



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

BIOSTIMULAATIO JA SEN TOIMIVUUS SUOMESSA

Elli-Noora Törrönen

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Biostimulaatio ja sen toimivuus Suomessa

Elli-Noora Törrönen

Oulun yliopisto, ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, 28 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Katharina Kujala

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää biostimulaation toimivuutta Suomen olosuhteissa. Työssä keskitytään öljyhiilivetyjen puhdistamiseen biostimulaation avulla. Lisäksi pyritään selvittämään, kuinka kylmät olosuhteet vaikuttavat biostimulaation toimivuuteen. Kandidaatintyö suoritetaan kirjallisuuskatsauksena.

Alussa perehdytään öljyhiilivetyihin ja niiden aiheuttamiin terveys- ja ympäristöriskeihin. Tämän jälkeen tarkastellaan pilaantuneen maaperän puhdistukseen liittyvää lainsäädäntöä ja yleisimpiä käytössä olevia kunnostusmenetelmiä Suomessa. Biostimulaatioon perehdytään ensin erikseen, jonka jälkeen käsitellään sen toimivuutta Suomessa. Työn loppupuolella tarkastellaan kolmea Case- kohdetta, joista yksi on Etelämantereelta ja kaksi Suomesta. Case-kohteiden avulla pyritään selvittämään menetelmän toimivuutta luonnonolosuhteissa. Työn lopussa käsitellään lyhyesti kestävästä kunnostamisesta ja riskinhallintaa.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella biostimulaatiolla on hyvät edellytykset toimia öljyhiilivetyjen puhdistuksessa Suomen olosuhteissa. Puhdistukseen tulee varata riittävästi aikaa ja optimoida ravinteiden sekä hapen saanti. Tarkasteltujen Case-kohteiden eroavaisuudet tuovat kuitenkin haasteita tulosten käyttöön ja yleistettävyyteen. Kohdekohtaista avointa tietoa tarvittaisiin enemmän selvien johtopäätösten tekemiseen.

Asiasanat: Biostimulaatio, Öljyhiilivedyt, Suomi

ABSTRACT

Biostimulation and its functionality in Finland

Elli-Noora Törrönen

University of Oulu, Degree Programme of Environmental Engineering

Bachelor's degree 2023, 28 pp.

Supervisor at the university: Katharina Kujala

The aim of this bachelor's thesis is to examine the functionality of biostimulation in Finnish conditions. This study will focus on the remediation of petroleum hydrocarbons. In addition, the aim of this study is to find out how cold conditions affect the functionality of biostimulation. This bachelor's thesis is conducted as a literature review.

The beginning of this study focuses on petroleum hydrocarbons and the health and environmental risks they pose. This will be followed by a review of legislation on the cleaning of contaminated soil and the most used remediation methods in Finland. At first biostimulation is studied on its own and after that the functionality of biostimulation in Finland is examined. Three case studies are examined at the end of this work. One of the case studies is from Antarctic and two of them are from Finland. The practicality of biostimulation in natural conditions is examined with the help of case studies. Sustainable rehabilitation and risk management will also be discussed at the end of this work.

According to the literature review biostimulation is well placed to function in the remediation of petroleum hydrocarbons under Finnish conditions. Sufficient time should be provided for remediation and the nutrient and oxygen intake should be optimized. Differences between the case studies examined pose challenges for the use and generalization of results. More target specific open information would be needed to draw clear conclusions.

Keywords: Biostimulation, Petroleum hydrocarbons, Finland

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	5
2 Öljyhiilivedyillä pilaantunut maaperä	6
2.1 Öljyhiilivedyt	6
2.2 Riskit ympäristölle ja terveydelle.....	6
2.2.1 Kulkeutuminen	6
2.2.2 Ekologiset riskit	7
2.2.3 Terveysriskit	8
2.3 Lainsäädäntö	8
2.3.1 Ympäristönsuojelulaki.....	8
2.3.2 Muu lainsäädäntö	9
2.4 Yleisimmät käytössä olevat puhdistusmenetelmät.....	10
3 Biostimulaatio	12
3.1 Biostimulaatio puhdistusmenetelmänä.....	12
3.2 Öljyhiilivetyjen puhdistaminen.....	13
3.3 Case: Carlini asema, Etelämantere.....	14
4 Biostimulaatio Suomessa	15
4.1 Menetelmän toimivuus ja rajoitteet.....	15
4.2 Käyttökohteet	15
4.2.1 Case: Lahti, Suomi.....	16
4.2.2 Case: Iisalmi, Suomi.....	17
4.3 Kestävä kunnostaminen	19
4.4 Kestävä riskinhallinta.....	20
5 Yhteenveto	21
LÄHDELUETTELO	23

KÄSITTEET JA TERMIT

Bioaugmentointi	Tiettyjen kasvatettujen mikrobien lisääminen pilaantuneeseen maaperään.
Biosaatava	Haitta-aineet ovat eliöille käyttökelpoisessa muodossa.
Haitta-aine	Terveys- tai ympäristöhaittaa mahdollisesti aiheuttava aine.
In situ	Maaperän tai pohjaveden kunnostamista paikan päällä ainetta siirtämättä.
JASKA-hanke	Öljynsuojarahaston hanke, jonka yhteydessä on tutkittu ja kunnostettu öljyllä pilaantuneita, riskialueilla sijaitsevia kiinteistöjä.
MATTI- tietojärjestelmä	Maaperän tilan tietojärjestelmä sisältää tietoa pilaantuneista maa-alueista ja pohjavesistä.
Off site	Haitta-aineet siirretään ja käsitellään kunnostettavan alueen ulkopuolella.
On site	Haitta-aineet siirretään maan pinnalle käsiteltäväksi kunnostuskohteessa.
PIMA	Maaperä tai pohjavesi, joka on pilaantunut tai pilaantuneeksi epäilty.
RSM-menetelmä	Vastepintamenetelmässä vasteen riippuvuutta siihen vaikuttavista tekijöistä pyritään arvioimaan tekijöiden polynomimuotoisen funktion avulla.

1 JOHDANTO

Maaperän pilaantuminen on ollut Suomessa merkittävä huolenaihe jo pitkään, minkä vuoksi maaperän pilaantumista on kartoitettu 1980-luvulta lähtien. Tähän mennessä Maaperän tilan tietojärjestelmään (MATTI) on kerätty tietoa noin 29 000 pilaantuneeksi epäilyltä, todetulta tai kunnostetulta maa-alueelta. Suomessa on tehty viimeisen neljänkymmenen vuoden aikana yli 7000 pilaantuneen maaperän kunnostuspäätöstä. (Suomen ympäristökeskus 2022) Pilaantuneen maaperän puhdistuspäätöksissä vuosina 2014 ja 2017 mainituista haitta-aineista merkittävimpiä olivatkin öljyhiilivedyt ja oksygenaatit (Jylhä ym. 2019 s.20).

Suomessa pilaantuneen maaperän puhdistusta ohjaavat useat lait, säädökset, strategiat sekä toimenpideohjelmat ja oppaat (Ympäristöministeriö 2014 s. 19). Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista (214/2007) määrittelee kynnys- ja ohjearvot haitta-aineiden pitoisuuksille maaperässä (Ympäristöministeriö 2014 s. 28-29). Haitta-aineet voivat kulkeutua ympäristössä kauas lähtöpaikastaan ja aiheuttaa riskejä ympäristölle ja terveydelle, minkä vuoksi maaperän puhdistaminen ja riskinarviointi on tärkeää (Reinikainen 2007 s.153).

Pilaantuneen maaperän puhdistaminen on toteutettu Suomessa perinteisesti massanvaihdoilla, mikä kuormittaa merkittävästi ympäristöä. Vähitellen kestävä riskinhallinta ja kestävien kunnostusmenetelmien käyttö ovat lisänneet merkitystään. (Jylhä ym. 2021 s.3) Kiertotaloutta edistävien puhdistusratkaisujen yleistymisestä kertovat in situ menetelmien käytön lisääntyminen ja maa-ainesten tehokkaampi hyötykäyttö. (Pyy ja Jylhä 2020 s. 24-25) Biostimulaatio eli tehostettu biologinen puhdistus on yksi mahdollinen in situ kunnostusmenetelmä öljyhiilivedyillä pilaantuneen maaperän puhdistuksessa. Biostimulaatiossa maaperää puhdistetaan tehostamalla sen luontaisten mikrobien toimintaa. (Penttinen 2001 s. 14-15)

2 ÖLJYHIILIVEDYILLÄ PILAANTUNUT MAAPERÄ

2.1 Öljyhiilivedyt

Öljyhiilivedyt ovat yleensä hydrofobisia monimuotoisia hiilivetyseoksista muodostuvia yhdisteitä, jotka voivat lisäksi sisältää happea, typpeä, rikkiä ja metalleja sisältäviä orgaanisia yhdisteitä. Öljyhiilivetyjen rakenne ja koko vaihtelee merkittävästi muun muassa hiiliketjun pituuden ja hiilten välisten sidosten takia. (Sillanpää 2007 s. 7, Wu ym. 2016 s.1) Öljyhiilivedyt vaikuttavat maaperän fyysisiin, kemiallisiin ja ekologisiin ominaisuuksiin (Wu ym. 2019 s.1).

Öljyhiilivedyt voidaan jakaa hiiliketjun pituuden perusteella bensiinijakeisiin/kevyisiin jakeisiin (C_5-C_{10}), keskitisleisiin ($>C_{10}-C_{21}$) ja raskaisiin jakeisiin ($>C_{21}-C_{40}$). Valtioneuvoston asetuksessa maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista (Vna 214 /2007, PIMA-asetus) on määritelty kynnykset ja ohjearvot öljyhiilivetyjen kevyille jakeille, keskitisleille ja raskaille jakeille sekä kokonaispitoisuudelle. (Reinikainen 2007 s. 150)

2.2 Riskit ympäristölle ja terveydelle

2.2.1 Kulkeutuminen

Öljyhiilivetyjen kulkeutumiseen maaperässä vaikuttavat sekä öljyhiilivetyjen, että maaperän ominaisuudet (Newell ym. 1995 s. 3). Mikäli öljyhiilivetyjen päästöt ovat hetkellisesti todella suuria tai jatkuvat pitkään, voi pohjaveden yläpuolelle syntyä vapaa öljyfaasi. Vapaa öljyfaasi voi tämän jälkeen edelleen kulkeutua maaperässä. Öljyhiilivedyt voivat myös kulkeutua sade- ja valumavesien mukana pilaantuneen alueen ulkopuolelle veteen liuenneena, kiintoaineeseen sitoutuneena tai liukenemattomana faasina. (Reinikainen 2007 s. 151-153)

Öljyhiilivetyjen raskaat jakeet eivät liukene lähes ollenkaan pohjaveteen, minkä vuoksi ne eivät yleensä aiheuta laajaa pohjaveden pilaantumista. Öljyhiilivetyjen kevyet jakeet sen sijaan voivat aiheuttaa suuren pohjaveden pilaumisriskin, koska niiden kulkeutuminen maaperässä ja pohjavedessä on todennäköisempää. Erillisten öljyfaasien aiheuttamat riskit tulee lisäksi arvioida erikseen. (Reinikainen 2007 s.158)

2.2.2 Ekologiset riskit

Öljyhiilivetyjen aiheuttamat ekologiset riskit riippuvat niiden rakenteesta sekä liukoisuudesta. Kevyet ja vesiliukoiset öljyhiilivedyt ovat ympäristön kannalta haitallisempia kuin raskaat ja niukkaliukoiset öljyhiilivedyt. Maaperän mikrobien kyky hajottaa vesiliukoisia ja kevyitä öljyhiilivetyjä on kuitenkin parempi kuin niiden kyky hajottaa raskaita ja niukkaliukoisia öljyhiilivetyjä. (Reinikainen 2007 s.154)

Ekologisten riskien arvioinnissa voidaan hyödyntää öljyhiilivetyjakeille määritettyjä ekologisia viitearvoja. Öljyhiilivetyjen aiheuttamia riskejä maaperässä ei voida arvioida pelkästään kokonaispitoisuuden perusteella, koska eri öljyhiilivety yhdisteiden biosaatavuudessa on merkittäviä eroja. Maaperän eliöiden herkkyydessä öljyhiilivedyille voi myös olla huomattavia eroja. Maaperän olosuhteet vaikuttavat eliöiden altistumiseen sekä öljyhiilivetyjen vaikutuksiin eliöissä. (Verbruggen 2004 s.13, Reinikainen 2007 s.154-155)

Tutkimusten mukaan öljyhiilivetyjen pitoisuuksilla on merkittävä rooli mikrobikantojen rakenteen, ekologisten toimintojen ja lajien monimuotoisuuden muuttamisessa. Korkea öljyhiilivetyypilaantuma (öljyhiilivetyypitoisuus > 20 000 mg/kg) esimerkiksi lisäsi Proteobakteerien runsautta, kun taas keskiverto öljyhiilivetyypilaantuma (öljyhiilivetyypitoisuus 4000–20 000 mg/kg) lisäsi Aktinobakteerien määrää. (Gao ym. 2022 s. 1)

2.2.3 Terveysriskit

Maaperän öljyhiilivedyille altistuminen voi tapahtua suoraan maaperästä kosketuksen, nielemisen tai sisäänhengityksen vuoksi tai välillisesti ilman tai veden kautta (Park & Park 2010 s. 7). Öljyhiilivetyjen tapauksessa terveysriskit voidaan yleensä käsitellä kahdessa eri kategoriassa, joko syöpäriskeinä tai muina terveysriskeinä. Maaperän hiilivetyjen pitoisuuksien perusteella voidaan arvioida niiden aiheuttama syöpäriski. Muut terveysriskit voidaan arvioida öljyhiilivetyjakeiden sekä ei- syöpävaarallisten avainyhdisteiden perusteella. (Reinikainen 2007 s.155)

Merkittävin öljyhiilivetyjen aiheuttama riski terveydelle on sisäilman kautta tapahtuva altistuminen (Reinikainen 2007 s.157). Öljyhiilivetyjen monimuotoisuuden ja niiden sisältämien useiden kemikaalien vuoksi öljyhiilivedyillä on useita tuntemattomia tai epävarmoja terveysvaikutuksia (Marcus 2021 s. 6). Vuotavien öljysäiliöiden on kuitenkin todettu esimerkiksi lisäävän alhaisen syntymäpainon ja ennen aikaisten syntymien todennäköisyyttä vuoden läheisyydessä. (Marcus 2021 s.33)

2.3 Lainsäädäntö

Pilaantuneiden maa-alueiden toimintoja ohjaavat ympäristönsuojelulaki (sis. PIMA-asetus 214/2007), laki vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä, terveydensuojelulaki, jätelaki, maankäyttö- ja rakennuslaki sekä kemikaalilaki. Päätöksentekoa ohjataan lakien lisäksi esimerkiksi erilaisilla strategioilla, toimenpideohjelmilla sekä toiminnan teknistä suunnittelua ja toteutusta edistävillä oppailla. (Ympäristöministeriö 2014 s. 19)

2.3.1 Ympäristönsuojelulaki

Ympäristönsuojelulain (527/2014) tarkoituksena on mm. torjua ympäristön pilaantumista, torjua ympäristövahinkoja sekä poistaa pilaantumisesta aiheutuvia vahinkoja, parantaa ympäristöä pilaavan toiminnan huomioon ottamista ja vaikutusten arviointia (Ympäristönsuojelulaki 527/2014). Ympäristönsuojelulaki on merkittävin ohjauskeino pilaantuneiden alueiden suunnittelu- ja kunnostushankkeissa (Ympäristöministeriö 2014 s. 19).

Edellytykset pilaantuneen alueen riskinarvioinnille määrittelee Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista (214/2007) eli niin kutsuttu PIMA-asetus. PIMA-asetuksessa määritellään maaperän pilaantuneisuuden kynnyks- ja ohjearvot myös öljyhiilivedyille (taulukko 1). Ohjearvot toimivat perustana maaperän pilaantuneisuuden riskinarvioinnissa. (Ympäristöministeriö 2014 s. 28-30, PIMA-asetus 214/2007)

Taulukko 1. Öljyhiilivetyjen Vna 214/2007 mukaiset kynnyks- ja ohjearvot

ÖLJYHIILIVEDYT	Bensiinijakeet	Keskittiseet	Raskaat jakeet	Kokonaispitoisuus
	C ₅ -C ₁₀	>C ₁₀ -C ₂₁	>C ₂₁ -C ₄₀	>C ₁₀ -C ₄₀
Kynnysarvo (mg/kg)	-	-	-	300
Alempi ohjearvo (mg/kg)	100	300	600	-
Ylempi ohjearvo (mg/kg)	500	1000	2000	-

2.3.2 Muu lainsäädäntö

Vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä (1299/2004) säädetyn lain tarkoituksena on turvata, edistää ja ennallistaa pinta- ja pohjavesien sekä Itämeren tilaa niin, että se on alhaisimmillaan hyvä (Laki vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä 1299/2004). Lisäksi valtioneuvoston asetuksissa vesiympäristölle vaarallisista ja haitallisista aineista (1022/2006, VESPA-asetus) ja vesienhoidon järjestämisestä (1040/2006, VEHA-asetus) säädetään pohjaveden haitallisten aineiden päästöjen ennalta ehkäisemisestä ja rajoittamisesta sekä pohjaveden kemiallisen tilan arvioinnista (Ympäristöministeriö 2014 s. 30)

Terveydensuojelulain (763/1994) tavoitteena on terveyden ylläpitäminen ja myötävaikuttaminen sekä sellaisten elinympäristössä esiintyvien tekijöiden torjuminen, vähentäminen ja eliminoiminen, jotka voivat aikaansaada terveyshaittaa (Terveydensuojelulaki 763/1994). Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksissa (422/2014 ja 401/2001) on säädetty yksityiskohtaisemmin talousveden laatuvaatimuksista ja sen valvontaa koskevista tutkimuksista (Ympäristöministeriö 2014 s. 32).

Jätelaki (646/2011) pyrkii vähentämään jätteen määrää ja haitallisuutta sekä ehkäisemään jätteistä ja jätehuollosta johtuvaa uhkaa ja haittaa terveydelle ja ympäristölle. Lisäksi jätelaki edistää kiertotaloutta ja luonnonvarojen kestäväää käyttöä sekä ehkäisee roskaantumista varmistamalla toimivan jätehuollon. (Jätelaki 646/2011) Pilaantunut maaperä ja pilaantumaton maa-aines, joka käytetään varmasti ja lyhyen ajan kuluessa hyödyksi rakentamisessa, on rajattu jätelain ulkopuolelle. (Ympäristöministeriö 2014 s. 32-33)

Maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999) päämääränä on aikaansaada edellytykset hyvälle elinympäristölle sekä myötävaikuttaa ekologisesti, taloudellisesti, sosiaalisesti ja kulttuurillisesti kestäväää kehitystä alueiden käyttöä ja rakentamista järjestämällä (Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999). Kaavoittamisessa ja rakentamisessa on otettava huomioon maaperän pilaantuneisuuden aiheuttamat rajoitteet. (Ympäristöministeriö 2014 s. 33)

Kemikaalilain (599/2013) tarkoituksena on suojella terveyttä ja ympäristöä kemikaalien aikaansaamilta vaaroilta ja haitoilta (Kemikaalilaki 599/2013). Euroopan parlamentti ja neuvosto on antanut REACH-asetuksen 2006/1907/EY, joka koskee muun muassa kemikaalien rekisteröintiä, arviointia, lupamenettelyä ja rajoituksia. Lisäksi Euroopan parlamentti ja neuvosto on antanut CLP-asetuksen 2008/1271/EY aineiden ja seosten luokituksesta, merkinnöistä ja pakkaamisesta. (Ympäristöministeriö 2014 s. 34)

2.4 Yleisimmät käytössä olevat puhdistusmenetelmät

Maaperän puhdistusmenetelmät voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan: in situ, on site ja off site menetelmiin. In situ menetelmällä tarkoitetaan sellaista maaperän puhdistusmenetelmää, jossa maa-ainesta ei siirretä ollenkaan, kun taas on site menetelmässä maa-aines kaivetaan ylös, mutta se käsitellään paikan päällä. Off site menetelmässä maa-aines kaivetaan ylös ja kuljetetaan muualle käsiteltäväksi tai loppusijoitettavaksi. (Penttinen 2001 s. 8)

Massanvaihto on edelleen yleisin pilaantuneen maaperän puhdistusmenetelmä ja sillä suoritettiin Suomessa vuonna 2017 noin 95 % maaperän puhdistuksista (Jylhä ym. 2019 s.25). Massanvaihto on off site menetelmä eli pilaantunut maa-aines kaivetaan ja siirretään muualle käsiteltäväksi tai loppusijoitettavaksi. Haitta-aineiden sijainti syvällä maaperässä tai pohjavedessä rajoittaa massanvaihdon käytettävyyttä puhdistusmenetelmänä, koska tällöin kaivuun ja vesien käsittelyn kustannukset kasvavat huomattavasti. Menetelmän hyötyinä ovat kuitenkin sen nopeus ja minimaalinen jälkitarkkailun tarve. (Laitinen ym. 2022 s. 28-29)

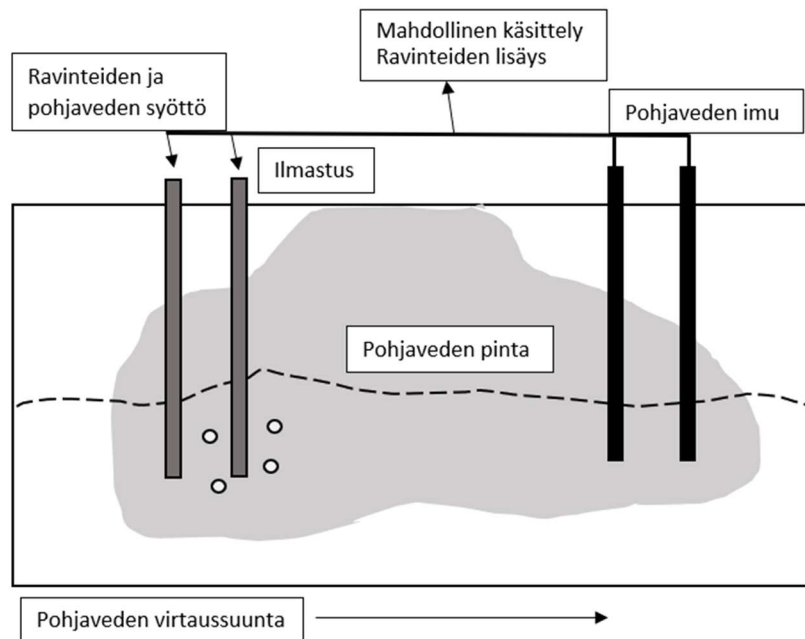
Massanvaihdon jälkeen suosituimpia puhdistusmenetelmiä ovat yleensä in situ menetelmät, joista eniten käytössä ovat huokoskaasukäsittely ja biostimulaatio. Edellä mainittujen menetelmien lisäksi Suomessa käytettyihin in situ menetelmiin sisältyy kemiallinen hapetus. (Jylhä ym. 2019 s.25) Puhdistusmenetelmän valinnassa on otettava huomioon menetelmien soveltuvuus puhdistettaville haitta-aineille. Hapetukseen ja haihtuvuuteen pohjautuvia menetelmiä sovelletaan tavallisesti orgaanisille haitta-aineille, kun taas epäorgaanisten haitta-aineiden puhdistamisessa hyödynnetään yleensä biokertyvyyttä ja liukoisuusominaisuuksia. (Laitinen ym. 2022 s. 25)

Huokoskaasukäsittelyssä haihtuvia yhdisteitä poistetaan pohjavesipinnan yläpuolisesta maaperästä imemällä huokoskaasua alipaineen avulla maaperän huokostilasta. Tällöin maaperään absorboituneiden, liuenneiden ja vapaana olevien haitta-aineiden haihtuminen lisääntyy. Kemiallisessa hapetuksessa haitta-aineita hapetetaan vaarattomiksi tai vähemmän vaarallisiksi hapettimien, katalyyttien ja niiden muodostamien reaktiivisten radikaalien avulla. (Laitinen ym. 2022 s. 27)

3 BIOSTIMULAATIO

3.1 Biostimulaatio puhdistusmenetelmänä

Biostimulaatiossa eli tehostetussa biologisessa puhdistuksessa (kuva 1) haitta-aineiden hajoamista maaperässä tehostetaan optimoimalla maaperän ja pohjaveden olosuhteet luontaiselle mikrobikannalle sopivaksi. Biostimulaatiossa maaperään syötetään elektronin vastaanottajia tai luovuttajia sekä ravinteita. Maaperään syötettävät yhdisteet ja tarvittavat maaperän olosuhteet riippuvat puhdistettavista haitta-aineista. Biostimulaation avulla voidaan puhdistaa orgaanisia yhdisteitä kuten öljyhiilivetyjä, PAH-yhdisteitä ja kloorattuja hiilivetyjä. (Penttinen 2001 s. 14, Laitinen ym. 2022 s. 26)



Kuva 1. Biostimulaation toimintaperiaate, muokattu lähteestä Penttinen 2001.

Biostimulaatiota hyödynnettäessä tulee ottaa huomioon, että puhdistettavien haitta-aineiden tulee olla biosaatavia eli eliöille käyttökelpoisessa muodossa, jotta puhdistus onnistuu mahdollisimman tehokkaasti. Maaperän korkeat haitta-ainepitoisuudet voivat olla myös haitallisia luontaisten mikrobien toiminnalle, minkä vuoksi tehostettu biologinen puhdistus sopii parhaiten alhaisten haitta-ainepitoisuuksien käsittelyyn. (Penttinen 2001 s.14-15, Repo 2008 s.5)

Tehostetun biologisen puhdistuksen käyttö on viisasta silloin, kun maaperän puhdistus voidaan suorittaa pitkällä aikavälillä ja maaperä on puhdistuksen kannalta soveltuvaa esimerkiksi hiekkaista tai orgaanista maa-ainesta. Biostimulaation käyttö on järkevää myös rakennetuilla tai laajasti pilaantuneilla alueilla, missä maaperän kaivaminen ei ole kannattavaa tai mahdollista. Biostimulaatiolla voidaan maaperän puhdistuksen lisäksi puhdistaa samalla käsittelyllä myös pohjavettä, mikä vähentää pohjaveden käsittelystä syntyviä kustannuksia. (Penttinen 2001 s. 14-15)

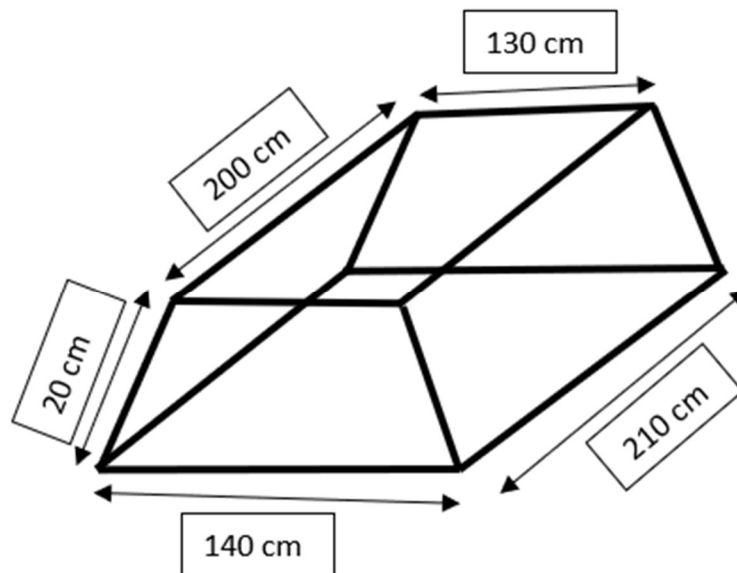
3.2 Öljyhiilivetyjen puhdistaminen

Öljyhiilivetyjen hajottaminen on tehokasta biostimulaatiolla, koska luonnon mikrobit kykenevät käyttämään öljyhiilivetyjä energian lähteenä. Pilaantuneessa maaperässä öljyhiilivetyjä hajottavien mikrobien kanta usein kasvaa, mikä osaltaan nopeuttaa haitta-aineiden hajottamista. Öljyhiilivetyjen hajoamisaika riippuu niiden rakenteesta, koosta sekä biosaatavuudesta. Öljyhiilivety yhdisteiden hajoaminen voi estyä, mikäli ravinteita ei ole riittävästi saatavilla. (Tuomi & Vaajasaari 2004 s.15-16)

Typpi ja fosfori ovat merkittäviä ravinteita pilaantuneen maaperän puhdistuksessa. Yleensä suositeltava hiilen, typen ja fosforin suhde maaperässä on 100/10/1. (Wu ym. 2019 s. 1-2) Jos öljyhiilivetyjen hajottaminen onnistuu toivotulla tavalla, muodostuu lopputuotteina hiilidioksidia tai metaania. Hajoaminen on kuitenkin monesti epätäydellistä, jolloin hajoamisessa syntyneet yhdisteet voivat muodostaa humusta muun orgaanisen aineksen kanssa. (Tuomi & Vaajasaari 2004 s.15-16)

3.3 Case: Carlini asema, Etelämantere

Biostimulaation toimivuuden testaus dieselillä pilaantuneiden maiden puhdistuksessa suoritettiin Carlini asemalla Etelämantereella kesäkuukausien aikana. Testaus suoritettiin On site menetelmänä, jossa puhdistettava maa-aines erotettiin ympäröivästä maaperästä geomembraanien avulla. Kokeessa maa-aines jaettiin kahteen 0,5 tonnin biopaaluun (kuva 2), joista toinen oli kontrollinäyte ja toisessa käytettiin biostimulaatiota kunnostusmenetelmänä. Kenttätestauksessa maa-aines homogenisoitiin ja sitä sekoitettiin testauksen aikana. Puhdistuksen kesto oli 50 päivää, jonka jälkeen tuloksia vertailtiin kontrollinäytteeseen. Typen ja fosforin määrän optimointiin käytettiin laboratorioolosuhteissa määritettyä RSM- menetelmää. (Martínez Álvarez ym. 2017)



Kuva 2. Biopaalujen muoto ja koko (Martínez Álvarez ym. 2017).

Tulosten perusteella huomattiin, että biostimulaatio oli kontrollinäytettä (luontainen biologinen puhdistus) huomattavasti tehokkaampi pienentämään hiilivetyjen pitoisuuksia maaperästä. Luontaisella biologisella puhdistuksella saavutettiin kokeen (50 päivän) aikana 49,54 % puhdistustaso, kun taas biostimulaatiolla saavutettiin 75,79 % puhdistustaso. Testauksen aikana havaittiin, että ravinteiden lisäys oli merkittävässä roolissa vahvistamassa mikrobikantojen kasvua, minkä vuoksi kannat olivat huomattavasti suuremmat biostimuloidussa systeemissä. (Martínez Álvarez ym. 2017)

4 BIOSTIMULAATIO SUOMESSA

4.1 Menetelmän toimivuus ja rajoitteet

Biostimulaatiolla on hyvät edellytykset toimia myös Suomessa, koska se sopii kunnostusmenetelmänä erityisesti hiekkaisille ja orgaanisille maa-aineksille, mutta mahdollisesti myös siltille ja moreenille. Oikein suunniteltuna biostimulaation käyttö kunnostusmenetelmänä aiheuttaa vain vähäisiä häiriöitä ympäristöön kunnostuksen aikana. Biostimulaatio soveltuu kunnostusmenetelmänä orgaanisten haitta-aineiden puhdistamiseen. (Penttinen 2001 s. 14-15) Vuosina 2014 ja 2017 öljyhiilivedyt ja oksygenaatit olivat edelleen merkittävimpiä maaperän pilaantumisen aiheuttajia Suomessa (Jylhä ym. 2019 s. 20).

Biostimulaation käytön rajoitteita Suomessa voivat aiheuttaa alhainen ympäristön lämpötila ja maaperän heterogeenisuus. Luontaisten mikrobien biologinen toiminta ja hajotusnopeus voi olla Suomen olosuhteissa hidasta maaperän sekä pohjaveden alhaisten lämpötilojen vuoksi. (Penttinen 2001 s.15) Maaperän jäätyminen talven aikana hidastaa biologisia prosesseja, minkä vuoksi puhdistus voi kestää useita vuosia (Kauppi ym. 2011 s.1). Maaperän heterogeenisuus aiheuttaa vedenjohtavuuden vaihtelua paikan suhteen sekä epäsäännöllisten leviämisalueiden muodostumista (Kuusela-Lahtinen & Vahanne 2005 s.26-27). Kyseiset ominaisuudet voivat tuottaa haasteita kunnostuksen suunnittelun sekä vesi- ja ilmavirtojen kontrolloinnin kannalta (Penttinen 2001 s.15).

4.2 Käyttökohteet

Suomessa biostimulaatiota on käytetty esimerkiksi JASKA-hankkeen yhteydessä. Hankkeen tavoitteena on ollut tutkia ja mahdollisesti kunnostaa isännättömiä öljyllä pilaantuneita maa-alueita mahdollisimman edullisesti ja kestävästi. JASKA-hankkeessa isännättömien öljyllä pilaantuneiden maiden kunnostaminen on suoritettu ensisijaisesti in situ tai on site kunnostusmenetelmillä. Mikäli kunnostusta ei saada saatettua loppuun saakka in situ tai on site menetelmillä, käytetään kunnostukseen hybridimenetelmää eli kunnostus saatetaan loppuun massanvaiholla. (Jylhä ym. 2021 s.21)

4.2.1 Case: Lahti, Suomi

Lahdessa vuonna 2006 tehdyssä Helsingin yliopiston tutkimuksessa vertailtiin biostimulaation ja bioaugmentoinnin (tiettyjen kasvatettujen mikrobien lisääminen pilaantuneeseen maaperään) vaikutusta diesel öljyn hajoamiseen pilaantuneessa maaperässä. Ensin tutkittiin erilaisten ravinne-, täyteaine- ja hapetusolosuhteiden sekä mikrobipitoisuuksien vaikutusta pilaantumisen hajottamiseen laboratorio-olosuhteissa, jonka jälkeen tehokkaiksi todettuja yhdistelmiä testattiin kenttäolosuhteissa. Kenttätestauksessa hiilivetyjen määrä pieneni kaikissa käsittelyissä huomattavasti alkukonsentraatiosta 2700 mg/kg^{-1} testauksen aikana. Kenttätestaus oli kestoltaan 11 kuukautta. (Kauppi ym. 2011)

Kenttätestauksessa rakennettiin kaksi maakerrosta, joissa oli diesel polttoaineella pilaantunutta maa-ainesta. Toinen kerros rakennettiin pumpulla toimivan hapetusjärjestelmän päälle ja toisessa kerroksessa oli passiivinen ilmavirtaus. Kasat jaettiin edelleen niin, että muodostui yhteensä seitsemän aluetta, joissa käytettiin erilaisia käsittelyitä. Käsittelyitä olivat: 1. pakotettu ilmavirta + ei lisäyksiä, 2. pakotettu ilmavirta + ravinteet (MU, P), 3. pakotettu ilmavirta + ravinteet (MU, P) + lisäaineet, 4. pakotettu ilmavirta + lisäaineet, 5. passiivinen ilmavirta + ei lisäyksiä, 6. passiivinen ilmavirta + ravinteet (MU, P) + lisäaineet ja 7. passiivinen ilmavirta + lisäaineet. (Kauppi ym. 2011)

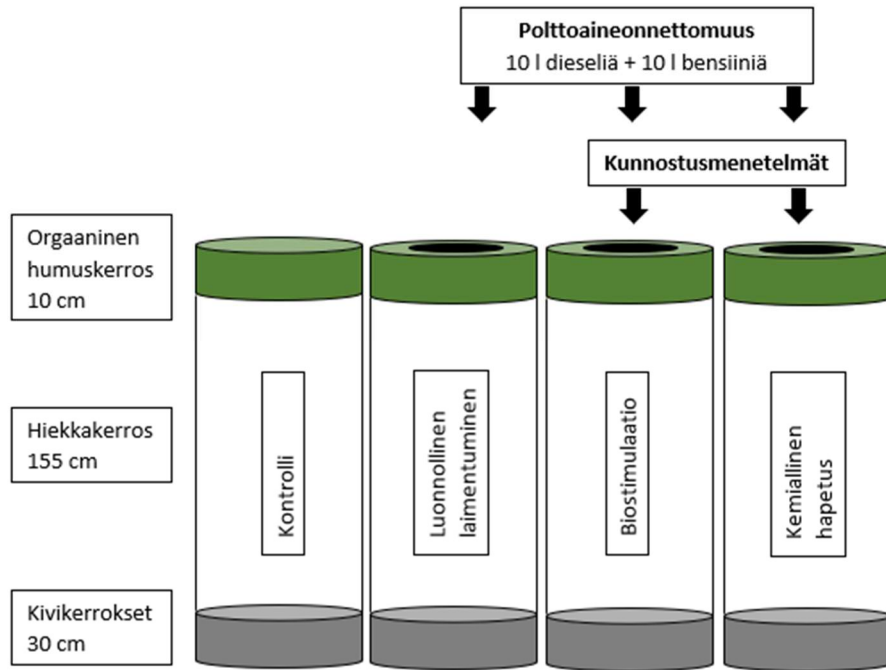
Tulosten perusteella todettiin, että biostimulaatio oli tehokas keino öljyllä pilaantuneen maaperän puhdistuksessa silloin, kun typen ja hapen määrä on optimoitu oikealla tavalla. Tutkimuksessa havaittiin myös, että bioaugmentoinnilla ei ollut vaikutusta puhdistuksen tehokkuuteen. Mikrobikannan kasvun kannalta hiili-typpi-suhteen optimointi ja riittävän happipitoisuuden ylläpitäminen ovat merkittävässä osassa prosessia. Proteobakteereihin kuuluvat bakteerit olivat hallitsevassa asemassa kaikissa tapauksissa. Kyseisessä kenttätestauksessa kosteuden puute rajoitti dieselöljyn hajoamista enemmän kuin ravinteiden tai hapen puute. (Kauppi ym. 2011)

4.2.2 Case: Iisalmi, Suomi

Lahden maaperän tutkimuskeskuksessa suoritettiin vuonna 2012 tutkimus, jossa stimuloitiin Iisalmessa tapahtunutta rekkaonnettomuutta. Rekkaonnettomuuden seurauksena dieseliä ja bensiiniä vuoti maaperään pohjavesialueella. Tutkimuksen yhteydessä vertailtiin erilaisten kunnostusmenetelmien toimivuutta vastaavassa tilanteessa. Verrattavina kunnostusmenetelminä käytettiin biostimulaatiota, kemiallista hapetusta ja maaperän luonnollista puhdistumista. Tutkimusta varten maaperän tutkimuskeskukselle Lahteen rakennettiin noin kahden metrin syvyisiä maapylväitä, joiden maakerrokset rakennettiin samankaltaisiksi kuin onnettomuuspaikan maaperä Iisalmessa. Kenttätestaus oli kestoltaan 467- 469 päivää kontaminoinnin jälkeen laskettuna. (Simpanen ym. 2016)

Kenttätestauksessa kahdeksan teräksistä sylinteriä upotettiin maaperään ja ne altistuivat testauksen aikana vuodenaikaisvaihtelulle. Rakennettuja maakerroksia tiivistettiin veden avulla ja niiden annettiin painautua, jotta maakerrokset muistuttaisivat mahdollisimman paljon maaperää onnettomuuspaikalla Iisalmessa. Kuusi kahdeksasta sylinteristä kontaminoitiin kesäkuun alussa 2012. Lysimetrien maaperän pilaantuminen pyrittiin toteuttamaan niin, että pilaantuma olisi samankaltainen kuin onnettomuuspaikalla. Pilaantumisen aikaan saamiseksi sylintereihin kaadettiin polttoaineseokitus, joka sisälsi 10 litraa Neste Green dieseliä ja 10 litraa Neste 95E bensiiniä. Kontaminoinnin jälkeen pilaantuneet maa-ainekset jätettiin tasaantumaan neljäksi kuukaudeksi, jotta pilaantuma leviää tasaisesti ja ulottuu myös alempiin maakerroksiin. (Simpanen ym. 2016)

Kunnostusmenetelmiä (biostimulaatio, kemiallinen hapetus ja luonnollinen laimentuminen) käytettiin yhteensä kuudessa lysimetrissä eli jokaista kunnostusmenetelmää sovellettiin kahdessa maa-ainespylväessä (kuva 3). Maaperän kunnostaminen aloitettiin neljä kuukautta maa-ainesten kontaminoinnin jälkeen. Biostimulaatiossa ravinteita lisättiin urean muodossa silloin, kun maakerroksen läpi tulevassa vedessä ei havaittu ammoniumia ja nitraattia. Kemiallinen hapetus toteutettiin muunneltuna Fentonin reaktiona, jossa käytettiin 10 % H₂O₂ liuosta ilman maaperän erillistä happamoittamista tai liukoisen rautakatalyytin lisäämistä. (Simpanen ym. 2016)



Kuva 3. Kenttätestauksen asetelma (toteutettiin kaksinkertaisena). Lysimetrien korkeus oli 195 cm ja tilavuus 1,7 m³. (Simpanen ym. 2016)

Kenttätestauksen lopussa kaikkien kunnostusmenetelmien kyky puhdistaa kevyitä jakeita C₅-C₁₀ ja BTEX- yhdisteitä oli parempi kuin niiden kyky puhdistaa keskittisleitä ja raskaita jakeita C₁₀-C₄₀. Testauksen lopussa kevyiden jakeiden pitoisuus oli pienentynyt 89-99 % ja BTEX yhdisteiden pitoisuus 99-100 %, kun taas keskittisleiden ja raskaiden jakeiden pitoisuudet olivat pienentyneet ylemmissä hiekkakerroksissa 45-51 % ja alemmissa 37-53 %. (Simpanen ym. 2016)

Haitta-aineiden pääsy maa-aineksen läpi kulkevaan veteen pienentyi kunnostusten alkamisen jälkeen erityisesti biostimulaatioissa. Tulosten perusteella kemiallinen hapetus ei parantanut maaperän puhdistumista ja se sai aikaan haitta-aineiden leviämisen. Biostimulaatio oli tulosten perusteella tehokkain keino vasta pilaantuneen maaperän puhdistamiseen. Se lisäsi liikkuvassa faasissa olevan öljyn biohajoamista ja siten pienensi maaperän läpi kulkevaa haitta-ainepitoisuutta. Tulosten perusteella biostimulaatio voi pienentää tai jopa ennaltaehkäistä öljyn liikkumista maaperässä ja siten se voisi olla turvallinen kunnostusmenetelmä jopa pohjavesialueilla. (Simpanen ym. 2016)

4.3 Kestävä kunnostaminen

Kestävä kehitys tarkoittaa sellaista yhteiskunnallisen toiminnan kehitystä, joka mahdollistaa tuleville sukupolville mahdollisuuden tyydyttää omat tarpeensa ja joka samalla tyydyttää nykyhetken tarpeet. Kestävän kehityksen tavoitteiden saavuttaminen vaatii toimia kansainvälisellä, kansallisella, alueellisella sekä yksittäisen kohteen tai hankkeen tasolla. (Ympäristöministeriö 2014 s.133) Kestävä kunnostaminen tarkoittaa riskiä aikaansaavien haitta-aineiden poistamista tai kontrollointia turvallisella ja tehokkaalla tavalla niin, että hyödyt ympäristön, yhteiskunnan ja talouden kannalta ovat mahdollisimman suuret. (Laitinen ym. 2022 s.7)

Kestävän kunnostamisen tavoitteena on saada aikaan kaikkia sidosryhmiä tyydyttävä lopputulos niin, että kunnostamisen hyödyt ovat pitkällä aikavälillä suuremmat kuin siitä aiheutuvat haitat. Kestävän kunnostamisen periaatteita ovat ihmisen terveyden ja ympäristön suojeleminen, kestävyys, moniulotteinen ja perusteltu tarkastelu, sidosryhmien osallistuminen päätöksentekoon sekä kunnostushankkeen huolellinen suunnittelu ja toteutus. Periaatteiden lisäksi hankkeen tulee olla teknisesti toteutettavissa ja sen tulee täyttää lainsäädännön asettamat vaatimukset. (Ympäristöministeriö 2014 s. 134-135, Pyy ym. 2017 s.13-15)

Kestävässä kunnostamisessa kestävä kehityksen periaatteet otetaan huomioon kaikissa kunnostushankkeen vaiheissa. Maankäytön ja riskienhallinnan suunnittelu on merkittävässä roolissa, kun pyritään lisäämään kunnostuksen kestävyttä. Lisäksi kunnostuksen suunnittelu, riskinarviointi ja kunnostusmenetelmän valinta vaikuttavat huomattavasti kunnostushankkeen kestävyteen. Tiettyä kunnostusmenetelmää ei voida selvästi luokitella kestävä kehitystä edistäväksi tai heikentäväksi, koska kunnostusmenetelmän kestävyys on riippuvainen tilanteesta. (Laitinen ym. 2022 s. 8, Ympäristöministeriö 2014 s. 15)

4.4 Kestävä riskinhallinta

Riskinhallinnassa tavoitteena on merkittävien ympäristö- ja terveyshaittojen tai -riskien pienentäminen hyväksyttävälle tasolle. Pilaantuneella alueella riskinhallintatoimet voivat suuntautua haitta-aineiden päästö- ja altistumlähteisiin, kulkeutumis- ja altistumisteihin tai vaikutuskohteisiin. Riskienhallintaratkaisujen ja toimenpiteiden valintaan vaikuttavat käytännössä useat sellaiset tekijät, joita ei voida tarkastella haitta-aineisiin kohdistuvalla ympäristö- ja terveystuotteen arvioinnilla. Riskinhallintaa koskeviin päätöksiin vaikuttavat esimerkiksi alueen maankäyttö, sosiaaliset tekijät, säädökset ja ohjeet, taloudelliset tekijät sekä saatavilla oleva tekniikka. (Ympäristöministeriö 2014 s. 131-133)

Kestävällä riskinhallinnalla pyritään maksimoimaan toiminnan hyödyt huomioimalla sen vaikutukset ympäristöön, sosiaalisiin tekijöihin sekä talouteen riskinhallintatoimien suunnittelu ja toteutus vaiheessa. Riskinhallinnan suunnittelussa ja toteutuksessa tulee taata ympäristön ja ihmisen terveyden suojeleminen, moniulotteinen ja perusteltu kestävyystarkastelu, sidosryhmien liittyminen päätöksentekoon sekä hankkeen aikana käytettävien menetelmien tarkka valinta, suunnittelu ja toteutus. (Ympäristöministeriö 2014 s.133, Pyy ym. 2017 s.14)

Kestävää riskinhallintaa voidaan edistää huomioimalla kestävä kehityksen periaatteet jo hankkeen suunnitteluvaiheessa. Kunnostusmenetelmän valinta, maankäytön suunnittelu ja rakentaminen vaikuttavat riskinhallinnan kestävyteen. Kestävän riskinhallinnan edellytyksiä ovat kestävyden arviointi päätöksentekoprosessin aikaisessa vaiheessa, ympäristö-, kaavoitus- ja rakennusviranomaisten aktiivinen ja laaja yhteistyö suunnitteluprosessissa sekä maa-alueiden pilaantuneisuutta koskevien tietojen saatavuus päätöksentekijöille. (Pyy ym. 2017 s. 14-29)

5 YHTEENVETO

Öljyhiilivedyt ovat monimuotoisia hiilivetysekoituksista koostuvia yhdisteitä, joiden rakenne ja koko vaihtelee merkittävästi. Ne voidaan jakaa hiiliketjun pituuden perusteella kevyisiin jakeisiin, keskittisileisiin ja raskaisiin jakeisiin. Öljyhiilivetyjen kulkeutumiseen maaperässä vaikuttavat sekä maaperän, että öljyhiilivetyjen ominaisuudet. Öljyhiilivetyjen raskaat jakeet eivät liukene lähes ollenkaan pohjaveteen, kun taas kevyet jakeet ovat huomattavasti liukoisempia.

Öljyhiilivedyt voivat aiheuttaa maaperässä sekä ekologisia, että terveydellisiä riskejä. Öljyhiilivetyjen ympäristölle aiheuttamien riskien arvioinnissa voidaan hyödyntää ekologisia viitearvoja. Terveysriskit voidaan jakaa syöpäriskeihin ja muihin terveysriskeihin. Syöpäriskien arvioinnissa hyödynnetään maaperän hiilivetyjen pitoisuuksia, kun taas muiden terveysriskien arvioinnissa keskitytään öljyhiilivetyjakeisiin ja ei-syöpävaarallisiin avainyhdisteisiin.

Suomessa pilaantuneiden maa-alueiden kunnostusta ohjaavat ympäristönsuojelulaki, laki vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä, terveydensuojelulaki, jätelaki, maankäyttö- ja rakennuslaki sekä kemikaalilaki. Ympäristönsuojelulaki on merkittävässä roolissa pilaantuneen maaperän puhdistuksessa. Se sisältää Valtioneuvoston asetuksen maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista (214/2007), missä määritellään kynnyks- ja ohjearvot maaperän pilaantuneisuuden riskinarviointia varten.

Yleisin nykyään käytössä oleva kunnostusmenetelmä on massanvaihto. Sen aiheuttamien suurien ympäristökuormien vuoksi myös muiden puhdistusmenetelmien kuten huokosilmakäsittelyn, biostimulaation ja kemiallisen hapetuksen käyttöä sekä toimivuutta pyritään lisäämään.

Biostimulaatio soveltuu puhdistusmenetelmänä hyvin öljyhiilivedyille. Öljyhiilivetyjen hajoamisaika ja syntyvät välituotteet riippuvat niiden rakenteesta, koosta biosaatavuudesta ja pitoisuudesta maaperässä. Biostimulaation käyttö kunnostusmenetelmänä on kannattavaa, kun puhdistuksella ei ole kiire ja samalla halutaan puhdistaa myös pohjavettä. Tehostettua biologista puhdistusta voidaan käyttää myös rakennetuilla alueilla ja laajasti pilaantuneissa kohteissa.

Biostimulaation testauksen tuloksena Carlini asemalla (Case: Carlini asema, Etelämantere) saatiin, että biostimulaatio on luontaista biologista puhdistumista huomattavasti tehokkaampi puhdistuskeino. Tulosten tulkinnassa tulee kuitenkin ottaa huomioon, että testaus on tehty maaperästä eristetyissä olosuhteissa, maa-aines on homogenisoitu ja systeemin maa-aineksia on sekoitettu testauksen aikana. Tulos kuitenkin osoittaa, että samanlaisissa olosuhteissa biostimulaatio on luontaista biologista puhdistusta tehokkaampi menetelmä.

Biostimulaation käyttö Suomessa on mahdollista ja sen hyötyinä ovat vähäiset häiriöt ympäristöön, menetelmän soveltuvuus öljyhiilivetyjen ja oksygenaattien puhdistukseen sekä toimivuus hiekkaisissa ja orgaanisissa maaperän olosuhteissa. Biostimulaation käyttöä Suomen olosuhteissa rajoittavat vuodenaikojen vaihtelu, kylmät olosuhteet ja maaperän heterogeenisuus. Avoimien käyttökohtetietojen saatavuus tuottaa haasteita case-kohteiden valinnassa.

Lahdessa tehdyssä tutkimuksessa (Case: Lahti, Suomi) verrattiin biostimulaation ja bioaugmentoinnin toimivuutta dieselöljyllä pilaantuneessa maaperässä. Testauksen tuloksena havaittiin, että biostimulaatio on tehokas puhdistuskeino silloin, kun typen ja hapen määrä on optimaalinen. Bioaugmentoinnilla ei tulosten perusteella ollut vaikutusta puhdistustulokseen. Tulosten tulkinnassa tulee ottaa huomioon, että kyseisessä testauksessa kosteuden puute oli merkittävä puhdistusta rajoittava tekijä.

Iisalmessa tapahtunutta öljyonnettomuutta simuloitiin Lahden maaperän tutkimuskeskuksessa (Case: Iisalmi, Suomi). Tutkimuksessa verrattiin biostimulaation, kemiallisen hapetuksen ja luontaisen biologisen puhdistumisen toimivuutta dieselin ja bensiinin puhdistamiseen maaperästä pohjavesialueella. Tulosten perusteella biostimulaatio oli menetelmistä toimivin kyseisessä maaperässä. Se pienensi huomattavasti haitta-aineiden pääsyä maapatsaan läpi kulkevaan veteen ja lisäsi liikkuvassa faasissa oleva öljyn hajoamista. Testaus oli toteutettu mallintamaan maaperää onnettomuusalueella, ja maapatsaat altistuivat testauksen aikana luonnon sääolosuhteille.

Kestävä riskinhallinta ja kestävä kunnostaminen ovat kestävä kehityksen periaatteita noudattavia menetelmiä, joiden tavoitteena on optimoida toimintojen hyödyt kaikille osaluueille (ympäristö, yhteiskunta ja talous).

LÄHDELUETTELO

Gao, H., Wu, M., Liu, H., Xu, Y. & Liu, Z., 2022. Effect of petroleum hydrocarbon pollution levels on the soil microecosystem and ecological function [verkkodokumentti]. *Environmental pollution*, 293. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118511> [viitattu 30.3.2023] s. 118511

Jylhä, H., Alhola, K., Antikainen, R. & Pyy, O., 2021. Kestävät ja innovatiiviset julkiset hankinnat pilaantuneiden maa-alueiden kunnostuksessa. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 30/ 2021. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/330104/SYKEra_30_2021_Kestavat_hankinnat_KEINO_PIMA.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 16.3.2023] 46 s.

Jylhä, H., Pyy, O. & Tuomainen, J., 2019. Pilaantuneiden maa-alueiden puhdistukseen liittyvät päätökset vuonna 2017 [verkkodokumentti]. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 10/2019. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/299787/SYKEra_10_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 16.3.2023] 36 s.

Jätelaki 646/2011. Ympäristöministeriö 17.6.2011. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110646> [viitattu 23.1.2023]

Kauppi, S., Sinkkonen, A. & Romantschuk, M., 2011. Enhancing bioremediation of diesel-fuel-contaminated soil in boreal climate: Comparison of biostimulation and bioaugmentation. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65 (2). Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2010.10.011> [viitattu 22.2.2023] s. 359-368

Kemikaalilaki 599/2013. Sosiaali- ja terveysministeriö 9.8.2013. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130599> [viitattu 24.1.2023]

Kuusela-Lahtinen, A. & Vahanne, P., 2005. Maaperän heterogeenisuuden vaikutus haitta-aineiden kulkeutumiseen pilaantuneiden maiden riskinarvioinnissa [verkkodokumentti]. VTT tiedotteita 2296. Helsinki: VTT. Saatavissa: <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2005/T2296.pdf> [viitattu 27.2.2023] 76 s.

Laitinen, J. (toim.), Kilponen, V., Kettunen, A., Virta, O., Pöyry, E., Tengvall, J., Nousiainen, A. & Itkonen, A., 2022. Kestävän kunnostamisen parhaat käytännöt [verkkodokumentti]. Opas 5/2022. Pirkanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Saatavissa:

<https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/184559/Kest%c3%a4v%c3%a4n%20kunnostamisen%20parhaat%20k%c3%a4yt%c3%a4nn%c3%b6t.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 14.3.2023] 67 s.

Laki vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä 1299/2004. Ympäristöministeriö 30.12.2004. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2004/20041299> [viitattu 23.1.2023]

Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999. Ympäristöministeriö 5.2.1999. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132> [viitattu 24.1.2023]

Marcus, M., 2021. Going Beneath the Surface: Petroleum Pollution, Regulation, and Health [verkkodokumentti]. *American Economic Journal: Applied Economics*, 13 (1). Saatavissa: <https://doi.org/10.1257/app.20190130> [viitattu 30.3.2023] s.72-104

Martínez Álvarez, L.M., Ruberto, L. A. M., Lo Balbo, A. & Mac Cormack, W. P., 2017. Bioremediation of hydrocarbon- contaminated soils in cold regions: Development of a pre-optimized biostimulation biopile-scale field assay in Antarctica [verkkodokumentti]. *The Science of the total environment*, 590-591. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.204> [viitattu 18.2.2023] s. 194-203

Newell, C. J., Acree, S. D., Ross, R. R. & Huling, S. G., 1995. Ground water issue: Light Nonaqueous Phase Liquids [verkkodokumentti]. United States: Environmental Protection Agency. Saatavissa: <https://nepis.epa.gov/Exec/ZyPURL.cgi?Dockey=10002DXR.txt> [viitattu 6.2.2023] 20 s.

Park, I. & Park, J., 2010. A novel total petroleum hydrocarbon fractionation strategy for human health risk assessment for petroleum hydrocarbon- contaminated site management [verkkodokumentti]. *Journal of Hazardous Materials*, 179 (1). Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.124> [viitattu 6.2.2023] s. 1128-1135

Penttinen, R., 2001. Maaperän ja pohjaveden kunnostus. Yleisimpien menetelmien esittely [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40841/SYKEmo_227.pdf [viitattu 16.3.2023] 57 s.

Pyy, O. & Jylhä, H., 2020. Valtakunnallisen pilaantuneiden maa-alueiden riskienhallintastrategian ensimmäinen seurantaraportti [verkkodokumentti]. Ympäristöministeriön julkaisuja 15/2020. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162293/YM_2020_15.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 16.3.2023] 82 s.

Pyy, O., Tikkanen, S., Reinikainen, J., Nihtilä, M. & Sorvari, J., 2017. Pilaantuneiden maa-alueiden kestävät riskinhallintakeinot [verkkodokumentti]. Valtioneuvoston selitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 25/2017. Valtioneuvoston kanslia. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/160236/Pilaantuneiden_maa-alueiden_kest%c3%a4v%c3%a4t_riskinhallintakeinot.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 14.3.2023] 109 s.

Reinikainen, J., 2007. Maaperän kynnys- ja ohjearvojen määrittäminen [verkkodokumentti]. Suomen ympäristö 23/2007. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38431/SY_23_2007.pdf?sequence=4&isAllowed=y [viitattu 16.3.2023] 168 s.

Repo, A., 2008. Antimonin biosaatavuus peltolieroille (*Aporrectodea tuberculata*) ja sitoutuminen lehtimetsämaassa [verkkodokumentti]. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto. Saatavissa: https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/18386/1/URN_NBN_fi_jyu-200805071444.pdf [viitattu 7.2.2023] 29 s.

Sillanpää, P., 2007. Öljyhiilivedyllä saastuneen maan puhdistaminen puiden avulla [verkkodokumentti]. Suomen ympäristö 2/2007. Tampere: Pirkanmaan ympäristökeskus. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38391/SY_2_2007.pdf?sequence=3&isAllowed=y [viitattu 7.2.2023] 94 s.

Simpanen, S., Dahl, M., Gerlach, M., Mikkonen, A., Malk, V., Mikola, J. & Romantschuk, M., 2016. Biostimulation proved to be the most efficient method in the comparison of in situ soil remediation treatments after a simulated oil spill accident [verkkodokumentti]. *Environmental science and pollution research international*, 23 (24). Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7606-0> [viitattu 27.2.2023] s. 25024-25038

Suomen ympäristökeskus (SYKE) 2022. Saasteettomuus ja ympäristöriskit: Pilaantuneet maa-alueet [verkkodokumentti]. Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: <https://www.ymparisto.fi/fi/saasteettomuus-ja-ymparistoriskit/pilaantuneet-maa-alueet> [viitattu 30.3.2023]

Terveysturvallisuuslaki 763/1994. Sosiaali- ja terveysministeriö 19.8.1994. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1994/19940763> [viitattu 23.1.2023]

Tuomi, P. & Vaajasaari, K., 2004. Monitoroidun luontaisen puhdistumisen (MLP) käyttö pilaantuneiden alueiden kunnostuksessa [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40499/SY_681.pdf [viitattu 18.2.2023] 63 s.

Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista 214/2007. Helsinki: Ympäristöministeriö 1.3.2007. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2007/20070214> [viitattu 17.1.2023]

Verbruggen, E. M. J., 2004. Environmental Risk Limits for Mineral Oil (Total Petroleum Hydrocarbons) [verkkodokumentti]. RIVM report 601501021/2004. The Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/27452021_Environmental_Risk_Limits_for_mineral_oil_Total_Petroleum_Hydrocarbons [viitattu 6.2.2023] 79 s.

Wu, M., Dick, W. A., Li, W., Wang, X., Yang, Q., Wang, T., Xu, L., Zhang, M. & Chen, L., 2016. Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum- contaminated soil [verkkodokumentti]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 107 (1). Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.pc124152.oulu.fi:9443/science/article/pii/S0964830515301414?via%3Dihub> [viitattu 7.2.2023] s. 158-164

Wu, M., Wu, J., Zhang, X. & Ye, X., 2019. Effect of bioaugmentation and biostimulation on hydrocarbon degradation and microbial community composition in petroleum-contaminated loessal soil [verkkodokumentti]. *Chemosphere*, 237. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124456> [viitattu 18.2.2023] s. 124456

Ympäristöministeriö, 2014. Pilaantuneen maa-alueen riskinarviointi ja kestävä riskinhallinta [verkkodokumentti]. Ympäristöhallinnon ohjeita 6/2014. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/136564/OH_6_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 16.3.2023] 238 s.

Ympäristönsuojelulaki 527/2014. Ympäristöministeriö 27.6.2014. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140527> [viitattu 17.1.2023]