposti käsiteltäville haitta-aineseoksille. Reaktiivisten seinämien käyttöön liittyy kuitenkin useita rajoituksia, ks. tarkemmin alla.

Reaktiivinen seinämä asennetaan kohtisuorasti pohjaveden virtaussuuntaa vasten. Vesi virtaa seinämän läpi passiivisesti. Seinämässä tapahtuvien reaktioiden vaikutuksesta haitta-aineet joko pidättyvät siihen tai hajoavat. Seinämän reaktiivinen täyte sekoitetaan usein huokoisen aineen kuten soran kanssa. Seinämän ollessa ympäröivää ainesta huokoisempaa hakeutuu pohjavesi helposti kulkeutumaan sen lävitse. Pohjaveden virtausta suuntaamaan voidaan rakentaa myös ohjausseinämiä.

Täytemateriaali valitaan kohteen ominaisuuksien ja haitta-aineen perusteella. Reaktiivisissa seinämissä tapahtuvia prosesseja voivat olla adsorptio (esim. aktiivihiileen tai zeoliittiin), saostuminen (esim. liukoisen liijyn saostaminen pohjaveden pH-arvoa nostamalla), hapettuminen tai pelkistyminen ja kemiallinen tai biologinen hajoaminen sekä näiden yhdistelmät. Reaktiivinen seinämä voi myös luovuttaa happea ja ravinteita luoden maaperässä tapahtuvalle biologiselle hajotukselle paremmat olosuhteet.

Reaktiivisten seinämien tavoitteena on estää haitta-aineiden kulkeutuminen pois pilaantuneelta alueelta. Käsittely on yleensä pitkäkestoinen ja sen etuna ovat alhaiset käyttökustannukset. USAssa on arvioitu, että menetelmää käytettäessä kunnostuskustannukset ovat vähintään 50 % alhaisempia kuin perinteisissä pump&treat -menetelmissä. *in situ* -menetelmänä ei reaktiivisten seinämien käyttö myöskään vaadi maan kaivutyötä ja kohdetta voidaan käyttää muuhun tarkoitukseen kunnostustyön ollessa käynnissä.



REAKTIIVISEN SEINÄMÄN TOIMINTAPERIAATE



<b>Soveltuvuus:</b>											
<p><b>Orgaaniset haitta-aineet:</b> - esim. polttoaineet ja klooratut liuottimet</p> <p><b>Epäorgaaniset haitta-aineet:</b> - liukoissa muodossa olevat raskasmetallit (esim. Pb, Cr)</p>	<p><b>Maaperä:</b></p> <table> <tr> <td>- Hiekka, sora</td> <td>x</td> </tr> <tr> <td>- Siltti</td> <td>x</td> </tr> <tr> <td>- Savi</td> <td>(x)</td> </tr> <tr> <td>- Moreeni</td> <td>x</td> </tr> <tr> <td>- Orgaaninen maa</td> <td>x</td> </tr> </table>	- Hiekka, sora	x	- Siltti	x	- Savi	(x)	- Moreeni	x	- Orgaaninen maa	x
- Hiekka, sora	x										
- Siltti	x										
- Savi	(x)										
- Moreeni	x										
- Orgaaninen maa	x										
<p><b>Menetelmän (tekniset) rajoitukset:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Menetelmän onnistunut soveltaminen edellyttää perusteellista tietoa kohteen geologisista ominaisuuksista, pohjaveden virtaussuunnista ja haitta-aineista sekä niiden pitoisuuksista.</li> <li>- Menetelmä soveltuu parhaiten huokoiselle hiekka- tai soramaalle, jossa pohjavesi ei ole liian syvällä. Menetelmä soveltuu huonosti tai ei lainkaan tiiviille maalle, jossa pohjaveden virtaus on vähäistä.</li> <li>- Kallioperän ruhjeet tai vastaavat geologiset muodostumat vaikuttavat pohjaveden virtaukseen. Haitta-aineet saattavat myös keräytyä ruhjeeseen, jolloin ne eivät kulkeudu pohjaveden mukana reaktiiviseen seinämään.</li> <li>- Seinämän puhdistusteho saattaa heikentyä ajan mittaan, jolloin reaktiivinen materiaali tulee vaihtaa.</li> <li>- Seinämä saattaa tukkeutua mm. raudan ja mangaanin saostumisen vuoksi.</li> <li>- Myös biologiset prosessit tai muiden aineiden kemiallinen saostuminen saattavat heikentää seinämän läpäisevyyttä.</li> <li>- Ei sovellu yhdisteille, jotka sitoutuvat tiukasti maapartikkeleihin eivätkä kulkeudu pohjaveden mukana.</li> <li>- Käsiteltävän kerroksen paksuus rajoittuu syvyyteen, jolle reaktiivisen seinämän asentaminen on teknisesti mahdollista.</li> <li>- Seinämän puhdistustehoa on tarkkailtava.</li> </ul>											
<p><b>Käsittelykustannukset:</b> vaihtelevat kohdekohtaisesti, ei kokemusta Suomesta. Usein alhaisemmat kuin perinteisten pump&amp;treat-menetelmien kustannukset.</p>											
<p><b>Käsittelyn kesto:</b> Pitkä</p>											
<p><b>Käyttö ja soveltuvuus Suomessa:</b></p> <p>Reaktiivisia seinämiä käyttäen ei Suomessa ole tehty yhtään pilaantuneen pohjaveden kunnostusta. Menetelmä kuitenkin periaatteessa soveltuu myös Suomeen, ottaen huomioon yllä esitetyt menetelmään liittyvät rajoitukset.</p> <p>Reaktiivisten seinämien avulla voidaan esimerkiksi estää haitta-aineiden leviäminen pois teollisuusalueelta, jonka pohjavesi on pilaantunut, mutta joka kuitenkin jatkaa edelleen toimintaansa. Toiminnan jatkuessa ei kohteen maaperän ja pohjaveden puhdistaminen ole välttämättä kannattavaa.</p>											
<p><b>Lisätietoja:</b></p> <p>kirjallisuus</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Federal Remediation Technologies Roundtable. Passive/reactive treatment walls. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide Version 3.0. Www-dokumentti, saatavilla: <a href="http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_46.html">http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_46.html</a></li> <li>• Suthersen, S.S. 1997. Remediation engineering, design concepts. <i>In situ</i> reactive zones. CRC Lewis Publishers. Boca Raton. Pp. 215-236.</li> <li>• U.S. EPA. 1996. A citizen's guide to treatment walls. Www-dokumentti, saatavilla: <a href="http://www.clu-in.org/products/citguide/walls.htm">http://www.clu-in.org/products/citguide/walls.htm</a></li> </ul> <p>yrietykset</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menetelmää ei ole sovellettu Suomessa. Doranova Oy:llä on valmiudet menetelmän soveltamiseen.</li> </ul>											

*Julkaisija*  
Suomen ympäristökeskus

*Julkaisun päivämäärä*  
elokuu 2001

*Tekijä(t) (toimielimestä: nimi, puheenjohtaja, sihteeri)*  
Riina Penttinen

*Julkaisun nimi (myös ruotsinkielinen)*  
Maaperän ja pohjaveden kunnostus - yleisimpien menetelmien esittely

Sanering av mark och grundvatten - presentation av de vanligaste metoderna

*Julkaisun laji* *Toimeksiantaja*  
*Toimielimen asettamispv*

*Julkaisun osat*

saatavissa: <http://www.vyh.fi/palvelut/julkaisu/elektro/symon227/symon227.htm>

*Tiivistelmä*

Suomessa on noin 20 000 pilaantuneeksi epäiltyä maa-aluetta, joista useista aiheutuu myös pohjaveden pilaantumista. Jos pilaantuminen aiheuttaa riskin ihmisen terveydelle tai ympäristölle, tulee alue kunnostaa. Nykyisin erilaisia maaperän ja pohjaveden kunnostusmenetelmiä on tarjolla runsaasti. Niiden soveltuvuus vaihtelee kohteittain riippuen mm. pilaantumisen aiheuttaneesta haitta-aineesta, käsiteltävän alueen laajuudesta ja maaperän ominaisuuksista.

Tässä julkaisussa esitellään yleisimpiä Suomessa käytössä olevia maaperän ja pohjaveden kunnostusmenetelmiä. Menetelmistä on esitetty niiden pääperiaate, soveltuvuus eri haitta-aineille ja maaperätyypeille, menetelmien tekniset rajoitukset, arvioidut käsittelykustannukset ja käsittelyn kesto. Lisäksi on kerrottu menetelmän käytöstä ja soveltuvuudesta Suomessa ja annettu viitteitä lisätietojen etsimistä varten. Yleisimpien menetelmien ohella on esitetty eräitä menetelmiä, jotka ovat käytössä muualla maailmassa, mutta voisivat soveltua myös Suomeen.

Tämän julkaisu soveltuu käytettäväksi parhaiten silloin, kun tehdään alustavaa valintaa käyttökelpoisten menetelmien kesken. Lopullinen menetelmän valinta vaatii kohdekohtaisia selvityksiä pilaantuneella alueella.

*Asiasanat (avainsanat)*

maaperän saastuminen, pohjavesi, vesien saastuminen, kunnostus, menetelmät,

*Muut tiedot*

*Sarjan nimi ja numero*  
Suomen ympäristökeskuksen moniste 227

*ISBN*  
952-11-0943-2

*ISSN*  
1455-0792

*Kokonaissivumäärä*  
51

*Kieli*  
suomi

*Hinta*  
maksuton

*Luottamuksellisuus*  
julkinen

*Jakaja*  
Suomen ympäristökeskus  
PL 140, 00251 Helsinki  
puh. 09-403 00 100  
telefax 09-403 00 190  
sähköposti: [neuvonta.syke@vyh.fi](mailto:neuvonta.syke@vyh.fi)

*Kustantaja*  
Suomen ympäristökeskus  
Ympäristökuormitusyksikkö  
PL 140, 00251 Helsinki

*Utgivare*  
Finlands miljöcentral

*Utgivningsdatum*  
augusti 2001

*Författare (uppgifter om organet: namn, ordförande, sekreterare)*  
Riina Penttinen

*Publikation (även den finska titeln)*  
Sanering av mark och grundvatten - presentation av de vanligaste metoderna

Maaperän ja pohjaveden kunnostus - yleisimpien menetelmien esittely

*Typ av publikation*

*Uppdragsgivare*

*Datum för tillsättandet av organet*

*Publikationens delar*

<http://www.vyh.fi/palvelut/julkaisu/elektro/symon227/symon227.htm>

*Referat*

I Finland finns det ca. 20 000 markområden som möjligen är förorenade. På många områden har också grundvattnet förorenats. Om föroreningen förorsakar risk för människans hälsa eller miljön, måste områden saneras. Nuförtiden finns en stor mängd olika saneringsmetoder på marknaden. Deras lämplighet varierar från plats till plats beroende bl.a. på det miljöfarliga ämnet, jordarten och omfattning av området som skall behandlas.

I denna publikation presenteras de vanligaste saneringsmetoderna för mark och grundvatten som är i bruk i Finland. Metodernas principer, lämplighet för olika kontaminanter och jordmån, tekniska begränsningar, uppskattade kostnader och saneringstiden presenteras. Också användningen i Finland och lämplighet för Finlands förhållanden presenteras. Förutom de vanligaste metoderna presenteras också några metoder som är i bruk utomlands och som skulle kunna vara lämpliga också i Finland.

Denna publikation kan användas bäst om man gör ett preliminärt val bland användbara metoder. Det slutliga valet av metod kräver att det förorenade områden först undersöks grundligt.

*Sakord (nyckelord)*

förorening av mark, vattenförorening, grundvatten, restaurering, metoder

*Övriga uppgifter*

*Seriens namn och nummer*

Suomen ympäristökeskuksen moniste 227

*ISBN*

952-11-0943-2

*ISSN*

1455-0792

*Sidantal*

51

*Språk*

Finska

*Pris*

-

*Sekretessgrad*

offentlig

*Distribution*

Finlands miljöcentral, kundservice  
PB 140, 00251 Helsinki  
tel. 09-403 00 100  
fax. 09-403 00 190  
e-mail: [neuvonta.syke@vyh.fi](mailto:neuvonta.syke@vyh.fi)

*Förlag*

Finlands miljöcentral  
Miljöbelastning  
PB 140, 00251 Helsingfors  
FINLAND

ISBN 952-11-0943-2  
ISSN 1455-0792