Tampereen yliopisto

Silja Koskinen

LÄMMITYSÖLJYN PILAAMAN MAAPERÄN BIOLOGINEN KUNNOSTAMINEN

Kandidaatintyö
Lääketieteen ja terveysteknologian tiedekunta
Marja Palmroth
Huhtikuu 2025

TIIVISTELMÄ

Silja Koskinen: Lämmitysöljyn pilaaman maaperän biologinen kunnostaminen
Bioremediation of soil contaminated with heating oil
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Bioteknologian ja biolääketieteen tekniikan kandidaattiohjelma, tekniikan opintosuunta

Huhtikuu 2025

Lämmitysöljy on polttoaine, jota käytetään asuinrakennusten lämmittämiseen. Suomessa lämmitysöljysäiliö voi olla sijoitettuna joko maan päälle tai maan alle. Maanalaisia lämmitysöljysäiliöitä on Suomessa arvioitu olevan noin 40 000–50 000. Lämmitysöljyvahinkoja tapahtuu esimerkiksi säiliörikkojen ja ylitäyttöjen seurauksena. Asuinrakennusten öljyvahinkoja tapahtuu vuosittain useita kymmeniä. Erityisesti maanalaiset lämmitysöljysäiliöt ovat ongelmallisia, sillä niihin liittyy useita riskejä. Routiminen ja ruoste voivat vahingoittaa säiliötä, jolloin öljy pääsee valumaan maaperään.

Maaperässä lämmitysöljy kulkeutuu dieselöljyn tavoin. Kulkeutumiseen vaikuttaa muun muassa yhdisteen tiheys, viskositeetti, maaperän koostumus sekä yhdisteen hiiliketjujen pituus. Vettä kevyempänä yhdisteenä lämmitysöljy lukeutuu LNAPL (light non aqueous phase liquids) -yhdisteeksi. Näin ollen se liukenee pohjaveden pinnalta pohjaveteen muodostaen epäpuhtauksien joukkoja eli pluumeja.

Työssä käsitellään tehostetun biologisen puhdistamisen kahta eri menetelmää; biostimulaatiota ja bioaugmentaatiota. Biostimulaatio on menetelmä, jossa ravinteilla ja muilla aineilla pyritään tehostamaan maaperässä luontaisesti esiintyvien mikrobien hajotustoimintaa. Bioaugmentaatio perustuu mikrobien lisäämiseen maaperään, jotta hajotustoiminta tehostuisi. Työssä käydään läpi menetelmien monitorointia, mutta myös tehostamista. Eräs keino tehostaa maaperän hajotustoimintaa on biostimulaation ja bioaugmentaation yhdistäminen.

Biostimulaation ja bioaugmentaation soveltuvuutta lämmitysöljyvahinkojen kunnostamiseen käydään läpi tapaustutkimuksen kautta. Tapaustutkimuksen kohteena toimii Kärkölässä sijaitseva asuinrakennus, joka jouduttiin purkamaan massanvaihdon suorittamista varten. Tapaustutkimuksella osoitetaan, että tehostetun biologisen puhdistamisen hyödyntäminen vaatii tarkkaa kohdentamista. Kärkölän tapaustutkimuksen kohdalla tehostettua biologista puhdistamista ei todennäköisesti olisi voitu hyödyntää savisen maaperän ja suuren haitta-ainepitoisuuden vuoksi. Tapaustutkimuksella osoitetaan kuitenkin mahdollisuus kokeilla biologista puhdistusmenetelmää ennen massanvaihtoon turvautumista.

Avainsanat: Lämmitysöljy, hiilivety, pilaantunut maaperä, tehostettu biologinen puhdistaminen, bioaugmentaatio, biostimulaatio

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☐ Ei
☒ Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: Scopus AI

Käyttötarkoitus: Kirjallisuuden hakeminen

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Tekoälyä on käytetty tiedonhakuun kaikissa työn osioissa

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. LÄMMITYSÖLJYN PILAAMA MAAPERÄ 2
2.1 Lämmitysöljyn ominaisuudet ja hajoaminen maaperässä 2
2.2 Maanalaisten lämmitysöljysäiliöiden ympäristöriskit ja sääntely 3
2.3 Maaperän pilaantuminen ja kunnostusmenetelmät 5
3. MAAPERÄN TEHOSTETTU BIOLOGINEN PUHDISTAMINEN 7
3.1 Tehostettu biologinen puhdistaminen 7
3.2 Biostimulaatio 8
3.3 Bioaugmentaatio 9
3.4 Tehostetun biologisen puhdistamisen monitorointi 10
4. TEHOSTETTU BIOLOGINEN PUHDISTAMINEN TAPAUSTUTKIMUS 13
5. JOHTOPÄÄTÖKSET 17
6. LÄHTEET 19

.

1. JOHDANTO

Öljylämmitys on pientalon lämmitysmuoto, jossa hyödynnetään lämmitysöljyä energiantuotannossa. Se on Suomessa suosittu lämmitysmuoto sen kustannustehokkuuden ja hyvän hyötysuhteen ansiosta (Motiva n.d.). Vuonna 2022 10,7 % kotitalouksista hyödynsi öljylämmitystä pääasiallisena lämmitysmuotonaan (Tilastokeskus 2022). Lämmitysöljy on kevyttä polttoöljyä, jonka varastointiin liittyy useita huomioitavia tekijöitä. Erityisen riskin muodostavat maanalaisten lämmitysöljysäiliöiden vuodot ja ylitäytöt. Maanalaiseksi öljysäiliöksi on määritelty sellainen säiliö, joka on ulkopinnaltaan kosketuksissa maaperään. (Pelastustoimi 2014.)

Maahan joutuessaan lämmitysöljy kulkeutuu painovoiman vaikutuksesta alaspäin, jolloin muodostuu riski pohjaveden pilaantumiselle. Tehostettu biologinen puhdistus on kunnostusmenetelmä, joka hyödyntää maaperän luontaista mikrobikantaa. Tehostetun biologisen puhdistamisen tavoitteena on erilaisin keinoin tehostaa maaperän luontaista hajotustoimintaa (Kensa 2011).

Työn tavoitteena on kuvata lämmitysöljyvuotojen aiheuttamia vaikutuksia maaperälle ja millaisin biologisin menetelmin lämmitysöljyn pilaamaa maaperää voidaan käsitellä. Työssä käsitellään biologisen puhdistamisen soveltuvuutta Suomen olosuhteissa sekä sen mahdollisia tehostamismenetelmiä. Työssä keskitytään erityisesti tehostetun biologisen puhdistamisen kahteen eri menetelmään; biostimulaatioon ja bioaugmentaatioon. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena ja menetelmien soveltuvuutta arvioidaan tapaustutkimuksen avulla.

Työn toisessa luvussa käsitellään lämmitysöljyn käyttäytymistä maaperässä. Kolmannessa luvussa keskitytään maaperän tehostettuun biologiseen puhdistamiseen ja sen eri vaihtoehtoihin. Työn neljännessä luvussa esitellään tapaustutkimuksen avulla jo aiemmin Suomessa suoritettu kunnostusprojekti, johon olisi voitu vaihtoehtoisesti hyödyntää tehostettua biologista puhdistamista. Työn viimeinen luku kokoaa yhteen tärkeimmät johtopäätökset.

2. LÄMMITYSÖLJYN PILAAMA MAAPERÄ

Tässä luvussa käsitellään lämmitysöljyn ominaisuuksia sekä perehdytään lämmitysöljyn pilaamaan maaperään. Lisäksi luvussa käsitellään tilanteita, joissa maaperä pääsee pilaantumaan kyseisellä öljyllä.

2.1 Lämmitysöljyn ominaisuudet ja hajoaminen maaperässä

Lämmitysöljy eli kevyt polttoöljy on kahden eri polttoöljyn seos, jota käytetään polttoaineena asuinrakennusten energiantuotannossa. Kemialliselta koostumukseltaan lämmitysöljy sisältää pääosin haarautumattomia C16–C19 alkaaneja eli 16–19 hiiltä sisältäviä hiilivetyjä. (Työterveyslaitos 2023.) Dieselöljy on dieselmoottoreissa käytettävää polttoainetta, jonka kemialliset ominaisuudet ovat lähes samanlaiset kuin lämmitysöljyllä. Dieselöljy ja lämmitysöljy ovat kumpikin eri mittaisten hiilivetyjen ja lisäaineiden seoksia, jolloin niille ei voi määrittää vain yhtä kemiallista kaavaa. Lämmitysöljy on punaiseksi värjättyä, kun taas dieselöljy on kirkasta tai kellertävää. (Työterveyslaitos 2025.)

Lämmitysöljyn tiheys on noin 0,8–0,9 g/cm^3, mikä tekee siitä vettä kevyempää. Pintavedestä lämmitysöljy voi haihtua ilmaan, mutta sillä on myös ominaisuus liueta veteen niukkaliukoisena. Lämmitysöljyn liukoisuus on alle 50 mg/l 20 °C:ssa. Suomen viileissä olosuhteissa liukoisuus on todennäköisesti vieläkin pienempää. Sora- ja hiekkamaassa lämmitysöljyn kulkeutuvuus on huomattavaa, joten öljyvuodon sattuessa on mahdollisuus sen päätymisestä pohjaveteen. (Työterveyslaitos 2023).

Lämmitysöljyn kulkeutuvuus maaperässä määräytyy muun muassa sen tiheyden ja viskositeetin perusteella. Koska tiedetään, että dieselöljy on kemialliselta koostumukseltaan lähes vastaavaa kuin lämmitysöljy, voidaan lämmitysöljyn viskositeetin olettaa vastaavan dieselöljyn viskositeettiä. Viskositeetti kuvaa aineen virtausvastusta (Balogun et al. 2021). Dieselöljyn viskositeetti vaihtelee lämpötilan mukaan, mutta 40 °C:ssa kinemaattinen viskositeetti asettuu välille 1,9–4,1 mm^2/s (Ramírez-Verduzco and Hernández-Sánchez 2021). Voidaan siis olettaa, että suuri viskositeetti vaikeuttaa kulkeutumista. Tiedetään myös, että lämmitysöljyn tiheys on veden tiheyttä pienempi. Tiheydeltään suuret yhdisteet kulkeutuvat todennäköisesti paremmin kuin pienen tiheyden omaavat yhdisteet painovoiman vaikutuksesta. Lämmitysöljyn kulkeutuvuus ei ole erityisen suurta tiheyden kannalta, mutta suhteellisen pieni viskositeetti kasvattaa sen kulkeutumista maaperässä.

Kulkeutuvuuteen vaikuttaa myös maaperän koostumus ja kosteus. Kulkeutuvuuden on havaittu kasvavan kosteassa maaperässä. Hiekkainen maaperä edistää lämmitysöljyn kulkeutuvuutta maaperässä verraten saviseen maaperään, sillä hiekan läpäisevyys on huomattavasti parempi kuin saven (Macaulay 2015). On havaittu myös, että lyhytketjuisilla hiilivedyillä on taipumus kulkeutua syvemmälle kuin pitkäketjuisilla hiilivedyillä (Shu et al. 2024). Bensiini on esimerkki selvästi lyhytketjuisesta hiilivetyjen seoksesta, jolloin se kulkeutuu maaperässä syvemmälle kuin lämmitysöljy.

Lämmitysöljy lukeutuu NAPL (Non aqueous phase liquids) -yhdisteeksi. NAPL-yhdisteet ovat veteen sekoittumattomia orgaanisia nesteitä. Nesteet, jotka ovat tiheydeltään pienempiä kuin vesi lukeutuvat LNAPL (Light non aqueous phase liquids) -yhdisteiksi (Leharne 2019). Lämmitysöljy on LNAPL-yhdiste, joka kulkeutuu maaperässä alaspäin painovoiman vaikutuksesta, mutta jää kellumaan pohjaveden pinnalle. Pohjaveden pinnalle jäävää NAPL-yhdistettä kutsutaan jäännös-NAPL-yhdisteeksi. Pohjaveden virtausliike saa aikaan NAPL-yhdisteen liukenemista pohjaveden pinnalta pohjaveteen, jolloin muodostuu epäpuhtausalue, pluumi, joka liikkuu pohjaveden mukana pois alkuperäiseltä saastumisalueelta. (Zhu and Sun 2016.)

Yhteenvetona voidaan todeta, että lämmitysöljy on kemiallisilta ominaisuuksiltaan monimutkainen ja ympäristölle haitallinen aine. Sen kyky kulkeutua maaperässä riippuu muun muassa tiheydestä ja viskositeetista, mutta myös maaperän koostumuksesta ja kosteudesta. Koska lämmitysöljy kuuluu LNAPL-yhdisteisiin, se voi aiheuttaa pohjaveden pilaantumista kelluessaan pohjaveden pinnalla ja liuetessaan siitä vähitellen vesimassaan muodostaen liikkuvia epäpuhtausalueita eli pluumeja.

2.2 Maanalaisten lämmitysöljysäiliöiden ympäristöriskit ja sääntely

Vuonna 2018 teetetyn kyselytutkimuksen mukaan pientaloissa on 40 000–50 000 maanalaista öljysäiliötä (Ympäristöministeriö 2021). Maanalainen öljysäiliö on määritelty olevan säiliö, jonka ulkopinta on kosketuksissa maaperään kaikkialta muualta paitsi hoitokuilun osalta. Maanalaisia öljysäiliöitä voi olla joko pohjavesialueen ulkopuolella tai pohjavesialueella (Pelastustoimi 2014). Vuosien 2019–2023 aikana asuinrakennusten öljyvahinkoja on sattunut 479, joista osa myös pohjavesialueella (TOKEVA 2024).

Suurin osa lämmitysöljyyn liittyvistä öljyvuodoista johtuu joko säiliön ylitäytöstä tai säiliön fyysisestä vauriosta. Ylitäyttö voi tapahtua esimerkiksi öljytoimituksen yhteydessä, jos täyttöä valvova henkilö ei ole paikalla tai toimii huolimattomasti. Myös ylitäytön estolaitteiden toimintahäiriöt voivat johtaa siihen, että säiliöön täytetään enemmän öljyä kuin sen tilavuus sallii. Säiliön rikkoutuminen taas johtuu useimmiten metallisen öljysäiliön

ruostevauriosta (Tuomainen et al. 2021). Koska edellä mainitun kaltaiset tilanteet aiheuttavat vakavia ympäristövahinkoja, on maanalaisille öljysäiliöille asetettu erilaisia vaatimuksia.

Nämä lain asettamat vaatimukset eroavat sen mukaan sijaitseeko lämmitysöljysäiliö pohjavesialueella vai pohjavesialueen ulkopuolella. Sijainnista huolimatta säiliön on oltava standardien mukainen ja hyväksytty palavan nesteen kiinteäksi varastosäiliöksi. Pientalokäytössä olevat lämmitysöljy säiliöt ovat pääosin alle 1,5 m^3 tilavuudeltaan, jolloin niihin sovelletaan kauppa- ja teollisuusministeriön päätöstä palavista nesteistä. Kyseinen päätös velvoittaa 1.1.1985-31.12.2012 välillä asennettuja palavien nesteiden säiliöitä. Se sisältää ohjeet säiliön materiaalista sekä sen sijoittamisesta. Maanalaisen öljysäiliön sijoittamisessa tulee huomioida maan kantavuus sekä painumattomuus. Erityisesti routimisen mahdollisuus tulee ottaa huomioon ja minimoida sen mahdollisesti aiheuttamat vahingot. Päätös kieltää palavien nesteiden säiliön sijoittamisen suoraan rakennuksen alle. (Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös palavista nesteistä 313/1985). Jotta voidaan välttää ylitäytön yhteydessä tapahtuvat vahingot, säiliön tulee olla ylitäytönestimellä varustettu. Pohjavesialueella säiliön tulisi olla kaksoisvaippasäiliö. (Pelastustoimi 2014.)

Pohjavesialueella tulee pitää mielessä ympäristönsuojelulain asettama pohjaveden pilaamiskielto. Kyseinen laki kieltää sellaiset pohjaveteen liittyvät toimet, jotka voivat aiheuttaa haittaa ympäristölle tai terveydelle. Lisäksi ympäristönsuojelulaki velvoittaa vahingontekijää puhdistamaan pilaantuneen maaperän tai pohjaveden sellaiseen tilaan, jossa ei pääse muodostumaan haittaa ympäristölle tai terveydelle. (Ympäristönsuojelulaki 527/2014.)

Käytöstä poistetut maanalaiset öljysäiliöt voivat myös muodostaa riskin öljyonnettomuudelle. Maanalaisen öljysäiliön poistaminen ei ole yksiselitteistä, sillä sen poistaminen voi vaatia asuinrakennuksen rakenteiden purkamista. Mikäli käytöstä poistetun öljysäiliön poisto ei onnistu, tulee se tyhjentää öljystä ja öljyisestä jätteestä sekä puhdistaa. Lisäksi säiliön täyttöaukko tulee tulpata tai muulla tapaa varmistaa, että säiliön täyttäminen ei onnistu. (Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös öljylämmityslaitteistoista 314/1985.)

Yhteenvetona voidaan todeta, että maanalaiset lämmitysöljysäiliöt muodostavat ympäristöriskin erityisesti pohjavesialueilla. Riskit liittyvät sekä säiliön vaurioihin että säiliön täyttöön liittyviin ongelmatilanteisiin. Sääntely pyrkii ehkäisemään näitä riskejä muun muassa säiliöiden rakenteelle, sijoittamiselle ja varustelulle asetetuilla vaatimuksilla. Myös käytöstä poistettujen säiliöiden hallittu käsittely on tärkeää, jotta mahdolliset ympäristöhaitat voidaan estää tehokkaasti.

2.3 Maaperän pilaantuminen ja kunnostusmenetelmät

Dieselöljy on lämmitysöljyn kaltainen kevyt polttoöljy, jonka vaikutuksia maaperälle on tutkittu laajemmin. Lämmitysöljyn ja dieselöljyn samankaltaisen kemiallisen koostumuksen vuoksi dieselöljyn vaikutukset maaperälle vertautuvat suoraan myös lämmitysöljylle. Dieselöljyn on havaittu vaikuttavan saven ja lietteen pitoisuuksiin maaperässä. Maaperän ominaispainon on havaittu laskevan merkittävästi sen ollessa dieselöljyn saastuttamaa. (He et al. 2020.) NAPL-yhdisteet tunkeutuvat maaperässä veden täyttämiin huokosiin. LNAPL-yhdisteet, joihin lämmitysöljy lukeutuu, ovat vettä kevyempiä, minkä vuoksi maaperän ominaispaino laskee.

Kiinassa suoritetussa tutkimuksessa selvitettiin millaisia vaikutuksia öljyjen hiilivedyt aiheuttavat maaperässä. Tutkimuksessa tutkittiin voimakkaasti ja kevyemmin hiilivetyjen saastuttamaa maaperää laboratoriossa. Voimakkaasti saastunut maaperä sisälsi yli 20 000 mg/kg öljyn hiilivetyjä ja kevyemmin saastunut maaperä sisälsi öljyn hiilivetyjä 4 000–20 000 mg/kg. Tutkimuksessa käytettiin lisäksi verrokkinäytettä, jonka hiilivetypitoisuus oli alle 500 mg/kg. Tutkimuksessa havaittiin, että voimakkaasti saastuneessa maaperässä mikrobien monimuotoisuus oli merkittävästi alentunut verraten kevyemmin saastuneeseen maaperään ja verrokkinäytteeseen. Tutkimuksen tulokset viittaavat siihen, että vain korkean öljyn sietokyvyn omaavat mikrobit voivat selviytyä voimakkaasti saastuneessa maaperässä. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että mikrobien väliset vuorovaikutussuhteet vähenivät merkittävästi voimakkaasti saastuneessa maaperässä. (Gao et al. 2022.)

Tällä hetkellä yleisin maaperän kunnostusmenetelmä on massanvaihto. Massanvaihto on *off site* -menetelmä, joka perustuu pilaantuneen maa-aineksen kaivamiseen ja puhtaalla maa-aineksella korvaamiseen. Kaivettu maa-aines kuljetetaan muualle käsiteltäväksi. Massanvaihdossa pilaantunut maa-aines poistetaan tapahtumapaikalta ja korvataan puhtaalla maalla, joka tuodaan pilaantuneen tilalle. Massanvaihto on kustannustehokas ratkaisu, mikä selittää sen suosion. (Maaperä kuntoon n.d.)

Maaperän kunnostaminen voidaan suorittaa myös maaperää siirtämättä eli *in situ*. Tällaisia menetelmiä on useita, ja ne perustuvat maaperän luontaiseen biohajoamiseen. (Penttinen 2001.) *In situ* -menetelmät voivat tarjota ratkaisun sellaisiin puhdistuskohteisiin, joissa maaperän kaivaminen on hankalaa ja kallista. Ennen vuotta 1985 asennetut maanalaiset lämmitysöljysäiliöt voivat olla sijoitettuna rakennusten alle, jolloin massanvaihto on työläs toimenpide.

Kärkölässä jouduttiin vuonna 2015 purkamaan omakotitalo, mikä johtui öljysäiliön ylitäytön seurauksena syntyneestä öljyonnettomuudesta. Saviseen maaperään joutui yli

500 litraa lämmitysöljyä, minkä vuoksi maaperää jouduttiin poistamaan arvion mukaan 100 tonnia. Jotta maaperään päästiin käsiksi, oli omakotitalo ensin purettava pois tieltä. (Autio 2015). Biologisen puhdistamisen merkitys korostuu edellä kuvatun kaltaisissa tilanteissa, kun joudutaan turvautumaan hyvin radikaaleihin toimenpiteisiin.

3. MAAPERÄN TEHOSTETTU BIOLOGINEN PUHDISTAMINEN

Luvussa esitellään biostimulaation ja bioaugmentaation toimintaperiaatteet, niihin liittyviä haasteita sekä biologisen puhdistamisen tehostamiskeinoja hiilivetyjen pilaamalle maaperälle.

3.1 Tehostettu biologinen puhdistaminen

Bioremediaatio pitää sisällään menetelmiä, jotka hyödyntävät luonnollisia biologisia prosesseja epäpuhtauksien poistamiseen. Sen ensisijainen tavoite on palauttaa maaperä alkuperäiseen tilaansa, mutta realistisempi tavoite on sen sijaan haitta-aineiden määrän vähentäminen. (Hazen 2010.) Bioremediaatiomenetelmiä ovat muun muassa biohajoaminen, biologinen ilmahuuhtelu (bioventing), fytoremediaatio, huokosilmakäsittely ja tehostettu biologinen puhdistaminen. Biologisten menetelmien yhteisiä etuja ovat kuljetustarpeen väheneminen sekä mahdollisuus muuntaa haitalliset aineet vaarattomiksi ympäristölle ja terveydelle. Menetelmiin liittyy kuitenkin useita haasteita, kuten niiden vaatima tarkka kohdentaminen sekä riski, että hajotusprosessien seurauksena voi muodostua alkuperäistä haitta-ainetta vaarallisempia yhdisteitä. (Kensa 2011.)

Tehostettu biologinen puhdistaminen tarkoittaa menetelmiä, jotka hyödyntävät maaperän mikrobien luontaista hajotustoimintaa. Koska tiedetään, että tehostettu biologinen puhdistus sopii orgaanisille haitta-aineille, voidaan sitä hyödyntää lämmitysöljyn pilaamaan maaperään. Menetelmä sopii Suomen olosuhteisiin, mutta toisinaan alhainen lämpötila hidastaa maaperän hajotustoimintaa. Tehostettu biologinen puhdistus on joukko erilaisia menetelmiä. Tässä työssä käsitellään kahta seuraavaa menetelmää. Biostimulaatio tarkoittaa hapen ja ravinteiden syöttämistä maaperään, kun taas bioaugmentaatiossa maaperään syötetään rikastettua mikrobikonsortiota. (Bento et al. 2005.)

Kunnostusmenetelmä tulee valita aina kohdekohtaisesti. Oikeanlaisen menetelmän valintaan vaikuttaa maaperän rakenne, jäännösöljypitoisuus, haitta-aineet ja niiden määrät. Lisäksi tulee tuntea maaperän mikrobit, niiden biosaatavuus sekä haitta-aineen biohajoamispotentiaali. (Bento et al. 2005.) Biostimulaation tai bioaugmentaation käyttö ei välttämättä sovellu tilanteisiin, joissa maaperä on pilaantunut epäorgaanisella haitta-aineella, haitta-ainepitoisuudet ovat hyvin suuria tai mikrobeja on vain vähän.

Maaperässä on luonnostaan useita öljyä hajottavien mikrobeja. Öljyä hajottavat mikrobit voivat olla joko bakteereja tai sieniä. Mikrobien öljyä hajottava ominaisuus perustuu niiden entsyymitoimintaan. (Li et al. 2022.) Tällaisia entsyymejä ovat esimerkiksi dehydrogenaasit, alkaani-mono-oksygenaasit ja lipaasit. Dehydrogenaasien tehtävänä on katalysoida orgaanisten aineiden hapettumista (Pi and Bao 2022.) Lipaasit vastaavat öljyn sisältämien rasvojen hajottamisesta. Alkaani-mono-oksygenaasit taas vastaavat erityisesti öljyjen sisältämien alkaanien hajottamisesta. (Margesin et al. 2007.)

Muuan muassa *Pseudomonas*, *Proteus* ja *Basillus* ovat maaperästä löydettäviä bakteerisukuja, joilla on öljyä hajottavia ominaisuuksia. Maaperän sienten on huomattu soveltuvan paremmin polysyklisten aromaattisien hiilivetyjen eli PAH-yhdisteiden hajottamiseen, kuin öljyn. Öljyä hajottavat mikrobit pystyvät adaptoitumaan öljyn saastuttamilla alueilla muokkaamalla solukalvojaan ja poistamalla toksiineja protoplasmastaan. Tämä selittää niiden elinkelpoisuuden saastuneillakin alueilla. (Macaulay 2015.)

3.2 Biostimulaatio

Kun maaperän mikrobit tunnetaan, voidaan niiden luontaista hajotustoimintaa lähteä tehostamaan. Biostimulaatio on hiilivetyjen hajottamiseen soveltuva menetelmä. Se perustuu mikrobien kasvuun ja aineenvaihduntaan vaadittavien ravinteiden syöttöön. Biostimulaatio vaatii maaperältä riittävästi öljyä hajottavia mikrobeja, joiden toimintaa tehostetaan. (Crawford and Rosenberg 2013.) Etelämantereella suoritetussa kenttätutkimuksessa havaittiin, että biostimulaatio on soveltuva menetelmä öljyn pilaaman maaperän kunnostamiseen myös kylmissä olosuhteissa. Kyseisessä tutkimuksessa biostimulaatiolla saavutettiin noin 26 prosenttiyksikköä parempi hiilivetyjen poisto kuin verrokkinäytteessä. (Martínez Álvarez et al. 2017.)

Biostimulaation ensisijaisena tarkoituksena on lisätä ravinteita tai muita aineita maaperän mikrobeille, jotta voidaan välttää mikrobien toimintaa haittaavat rajoitteet. Maaperään voidaan lisätä muun muassa typpeä, fosforia tai pinta-aktiivisia aineita. Typpi ja fosfori ovat eliöille välttämättömiä ravinteita, ja ne ovat keskeisessä roolissa mikrobien hajotustoiminnassa. Hiilivedyillä saastuneilla alueilla näiden ravinteiden pitoisuudet ovat usein erittäin alhaisia. Pinta-aktiivisten aineiden lisäämisellä voidaan tehostaa haitta-aineiden liukoisuutta veteen. Näin haitta-aineet ovat helpommin mikrobien käytettävissä ja niiden hajottaminen helpottuu. (Calvo et al. 2019.)

Biostimulaatio perustuu alueella luontaisesti esiintyvien mikrobien toimintaan. Tutkimuksissa on havaittu, että kunnostusalueella luontaisesti esiintyvät mikrobit ovat tehokkain tapa hajottaa hiilivetyjä, sillä ne selviävät todennäköisemmin elinkelpoisina kuin mikrobit,

jotka eivät esiinny alueella luontaisesti (Nikolopoulou et al. 2013). Alueella luontaisesti esiintyvillä mikrobeilla on kyky sopeutua hiilivetyjen saastuttamaan maaperään, mutta myös kyky hyödyntää maaperään lisättyjä ravinteita. Arabialaisella raakaöljyllä suoritetussa tutkimuksessa havaittiin, että alueella luontaisesti esiintyvien mikrobien käyttö, joille syötettiin typpeä, fosforia ja pinta-aktiivisia aineita poisti tehokkaasti hiilivetyjä (Calvo et al. 2019).

Luonnollisesti biostimulaation tehokkuus vaihtelee ympäristöolosuhteiden mukaan. Tehokkuuteen vaikuttaa muuan muassa ympäristön lämpötila, muiden haitta-aineiden läsnäolo, maaperän rakenne ja veden saatavuus (Martínez Álvarez et al. 2017). Esimerkiksi matala lämpötila saattaa hidastaa mikrobien hajotustoimintaa merkittävästi. Haitta-aineiden saatavuus maaperästä vaihtelee maaperätyyppien välillä. Savinen maaperä on läpäisemättömämpi kuin hiekkainen maaperä sen tiiviin rakenteen vuoksi. Näin ollen savisen maaperän haitta-aineiden biosaatavuus on heikkoa. Biosaatavuus kuvaa määrää, joka on eliöiden hyödynnettävissä. Hiekkaisen maaperän haitta-aineiden biosaatavuus on vastaavasti huomattavasti parempaa. (Macaulay 2015.)

Biostimulaatio vaatii optimointia, jotta sen avulla voidaan saavuttaa paras mahdollinen hiilivetyjen poistoaste. Ympäristöolosuhteisiin ei useinkaan voida vaikuttaa, sillä maaperän kunnostaminen suoritetaan suoraan saastuneella alueella. Optimoinnissa tuleekin siis keskittyä mikrobeille syötettäviin ravinteisiin ja muihin aineisiin. Parhaan poistoasteen saavuttamiseksi tarvitaan todennäköisesti useampaa kuin yhtä ravinnetta tai muuta ainetta. Ravinteiden lisäksi pinta-aktiivisten aineiden käyttö on merkittävässä asemassa, sillä se parantaa haitta-aineiden saatavuutta maaperästä. Näin ollen mikrobien luontainen hajotustoiminta tehostuu merkittävästi.

3.3 Bioaugmentaatio

Mikäli maaperän tutkimisen jälkeen päädytään siihen, ettei maaperässä ole riittävästi oikeanlaisia mikrobeja, voidaan menetelmäksi valita bioaugmentaatio. Tällöin maaperään on tarpeellista lisätä joko luonnollisia tai geneettisesti muokattuja mikrobeja. (Crawford and Rosenberg 2013.)

Bioaugmentaatiotekniikoita on useampi erilainen. Autoktoninen bioaugmentaatio on tekniikka, jossa eristetään saastuneen alueella luontaisesti esiintyviä mikrobeja, joita kasvatetaan laboratoriossa. Nämä mikrobit syötetään saastuneelle alueelle. Tutkimuksissa on saatu viitteitä, että kyseinen tekniikka olisi paras bioaugmentaatiotekniikka, sillä alu-

een maaperässä luontaisesti esiintyvien mikrobien selviytyminen on huomattavasti parempaa kuin mikrobien, joita ei esiinny luonnostaan alueen maaperässä. (Nikolopoulou et al. 2013.)

Muita bioaugmentaatiotekniikoita ovat alloktoninen bioaugmentaatio sekä geenibioaugmentaatio. Alloktonisessa bioaugmentaatiossa haitta-aineita pyritään hajottamaan hyödyntäen mikrobeja, joita ei esiinny kunnostettavalla alueella luonnostaan. Alloktoninen tekniikka ei ole osoittanut viitteitä merkittävästä toimivuudesta, sillä tuollaisten mikrobien selviytyminen on heikompaa kuin alueen maaperässä luontaisesti esiintyvien mikrobien. (Fodelianakis et al. 2015.) Geenibioaugmentaatio perustuu geenitekniikkaan, jossa mikrobeille siirretään geenejä niiden toiminnan tehostamiseksi. Näin voidaan kohdentaa mikrobien ominaisuuksia esimerkiksi hajottamaan hiilivetyjä paremmin hiilivetyjen saastuttamille alueille. Myös tähän tekniikkaan liittyy useita haasteita, ja sen onnistuminen on ollut varsin heikkoa. (Top et al. 2002.) Geeni- ja alloktoninen bioaugmentaatio ovat jääneet taka-alalle, sillä autoktoninen menetelmä on edellä kuvatuista tekniikoista selvästi lupaavin.

Bioaugmentaation tehokkuuteen voidaan vaikuttaa suuresti mikrobien valinnalla. Menetelmässä tulisi hyödyntää mikrobeja, joilla on korkea sietokyky erilaisiin ympäristöolosuhteisiin ja ovat helppoja viljellä. Kuten jo edellä mainittiin, on saastuneelle alueelle parasta käyttää sen maaperässä luontaisesti esiintyviä mikrobeja (Nikolopoulou et al. 2013). Tällaisten mikrobien selviytyminen on todennäköisempää, jolloin mikrobien hajotustoimintakin on tehokkaimmillaan.

Kuten biostimulaation niin myös bioaugmentaation tehokkuuteen vaikuttaa ympäristöolosuhteet. Ympäristöolosuhteiden vaikutukset ovat pitkälti vastaavat kuin biostimulaation kohdalla, sillä mikrobien vaatimukset ovat samat kummankin menetelmän kohdalla. Vaikka bioaugmentaatio tarkoittaakin mikrobien lisäämistä maaperään, on usein tarve myös ravinteille. Tästä syystä bioaugmentaatio itsessään ei ole juuri vakuuttanut tuloksillaan, sillä sen tuottamat tulokset ovat usein jääneet huonommiksi kuin biostimulaation (Wu et al. 2016). Mikäli biostimulaation kohdalla mikrobit hyötyvät esimerkiksi pinta-aktiivisten aineiden lisäämisestä, voidaan bioaugmentaation kohdalla todeta mikrobien hyötyvän siitä myös.

3.4 Tehostetun biologisen puhdistamisen monitorointi

Tehostettu biologinen puhdistaminen tarjoaa tehokkaita keinoja maaperän kunnostamiseen, mutta sen toteuttaminen tuo mukanaan useita haasteita. Prosessin optimointi vaa-

tii tarkkaa mikrobitoiminnan tuntemusta ja sopivien olosuhteiden varmistamista. Muuttuvat ympäristöolosuhteet luovat haasteen tehostetun biologisen puhdistamisen käytölle ja vaikuttavat puhdistusprosessin tehokkuuteen. Haasteita on siis menetelmän valintaan liittyen, mutta myös menetelmien käyttöön liittyen.

Tutkimuksissa on havaittu, että katalaasiaktiivisuuden mittaamista voidaan hyödyntää maaperän mikrobistoa selvitettäessä. Katalaasi on entsyymi, jota esiintyy aerobisissa eli happea hyödyntävissä bakteereissa. Maaperän katalaasiaktiivisuus viittaa suoraan elinkelpoisen mikrobiston aktiivisuuteen. Katalaasiaktiivisuuden on havaittu heikkenevän öljypitoisuuden kasvaessa ja kohenevan bioremediaation jälkeen. Näin ollen katalaasiaktiivisuutta tutkimalla saadaan tietoa maaperän mikrobien aktiivisuudesta, mutta voidaan myös arvioida biologisen kunnostamisen onnistumista. (Wu et al. 2016)

Maaperän mikrobistoa selvitettäessä voidaan hyödyntää muidenkin entsyymien aktiivisuuden mittaamista. Tällaisia entsyymejä ovat muun muassa lipaasit ja dehydrogenaasit. Näiden entsyymien aktiivisuuden mittaamista voidaan hyödyntää maaperän luontaisen hajotustoiminnan selvittämisessä. Kuten kataalasiaktiivisuuden mittaamista, myös muiden entsyymien aktiivisuuden avulla voidaan arvioida biologisen kunnostamisen etenemistä ja onnistumista. (Piotrowska-Cyplik et al. 2013.)

Kunnostettava ympäristö luo omat haasteensa menetelmien käyttöön liittyen. Vallitsevat ympäristöolosuhteet voivat toimia rajoittavana tekijänä öljyä hajottaville bakteereille. Ympäristön alhainen lämpötila ja alhaiset ravinnepitoisuudet hidastavat haitta-aineiden hajotusta. Erityisesti bioaugmentaation kohdalla esiintyy haasteita mikrobien selviytymisessä. Siirrettävät mikrobit tulisivat olla kunnostettavalla alueella alkuperäisinä esiintyviä bakteereita, jotta ympäristöolosuhteet olisivat mahdollisimman suotuisat. Kunnostettavalla alueella ei-luontaisesti esiintyvien mikrobien käyttäminen on suhteellisen tehotonta, sillä mikrobien selviytyminen ja näin ollen myös hajotustoiminta on heikkoa. (Nikolopoulou et al. 2013.)

Laboratoriossa toimiviksi todettujen kunnostusmenetelmien siirto kentälle voi koitua ongelmaksi tehostetun biologisen puhdistamisen kohdalla. Laboratorion tasaiset olosuhteet voivat tuottaa hyvinkin lupaavia tuloksia, mutta kentälle siirryttäessä vastaan voi tulla ongelmia muun muassa vaihtelevien olosuhteiden vuoksi. Kiinassa suoritetussa tutkimuksessa tutkittiin öljyn pilaaman maaperän biologista puhdistamista biostimulaatiolla ja bioaugmentaatiolla. Tutkimuksessa öljyn pilaamia maaperänäytteitä inkuboitiin laboratoriossa kymmenen viikon ajan. Maaperänäytteestä seurattiin katalaasiaktiivisuutta sekä hiilivetyjen hajoamistehokkuutta. Kuuden viikon jälkeen havaittiin, että biostimulaatio tehosti hiilivetyjen hajoamista 64 %:a. Bioaugmentaation kohdalla vastaava luku oli vain

34 %:a. (Wu et al. 2016). Laboratoriotutkimuksen perusteella voidaan todeta, että biostimulaatio on lupaavampi keino hiilivetyjen hajottamiseen kuin bioaugmentaatio.

Kenttäolosuhteiden mahdollisimman hyvä tuntemus auttaa valitsemaan kunnostuspaikalle sellaisia mikrobeja, joilla on parhaat edellytykset selvitä siellä. On hyvä pitää mielessä, että laboratoriossa saavutetut hyvät tulokset eivät vielä takaa tehostetun biologisen puhdistamisen onnistumista kentällä. Kuitenkin huolellinen taustatyö edesauttaa biologisen puhdistamisen onnistumista, kun voidaan välttää esimerkiksi sellaisten bakteerien käyttö, joilla on huonot edellytykset selvitä ja edistää biohajoamisprosessia.

Eräs keino tehostaa biologista puhdistamista on biostimulaation ja bioaugmentaation yhdistäminen. Bioaugmentaatioon liittyy ongelmia mikrobien eloonjäämiseen johtuen niille vieraista ympäristöolosuhteista. Yhdistämällä nämä menetelmät voidaan kuitenkin saavuttaa parempia tuloksia. Hiilivetyjen saastuttamalle maaperälle suunnatussa tutkimuksessa havaittiin, että yhdistämällä biostimulaatio ja bioaugmentaatio saatiin aikaan suurempi hiilivetyjen poistoaste kuin maaperän luontaisella puhdistumisella. Tutkimuksessa osoitettiin, että menetelmien yhdistelmällä saatiin poistettua noin 93 %:n hiilivedyistä. Luontainen puhdistuminen johti vain noin 78 %:n hiilivetyjen poistoon. (Conde Molina et al. 2023.) Parhaiden tulosten saavuttamiseksi olisi tärkeää käyttää kunnostuspaikalta luonnostaan löytyviä mikrobeja. Tällaisia mikrobeja lisätään kunnostuspaikalle sekä huolehditaan kyseisille mikrobeille elintärkeiden ravinteiden saatavuudesta. Näin voidaan hyötyä molempien menetelmien eduista ja saavuttaa parempia tuloksia. (Nikolopoulou et al. 2013.)

4. TEHOSTETTU BIOLOGINEN PUHDISTAMINEN TAPAUSTUTKIMUS

Tehostetun biologisen puhdistamisen hyödyt on hyvä pitää mielessä varsinkin silloin, kun puhdistustyöt vaativat mittavia purkutöitä. Tässä luvussa esitellään Kärkölässä tapahtunut mittava öljyvahinko. Kyseisen vahingon kunnostustöiden aluksi jouduttiin purkamaan asuinrakennus, jotta pilaantuneeseen maaperään päästiin käsiksi. Tässä luvussa selvitetään tehostetun biologisen puhdistamisen mahdollisuus kyseisen maaperän kunnostamisessa. Tehostetun biologisen puhdistamisen avulla olisi mahdollisesti voitu välttyä purkutöiltä.

Kärkölässä tapahtui vuonna 2014 öljyvahinko, joka johtui lämmitysöljysäiliön täytön yhteydessä hajonneesta täyttöputken liitoksesta. Rikkoutuneen liitoksen vuoksi omakotitalon säiliötilaan pääsi vuotamaan noin 1200 litraa lämmitysöljyä. Lämmitysöljysäiliötä täyttänyt henkilö huomasi vuodon, jolloin vahingosta ilmoitettiin pelastusviranomaiselle. Öljyä onnistuttiin pumppaamaan noin 650 litraa talteen, mutta noin 550 litraa öljyä kulkeutui maaperään. (Elinkeino- liikenne- ja ympäristökeskus 2015.)

Öljyvahingon jälkeen tapahtumapaikalla suoritettiin torjuntatöitä. Torjuntatöiden yhteydessä yritettiin estää öljyn kulkeutuminen omakotitalon alle, mutta samalla havaittiin öljyn jo levinneen sinne. Maaperälle suoritettiin pilaantuneisuustutkimukset, jotta voitiin selvittää puhdistustarpeen arviointi. Pilaantuneisuustutkimuksissa selvisi, että maaperä on pilaantunut asuinrakennuksen alla noin 1,5 metrin syvyyteen asti. Maaperän öljyhiilivetyjen keskitisleiden pitoisuus oli suurimmillaan 24 000 mg/kg raja-arvon ollessa 1 000 mg/kg. Lisäksi maaperästä mitattiin raja-arvot ylittävä pitoisuus raskaiden öljyjakeiden, ksyleenin ja bentseenin kohdalla. (Elinkeino- liikenne- ja ympäristökeskus 2015.)

Maaperän pilaantuneisuustutkimusten jälkeen kohteelle tehtiin maaperän puhdistussuunnitelma. Tämän jälkeen maaperälle suoritettiin massanvaihto. Maaperän öljyhiilivedyille asetettiin tavoitetasoksi 300 mg/kg. Massanvaihdon edetessä otettiin laboratorionäytteitä, jotta voitiin varmistua tavoitetason toteutumisesta. Pilaantunutta maata arvioitiin olevan noin 100 tonnia. Pilaantunut maa-aines kuljetettiin käsittelylaitokselle, joka oli hyväksytty kyseisen jätteen käsittelyyn. (Elinkeino- liikenne- ja ympäristökeskus, 2015.)

Koska Kärkölässä maaperä on pilaantunut lämmitysöljyllä, voidaan seuraavaksi pohtia tehostetun biologisen puhdistamisen soveltuvuutta kyseisen maaperän kunnostamisessa. Jotta kunnostaminen olisi mahdollisimman tehokasta, käsitellään menetelmänä

biostimulaation ja bioaugmentaation yhdistämistä. Tehostetun biologisen puhdistamisen tavoitteena on kunnostaa maaperä ilman, että asuinrakennuksia joudutaan purkamaan.

Jo aiemmin todettiin, että tehokkain biologinen tapa kunnostaa maaperää on yhdistää biostimulaatio ja bioaugmentaatio. Näin saadaan hyödynnettyä kunnostusalueella luontaisesti esiintyviä mikrobeja, joiden toimintaa voidaan tehostaa ravinteilla tai muilla aineilla. Bioaugmentaatio mahdollistaa mikrobien määrän lisäämisen, jolloin biohajoaminen tehostuu. Menetelmien yhdistäminen vaatii huolellista taustatietojen selvittämistä.

Alkuun tulee selvittää saastuneen maaperän haitta-aine, sen pitoisuudet ja levinneisyys. Nämä asiat tulee tuntea myös massanvaihtoa suoritettaessa. Tehostettua biologista puhdistamista käytettäessä tulee saada selville myös maaperän mikrobisto. Jotta maaperään voidaan hyödyntää biostimulaatiota, tulee sieltä löytyä bakteereita, joilla on öljyä hajottava ominaisuus. Katalaasiaktiivisuutta tutkimalla saadaan tietoa maaperän mikrobien aktiivisuudesta, jolloin menetelmää käyttämällä voidaan alkuun selvittää kuinka aktiivista kyseisen maaperän mikrobitoiminta on (Wu et al. 2016). Mikäli jo alkuun todetaan, ettei mikrobitoimintaa juuri ole, on järkevää siirtyä muihin kunnostusmenetelmiin.

Maaperän mikrobien lajien selvittämisessä voidaan käyttää 16S rRNA sekvensointia eli 16S ribosomaalisen RNA:n sekvensointia. Kyseisellä menetelmällä saadaan tietoa mikrobeista sukutasolla, ja joissakin tapauksissa jopa lajitasolla. 16S geeni löytyy kaikilta prokaryooteilta ja se sisältää hyvin konservoituneita alueita. Menetelmä antaa tietoa mikrobeista sekvenssidataan perustuen. (Santos et al. 2020.) Pilaantuneen maaperän mikrobisto selvitetään maaperänäytteestä hyödyntäen 16S rRNA sekvensointia.

Taustatöiden jälkeen voidaan siirtyä tehostetun biologisen puhdistamisen toteutukseen. Kärkölässä suurin haaste liittyy pilaantuneen maaperän sijaintiin. Koska pilaantunut maaperä sijaitsee asuinrakennuksen alla, on sen käsittely luonnollisesti vaikeaa. Ravinteiden ja muiden aineiden sekä mikrobien injektoinnin vuoksi pilaantuneeseen maaperään tulee saada yhteys. Reikien poraaminen pilaantuneeseen maaperään mahdollistaa edellä mainittujen asioiden injektoinnin, mutta myös maaperänäytteen ottamisen.

Pilaantunut maaperä on pääosin savea ja silttiä (Elinkeino- liikenne- ja ympäristökeskus 2015). Savisen maaperän biosaatavuus on heikompaa kuin hiekkaisen maaperän. Pinta-aktiivisilla aineilla saadaan lisättyä haitta-aineiden liukoisuutta veteen, jolloin ne ovat paremmin mikrobien hyödynnettävissä (Calvo et al. 2019). Toisaalta voi olla myös

tarpeen lisätä maaperän kosteutta, jotta pinta-aktiivisten aineiden käyttö olisi mahdollisimman tehokasta. Pinta-aktiivisten aineiden käytöllä haitta-aineet saadaan siis vapautettua mikrobien hajotettavaksi.

Koska jo kunnostustöiden alussa selvitetään maaperän mikrobien katalaasiaktiivisuus, voidaan sitä seurata kunnostamisen edetessä. Katalaasiaktiivisuudesta tiedetään, että maaperän pilaantuessa öljyllä se laskee merkittävästi. Kuitenkin maaperän puhdistuessa katalaasiaktiivisuus lisääntyy vähitellen. (Wu et al. 2016.) Näin ollen katalaasiaktiivisuutta seuraamalla voidaan seurata maaperän puhdistumista. Mikäli katalaasiaktiivisuus laskee entisestään alkumittausten jälkeen, voidaan todeta tehostetun biologisen puhdistamisen tehottomuus.

Kuten massanvaihdon kohdalla, myös tehostetun biologisen puhdistamisen onnistumista tulee seurata näytteenotoilla. Kärkölän tapauksen kohdalla maaperän öljyhiilivetyjen tavoitetasoksi asetettiin 300 mg/kg (Elinkeino- liikenne- ja ympäristökeskus 2015). Tämä tavoitetaso tulee pystyä saavuttamaan käyttäen tehostettua biologista puhdistamista, jotta se voidaan valita menetelmäksi. Koska tehostetun biologisen puhdistamisen tavoitteena on säästyä asuinrakennuksen purulta, tulisi tuo tavoitetaso pystyä saavuttamaan ilman, että massanvaihtoon joudutaan turvautumaan.

Tehostetun biologisen puhdistamisen esteitä voivat olla hyvin suuret haitta-ainepitoisuudet, savinen maaperä tai luontainen mikrobien puute. Vaikka öljyä hajottavilla mikrobeilla on kyky adaptoitua öljyn saastuttamilla alueilla, todennäköisesti niidenkin elinkelpoisuus kärsii valtavista haitta-ainepitoisuuksista. Savinen maaperä on koostumukseltaan hyvin läpäisemätöntä (Macaulay 2015). Tämän vuoksi ravinteiden ja muiden aineiden injektointi voi osoittautua tehottomaksi, sillä niiden kulkeutuminen mikrobeille on todennäköisesti hyvin pientä. Luontainen mikrobien puute taas aiheuttaa sen, että maaperässä ei ole mikrobitoimintaa, jota voitaisiin tehostaa. Bioaugmentaation onnistuminen on tällaisessa maaperässä myös hyvin epävarmaa, sillä mikrobitoiminnan puute kertoo hankalista elinoloista.

Kiinassa suoritetussa tutkimuksessa pidettiin voimakkaasti saastuneena sellaista maaperää, jonka öljyn hiilivetyjen pitoisuus oli yli 20 000 mg/kg. Tutkimuksessa todettiin, että mikrobien monimuotoisuus on alentunut sekä mikrobien vuorovaikutus vähentynyt näytteissä, joissa kyseinen arvo ylittyi. (Gao et al. 2022.) Kärkölän pilaantuneen maaperän öljyhiilivetyjen pitoisuus oli suurimmillaan 24 000 mg/kg, jolloin se ylittää edellä

mainitun pitoisuuden. Näin ollen voidaan olettaa, että Kärkölässä pilaantuneen maaperän mikrobiston monimuotoisuus on kärsinyt suuresta hiilivetypitoisuudesta. Tämä voi vaikuttaa negatiivisesti tehostetun biologisen puhdistamisen onnistumiseen.

Koska Kärkölän pilaantunut maaperä koostuu savesta ja siltistä, voidaan tehostetun biologisen puhdistamisen onnistumista pitää suhteellisen epätodennäköisenä. Haitta-ainepitoisuuksien tiedetään olevan suuria, jolloin on syytä pohtia, saavutetaanko bioaugmentaation ja biostimulaation avulla riittävän hyviä tuloksia. Koska massanvaihto edellyttää asuinrakennuksen purkamisen, on vaihtoehtona kokeilla ensin tehostettua biologista puhdistamista. Näin voidaan selvittää lähteekö maaperä puhdistumaan mikrobitoiminnan avulla, vai joudutaanko turvautumaan massanvaihtoon. Tehostetun biologisen puhdistamisen kokeilu tuskin aiheuttaa niin merkittäviä kustannuksia, että sen kokeilemista ei kannattaisi harkita. Kustannusten merkitys nousee suureksi, mikäli asuinrakennuksen purku voidaan välttää.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli kuvata millaisia vaikutuksia maaperään joutunut lämmitysöljy aiheuttaa ja miten maaperään joutunutta lämmitysöljyä voidaan poistaa maaperästä biologisin keinoin.

Maaperään voi päätyä lämmitysöljyä esimerkiksi säiliörikkojen ja ylitäyttöjen vuoksi. Maaperän mikrobien toiminnan häiriintymisen vuoksi lämmitysöljyvuodot vaikuttavat ravinteiden pitoisuuksien pienenemiseen. Lämmitysöljy on tiheydeltään vettä kevyempää, jolloin se lukeutuu LNAPL-yhdisteeksi. Lämmitysöljyn pilaaman maaperän ominaispaino laskee, sillä LNAPL-yhdisteet syrjäyttävät veden täyttämät huokoset.

Lämmitysöljyn kulkeutuvuuteen vaikuttaa useita tekijöitä. Koska lämmitysöljy vertautuu kemiallisilta ominaisuuksiltaan dieselöljyyn, voidaan kulkeutumista tutkia dieselöljyn kulkeutumisen kautta. Maaperässä kulkeutumiseen vaikuttaa yhdisteen tiheys, viskositeetti ja hiiliketjun pituus. Näiden tekijöiden perusteella lämmitysöljyn kulkeutuminen ei ole erityisen suurta verrattuna esimerkiksi bensiiniin. Lämmitysöljyn kulkeutuvuuden tiedetään olevan sora- ja hiekkamaassa suurempaa kuin savimaassa hiukkaskoon vuoksi.

Joillakin maaperän mikrobeilla on luontainen kyky hajottaa öljyä. Öljyä hajottavat mikrobit ovat pääosin bakteereja, sillä sienet soveltuvat paremmin PAH-yhdisteiden kuin hiilivetyjen hajottamiseen. Öljyä hajottavien bakteerien entsyymitoiminta mahdollistaa öljyn hajottamisen. Tällaisia bakteerisukuja ovat muun muassa *Proteus*, *Basillus ja Pseudomonas*. Öljyn hajotustoimintaan osallistuvia entsyymejä ovat esimerkiksi lipaasit ja dehydrogenaasit.

Tehostettu biologinen puhdistaminen on menetelmä, jota voidaan hyödyntää lämmitysöljyn pilaamaan maaperään. Se jaetaan useaan eri tekniikkaan, josta tässä työssä käsiteltiin biostimulaatiota ja bioaugmentaatiota. Työssä havaittiin, että biostimulaatio on tehokas menetelmä lämmitysöljyn pilaaman maaperän kunnostamiseen, sillä se hyödyntää saastuneen alueella luontaisesti esiintyviä mikrobeja. Tällaisten mikrobien selviytyminen on todennäköisempää kuin mikrobien, joita ei esiinny alueella luonnostaan.

Menetelmien käyttöön liittyy useita haasteita kuten maaperän mikrobiston selvittäminen, laboratoriotulosten skaalaaminen kenttäolosuhteisiin sekä mikrobien selviytymishaasteet. Näihin haasteisiin voidaan ainakin osittain vastata biostimulaation ja bioaugmentaation yhdistämisellä. Menetelmien yhdistämisellä saadaan lupaavia tuloksia hiilivetyjen hajottamisen suhteen, sillä alueella luontaisesti esiintyvien mikrobien lisääminen sekä

ravinteiden ja muiden aineiden syöttäminen tehostaa öljyä hajottavien mikrobien toimintaa. Biostimulaation ja bioaugmentaation yhdistämistä käsittelevässä tutkimuksessa on saatu poistettua jopa 93 %:a hiilivedyistä.

Lämmitysöljyvahingot voivat vaatia mittavia toimenpiteitä kuten massanvaihtoa ja rakennuksien purkutöitä. Tapaustutkimuksella esitetään biostimulaation ja bioaugmentaation yhdistelmä kunnostusmenetelmänä. Tehostetun biologisen puhdistamisen avulla voidaan saavuttaa merkittäviä tuloksia, mutta sen vaatimukset ovat suhteellisen tarkkarajaiset.

Biostimulaation ja bioaugmentaation etuna on, että maaperä voidaan puhdistaa siellä, missä pilaantuminen on tapahtunut, eikä sitä tarvitse kuljettaa muualle käsiteltäväksi. Toisaalta maaperän ominaisuudet tai mikrobiston puutteet voivat tehdä menetelmän käytöstä mahdotonta. Vaikka menetelmä vaatiikin kohdekohtaista tarkastelua, tehostettu biologinen puhdistaminen on varteenotettava vaihtoehto maaperän in situ -kunnostukseen.

6. LÄHTEET

Autio, R. 2015. Harvinainen öljyonnettomuus: Omakotitalo purettava satojen litrojen vuodon takia. Yle Uutiset 9.4.2015. Viitattu 18.2.2025. https://yle.fi/a/3-7917489.

Balogun, Y., Iyi, D., Faisal, N., Oyeneyin, B., Oluyemi, G., Mahon, R., 2021. Experimental investigation of the effect of temperature on two-phase oil-water relative permeability. Journal of Petroleum Science and Engineering 203, 108645. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108645

Bento, F.M., Camargo, F.A.O., Okeke, B.C., Frankenberger, W.T., 2005. Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation. Bioresource Technology 96, 1049–1055. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.09.008

Calvo, C., Rodríguez-Calvo, A., Robledo-Mahón, T., Manzanera, M., González-López, J., Aranda, E., Silva-Castro, G.A., 2019. Biostimulation of crude oil-polluted soils: influence of initial physicochemical and biological characteristics of soil. International Journal of Environmental Science and Technology 16, 4925–4934. https://doi.org/10.1007/s13762-019-02269-8

Conde Molina, D., Liporace, F., Quevedo, C.V., 2023. Bioremediation of an industrial soil contaminated by hydrocarbons in microcosm system, involving bioprocesses utilizing co-products and agro-industrial wastes. World Journal of Microbiology and Biotechnology 39. https://doi.org/10.1007/s11274-023-03766-2

Crawford, R.L., Rosenberg, E., 2013. Bioremediation, in: The Prokaryotes. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 295–307. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31331-8_30

Elinkeino- liikenne- ja ympäristökeskus, 2015. Päätös pilaantuneen maaperän puhdistamisesta Dnro HAMELY/547/2015. Saatavilla: Pyynnöstä Hämeen Ely-keskus/Kirjaamo

Fodelianakis, S., Antoniou, E., Mapelli, F., Magagnini, M., Nikolopoulou, M., Marasco, R., Barbato, M., Tsiola, A., Tsikopoulou, I., Giaccaglia, L., Mahjoubi, M., Jaouani, A., Amer, R., Hussein, E., Al-Horani, F.A., Benzha, F., Blaghen, M., Malkawi, H.I., Abdel-Fattah, Y., Cherif, A., Daffonchio, D., Kalogerakis, N., 2015. Allochthonous bioaugmentation in *ex situ* treatment of crude oil-polluted sediments in the presence of an effective degrading indigenous microbiome. Journal of Hazardous Materials 287, 78–86. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.01.038

Gao, H., Wu, M., Liu, H., Xu, Y., Liu, Z., 2022. Effect of petroleum hydrocarbon pollution levels on the soil microecosystem and ecological function. Environmental Pollution 293, 118511. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118511

Hazen, T.C., 2010. Biostimulation. https://escholarship.org/uc/item/7b93x80

He, X., Liu, F., Li, G., Lu, H., 2020. Experimental study on the basic physical properties of diesel contaminated soil. Presented at the E3S Web of Conferences. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016502008

Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös öljylämmityslaitteistoista 314/1985, 1985. https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1985/19850314.

Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös palavista nesteistä 313/1985, 1985. https://finlex.fi/fi/lainsaadanto/1985/313

Kensa, V.M., 2011. Bioremediation - an overview. Journal of industrial pollution control. https://www.icontrolpollution.com/articles/bioremediation--an-overview-.php?aid=37408

Leharne, S., 2019. Transfer phenomena and interactions of non-aqueous phase liquids in soil and groundwater. ChemTexts 5, 1–21. https://doi.org/10.1007/s40828-019-0079-2

Li, Y., Li, C., Xin, Y., Huang, T., Liu, J., 2022. Petroleum pollution affects soil chemistry and reshapes the diversity and networks of microbial communities. Ecotoxicology and Environmental Safety 246, 114129. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114129

Maaperä kuntoon, n.d. Puhdistusmenetelmiä. Maaperä kuntoon Viitattu 18.2.2025. https://maaperakuntoon.fi/puhdistusmenetelmia

Macaulay, B.M., 2015. UNDERSTANDING THE BEHAVIOUR OF OIL-DEGRADING MICRO-ORGANISMS TO ENHANCE THE MICROBIAL REMEDIATION OF SPILLED PETROLEUM. AEER 13. https://doi.org/10.15666/aeer/1301_247262

Margesin, R., Hämmerle, M., Tscherko, D., 2007. Microbial Activity and Community Composition during Bioremediation of Diesel-Oil-Contaminated Soil: Effects of Hydrocarbon Concentration, Fertilizers, and Incubation Time. Microb Ecol 53, 259–269. https://doi.org/10.1007/s00248-006-9136-7

Martínez Álvarez, L., Ruberto, L., Lo Balbo, A., Mac Cormack, W., 2017. Bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils in cold regions: Development of a pre-optimized biostimulation biopile-scale field assay in Antarctica. Science of The Total Environment 590–591, 194–203. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.204

Motiva, n.d. Öljylämmitys. Motiva. Viitattu 11.02.2025 https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/energiatehokas_pientalo/pientalon_lammitys/oljylammitys

Nikolopoulou, M., Pasadakis, N., Kalogerakis, N., 2013. Evaluation of autochthonous bioaugmentation and biostimulation during microcosm-simulated oil spills. Marine Pollution Bulletin 72, 165–173. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.04.007

Pelastustoimi, L.J., 2014. Lämmitysöljysäilion ja öljylämmityslaitteiston sijoittaminen, huolto, tarkastuttaminen ja käytöstä poistaminen. Viitattu 1.3.2025. Saatavilla pelastustoimi.fi > lomakkeet ja ohjeet > asukkaan opas

Penttinen, R., 2001. Maaperän ja pohjaveden kunnostus. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. http://hdl.handle.net/10138/40841

Pi, Y.-R., Bao, M.-T., 2022. Investigation of kinetics in bioaugmentation of crude oil via high-throughput sequencing: Enzymatic activities, bacterial community composition and functions. Petroleum Science 19, 1905–1914. https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.01.022

Piotrowska-Cyplik, A., Chrzanowski, Ł., Cyplik, P., Dach, J., Olejnik, A., Staninska, J., Czarny, J., Lewicki, A., Marecik, R., Powierska-Czarny, J., 2013. Composting of oiled bleaching earth: Fatty acids degradation, phytotoxicity and mutagenicity changes. International Biodeterioration & Biodegradation 78, 49–57. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.12.007

Ramírez-Verduzco, L.F., Hernández-Sánchez, M.J., 2021. Blends of Green Diesel (Synthetized from Palm Oil) and Petroleum Diesel: a Study on the Density and Viscosity. Bioenergy Research 14, 1002–1013. https://doi.org/10.1007/s12155-020-10183-y

Santos, A., van Aerle, R., Barrientos, L., Martinez-Urtaza, J., 2020. Computational methods for 16S metabarcoding studies using Nanopore sequencing data. Computational and Structural Biotechnology Journal 18, 296–305. https://doi.org/10.1016/j.csbj.2020.01.005

Shu, A., Yang, Z., Cui, Q., Liu, Z., Liu, S., Zhang, M., Sun, H., Shang, J., Tian, H., Xiao, Y., Tan, W., 2024. Spatial variations and vertical migration potentials of petroleum hydrocarbons with varying chain lengths in soils of different depths: Roles of solid and dissolved organic matters and soil texture. Science of The Total Environment 955, 176984. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176984

Tilastokeskus, 2022. Kotitalouksien kulutus muuttujina Talotyyppi, Vuosi ja Tiedot. Tilastokeskus. Viitattu 11.2.2025. https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/Kotitalouksien kulutus > Asunnon pääasiallinen lämmitystapa talotyypeittäin > Pääasiallinen lämmitystapa Öljy > Talotyyppi Omakotitalo > Vuosi 2022

TOKEVA, 2024. Suomessa sattuneet kemikaalionnettomuudet 2019-2023. TOKEVA.fi
Top, E.M., Springael, D., Boon, N., 2002. Catabolic mobile genetic elements and their potential use in bioaugmentation of polluted soils and waters. FEMS Microbiology Ecology 42, 199–208. https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2002.tb01009.x
Tuomainen, J., Högmander, P., Pyy, O., 2021. Ympäristövahingot Suomessa vuosina 2013–2019. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 22–24.
Työterveyslaitos, 2023. Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet: Kevyt polttoöljy Viitattu 11.2.2025. https://ova.ttl.fi/kevyt-polttooljy
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. International Biodeterioration & Biodegradation 107, 158–164. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.11.019
Wyszkowski, M., Wyszkowska, J., Borowik, A., Kordala, N., 2020. Contamination of Soil with Diesel Oil, Application of Sewage Sludge and Content of Macroelements in Oats. Water, Air, and Soil Pollution 231. https://doi.org/10.1007/s11270-020-04914-2
Ympäristö, n.d. Ympäristönsuojelulaki 527/2014 [WWW Document]. URL https://finlex.fi/fi/lainsaadanto/2014/527 (accessed 4.8.25).
Ympäristöministeriö, 2021. FOSSIILISESTA ÖLJYLÄMMITYKSESTÄ LUOPUMISEN TOIMENPIDEOHJELMA. Ympäristöministeriö.
Zhu, J., Sun, D., 2016. Significance of groundwater flux on contaminant concentration and mass discharge in the nonaqueous phase liquid (NAPL) contaminated zone. Journal of Contaminant Hydrology 192, 158–164. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2016.08.002