

Pro gradu – tutkielma

**Öljihiilivedyillä pilaantuneen maa-aineksen
kompostoinnin tehostaminen**

Marko Männynsalo



Jyväskylän yliopisto

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede- ja teknologia

16.9.2009

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede- ja teknologia

MÄNNYNSALO MARKO, T.: Öljyhiilivedyillä pilaantuneen maa-aineksen
kompostoinnin tehostaminen

Pro gradu: 110 + 7 s.

Työn ohjaaja: FT Kai Sormunen, Ins. Jani Burman

Tarkastaja: Professori Jukka Rintala, FT Kai Sormunen

Elokuu 2009

Hakusanat: Pilaantunut maa-aines, öljyhiilivedyt, aumakompostointi, tehostaminen

TIIVISTELMÄ

Öljyhiilivedyillä pilaantuneet maa -ainekset käsitellään jätteenkäsittelykeskuksissa pääasiassa kompostoimalla ne aumoissa. Aumakompostoinnin kustannustehokkuus on sen merkittävin etu muihin käsittelymenetelmiin verrattuna. Menetelmän heikkoutena voidaan pitää sen pitkää käsittelyaikaa ja riippuvuutta sääolosuhteista sekä suurta kenttätilan tarvetta.

Tässä tutkimuksessa kartoitettiin ratkaisuja öljyhiilivedyillä pilaantuneiden maa-ainesten kunnostuksen tehostamiseen. Työssä tutkittiin kompostointiprosessin tehostamista pyrkimällä muokkaamaan aumojen hajotusolosuhteita optimaalisimmiksi tukiainelisäyksiin sekä ilmakiertoon liittyvin rakenneratkaisuin.

Tutkimusta varten Mustankorkean jätteenkäsittelykeskuksen kompostointikentälle rakennettiin neljä rakenteeltaan erilaista koeaamaa, joiden kompostoitumisprosessin toimintaa seurattiin kesäkuun 2008 ja tammikuun 2009 välisenä ajanjaksona. Kompostointiprosessien seuranta järjestettiin näytteenoton, manuaalisten kenttämittausten sekä reaaliaikaisten lämpötila -antureiden avulla. Hankkeen tavoitteena oli luoda toimintamalli, jonka mukaisesti öljyhiilivedyillä pilaantuneiden maa-ainesten aumakompostointia olisi mahdollista suorittaa tehokkaasti vuodenajasta riippumatta.

Tehostetun aumakompostoinnin avulla saavutettiin 58–75 % vähenemä aumakohtaisissa öljyhiilivetytypitoisuuksissa kahdeksan käsittelykuukauden aikana. Tutkimus osoitti, että tehostamistoimenpiteillä, kuten orgaanisen tukiaineen lisäyksellä sekä tehostetulla ilmastuksella, voidaan vaikuttaa kompostoitumisprosessin toimivuuteen sekä öljyhiilivetyjen hajoamisnopeuteen.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, Faculty of Science

Department of Biological and Environmental Science

Environmental Science and Technology

MÄNNYNSALO MARKO, T.: Improving the composting process of hydrocarbon contaminated soils

Master of Science Thesis: 110 + 7 p.

Supervisors: Ph.D. Kai Sormunen, B. Sc. Jani Burman

Inspectors: Professor Jukka Rintala, Ph.D. Kai Sormunen

August 2009

Key Words: Composting, contaminated soil, hydrocarbons, biopile, field-scale study

ABSTRACT

Composting is a traditional method of treating hydrocarbon contaminated soil. Usually composting is carried out by piling contaminated soil in biopiles, where organic matter such as bark chips or sewage sludge is added as a bulking agent and source of nutrients. Biopiles are relatively cost effective but the treatment process needs a lot of time and field space and is also highly depended on weather.

This field-scale study examines the effect of aeration, thermal insulation and the addition of pre-treated sewage sludge for the treatment of diesel oil contaminated soil in a biopile system. Four biopiles were constructed with soil freshly contaminated with diesel oil and operated for eight months (June 2008 – January 2009) in the waste disposal site of Mustankorkea. Total petroleum hydrocarbons (TPH), pH, total organic compounds (TOC) and dry matter were monitored by periodic collection and analysis of soil samples. Volatilization of gas compounds (O₂, CO₂, CH₄, volatile organic compounds) was measured by using a portable gas analyzer. Biopile temperatures were monitored continuously with a datalogger and field measurements.

In the present study significant TPH reduction was observed in all biopile systems. THP content decreased 58–75 % and reached the residue concentration under 2500 mg/kg (dry weight) in every studied biopile. Findings suggest that aeration with the pre-treated sewage sludge can enhance the biodegradation of hydrocarbons. By optimizing the essential factors of composting process, like oxygen level and nutrient rates, it is possible to treat hydrocarbon contaminated soils in biopiles also during the winter time.

Sisältö

1. JOHDANTO	6
1.1. Pilaantuneen maa -aineksen kompostointi	7
1.2. Tutkimuksen tavoitteet	9
2. ÖLJYHIILIVEDYT	9
2.1. Alkuperä, rakenne ja jalosteiden käyttö	9
2.2. Käyttäytyminen maaperässä.....	11
2.3. Mikrobiologinen hajoaminen	14
2.4. Kompostoitumiseen vaikuttavat ympäristötekijät	19
3. ÖLJYHIILIVEDYILLÄ PILAANTUNEEN MAA-AINEKSEN KOMPOSTOINTI	22
3.1. Käsiteltävän maa-aineksen ominaisuudet	22
3.2. Esitutkimukset ja näytteenotto	23
3.3. Kompostikentän rakenteet.....	26
3.4. Aumarakenteet.....	27
3.5. Päästöjen hallinta.....	31
3.6. Kunnostustyön aikainen laadunhallinta.....	32
3.7. Kompostoinnin päättäminen sekä loppusijoitus.....	33
3.8. Työsuojelu ja turvallisuus	34
3.9. Kokemuksia öljyhiilivedyillä pilaantuneiden maiden kompostoinnista	36
3.9.1. Koneellisen ilmastuksen ja kostutuksen vaikutus kompostoitavuuteen	36
3.9.2. Orgaanisen aineksen vaikutus kompostoitavuuteen	38
4. AINEISTO JA MENETELMÄT	40
4.1. Jätteenkäsittely Mustankorkealla	40
4.2. Tutkimuksen toteutus	43
4.3. Pilaantunut maa-aines sekä käytetyt seosaineet	45
4.4. Koeaumamat.....	46
4.4.1. Vertailuauama, koeauma 0	46
4.4.2. Painovoimaisesti ilmastettu auma, koeauma 1	48
4.4.3. Lämpöeristetty auma, koeauma 2	50
4.4.4. Ilmastettu sekä lämpöeristetty auma, koeauma 3	52
4.5. Kenttäanalyysit	55

4.5.1. Näytteenotto ja öljyhiilivetyanalyytit PetroFLAG™- kenttätestauslaitteistolla	55
4.5.2. Lämpötilaseuranta.....	55
4.5.3. Reaaliaikaiset lämpötila-anturit	56
4.6. Laboratorioanalyytit.....	59
4.6.1. Öljyhiilivetyanalyytit	59
4.6.2. Kuiva-ainepitoisuus, pH sekä orgaaninen hiili (TOC)	60
5. TULOKSET	61
5.1. Öljyhiilivedyt.....	61
5.2. Lämpötilat	71
5.3. Kaasumaiset yhdisteet	77
5.4. Kuiva-ainepitoisuus, pH sekä orgaaninen hiili (TOC).....	82
6. TULOSTEN TARKASTELU	85
6.1. Öljyhiilivetyjen reduktio koeaumoissa.....	85
6.2. Lämpötilojen kehitys koeaumoissa	90
6.3. Kaasumaisten yhdisteiden kehitys koeaumoissa.....	95
6.4. Kuiva-ainepitoisuus, pH sekä orgaaninen hiili (TOC).....	99
6.5. Käsittelyprosessin seuranta ja hallinta	101
7. JOHTOPÄÄTÖKSET	104
7.1. Tutkimustavoitteiden toteutuminen.....	104
7.2. Toimintamalli öljyhiilivedyillä pilaantuneen maa-aineksen kompostointiin....	106
7.3. Jatkotutkimus.....	109
Kiitokset	111
Kirjallisuus	112

1. JOHDANTO

Suomessa tapahtuu vuosittain noin 2000 öljyvahinkoa, jossa öljy-yhdisteitä pääsee valumaan maaperään. Pääosassa kyseisistä vahingoista vain pieni määrä öljyä ehtii valua maahan, ennen niiden havaitsemista ja nopeita torjuntatoimenpiteitä. Vakavampia öljyvahinkoja sattuu vuosittain 100–150 kappaletta. Hoitamattomat öljyonnettomuusalueet ja pilaantumukset voivat aiheuttaa riskin niin ihmisille kuin ympäröivälle luonnollekin (Gråsten & Kiukas 2004).

Maaperän pilaantuneisuutta koskevat kynnys- ja ohjearvot on määritelty perustuen haitta-aineiden aiheuttamaan ekologiseen tai terveydelliseen riskiin (Ympäristöministeriö 2007). Valtioneuvoston asetuksen (214/2007) 3 § mukaan maaperän pilaantuneisuuden puhdistustarve on arvioitava, mikäli yhden tai useamman haitallisen yhdisteen pitoisuus maaperässä ylittää kyseisessä asetuksessa säädetyn kynnysarvon. Samaisen asetuksen 4 § mukaan maaperän pilaantuneisuudesta asetettuja ohjearvoja tulee noudattaa suunniteltaessa haitta-aineilla pilaantuneille alueille maankäyttöä. Alempi ohjearvo määrittää vakituiseen asumiseen tai työntekoon käytettäville alueille haitta-ainepitoisuuksien raja-arvot. Ylempää ohjearvoa voidaan puolestaan soveltaa sijoitettaessa esimerkiksi teollista tuotantoa haitta-aineilla pilaantuneille maa-alueille. Edellä mainitut kynnys- ja ohjearvot on esitetty taulukossa 1. Yleisesti pilaantuneella maa-alueella tarkoitetaan aluetta, jota ei voida käyttää alkuperäiseen käyttötarkoitukseen tai mahdollisesti muuhun suunniteltuun tarkoitukseen.

Taulukko 1: Maaperässä esiintyvien öljyhiilivety-yhdisteiden kynnys- sekä ohjearvot, jossa 1) summapitoisuus sisältäen yhdisteet: metyyli-tert-butyylieetteri (MTBE) sekä tert-amyylimetyylieetteri (TAME), 2) n-parafiinisarja kaasukromatografisessa analyysissä (Ympäristöministeriö 2007, mukailten).

Öljyhiilivetyjakeet ja oksygenaatit	Kynnysarvo (mg/kg)	Alempi ohjearvo (mg/kg)	Ylempi ohjearvo (mg/kg)
MTBE-TAME ¹⁾	0,1	5 (t)	50 (t)
Bensiinijakeet (C ₅ - C ₁₀) ²⁾		100	500
Keskitisleet (> C ₁₀ - C ₂₁) ²⁾		300	1 000
Raskaat öljyjakeet (> C ₂₁ - C ₄₀) ²⁾		600	2 000
Öljyjakeet (> C ₁₀ - C ₄₀) ²⁾	300		

Ohjearvot (taulukko 1) koskevat pilaantuneita maamassoja, jotka sijaitsevat vielä pilaantumiskohteen maaperässä. Jätteenkäsittelykeskuksissa pilaantuneiden maamassojen käsittelylle on asetettu erilliset ohjeelliset raja-arvot. Jätteenkäsittelykeskuksissa käsiteltävien pilaantuneiden maa-ainesten kaatopaikkakelpoisuutta ja pitoisuusrajoja on käsitelty jäljempänä luvussa 3.8. ”Kompostoinnin päättäminen ja loppusijoitus”.

1.1. Pilaantuneen maa -aineksen kompostointi

Kompostointi on yksi perinteisimmistä biologisista maaperän orgaanisten haitta-aineiden käsittelymenetelmistä, jossa hyödynnetään mikrobipopulaatioiden kykyä hajottaa maaperän orgaanisia haittayhdisteitä. Maaperän luontaista mikrobiaktiivisuutta voidaan parantaa mm. lisäämällä siihen ravinteita, tukiaineita sekä happea. Kompostoinnissa pyritään vaikuttamaan juuri näihin tekijöihin, luoden kompostoitavaan massaan mikrobeille optimaaliset hajotusolosuhteet (Mroueh ym. 2004). Vaikka kompostointia onkin käytetty jo vuosikymmeniä puutarha- ja biojätteiden sekä kuntien ja teollisuuden lietteiden käsittelymenetelmänä, on se varsin uusi menetelmä pilaantuneiden maiden laitosmaisessa (*ex situ*) käsittelyssä (Namkoong ym. 2002).

Kompostoinnilla voidaan katsoa olevan myös merkittäviä ympäristöllisiä etuja muihin puhdistustekniikkoihin nähden. Kompostoitumisprosessissa maaperän mikrobit hajottavat tai immobilisoivat haitta-aineet usein täydellisesti, jolloin niiden hajoamis- tai metaboliatuotteet eivät aiheuta uutta riskiä ja räsitystä ympäristölle. Fysikaalis-kemiallisissa käsittelymenetelmissä, kuten esimerkiksi poltossa, haitta-aineet puolestaan ”voivat siirtyä” maaperästä ilmakehään, jolloin vain ympäristöräsitukselle altistunut kohde ja päästölähde vaihtuvat. Haittayhdisteet voivat jopa muuttua kemiallisten reaktioiden kautta ympäristölle haitallisempaan muotoon. (Sabaté, ym. 2004).

Pilaantuneiden maiden kompostointi toteutetaan yleensä aumakompostointina käsittelykeskuksissa tai pysyvissä käsittelypaikoissa (Jørgensen ym. 2000). Aumakompostointi (*biopile*) soveltuu varsin hyvin helposti hajoavilla öljyhiilivedyillä, kuten poltto- ja voiteluaineilla, kreosoottiöljyllä tai kloorifenoleilla, pilaantuneiden maamassojen käsittelyyn (Penttinen 2001). Kompostoinnin on todettu olevan kustannustehokkain markkinoilla oleva käsittelymenetelmä molekyylipainoltaan keskiraskailla öljyhiilivedyillä pilaantuneille maamassoille. Kompostoinnin vaatimat alku- ja käsittelyinvestoinnit ovat muihin käsittelymenetelmiin verrattuna varsin alhaiset. Lisäksi kompostointiprosessin toteutus ja seuranta ovat kilpaileviin menetelmiin nähden yksinkertaisia toteuttaa ja saavutettava puhdistustulos usein riittävä vastaamaan käsiteltyjen massojen jatkokäyttötarkoitusta (Namkoong ym. 2002; Ouyang ym. 2005).

Aiempien tutkimusten mukaan kompostointi ei ole kuitenkaan osoittautunut tehokkaaksi puhdistusmenetelmäksi pitkäketjuisilla, haaroittuneilla tai haihtuvilla hiilivedyillä pilaantuneiden maa-ainesten kunnostuksessa. Lisäksi menetelmän heikkoutena voidaan pitää sen pitkää käsittelyaikaa sekä riippuvuutta sääolosuhteista. Käsittelyn pitkäkestoisuuden vuoksi aumakompostointi vaatii runsaasti kenttätilaa. Pilaantuneiden maamassojen haitta-aineiden laadulla ja pitoisuudella sekä toisaalta myös puhdistuksen tavoitearvoilla onkin näin ollen ratkaiseva merkitys siihen, milloin kompostointia kannattaa soveltaa puhdistusmenetelmänä (Sarkkila ym. 2004).

Kompostoitaessa pilaantunutta maa-ainesta on huomioitava, ettei haitallisten aineiden pitoisuus saa ylittää mikrobeille toksista pitoisuutta. Aiemmissä tutkimuksissa on todettu mm. yli 2500 ppm:n raskasmetallipitoisuuksien olevan myrkyllisiä useimmille hajottajamikrobeille estäen näin niiden toiminnan. Toisaalta kompostoitaessa on myös huomioitava, että hajoamisprosessi pysähtyy aina johonkin tiettyyn loppupitoisuuteen, jonka alle haitta-ainepitoisuus ei menetelmää tehostamatta pysty laskemaan (Sarkkila ym. 2004).

Öljihiilivedyillä pilaantuneen maa-aineksen kompostoitumista aumoissa voidaan tehostaa monin eri menetelmin ja niiden yhdistelmin. Komposteihin voidaan lisätä ulkopuolisia ravinteita (*biostimulaatio*) tai mikrobeja (*bioviljely*), jotka kiihdyttävät kompostoitumisprosessia (Van Gestel ym. 2003). Kompostin pH-tasoa voidaan säätää tarvittaessa esimerkiksi kalkitsemalla. Aumoja voidaan kastella, ilmastaa ja lämmöneristää, jolloin ympäristölliset olosuhteet hajotustoiminnalle paranevat (Sanscartier ym. 2008). Kompostointi on kustannuksiltaan edullisempi vaihtoehto verrattuna pilaantuneiden massojen polttoon, stabilointiin tai fysikaalis-kemiallisiin menetelmiin (Forsbacka 1996).

1.2. Tutkimuksen tavoitteet

Keski-Suomen ympäristökeskus on Mustankorkea Oy:lle antamassaan ympäristölupapäätöksessä (KSU-2003-Y-243/121) myöntänyt luvan käsitellä biologisesti hajoavilla öljyhiilivedyillä sekä polyaromaattisilla hiilivedyillä (PAH) pilaantuneet maa-aineserät aumakompostointia hyväksi käyttäen. Samassa lupapäätöksessä ympäristölupaviranomainen on edellyttänyt Mustankorkea Oy:n toimittamaan lupaviranomaiselle suunnitelmat pilaantuneiden maiden kompostointikäsitelyn tehostamisesta.

Tässä tutkimuksessa on selvitetty ratkaisuja pilaantuneiden maiden aumakompostointikäsitelyn tehostamiseksi aumojen rakenneratkaisuiden avulla. Tämän työn yhteydessä on laadittu Mustankorkea Oy:lle pilaantuneiden maiden kompostoinnin toimintamalli. Pilaantuneiden maiden käsittely tullaan jatkossa suorittamaan Mustankorkealla laaditun toimintamallin mukaisesti.

2. ÖLJYHIILIVEDYT

2.1. Alkuperä, rakenne ja jalosteiden käyttö

Ölji-yhdisteet ovat syntyneet maan sisällä miljoonien vuosien saatossa eloperäisistä luonnon jäänteistä. Ne koostuvat hiilivetyseoksista ja ne ovat rakenteensa perusteella luokiteltavissa kolmeen pääluokkaan, jotka ovat 1) tyydyttyneet alkaanit eli parafiinit, 2) tyydyttymättömät rengasyhdisteet eli naftaleenit sekä 3) aromaattiset yhdisteet. Näitä hiilivety-yhdisteitä kutsutaan usein yhteisnimityksellä öljyhiilivedyt (Haus ym. 2001).

Öljyt voidaan toisaalta myös jakaa haihtuviin ja haihtumattomiin yhdisteisiin. Haihtuviin öljy-yhdisteisiin kuuluvat ne yhdisteet, joiden leimahduspiste on alle 60 °C. Tähän kategoriaan luetaan mm. bensiinit ja naftat. Haihtumattomiin öljy-yhdisteisiin kuuluvat puolestaan mm. dieselöljyt sekä kevyet ja raskaat polttoöljyt. Viimeksi mainittujen leimahduspiste on yli 60 °C (Gråsten & Kiukas 2004).

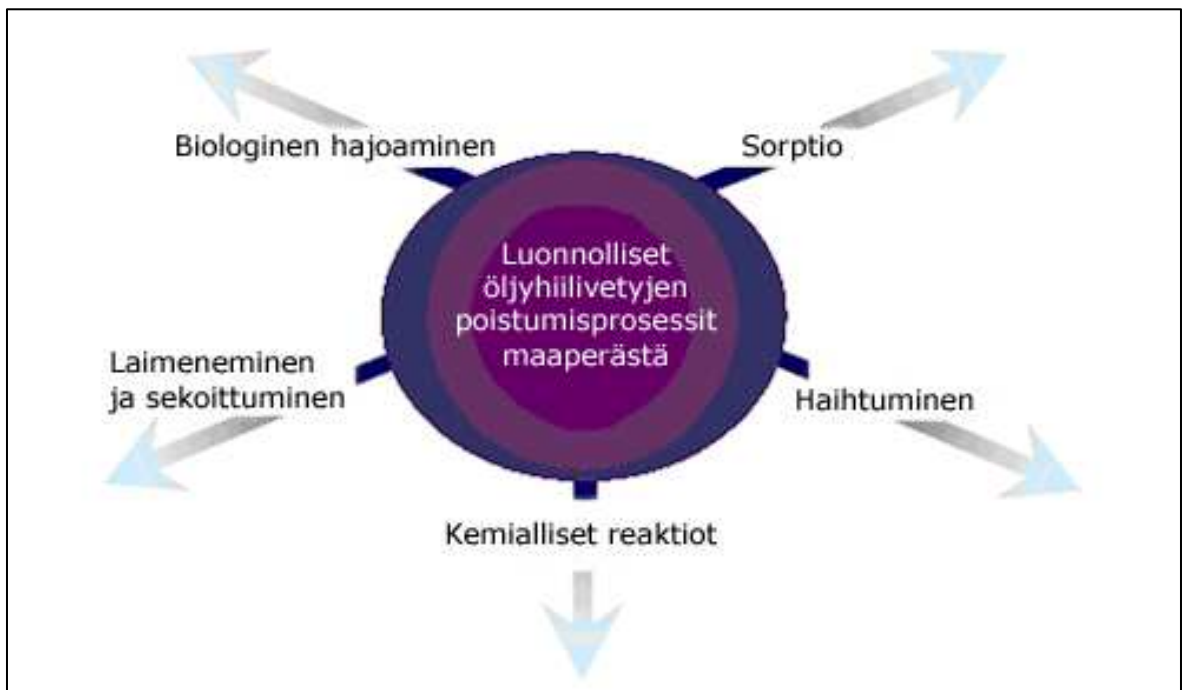
Raakaöljy koostuu useista erilaisista öljyhiilivedyistä, joista kevyimmät ovat siis kaasumaisia ja raskaimmat haihtuvat vasta noin 700 °C lämpötilassa. Raakaöljyn laatu ja ominaisuudet voivat vaihdella suuresti sen syntytavasta ja alkuperästä riippuen. Öljyhiilivetyjen ohella raakaöljy sisältää lisäksi muita kemiallisesti sitoutuneita alkuaineita kuten rikkiä (0,1–7,0 %), typpeä (0,01–0,9 %) ja happea (0,06–0,4 %) sekä metalleja kuten vanadiinia (1-1500 mg/kg) ja nikkeliä (1-100 mg/kg). Lisäksi raakaöljyyn on usein sekoittuneena suoloja sekä vettä (Neste Oil Oyj 2006; Neste Oy 1992).

Öljyjakeiksi luetaan hiilivedyt, joiden hiiliketjut ovat pituudeltaan 10:stä 40:een. Öljyjakeet voidaan jakaa edelleen keskittisleisiin (C₁₀-C₂₁) ja raskaisiin (C₂₁-C₄₀) öljyjakeisiin. Keskittisleisiin luetaan mm. dieselöljy, joka koostuu sadoista erilaisista C₁₃-C₂₅ hiilivedyistä (alkaaneista) sekä lisäaineista. Maaperässä dieselöljy on niukkaliukoisena melko hitaasti haihtuva ja biohajoava. Raskaat polttoöljyt koostuvat C₁₉-C₃₅-hiilivedyistä, ollen keskittisleitä raskaampia ja rikkipitoisempia yhdisteitä. Raskaat polttoöljyt ovat melko niukkaliukoisia ja siksi luonnossa yleisesti hyvin hitaasti biohajoavia yhdisteitä (Forsbacka 1996; Gråsten & Kiukas 2004).

Suomeen tuotavasta raakaöljystä 80 % tuodaan Venäjältä ja 16 % Pohjanmeren öljyntuottajilta, joista suurin on Norja. Suomen vuotuinen öljynkulutus on viime vuosina ollut noin 10 miljoonaa tonnia vuodessa, josta dieselöljyn osuus on noin kaksi miljoonaa tonnia, kevyiden polttoöljyjen 2,3 miljoonaa tonnia sekä raskaiden polttoöljyjen 1,6 miljoonaa tonnia vuodessa. Jalostettuja öljytuotteita käytetään pääasiassa teollisuuden ja tuotannon raaka-aineena sekä energialähteenä liikenteessä ja lämmöntuotannossa (Neste Oil Oyj 2006).

2.2. Käyttäytyminen maaperässä

Maaperään vuotaneet ja kulkeutuneet öljy-yhdisteet altistuvat useille fysikaalisille, kemiallisille sekä biologisille prosesseille, jotka alentavat yhdisteiden kokonaispitoisuutta (kuva 1). Öljy-yhdisteet eivät vähene maaperästä pelkästään luonnollisen biohajoamisen kautta, joskin se on niiden tärkein poistumisreitti, vaan myös muiden prosessien, kuten mineralisaation, laimenemisen, sorption, foto-oksidaation, haihtumisen sekä kemiallisten reaktioiden kautta (Jörgensen ym. 2000; Tuomi & Vaajasaari 2004).

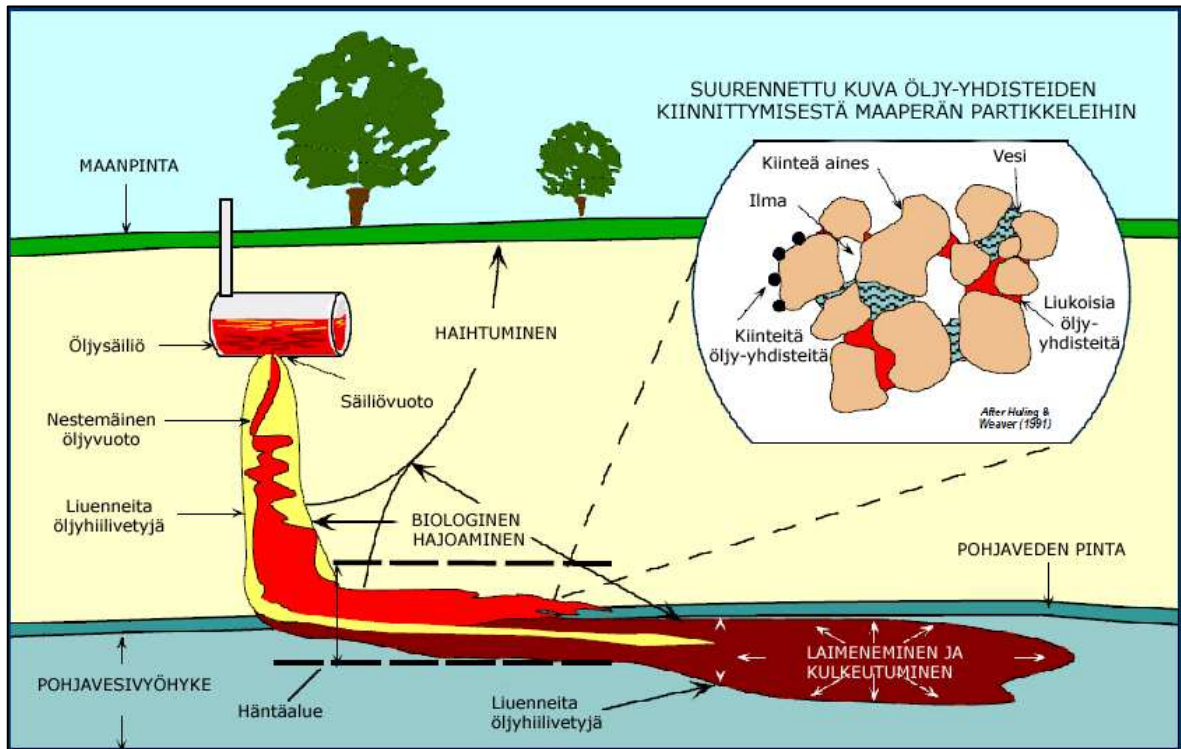


Kuva 1: Luonnolliset öljyhiilivetyjen poistumisprosessit maaperästä (USEPA 1999, muokattu).

Öljy imeytyy varsin hyvin ja nopeasti vettä läpäisevään maaperään kuten karkeahkoihin hiekka- ja soramallajeihin. Öljy kulkeutuu huokoisessa maaperässä syvempiin maakerroksiin, kunnes se kohtaa pohjaveden pinnan tai läpäisemättömän maakerroksen. Matkalla syvempiin maakerroksiin osa öljyhiilivedyistä kiinnittyy ja pidättyy maaperän hiukkasiin, kun hiilivedyistä kevyimmät ja kaasumaiset voivat puolestaan haihtua maahuokosten kautta ilmaan (USEPA 1999). Orgaaninen aines sitoo tehokkaasti öljy-yhdisteitä ja hydrofobisten öljy-yhdisteiden, kuten diesel-öljyjen, sorption maapartikkeleihin onkin todettu olevan voimakkainta runsaasti orgaanista ainesta sisältävässä maaperässä, kuten humusmaissa (Van Gestel ym. 2003).

Öljihiilivedyt kulkeutuvat maaperässä pääasiassa pystysuunnassa, mutta osa niistä kiinnittyy huokoiseen maaperään kapillaarivoimien ansiosta. Maaperään pidättyminen vähentää kevyimpien hiilivetyjen haihtumista ja samalla akuuttia toksisuutta, mutta toisaalta lisää samalla niiden pysyvyyttä maaperässä. Hiilivedyt kulkeutuvat maaperässä alaspäin kunnes niiden massa pienenee riittämättömäksi ylläpitämään alaspäin suuntautuvaa virtausta tai kun maan läpäisevyys pienenee tasolle, jossa painovoima ei pysty voittamaan kapillaarivoimia. Kun hiilivedyt saavuttavat kyllästyneen vyöhykkeen, vajoavat vettä raskaammat yhdisteet vesikerroksen alle ja kevyimmät jäävät vapaaksi veden pinnalle (Forsbacka 1996).

Kohdattuaan pohjaveden pinnan tai läpäisemättömän maakerroksen öljy alkaa levitä sen pinnalla kerroksen suuntaisesti muodostaen pyöreähkön öljyllä kyllästyneen alueen, öljyyntymän, jonka koko riippuu valuneen öljyn määrästä, viskositeetista sekä maaperän läpäisykyvystä. Vettä kevyempien mineraaliöljytuotteiden aiheuttama öljyyntymä muodostuu pääosin vapaan pohjaveden pinnan yläpuoliseen kapillaarivyöhykkeeseen. Pohjaveden pinnan vaihteluista johtuen, myös kevyempiä öljyhiilivetyjä päätyy virtaavan pohjaveden vyöhykkeeseen. Pohjavesikerroksen pinnalle jäävät yhdisteet leviävät huomattavasti helpommin ja laajemmalle alueelle kuin vesikerroksen pohjalla olevat yhdisteet, jotka yleensä pysähtyvät vahinkopaikan läheisyydessä läpäisemättömän kerroksen painanteisiin. Veteen liuenneet yhdisteet kulkevat veden virtausten mukana laimentuen jatkuvasti. Öljyn kulkeutumista maaperän läpi öljyvuodon yhteydessä sekä siihen liittyviä fysikaalisia, kemiallisia sekä mikrobiologisia prosesseja on havainnollistettu kuvassa 2 (USEPA 1999; Valtion ympäristöhallinto 2005).



Kuva 2: Öljyn kulkeutuminen maaperässä, esimerkkinä säiliövuoto (USEPA 1999, muokattu).

Öljyhiilivetyjen hajoamisnopeus on suoraan verrannollinen niiden höyrynpaineeseen. Hiilivedyt, joiden höyrynpaine (P_{vp} , Pa) tai Henryn vakio (K_H , Pa m³mol⁻¹) on yli 13,33 ja joiden kiehumispiste on alle 250 °C, poistuvat maaperästä pääasiallisesti haihtumalla (Forsbacka 1996; Sillanpää 2007).

Hiilivetyjen imeytymiseen ja kulkeutumiseen maaperässä vaikuttaa ratkaisevasti myös yhdisteen oktanoli/vesi- jakaantumiskerroin (K_{OW}), joka on kääntäen verrannollinen aineen vesiliukoisuuteen. Öljyhiilivetyjen vesiliukoisuus pienenee ja K_{OW} - arvo kasvaa yhdisteen moolimassan kasvaessa. Yhdisteiden moolimassan kasvaessa, ne tulevat yhä rasvaliukoisemmiksi ja pidättyvät näin maaperään tehokkaasti. Tällaisia yhdisteitä ovat mm. monirenkaiset polyaromaattiset sekä pitkäketjuiset ja haaroittuneet hiilivety-yhdisteet. Pienen moolimassan omaavat yhdisteet, alle kymmenen hiiliatomia sisältävät alkaanit ja yksinkertaisimmat aromaattiset yhdisteet, liukenevat veteen puolestaan helpommin. Öljy-yhdisteiden biosaatavuuteen vaikuttavat oleellisesti myös niiden molekyyli rakenne sekä saatavuus maaperässä, joka on usein suoraan riippuvainen maaperän kosteuspitoisuudesta sekä haitta-aineen vesiliukoisuudesta (Forsbacka 1996; Tuomi & Vaajasaari 2004).

2.3. Mikrobiologinen hajoaminen

Aiemmissa tutkimuksissa on todettu, että öljy-yhdisteiden hajoaminen on tehokkainta pilaantumisen alkuvaiheessa, jolloin öljy-yhdisteet eivät ole ehtineet sitoutua maaperän partikkeleihin tai joutuneet alttiiksi muille maaperässä tapahtuville fysikaalisille tai kemiallisille reaktioille (Song ym.1990).

Maaperän pintakerroksissa mikrobit pyrkivät hajottamaan tyydyttyneitä sekä yksinkertaisia hiilivetyjä pääasiassa aerobisesti. Ikääntyneissä pilaantumissa öljy-yhdisteiden on todettu muuttuvan vähemmän mobileiksi yhdisteiksi, jolloin raskaimmat aromaattiset sekä pooliset yhdisteet pyrkivät rikastumaan.. Ajan myötä öljy-yhdisteet muodostavat maaperässä pitkäketjuisia haaroittuneita alkaaneita sekä kyllästyneitä rengasyhdisteitä, kuten naftaleeneja, jotka kiinnittyvät tiiviisti maaperän partikkeleihin sekä huokosrakenteisiin. Tämä johtaa usein siihen, että pilaantunut maaperä muuttuu ajan saatossa koostumukseltaan enemmän aromaattiseksi sekä pooliseksi lähestyen asfalttimaista koostumusta (Forsbacka 1996; Heusemann 1997). Yleisesti mitä kevyempi ja yksinkertaisempi öljy-yhdiste on, sitä helpommin se on poistettavissa maaperästä (USEPA 1999).

Mikrobitoiminnan aikaansaama biohajoaminen on merkittävin haitallisten öljy-yhdisteiden poistumisreitti maaperästä (Haus ym. 2001). Edellytyksenä öljy-yhdisteiden mikrobiologiselle hajoamiselle on toisaalta riittävän alhainen haitta-ainepitoisuus, joka ei ole hajottavalle mikrobipopulaatiolle liian toksinen, ja toisaalta yhdisteen riittävä biosaatavuus (Forsbacka 1996; Scherr ym. 2007). Maaperään pidättyvistä öljyhiilivety-yhdisteistä osa toimii hiilen- ja energianlähteenä maaperän mikro-organismeille, jotka metaboliensa kautta sekä hajottavat että muuntavat yhdisteitä erilaisiksi väli- ja lopputuotteiksi, jotka voivat olla jossain tapauksissa ympäristön kannalta jopa alkuperäisiä yhdisteitä haitallisempia (Sillanpää 2007).

Maaperän mikrobit tarvitsevat hajotustoimintansa ylläpitämiseen hiilen ja hapen lisäksi myös muita ravinteita, kuten typpeä, fosforia ja kaliumia sekä pieniä määriä hivenaineita. Hiiliyhdisteitä mikrobit käyttävät energian tuotantoon ja uusien solujen rakennusaineeksi, kun taas puolestaan typpeä ne tarvitseva proteiinien, nukleinihappojen sekä koentsyymien valmistamiseen. Mikäli hajotusprosessin kannalta merkittäviä ravinteita ei ole mikrobien saatavilla, hajotustoiminta hidastuu ja voi estyä jopa kokonaan (Forsbacka 1996).

Scherr ym. (2007) havaitsivat tutkimuksissaan, että maaperän mikrobipopulaatio hajottaa tehokkaammin haitta-aineita, kuten hiilivetyjä, runsaasti orgaanisia yhdisteitä sisältävässä maaperässä. Näin ollen hajotus on usein hitainta hiekkapitoisessa ja nopeinta humuspitoisessa maaperässä. Tejada ym. (2008) havaitsivat puolestaan, että orgaanista ainesta sisältävässä maaperässä mikrobit pystyvät kestämaan paremmin myös öljyhiilivetyjen myrkyllisiä vaikutuksia. Tämä selittyy orgaanisen maa-aineksen kyvyllä sitoa myrkyllisiä yhdisteitä partikkeleihinsa, jolloin ne eivät enää ole mikrobin saatavilla liukoisessa muodossa.

Pilaantunut maa-aines sisältää usein hyvin vähän luonnostaan orgaanista ainesta ja näin ollen myös sen luontainen mikrobikanta on myös rajoittunut. Öljyllä pilaantuneeseen maaperään muodostuu kuitenkin nopeasti pilaantumisen jälkeen aktiivinen mikrobikanta, joka pystyy hajottamaan maaperään päässeitä haittayhdisteitä, mikäli myös maaperän ravinnepitoisuus ja happiolot ovat niille suotuisat. Optimiolosuhteiden esiintyminen mikrobitoiminnan kannalta on kuitenkin melko epätavallista ja siksi haittayhdisteiden hajoaminen saastumiskohteissa on usein varsin hidasta (Jørgensen ym. 2000).

Hiilivetyjen yleisin hajoamistapa maaperässä on aerobinen hajoaminen. Siinä hiilivedyt hajoavat mikrobin aineenvaihdunnan seurauksena hapetus-pelkistys-reaktioissa, jossa hiilivedyt hapettuvat ja elektronien vastaanottaja eli happi pelkistyy. Mikrobin hajottaessa orgaanista ainesta lopputuotteena syntyy hiilidioksidia (Forsbacka 1996). Hiilidioksidin (CO₂) tuoton onkin todettu olevan hyvä indikaattori hiilivetyjen mikrobiologiselle hajoamiselle (Kim ym. 2005; Namkoong ym. 2002). Ilmiötä kutsutaan myös maahengitykseksi. Täydellisessä hajoamisessa eli mineralisaatiossa lopputuotteena syntyy hiilidioksidin lisäksi vettä ja epäorgaanisia suoloja. Täydellinen hajoaminen on luonnonoloissa kuitenkin melko harvinaista ja usein maaperään jää puutteellisen hapettumisen seurauksena erilaisia välituotteita (Forsbacka 1996).

Hiilivetyjä aerobisesti hajottavia bakteerisukuja on aiemmissa tutkimuksissa esitetty useita kymmeniä. Yleisimpiä öljy-yhdisteitä hajottamaan pystyviä bakteerisukuja ovat muun muassa *Acinetobacter*, *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Enterobacter*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Pseudomonas* sekä *Sphingomonas*. Näiden joukossa esiintyy sekä gram-negatiivisia että – positiivisia bakteerisukuja (Jørgensen ym. 2000; Kim ym. 2005; Rahman ym. 2002; Van Gestel ym. 2003). Lisäksi joidenkin sieni- ja homelajien (mm. *Trichoderma* ja *Gliocladium*) on todettu osallistuvan suotuisissa olosuhteissa myös tehokkaasti öljyhiilivetyjen hajotukseen (Van Gestel ym. 2003).

Anaerobisen hajoamisen hajoamistuotteena syntyy pääasiassa metaanikaasua (CH_4), mutta myös muita kaasumaisia yhdisteitä, kuten dityppioksidia (N_2O) sekä rikkivetyä (H_2S) (Jörgensen ym 2000; Sarkkila ym. 2004). Runsas metaanikaasun muodostus kompostissa indikoi näin ollen anaerobisista hajotusolosuhteista. Komposti voi joutua anaerobiseen tilaan liiallisen tiivistymisen, vajaan mikrobitoiminnan tai liiallisen kosteuden takia, jolloin siitä saattaa aiheutua lähinnä rikkiyhdisteistä johtuvia hajuhaittoja ympäristöön (Sarkkila ym. 2004). Eräiden mikrobien on todettu pystyvän hajottamaan hiilivetyjä myös anaerobisissa olosuhteissa (Singh & Ward 2004). Koska tämä tutkimus keskittyy öljyhiilivetyjen aerobisen hajoamisen tehostamiseen, ei anaerobista hajoamista käsitellä tässä yhteydessä näin ollen tarkemmin.

Lämpötila on mikrobitoiminnan kannalta yksi tärkeimmistä olosuhdetekijöistä, vaikuttaen mikrobipopulaation aktiivisuuteen, koostumukseen sekä öljyn fysikaaliseen tilaan. Biohajoavuuden kannalta optimaalisimmaksi lämpötila-alueeksi on todettu 18–37 °C. Alhaisissa lämpötiloissa öljy-yhdisteiden liukoisuus veteen vähenee ja viskositeetti kasvaa, jolloin niiden biosaatavuus mikrobeille heikkenee. Korkeissa lämpötiloissa öljyhiilivetyjen haihtuvuus taas voimistuu, mikä voi altistaa mikrobit niiden myrkyllisille vaikutuksille. Mikrobit jaetaan niiden toimintalämpötilojen mukaan kolmeen pääryhmään, jotka ovat 1) psykofiilit (< 25 °C), 2) mesofiilit (20–40 °C) sekä 3) termofiilit (40–70 °C) (Forsbacka 1996; Sarkkila ym. 2004).

Kullakin mikro-organismilla on siis sille tyypillinen toimintalämpötila, jonka alapuolelle ne eivät enää kasva. Useat mikro-organismit pystyvät kuitenkin selviytymään sekä myös tietyissä määrin hajottamaan haitta-aineita toimintalämpötilansa alapuolella. Vaikeasti hajoavien haittayhdisteiden kompostoituminen edellyttää usein korkeita kompostointilämpötiloja ja näin ollen termofiilisten mikro-organismien läsnäoloa. Öljyhiilivetyjen hajoamisen on todettu tapahtuvan puolestaan meso- ja termofiilisillä lämpötila-alueilla (Sarkkila ym. 2004).

Maaperän kosteus vaikuttaa myös oleellisesti mikrobien kykyyn hajottaa haittayhdisteitä. Liian kuiva maaperä estää mikrobeja pääsemästä käsiksi orgaanisiin yhdisteisiin ja ravinteisiin, koska vesi toimii kyseisten yhdisteiden välittäjänä mikrobeille. Vähäinen kosteus rajoittaa myös mikrobipopulaation kasvua ja toimintaa. Toisaalta liian vesipitoisessa maaperässä maa ilmahuokokset ovat veden peitossa, josta seuraa hapettomuutta. Optimaalisin maankosteus biohajotuksen kannalta on todettu olevan 50–70 % maan vedenpidätyskyvystä (*water holding capacity*). Aumakompostoinnissa käsiteltävä maa-aines saattaa kuivua liian tehokkaan ilmastuksen ja auringonsäteilyn vaikutuksesta. Usein kompostointiprosessi vaatiikin ylimääräistä kastelua, jotta optimaalisiin kosteusolosuhteisiin päästäisiin (Forsbacka 1996; Sanscartier ym. 2008).

Useimmille mikrobeille optimaaliseksi pH-alueeksi on todettu lähellä neutraalia oleva pH:n arvo (6,5–7,8). Tällöin mikrobien toiminta ja biohajoaminen ovat tehokkaimmillaan sekä tarvittavat ravinteet liukoisessa muodossa. Pilaantuneen maan kompostin kosteuspitoisuuteen vaikuttaa merkittävästi myös kompostin orgaanisen aineksen määrä (Forsbacka 1996; Rahman ym. 2002; Sarkkila ym. 2004).

Mikrobien ravinnonotto tapahtuu niitä ympäröivästä vesifaasista, joten kuivassa maaperässä haittayhdisteiden saanti mikrobeille heikkenee. Mikrobit voivat käyttää ravinnokseen vain veteen liuenneita hiilivety-yhdisteitä, jotka ovat suorassa kosketuksessa mikrobisoluun. Mikrobit erittävät pinta-aktiivisia aineita kuten lipidejä, jotka parantavat hiilivetyjen liukoisuutta veteen (Tuomi & Vaajasaari 2004).

Koska öljy-yhdisteet saattavat sisältää tuhansia erilaisia hiilivetyjä, tarvitaan tällaisten yhdisteiden hajottamiseen monimuotoinen mikrobipopulaatio. Yksi tai muutama mikrobilaji ei yleensä pysty erikoistumaan useiden hiilivety-yhdisteiden hajotukseen. Yleisesti tunnetaan yli 100 mikrobilajia jotka pystyvät hajottamaan hiilivetyjä. Hajottajamikrobit voivat olla joko bakteereja, hiivoja, sieniä, leviä tai alkueläimiä. Näistä bakteerien on todettu olevan merkittävimpiä öljyhiilivetyjen hajottajia (Tuomi & Vaajasaari 2004). Usein kompostointikäsitellyssä pilaantuneeseen maa-ainekseen lisätäänkin orgaanista ainesta, joka joko aktivoi hiilivety-yhdisteillä pilaantuneen maaperän luonnollisten hajottajamikrobien toimintaa tai vaihtoehtoisesti tuo käsiteltävään maa-aineserään elinvoimaisen mikrobikannan mukanaan (Van Gestel ym. 2003).

Mikrobilisäyksestä saatava hyöty perustuu valikoitujen mikrobilajien kykyyn hajottaa tiettyjä haitta-aineita. Jos käsiteltävä maaperä ei luonnostaan sisällä hajotustoimintaan kykenevää lajia, hajoaminen on erittäin hidasta tai sitä ei tapahdu lainkaan. Käsiteltävään massaan lisättävillä mikrobiympyeillä voidaan nopeuttaa myös mikrobien mukautumista vallitseviin haitta-aineolosuhteisiin, jolloin biohajoaminen tehostuu. Mikrobilisäyksen yhteydessä on usein syytä lisätä käsiteltävään massaerään myös ravinteita, joista mikrobipopulaatio saa hajotustoimintaan tarvitsemansa energian. Ulkopuolinen mikrobilisäys on usein turhaa, mikäli käsiteltävässä massassa on jo valmiina elinvoimainen ja hajotustoimintaan pystyvä mikrobipopulaatio. Laboratoriossa kasvatettujen mikrobiymppien käyttöön liittyy myös usein monia ympäristön aiheuttamia rajoitteita, jotka on hyvä tiedostaa ja tunnistaa ennen mikrobilisäysten käyttöä (Alexander 1999).

Aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että elinvoimaisia mikrobikantoja voidaan siirtää pilaantuneiden kohteiden välillä. Öljykontaminaation jälkeen maaperän mikrobikannan hajotusaktiivisuus pysyy usein korkeana melko pitkään. Tällöin näiden erikoistuneiden mikrobikantojen siirto vastaavasti saastuneisiin kohteisiin voi nopeuttaa hajotustoiminnan käynnistymistä ja näin ollen koko prosessin tehokkuutta (Vieira ym. 2007).

Pääsääntönä voidaan pitää, että mitä yksinkertaisempi ja suoraketjuisempi hajotettava hiilivety-yhdiste on, sitä helpommin ja nopeammin se maaperässä hajoaa. Monimutkaiset rengasrakenteet ja haaroittuneet hiilivedyt ovat usein vaikeasti maaperän mikrobien hajotettavissa ja siksi ne säilyvätkin maaperässä yksinkertaisia yhdisteitä pidempään (Forsbacka 1996; Haus ym. 2001). Lisäksi useat monosykliset yhdisteet ovat myrkyllisiä monille hiilivetyjä hajottaville mikrobeille, koska ne liuottavat mikrobien lipidirakenteisia kalvoja (Sillanpää 2007).

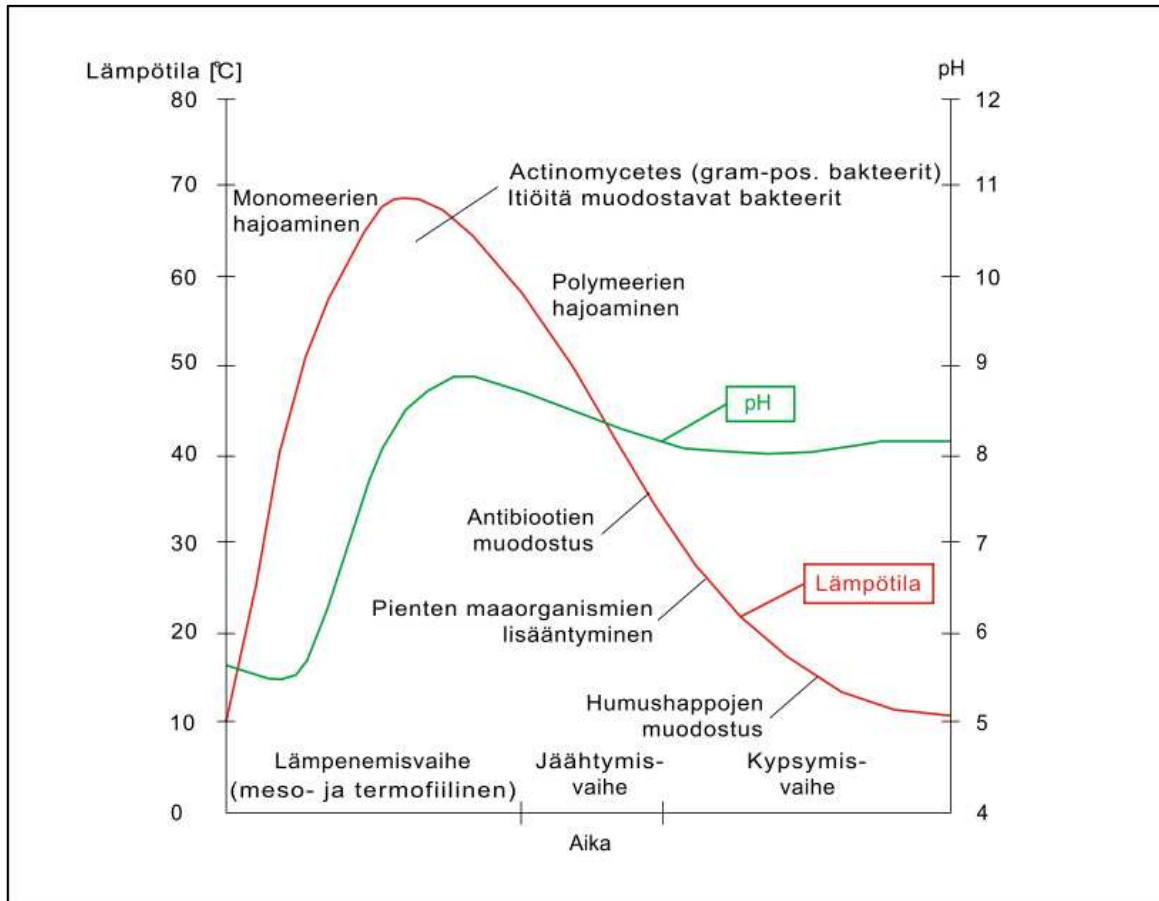
Öljy-yhdisteiden kemiallis-fysikaalisten ominaisuuksien, kuten liukoisuuden ja pintajännityksen, on myös todettu vaikuttavan merkittävästi niiden biosaatavuuteen ja –hajoavuuteen (Scherr ym. 2007). Öljy-yhdisteiltä tyypillisesti vaadittava ominaisuus niiden teollisessa käytössä on riittävä viskositeetti (Haus ym. 2001). Haus ym. (2001) totesivat tutkimuksissaan, että öljy-yhdisteiden korkea viskositeetti alentaa kyseisten yhdisteiden biohajoavuutta. Tutkimustulos on Suomen olosuhteita silmällä pitäen merkittävä, sillä tunnetusti öljy-yhdisteiden viskositeetti kasvaa lämpötilan alentuessa.

2.4. Kompostoitumiseen vaikuttavat ympäristötekijät

Käsiteltävän maa-aineksen laatu sekä kompostoitumiseen vaikuttavat ympäristötekijät määräävät kompostoitumisen onnistumisen. Kompostoinnin alkuvaiheessa lämpötila kompostissa nousee mesofiiliselta alueelta termofiiliselle (kuva 3). Lämpötilan nousu johtuu kompostissa toimivien mikrobien aerobisesta hengityksestä, jossa vapautuu biokemiallisten reaktioiden tuottamaa energiaa. Kun hajotustoiminnan huippu on saavutettu lämpötila palaa takaisin mesofiiliselle alueelle ja jatkaa edelleen laskuaan mikrobitoiminnan vähentyessä ehtyvän ravintotilanteen vuoksi. Lämpötilamuutosten perusteella kompostoitumisprosessi voidaan jakaa neljään vaiheeseen, jotka ovat 1) mesofiilinen, 2) termofiilinen, 3) jäähtymisvaihe sekä 4) kypsymisvaihe. Näistä kolme ensimmäistä vaihetta tapahtuvat nopeasti, aumakompostoinnissa ne kestävät muutamasta viikosta kuukauteen. Hyvin etenevässä kompostoitumisprosessissa lämpötilan lasku on jäähtymisvaiheessa hidasta. Nopea lämpötilan tippuminen on usein merkki kompostin joutumista anaerobiseen tilaan (Järvinen 2000; Sarkkila ym. 2004).

Mikäli kompostoinnissa jäähdään alle 45 °C lämpötilaan, tulee varmistaa, että haluttu lopputulos saavutetaan mesofiilisella alueella tapahtuneen hajotustoiminnan ansiosta. Jälkikompostoitumisvaiheessa kompostin lämpötila ei enää nouse kääntelynkään vaikutuksesta. Jälkikompostoitumisvaihe tapahtuu mesofiilisellä alueella ja se on erityisen tärkeä silloin, kun kompostointiaikaa on lyhennetty tai kompostin hoidossa on ilmennyt ongelmia (Sarkkila ym. 2004).

Alhaisen käsittelylämpötilan on todettu olevan tärkein kompostoitumisprosessia inhiboiva tekijä, sillä hajottajamikrobien kyky toimia alemmissa lämpötiloissa tehokkaasti on usein rajoittunutta. Toisaalta eräiden mikrobien on todettu voivan edistää kompostoitumista varsin alhaisissa, jopa 5 °C lämpötilassa (Sanscartier ym. 2008). Useat aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että orgaanisen aineksen, kuten kasvi- ja biojätteen tai lietekompostin lisääminen osaksi käsiteltävää maa-ainesta auttaa saavuttamaan korkeamman kompostoitumislämpötilan ja sitä kautta pienemmän haitta-ainepitoisuuden jäännösmassassa. Orgaanisen aineksen määrä suhteessa pilaantuneeseen maamassaan on näissä tutkimuksissa vaihdellut 33–75 % välillä. Korkeamman käsittelylämpötilan on todettu parantavan haitta-aineiden biosaatavuutta pääasiassa lisääntyneen liukoisuuden sekä ravinteiden liikkuvuuden ansiosta (Jörgensen ym. 2000; Namkoong ym. 2002; Van Gestel ym. 2003).



Kuva 3: Lämpötilan ja pH:n kehitys kompostiaumassa (Barrena ym. 2006; Sarkkila ym. 2004; Sundberg ym. 2008 mukailten).

Kompostoinnin alkuvaiheessa kompostimassan pH:n tulisi olla 6,5–8,0 välillä. Aivan kuten lämpötila, myös pH vaihtelee kompostoinnin eri vaiheissa (kuva 4). Alkuvaiheessa kompostin pH yleensä laskee. pH:n lasku johtuu helposti käytettävissä olevien hiilenlähteiden, esimerkiksi sokerien, tärkkelysten ja rasvojen happamista hajoamistuotteista. Laskua seuraa kuitenkin voimakas pH:n nousu ammonifioivien mikrobien hajottaessa valkuaisaineita rakennusaineiksi uusille mikrobeille. Kun suurin osa kompostin sisältämästä valkuaisaineesta on käytetty, stabiloituu pH vakiotasolle. Usein kompostoitava maa-aines on pH:ltaan hapanta, jolloin se voidaan säätää neutraalille tasolle kalkitsemalla. Lisättävän kalkin määrä riippuu käsiteltävän maa-aineksen sekä käytettävien tukiaineiden seossuhteista (Järvinen 2000; Sarkkila ym. 2004).

Maaperän ravinnesuhteet vaikuttavat myös haitta-aineiden kompostoitumiseen. Pilaantuneessa maaperässä vallitsee usein hajotustoiminnan kannalta epäedulliset ravinnesuhteet, joita voidaan parantaa lisäämällä käsiteltävään massaan kaupallisia lisäravinteita. Lisäravinteina voidaan käyttää typpi- ja fosforilannoitteita tai ureaa. Käytettäessä ravinnelisänä jätevesilietettä, on tällöin otettava huomioon lietteen mukana tuleva runsas orgaaninen aines ja sen vaikutus haittayhdisteiden hajoamiseen (Forsbacka 1996). Järvisen (2000) tutkimusten mukaan jätevesiliete soveltuu varsin hyvin kompostiaumojen fosforilähteeksi, mutta sillä ei voida juurikaan lisätä aumojen typpipitoisuutta. Lisäksi käytettäessä jätevesilietettä kompostien ravinnelisänä, tulee kiinnittää erityistä huomiota lietteen tasaiseen sekoittumiseen osaksi käsiteltävää maa-ainesta ennen niiden läjittämistä aumoihin (Järvinen 2000).

Chaureau ym. (2005) tutkivat maaperän ravinnesuhteiden vaikutusta öljyhiilivetyjen hajoamiseen 150 päivän seurantajakson aikana. He havaitsivat, että maaperän hiili-typpi-fosforisuhteella on suuri vaikutus mikrobien kykyyn hajottaa öljyhiilivetyjä. Optimaalisimmaksi ravinnesuhteeksi havaittiin 100/10/1 (C/N/P). Ilman ravinnelisäystä seurantajakson aikana saavutettiin 47 % vähenemä ja kohtuullisella ravinnelisäyksellä 62 % vähenemä kokonaishiilivetyypitoisuuksissa. Rahman ym. (2002) havaitsivat puolestaan, että ravinnelisäyksen lisäksi optimoimalla ympäristöolosuhteita ($T = 30\text{ °C}$ ja $\text{pH} = 7,5$) päästään mikrobiologisesti toteutetussa öljyhiilivetyjen hajotuksessa lähes 80 % reduktioon saastuneen maaperän kokonaishiilivetyypitoisuuksissa.

Lisäravinteiden käytön vaikutuksista kompostoinnin tehokkuuteen on myös esitetty vastakkaisia arvioita. Sarkkila ym. (2004) mukaan pilaantuneen maan kompostoinnissa ravinteiden lisäyksellä ei ole havaittu olevan kovinkaan suurta merkitystä. Ainoana merkittävänä etuna voidaan pitää, että lisäravinteiden avulla kompostointiprosessin käynnistymisen on todettu olevan nopeampaa. Sarkkilan ym. (2004) mukaan kompostin toiminta-alue hiili-typpi- suhteen arvolla on noin 20:1–40:1. Liian alhainen hiilipitoisuus muodostaa stabiloimattomasta tyypestä ammoniakkia ja voi näin ollen estää hajottajamikrobien toiminnan sekä aiheuttaa hajuhaittoja. Toisaalta, mikäli hiiltä esiintyy kompostoitavassa massassa liikaa, vapaa typen osuus kompostissa vähenee ja hajotusprosessin toiminta hidastuu merkittävästi.

Kompostoitaessa orgaanista ainesta, tulee kompostin huokostiloissa happipitoisuuden olla yli 5 %, jotta komposti toimisi aerobisena. Pilaantunutta maa-ainesta kompostoitaessa 5 % happitasoa voidaan pitää vain suositeltavana lähtötasona, joka prosessin aikana vaihtelee usein suuresti. Van Gestel ym. (2003) havaitsivat merkittäviä happitason vaihteluita, jopa ilmastetussa ja tukiaineella (puuhake 30 % käsiteltävän massan kuivapainosta) kuohkeutetussa kompostissa. Biojätteellä (osuus 90 % koko massasta) sekä diesel-öljyllä pilaantuneessa massaseoksessa happipitoisuus vaihteli 8-21 % välillä hajotustoiminnan aktiivisuudesta riippuen. Kompostoitaessa pilaantunutta maa-ainesta aumoissa, tuleekin huolehtia aumojen riittävän happitason ylläpitämisestä kääntelemällä aumoja säännöllisesti tai vaihtoehtoisesti syöttämällä niihin ilmaa ali- tai ylipaineella (Sarkkila ym. 2004).

Käsiteltävän massan partikkelikoko, rakenne sekä fysikaaliset ominaisuudet vaikuttavat kompostin happiolosuhteisiin sekä haitta-aineiden ja ravinteiden biosaatavuuteen. Liian pieni partikkelikoko tiivistää kompostia ja voi johtaa anaerobisiin hajotusolosuhteisiin. Liian suuri partikkelikoko puolestaan haittaa näytteenottoa ja vähentää analyysitulosten edustavuutta. Halkaisijaltaan yli 50–70 mm partikkelit tulisivat murskata tai seuloa pois kompostista (Järvinen 2000; Sarkkila ym. 2004).

3. ÖLJYHIILIVEDYILLÄ PILAANTUNEEN MAA-AINEKSEN KOMPOSTOINTI

3.1. Käsiteltävän maa-aineksen ominaisuudet

Aivan kuten öljy-yhdisteiden ominaisuuksilla, myös maaperän laadulla on suuri merkitys haitta-aineiden hajoamiseen ja kompostoitavuuteen. Merkittävimmän haittayhdisteiden kompostoitavuuteen vaikuttavia maa-aineksen ominaisuuksia ovat haitta-aineiden laatu sekä pitoisuudet, maa-aineksen saven ja orgaanisen aineksen seossuhteet, saven laatu, pH sekä maa-aineksen vedenpidätyskyky (Mroueh ym. 2004).

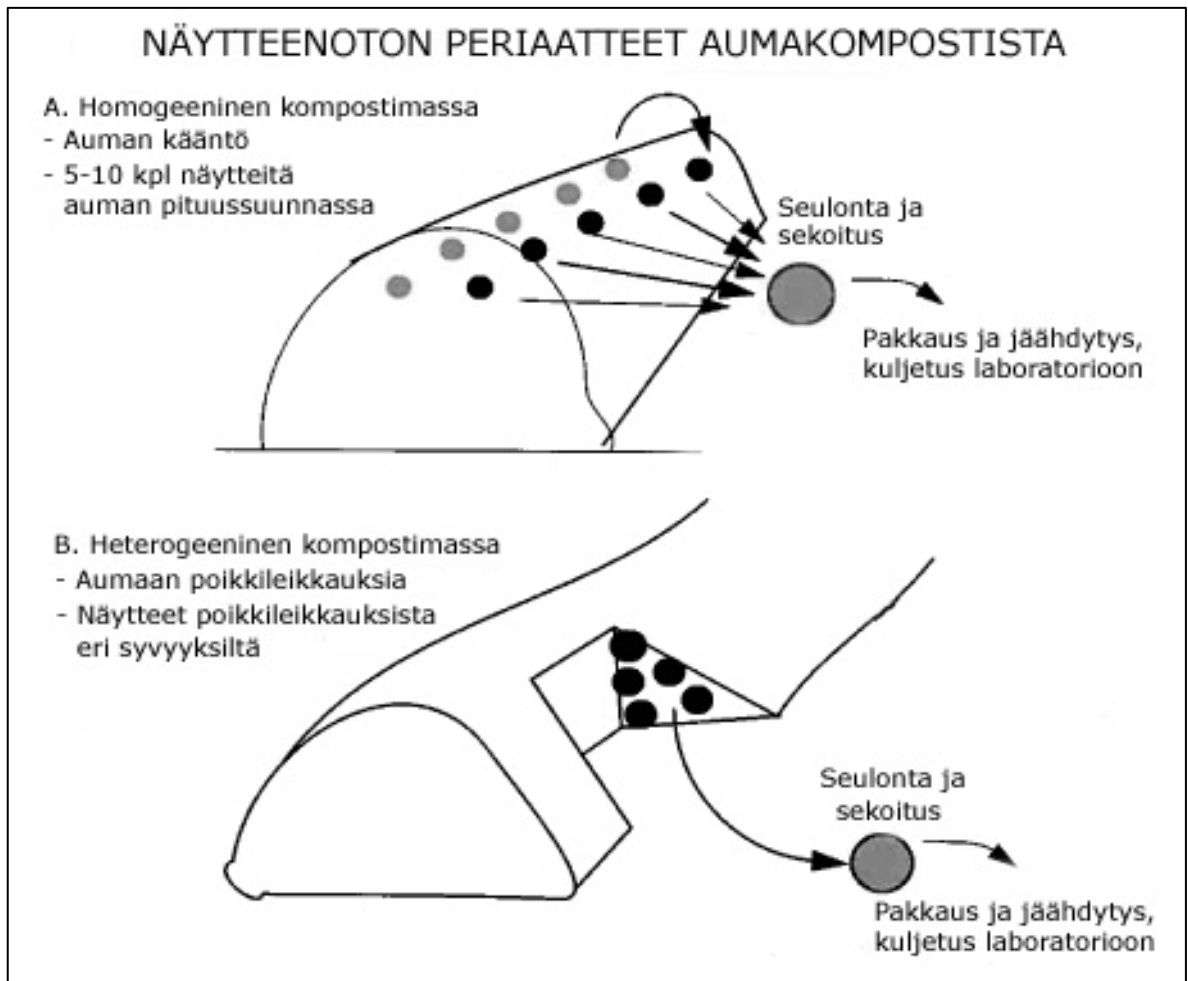
Korkean savipitoisuuden on todettu heikentävän maa-aineksen kompostoitavuutta. Savella on pieni kaasunläpäisevyys, joten mikrobitoiminnan kannalta oleellisen happipitoisuuden tasaisen saavuttaminen koko kompostoitavalle maamassalle voi näin ollen muodostua ongelmaksi. Savi sitoo myös tehokkaasti orgaanista -ainesta, mikä osaltaan voi rajoittaa haitta-aineiden biologista saatavuutta. Mikäli kompostoitavan maa-aineksen savipitoisuus on suuri, voidaan massan kaasunläpäisevyyttä ja kuohkeutta parantaa sekoittamalla käsiteltävään massaan tukiaineita (Mroueh ym. 2004).

3.2. Esitutkimukset ja näytteenotto

Kompostoitavasta maa-aineksesta on tarpeellista tehdä ennakkotutkimukset käsiteltävyyden arvioimiseksi, mikäli aikaisempien tietojen pohjalta ei voida varmasti todeta, että kompostoinnin avulla saavutetaan öljyhiilivetyjen osalta haluttu loppupitoisuus. Ennakkotutkimusten yhteydessä on hyvä arvioida kaikkien mahdollisten muuttujien herkkyyttä, joiden vaihtelulla voi olla vaikutuksia kompostoinnin onnistumiseen. (Mroueh ym. 2004; Sarkkila ym. 2004).

Näytteenotto homogeenisista kompostiaumoista tehdään auman sekoittamisen jälkeen. Aumasta otetaan pistenäytteet 5-10 tasavälisestä pisteestä, 30–60 cm syvyydestä käsiteltävästä maa-aineksesta auman rakennekerrokset huomioiden (kuva 4). Näytteenottoon voidaan käyttää joko pientä lapiota tai näytekairaa (kuva 5). Pistenäytteet sekoitetaan yhdeksi kokoomänäytteeksi, jonka suositeltava näyte koko tulisi olla vähintään yksi litra. Tarvittaessa kokoomänäyte seulotaan ja seulalle jäävät ylisuuret kappaleet poistetaan lopullisesta näytteestä. Lopuksi kokoomänäytteestä otetaan tarvittava määrä erillisiä laboratorionäytteitä tutkittavalle haitta-aineelle soveltuvaan näytteenottoastiaan tai polyeteenipussiin (Woods End Research Laboratories 2005).

Maanäytteiden säilytysajan tulisi olla yleensä alle 48 tuntia ja näytteet tulisi säilyttää viileässä sekä valolta suojassa. Näytteet voidaan toimittaa laboratorioon esimerkiksi kylmälaukkuun pakattuina. Pääsääntöisesti intensiivisin näytteenottojakso tulisi kohdistaa kauteen, jolloin kompostissa oletetaan olevan eniten aktiivista hajotustoimintaa (Mroueh ym. 2004).



Kuva 4: Näytteenoton periaatteet homogeenisestä ja heterogeenisestä kompostimassasta (WERL 2005, muokattu).

Näytteenottovirheitä voi aiheutua auman sisäisistä laatuvarioista, mikäli aumaa ei ole sekoitettu riittävän tasaisesti ennen läjittämistä. Myös kompostinäytteen suuri kosteuspitoisuus (<60 %) voi vääristää analyysituloksia. Mikäli on syytä epäillä, että kompostiauman massa ei ole homogeenisesti sekoittunutta, tulee pistenäytteet ottaa auman sivuille kaivinkoneen kauhalla tehdyistä profiileista (kuva 5). Profiilista otetaan tasavälein 5-10 pistenäytettä. Näytteitä ei oteta auman pitkittäissuuntaisesta leikkauspinnasta. Kustakin leikkauksesta otetut pistenäytteet yhdistetään kokoomänäytteeksi, tarvittaessa seulotaan ja jaetaan laboratorionäytteiksi näytempusseihin (WERL 2005).



Kuva 5: Käsikäyttöinen näytekairakalusto (vas.) ja näytekairalla otettu maanäyte (oik.) (Eijkelkamp Agrisearch Equipment 2008).

Ennen kompostoinnin lopettamista ja käsiteltyjen maamassojen jatko- tai uusiokäyttöä, tulee aumoista ottaa ns. loppunäytteet käsittelytuloksen hyväksyttävyyden arvioimiseksi. Käsittelytuloksen hyväksyttävyys arvioidaan erillisnäytteistä, joita tulisi ottaa vähintään 2 kappaletta/25 m³ käsiteltävää maamassaa kohden (WERL 2005).

Joissakin tapauksissa on hyvä osoittaa tiettyjen haitta-aineiden kompostoituminen laboratorio-olosuhteissa ennen kenttämittakaavan käsittelyjärjestelyitä. Koetulosten laadun varmistamiseksi vähintään kahden tai kolmen rinnakkaiskokeen teko sekä käsittelemättömän maanäytteen käyttö vertailunäytteenä on suositeltavaa. Laboratoriokokeiden tuloksia voidaan käyttää osaltaan osoittamaan kompostoinnin toimivuus tai toimimattomuus halutulle haitta-aineelle, mutta pelkästään laboratoriokokeilla saatujen tulosten perusteella ei kompostoitumista kenttäolosuhteissa voida kokonaan arvioida. Kenttäolosuhteissa haitta-aineiden kompostoitumiseen vaikuttavat huomattavan paljon myös ulkoiset ympäristötekijät, kuten lämpötila- ja kosteusolosuhteet sekä haitta-aineiden liukeneminen, muuntuminen sekä haihtuminen. Näiden tekijöiden mallintaminen laboratorio-olosuhteissa lämpötilaolosuhteita lukuun ottamatta voi usein olla hankalaa (Mroueh ym. 2004).

3.3. Kompostikentän rakenteet

Pilaantuneiden maa-ainesten kompostointiin käytettävät alueet tulee varustaa asianmukaisilla pintarakenteilla (taulukko 2) sekä sade- ja suotovesien (valumavedet) keräys- ja käsittelyjärjestelmillä. Kompostiaumat tulisi lähtökohtaisesti perustaa asfaltoidulle kompostointikentälle, jonka suoto- ja hulevesien keräys, käsittely sekä laaduntarkkailu on järjestetty keskitetysti. Käsittelykentän koko määräytyy käsiteltävien massojen määrän, kompostointilaitteiden sekä varastokompostien tilantarpeen sekä valumavesien keräilyjärjestelmien perusteella. Pysyväksi tarkoitetut kompostointikentät tulisi perustaa routimattomalle ja painumattomalle maaperälle (Forsbacka 1996; Mroueh ym. 2004).

Kompostikentän pohjarakennemateriaalien, kulutus- ja tiivistekerroksen, tulee olla kompostin suotovesiä sekä käsiteltäviä haitta-aineita kestäviä. Kulutuskerroksen materiaalien tulee myös kestää käytettävien työkonien pyöräkuormitus. Pohjarakenteiden pinnat tulee kallistaa siten, etteivät valumavedet pääse kertymään ja varastoitumaan rakenteiden pinnoille (Forsbacka 1996; Mroueh ym. 2004).

Taulukko 2: Esimerkki pysyvän kompostointikentän rakennekerroksista (Mroueh ym. 2004).

Rakennekerros	Kerrosmateriaali
Pinnan tiivistekerros	Kaksikerroksinen tiivis asfalttirakenne (tiivis asfaltti ABT, tyhjättila alle 3 %) tai betonilaatta + asfaltista (AB) rakennettu kulutuskerros
Jakava ja kantava kerros	Kallio- tai soramurske
Kuivatuskerros salaajaputkineen	Salaojitussora 260–300 mm
Tiivistyskerros	Tiivis materiaalimaa, murskebetoniitti ja/tai mekaanisesti suojattu HDPE- kalvo
Tasattu pohjamaa	

Kompostointikentän ympäristö on muotoiltava siten, ettei kentän ulkopuolella muodostuvat sade- ja sulamisvedet pääse valumaan käsittelykentälle. Kentän ulkopuolisten vesien pääsy kentälle voidaan estää esimerkiksi reunusojien avulla. Kompostiaumojen alapuolisessa salaojituserroksessa sekä kompostointikentällä syntyvät sade- ja suotovedet johdetaan keräilyjoja tai –putkistoja pitkin tarkkailukaivoon. Valumavesien keräilykaivot sekä –altaat tulee mitoittaa maksimisadevesimäärien mukaisesti. Suomen olosuhteissa kompostikentillä muodostuu valumavesiä noin 40- 60 % sadannasta. Mikäli kentällä muodostuvat valumavedet eivät sisällä kompostin mikrobitoisuutta haittaavia yhdisteitä, voidaan niitä käyttää kompostiaumojen kasteluun. Myös valumavesialtaaseen kerääntynyt liete voidaan palauttaa takaisin kompostiin ravinteeksi (Forsbacka 1996; Mroueh ym. 2004).

Usein käsittelykentiltä esikäsitellyt valumavedet voidaan johtaa kunnalliseen viemäriverkkoon. Viemäriverkkoon johdettaville valumavesille noudatetaan paikallisen viemärlaitoksen antamia ehtoja sekä pitoisuusrajoja. Valumavedet tulee johtaa hiekan- ja öljynerotuskaivojen läpi ennen niiden purkamista viemäriverkostoon. Tällöin erotinkaivot tulee varustaa hälyttimillä ja ne on tarkastettava sekä huollettava säännöllisesti häiriötilanteiden välttämiseksi (Mroueh ym. 2004; Sarkkila ym. 2004).

3.4. Aumarakenteet

Öljiyhdisteillä pilaantuneen maa-aineksen kompostoinnissa pilaantunut maa kaivetaan kohteessa ylös, kuljetetaan jätteenkäsittelylaitokselle ja sijoitetaan kompostointiaumoihin, joiden riittävä hapensaanti taataa joko sekoittamalla massoja mekaanisesti tai aumoihin asennettujen ilmastointiputkien avulla (Penttinen 2001). Tämän jälkeen kompostiaumojen toimintaa voidaan säädellä, mikäli hajoamisprosessiin vaikuttavia olosuhteita, kuten lämpötilaa, pH:ta sekä kosteus- ja happioloja voidaan hallitusti kontrolloida (Häikiö 2000).

Kompostointi soveltuu hyvin suhteellisen helposti hajoavien, vesiliukoisilla orgaanisilla haitta-aineilla pilaantuneiden maamassojen käsittelyyn. PAH- yhdisteiden sekä kloorifenolien kompostoinnin on todettu kestävän öljy-yhdisteitä pidempään. Puolestaan haihtuvien haitta-aineiden, kuten VOC- yhdisteitä sisältävien yhdisteiden, käsittely edellyttää kaasujen keräilyä sekä käsittelyn yhdistämistä kompostointiin (Mroueh ym. 2004; Penttinen 2001).

Kompostiauman pohjalle levitetään noin 20- 50 cm paksuudelta ja hieman pohjaa leveämmälle alueelle tukiainetta, kuten puumursketta tai kuoriketta. Alimman tukiainekerroksen tehtävänä on eristää käsiteltävä massa kompostikentästä ja näin edistää kompostin ilmastumista. Käsiteltävät maa-ainekset sekoitetaan huolellisesti ennen aumoihin kasaamista, jotta käsiteltävät haitta-aineet saadaan jakautumaan tasaisemmin massaan. Tarvittaessa käsiteltävälle massalle suoritetaan myös seulonta, jolla karkeimmat ainesosat saadaan erotettua (Forsbacka 1996). Auman ilmanvaihtoa voidaan edelleen parantaa asentamalla rei'itetyt ilmastusputket auman tukiainekerrokseen. Auman ilmanvaihto voi toimia joko passiivisesti tai sitä voidaan vaihtoehtoisesti tehostaa imu- ja puhalluspumpun avulla (Sanscartier ym. 2008).

Käsiteltävään massaan voidaan tarvittaessa sekoittaa tukiaineita, kuten kuoriketta, olkea, turvetta tai esikompostoituja massoja, mutta tällöin on otettava huomioon haitta-aineiden laimentuminen ja oikea sekoitussuhde. Tukiaineen tulisi olla hitaasti hajoavaa ainesta, joka toimii samalla täydentävänä hiilenlähteenä tai vaihtoehtoisesti hajoamatonta materiaalia, joka voidaan kierrättää useaan kertaan. Yleisesti ottaen käytettävät tukiaineet parantavat kompostin happi- ja ravinneolosuhteita sekä tuovat kompostiin mukanaan elinvoimaisen mikrobikannan. Mikäli tukiaineet sisältävät huomattavia määriä orgaanisesti helposti hajoavaa ainesta, saattaa tukiaineen käytöllä kuitenkin tällöin olla negatiivinen vaikutus kompostin happioloihin (Forsbacka 1996; Sarkkila ym. 2004; USEPA 1999). Aiempien tutkimusten perusteella jätevesiliete- tai biokompostin käyttö käsiteltävän massan tukiaineena on tehokas ja edullinen keino lisätä kompostointikäsitelyn tehokkuutta (Namkoong ym. 2002).

Kompostikäsitelyn aikana on huolehdittava siitä, että happiolosuhteet kompostissa pysyvät hajotustoiminnan kannalta otollisina koko käsittelyprosessin ajan. Kompostissa tulee olla riittävästi ilman kanssa kosketuksissa olevaa pintaa, jotta orgaanisen aineen hajoamiseen tarvittava happi ja hajoamisreaktioissa vapautuva hiilidioksidi pääsevät vaihtumaan tehokkaasti. Kompostissa oleva huokoinen materiaali edesauttaa kaasujen kulkeutumista aumassa. Usein pelkkä tukiaineen lisäys ei riitä ylläpitämään riittäviä happiolosuhteita, varsinkin käsittelyprosessin jatkuessa useita kuukausia. Hajotustoiminnan seurauksena kompostiin lisätyn orgaanisen aineksen partikkelikoko pienenee aiheuttaen näin auman tiivistymistä ja sitä kautta happiolojen huonontumista. Ainoaksi vaihtoehdoksi voi jäädä massaseoksen mekaaninen kääntäminen tai ulkoisesti toteutettu ilmastus (Van Gestel ym. 2003).

Tukiaineiden lisäksi aumoihin voidaan lisätä happamuuden säätöaineita ja ravinteita sekä tarvittaessa säätää maa-aineksen kosteuspitoisuutta. Käyttökelpoisia lisäravinteita ovat typpeä sekä fosforia sisältävät lannoitteet, jotka sisältävät ammoniumsulfaattia, fosforisuoloja tai ammoniumfosfaattia. Muita mahdollisia lisäravinyhdisteitä ovat muun muassa ammoniumnitraatti ja – kloridi sekä kalium-, natrium- ja kalsiumfosfaatit (Järvinen 2000).

Tarvittavat tuki- ja lisäainemäärät tulee selvittää maa-aineksen laadun sekä mahdollisten ennakkokokeiden perusteella (taulukko 3). Usein kaupallisten lisäaineiden käyttö on turhaa, mikäli kompostiin lisätään jotakin tukiainetta. Lisä- ja tukiainekset ei saa sisältää kompostoitumisprosessin tai kompostin jatkokäytön kannalta haitallisia materiaaleja tai yhdisteitä. Mikäli kompostiin kuitenkin sekoitetaan kaupallisia lisäaineita, tulee niiden sisältää asianmukaiset käyttöturvallisuustiedotteet. Lähtökohtana kompostointiprosessia suunniteltaessa tulisi olla tuki- ja lisäaineiden käytön minimointi, sillä tavoitteena ei saa olla käsiteltävän haitta-ainepitoisuuden laimentaminen (Mroueh ym. 2004; Sarkkila ym. 2004).

Taulukko 3: Kompostoitavan maa-aineksen suositeltavat ravinnesuhteet sekä lähtöpitoisuudet (Mroueh ym. 2004).

Parametri	Suhde/pitoisuus
Hiili-typpeäsuhte (C:N)	20:1–35:1
Typpeä-fosforisuhte (N:P)	5:1
Kosteuspitoisuus (%)	40–60
Happipitoisuus (%)	> 5
pH	6,5–8,0

Kompostiaumojen koko ja pituus määräytyy pääasiassa käytettävissä olevan käsittelytilan mukaan. Riittävän lämmöneristyksen varmistamiseksi aumojen vähimmäismittoina voidaan pitää 1,5 m korkeutta sekä 3-7 m pohjan leveyttä. Kompostoinnin alkuvaiheessa yli 2,5 m korkeus voi, materiaalista riippuen, johtaa auman liialliseen tiivistymiseen (Forsbacka 1996). Korkeammassa aumarakenteissa voidaan auman aerobiset olosuhteet varmistaa rakentamalla useampia päällekkäisiä tukiaine- ja massakerroksia (Burman & Huttunen 2006).

Kompostien vaativan ilmastuksen tarvetta on melko vaikeaa määrittää yleispätevästi, sillä hapenkulutukseen vaikuttavat myös useat muut kompostin olosuhdetekijät (mm. lämpötila ja mikrobikoostumus). Käytettäessä koneellista ilmastusta, ei kompostiaumaa tarvitse yleensä kääntää, riittävien happiolosuhteiden saavuttamiseksi. Koneellisen ilmastuksen seurauksena saattaa aumoihin kuitenkin muodostua ns. ilmastuskanavia, jolloin ilma ei kulje tasaisesti koko kompostoitavan materiaalin läpi. Liian vähäinen ilmastus voi hidastaa hajottavien mikrobien toimintaa, kun taas liiallinen ilmastus puolestaan voi alentaa kompostin lämpötilaa (Forsbacka 1996).

Lämpötilan seuranta ja sen mukaan tehtävä kompostoinninohjaus on yleisesti käytetyin ja luotettavin menetelmä öljyhiilivedyillä pilaantuneiden maa-ainesten kompostoinnissa. Kompostiauman lämpötilaa kannattaa seurata useasta pisteestä, sillä auman lämpötila voi vaihdella suuresti auman eri osien välillä, riippuen vallitsevista hajotus- ja happiolosuhteista sekä ulkoilman lämpötilasta (Forsbacka 1996).

Kompostiaumat menettävät lämpöä kolmen päämekanismin kautta, jotka ovat 1) konvektio, 2) konduktio ja 3) säteily. Luonnollisessa ilmanvaihdossa auman sisällä lämmennyt kaasu pyrkii nousemaan ylöspäin muodostaen ns. savupiippuefektin. Lämpötilaerojen vaikutuksesta auman alaosiin puolestaan virtaa viileämpää korvausilmaa auman ulkopuolelta (Barrena ym. 2006).

Riittävät lämpötilaolosuhteet voidaan taata oikeanlaisen kompostirakenteen ja erillisen lämmöneristyksen avulla. Aumoja voidaan myös tarvittaessa lämmittää esimerkiksi lämpöputkien tai -vaipan avulla tai johtamalla aumoihin lämmitettyä ilmaa. Jätteenkäsittelykeskuksissa voidaan aumojen lämmityksessä käyttää hyödyksi muissa prosesseissa, esimerkiksi kompostointilaitoksessa, syntyvää hukkalämpöä. Koneellista ilmastusta käytettäessä tulee varmistua käsiteltävän massan riittävän kosteuspitoisuuden ylläpitämisestä aumakäsittelyn ajan (Forsbacka 1996; Sanscartier ym. 2008).

Kompostiaumojen kosteuspitoisuutta voidaan ylläpitää kastelemalla aumoja pinnalta vesiletkun avulla tai vaihtoehtoisesti johtamalla auman sisään esimerkiksi ilmastusputkia pitkin vesihöyryä. Riittävä kosteuspitoisuus edesauttaa hajottajamikrobien toimintaa ja haitta-aineiden saatavuutta sekä vähentää haihtumista ja kaasumaisten yhdisteiden syntyä. Käytettäessä tehostettua kostutusta, tulee kuitenkin varmistua, ettei kompostoitumisprosessi ajaudu anaerobiseen hajotustilaan hapen puutteen vuoksi tai ettei kostutuksen yhteydessä pääse syntymään haitallisia suotovesiä (Sanscartier ym. 2008).

Kompostiaumat tulisi aina pyrkiä peittämään käsittelyn ajaksi esimerkiksi aumamuovilla. Aumojen peittämisellä voidaan vähentää pöly- ja hajupäästöjä, vähentää haihduntaa ja näin ollen aumojen kuivumista sekä toisaalta estää aumojen liiallinen tiivistyminen ja suotovesien syntyminen sateen vaikutuksesta (Sarkkila ym. 2004).

3.5. Päästöjen hallinta

Mikäli kompostoitavia maa-aineksia joudutaan varastoimaan kompostointikentällä, tulee kohteessa varautua pöly- ja kaasupäästöjen hallintaan. Varastokasat tulee tällöin peittää esimerkiksi aumamuovilla, tai mikäli mahdollista, siirtää välivarastoinnin ajaksi katettuun tilaan. Haihtuvia yhdisteitä sisältäviä maamassoja käsiteltäessä tulee päästöjen hallintaan kiinnittää erityistä huomiota. Pilaantuneiden massojen alkuperä, varastoinnin alkamisaika sekä lähtöpitoisuudet tulee dokumentoida asianmukaisesti. Komposteissa käytettävät lisä- ja tukiaineet tulee säilyttää tiiviissä säiliöissä tai säkeissä siten, etteivät ne joudu kosketuksiin sade- tai valumavesien kanssa. Kompostointikentällä varastoitavat lisä- ja tukiainemateriaalit tulee merkitä selvästi ja merkkitarroista sekä -tauluista on käytävä ilmi myös tuotteille ominaiset turvamerkinnot (Burman & Huttunen 2006; Mroueh ym. 2004).

Pölyäviä tai herkästi haihtuvia yhdisteitä sisältäviä maamassoja kuljetettaessa, voidaan siirrettävä maa-aines kostuttaa vedellä kuljetusten ajaksi. Haihtuvia haitta-aineita sisältävien maamassojen siirrot ja käännöt pyritään tekemään kohteissa, joissa kaasut voidaan hallitusti kerätä sekä käsitellä. Ennen kompostointiprosessin käynnistämistä on varmistettava, että kompostointikentällä on riittävät sijoituspaikat ja tilat käsiteltäville maa-aineksille sekä kompostoinnissa käytettäville tukiaineille ja työkoneille. Kompostiaumat on suojattava kuivumiselta sekä tuulen ja sateiden aiheuttamilta rasituksilta esimerkiksi geotekstiileillä, polyesteri- tai propeenipeitteellä tai vastaavilla huokoisilla kankailla (Mroueh ym. 2004).

Mikäli käsiteltävien maamassojen tiedetään sisältävän kompostointilämpötiloissa (< 65 °C) haihtuvia haittayhdisteitä, tulee kompostointiprosessissa varautua myös keskitetyn kaasujen keräyksen sekä käsittelyn järjestämiseen esimerkiksi aktiivihiihluodatus- tai katalyyttisen polttolaitteiston tai vaihtoehtoisesti biosuodattimen avulla (Van Gestel ym. 2003). Hyväksi havaittuja biologisia kaasujen absorptiomateriaaleja ovat mm. orgaaniset massat, kuten jätevesiliete sekä biokomposti. Huokoisen rakenteensa avulla ne pystyvät sitomaan itseensä suuria pitoisuuksia kaasumaisia haittayhdisteitä (Namkoong ym 2002).

Kompostointiprosessin yhteydessä voi syntyä sivutuotteena jätteitä, joita ei voida loppusijoittaa muun maa-aineksen mukana. Nämä jätemateriaalit tulee toimittaa käsiteltäväksi asianmukaiseen laitokseen tai viranomaisten hyväksymään sijoituskohteeseen. Tällaisiksi ongelmajätteiksi voidaan luokitella mm. hiekanerotuskaivojen raskasmetallipitoiset lietteet, seulentajäte tai kaasumaisilla haitta-aineilla kyllästynyt aktiivihiili (Mroueh ym. 2004; Sarkkila ym. 2004).

3.6. Kunnostustyön aikainen laadunhallinta

Kompostoinnin laadunvarmistukseen kuuluu ensisijaisesti alkuperäisen pilaantuneen maa-aineksen ominaisuuksien selvittäminen. Pilaantunut maa-aines tulisi karakterisoida ainakin pilaavien haitta-aineiden lisäksi kosteuspitoisuuden, orgaanisen aineksen (hehikutushäviö), pH:n sekä tarvittaessa typpiyhdisteiden (NH_4 , NO_3 , kokonaistyyppi) osalta. Tukiaineesta tulee edellä mainittujen analyysien lisäksi määrittää hiili-typpisuhde. Haitta-aineanalyysjä varten tulee käsiteltävästä maa-aineksesta ottaa näytteet riittävällä otannalla, noin yksi lapiollinen 10 m^3 :a käsiteltävää maa-ainesta kohti (Sarkkila ym. 2004).

Kompostoitavat maa-ainekset sekoitetaan sekä tarvittaessa seulotaan ja homogenoidaan huolellisesti ennen aumoihin läjitystä. Usein massat sekoitetaan mekaanisesti käyttäen apuna työkoneiden kauhoja tai rumpusekoitinta. Pilaantuneiden massojen sekoituksen yhteydessä lisätään niihin tarvittavat tuki-, seos- ja lisäaineet. Mikäli käsiteltävät massat sisältävät haihtuvia haittayhdisteitä, tulee sekoitus suorittaa suljetussa kaasunkeräysjärjestelmällä varustetussa tilassa.. Auman rakentamisen jälkeen, tarkastetaan vielä sen ravinne-, happi- ja kosteuspitoisuudet sekä otetaan tarvittavat näytteet haitta-ainepitoisuuksien varmistamiseksi (Mroueh ym. 2004).

Kompostoinnin etenemistä sekä toimivuutta seurataan säännöllisesti koko prosessin ajan. Kompostin lämpötilaa tulee seurata tasaisin väliajoin tehtävin mittauksin eri kompostikerroksista. Kompostikentällä tehtävin mittauksin voidaan lisäksi seurata mm. kompostiaumojen kaasupitoisuuksia ja -jakaumaa, kosteuspitoisuutta, pH:ta sekä käsiteltävän massan koostumusta yms. Kompostointiprosessin toimivuus voidaan osoittaa aumoissa muodostuvan hiilidioksidin ja metaanin tuoton avulla. Kompostissa syntyvä hiilidioksidi indikoi aerobisista ja metaanin tuotto puolestaan anaerobisista hajotusolosuhteista. Haitta-ainepitoisuuksien kehittymistä tulee seurata kenttä- ja laboratorioanalyysin (Sarkkila ym. 2004).

Kompostia tulee tarvittaessa kääntää tai ilmastaa, jotta saastunut maa-aines saavuttaisi kauttaaltaan käsittelyn vaatimat happiolosuhteet ja sitä kautta käsittelylämpötilat. Kunnostustyön aikainen laadunhallinta pitää sisällään kompostiaumojen rakenteiden seurannan säännöllisin väliajoin, kompostiaumojen yleisen hoidon ja laadunvalvonnan sekä poistovirtojen seurannan ja laaduntarkkailun. Laadunvalvonnan avulla pyritään seuraamaan kompostoitumisprosessin toimivuutta ja puhdistumisen edistymistä sekä arvioida, milloin mahdolliset korjaaviin tai tehostaviin toimenpiteisiin tulee ryhtyä. Seurantatiheys tulee arvioida kompostin tilan, vuodenajan, sääolosuhteiden sekä tarkkailumittausten ja näytteenottotiheyden mukaan (Mroueh ym. 2004; Sarkkila ym. 2004).

3.7. Kompostoinnin päättäminen sekä loppusijoitus

Kompostin valmistuksen yhteydessä käsiteltävät massamäärät sekä massan laatu muuttuvat. Kompostoinnin hyväksyttävyyden arviointi määräytyy yleensä ympäristöluvassa esitettyjen ehtojen, kuten maa-aineksen pitoisuuksille ja muille ominaisuuksille asetettavien vaatimusten täyttäminen. Ennen kuin kompostoitu maamassa voidaan loppusijoittaa, tulee siitä määrittää samat ominaisuudet kuin kompostoinnin käynnistämävaiheessa. Tällöin haitta-aineiden lisäksi voi usein olla syytä määrittää myös merkittävien haitallisten hajoamistuotteiden sekä ns. pysyvien yhdisteiden (mm. raskasmetallien) pitoisuudet. Mikäli kompostoidaan useiden yhdisteiden muodostamia seoksia, kuten öljyt, tulee puhdistustulos arvioida erikseen kevyille ($<C_{10}$), keskiraskaille ($C_{10}-C_{21}$) sekä raskaille ($>C_{21}$) fraktioille. Loppusijoitettavan maa-aineksen pH:n tulisi myös olla neutraalilla tasolla (5,0–7,5) (Mroueh ym. 2004).

Mikäli haitta-ainepitoisuudet jäävät käsittelyn jälkeen yhä liian korkeiksi, tulee pilaantuneiden massojen osalta harkita loppusijoittamisen sijaan korvaavien käsittelymenetelmien käyttöä. Tällöin vaihtoehdoksi voi tulla kompostin ns. uudelleen käynnistäminen, jossa kompostiin lisätään kaupallisia lisäravinteita tai kompostikiihdytinaineita ja massat sekoitetaan uudelleen (Sarkkila ym. 2004).

Pilaantuneiden maiden kaatopaikkakelpoisuudesta ei ole säädetty yleisesti sovellettavia raja-arvopitoisuuksia. Pilaantuneiden maiden pienjäte-erien sijoittamisesta tavanomaisen jätteen kaatopaikalle (VNa 861/1997 § 2) on esitetty enimmäispitoisuusarvo Ympäristöhallinnon vuonna 2006 laatimassa jätteiden kaatopaikkakelpoisuutta käsittelevässä ohjeessa. Mineraaliöljyjen (C₁₀-C₄₀) osalta enimmäispitoisuusarvoksi on tässä yhteydessä ehdotettu 2500 mg/kg, mikäli jäte-erä ei sisällä bentseenijakeita (Wahlström ym. 2006).

Mikäli kompostoidut maa-ainekset aiotaan hyötykäyttää, tulee osoittaa, että ne on käsitelty lupaehtojen mukaisesti ja että kaikki hyötykäyttökelpoisuuden edellytykset tulevat täytetyiksi. Kompostointiprosessin laadunvalvonnan tulee tällöin olla perusteellisempaa kuin perinteisessä kaatopaikkakäsittelyssä. Hyötykäyttöön menevien massojen hyväksyttävän pitoisuustason ylitysriskin tulisi olla kaatopaikkasijoitusta pienempi. Yhtenä kompostoinnin heikkouksista pilaantuneiden maa-ainesten kunnostuksessa voidaankin pitää jäljelle jääviä haitta-ainepitoisuuksia (Sarkkila ym. 2004).

3.8. Työsuojelu ja turvallisuus

Erillisille kunnostustyömaille tulee aina laatia työsuojelusuunnitelma, jossa esitetään toimintasuunnitelmat ja varautuminen mahdollisten riskien varalle. Suunnitelma tulee hyväksyttävä työnsuojeluviranomaisilla. Mikäli kompostointikunnostus suoritetaan lainvoimaisissa jätteenkäsittelykeskuksissa, ei erillistä työnsuojelusuunnitelmaa vaadita (Mroueh ym. 2004).

Haitta-aineilla, kuten öljyhiilivedyillä, pilaantuneen maaperän kompostoinnista saattaa aiheutua työnaikaisia riskejä, jotka tulee huomioida kunnostusta suunniteltaessa. Riskejä voivat aiheuttaa mm. altistuminen haitta-aineille sekä mikro-organismeille hengitys- tai ruoansulatuselimistön välityksellä. Turvallisuusriskin saattaa aiheuttaa myös käsittelyalueella käytettävät työkoneet ja – laitteet. Käsiteltäessä öljyhiilivedyillä pilaantuneita maamassoja, tulee myös aina varautua mahdolliseen tulipaloriskiin (Mroueh ym. 2004).

Mikäli kohteessa käsitellään maa-aineseriä, joiden kaikkia haitta-aineita tai muita ominaisuuksia ei täsmällisesti tunneta, on ennen käsittelyyn aloittamista syytä laatia tapauskohtainen riskinarviointi. Riskinarvioinnilla tarkoitetaan menettelyä, jossa käydään läpi mahdollisesti työstä aiheutuvat riskit työntekijöiden terveydelle sekä yleiselle turvallisuudelle. Riskinarviointi etenee työstä aiheutuvien vaarojen sekä haittojen tunnistamisesta niiden vakavuuden ja todennäköisyyden arviointiin. Kattavalla riskinarvioinnilla tunnistettuihin haittatekijöihin voidaan näin ollen varautua jo ennakkoon sekä laatia toimintasuunnitelma työn turvallisesti läpiviemiseksi (Ympäristöhallinto 2006).

Kentällä tapahtuvia työ- ja terveysriskejä voidaan ehkäistä tehokkaasti henkilösuojaintein, kuten hengityssuojainten, suojahansikkaiden ja – haalarien sekä turvaliivien ja -jalkineiden avulla. Mikäli kompostointi suoritetaan suljetussa tai katetussa tilassa, tulee varmistua siitä, että tilassa on riittävä ilmanvaihto työntekijöiden suojaamiseksi. Käsiteltävästä maa-aineksesta mahdollisesti haihtuvien haitta-aineiden lisäksi kompostoinnin yhteydessä voi syntyä myös muita kaasumaisia yhdisteitä, kuten hiilidioksidia, metaania ja ammoniakkaa (Mroueh ym. 2004).

Turvaliivit parantavat kompostointikentällä työskentelevien henkilöiden havaittavuutta. Työkoneiden lähellä työskenneltäessä tulisi myös aina käyttää suojakypärää sekä kuulosuojaimia. Jokainen kentällä työskentelevä henkilö tulee perehdyttää kentällä suoritettaviin työtehtäviin ja niistä mahdollisesti aiheutuviin vaaroihin. Kompostointikentällä käytetyt työvaatteet tulisi säilyttää erillään ns. ”puhtaista vaatteista”. Asianmukaisesti hoidetut sekä siistit sosiaali- ja pesutilat vähentävät osaltaan syntyviä terveyshaittoja. Sosiaalitalat tulee varustaa ensihoitoon mahdollistavilla ensiapuvälineillä (Mroueh ym. 2004; Ympäristöhallinto 2006).

3.9. Kokemuksia öljyhiilivedyillä pilaantuneiden maiden kompostoinnista

Öljyhiilivedyillä pilaantuneiden maiden kunnostamisesta ja erilaisten tehostamistoimenpiteiden vaikutuksista pilaantuneiden maamassojen kompostointiin on 2000- luvulla raportoitu useissa alan julkaisuissa. Pääosa näistä tutkimuksista keskittyy laboratorio-olosuhteissa suoritettuihin tutkimuksiin, kuten esimerkiksi Kim ym. (2005), Namkoong ym. (2002), Rahman ym. (2002), Van Gestel ym. (2003) ja Viera ym. (2007) julkaisemat tutkimukset. Pilot -mittakaavan kenttätutkimuksista ja niistä saatuja tutkimustuloksia on julkaistu huomattavasti edellä mainittuja vähemmän. Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan Sanscartierin ym. (2008) sekä Jörgensen ym. (2000) tutkimuksien toteutustapoja ja menetelmiä sekä merkittävämpiä tutkimustuloksia.

3.9.1. Koneellisen ilmastuksen ja kostutuksen vaikutus kompostoitavuuteen

Sanscartier ym. (2008) tutkivat koneellisen ilmastuksen sekä kostutuksen vaikutusta öljyhiilivedyillä pilaantuneen maamassan kunnostuksessa aumakompostoinnin yhteydessä. Tutkimuskohteeseen (Kingston, Kanada) rakennettiin kolme 4 m³:n koeaumaa, jotka sisälsivät tuoretta, öljyhiilivedyillä pilaantunutta maa-ainesta. Koska pilaantunut maa-aines sisälsi pääosin savea, sekoitettiin sen joukkoon tukiainetta (sora ja hiekkaa) parantamaan huokoisuutta sekä teollista ravinneseosta (BioSolve™, Westford Chemical Corporation, Westford, Kanada) ja maatalouslannoitteita (mm. (NH₂)₂CO sekä (NH₄)₂HPO₄) parantamaan ravinnonlähteeksi mikrobeille. Pilaantuneen maamassan sekä tuki- ja ravinneaineympin seossuhteena käytettiin 3:1. Pilaantuneen maa-aineksen öljyhiilivetyjen lähtöpitoisuus oli noin 11 000 mg/kg. Aumakäsittely kesti yhteensä kymmenen kuukauden ajan, marraskuusta 2004 syyskuuhun 2005.

Kaksi kolmesta tutkimuksessa käytetystä koeaumasta oli ilmastettu sekä lämmitetty koneellisesti. Toiseen koeaumoista johdettiin lisäksi ilmastuksen yhteydessä kosteaa vesihöyryä ylläpitämään käsiteltävässä maamassassa sopivaa kosteuspitoisuutta. Kolmas koeauma oli ilmastettu passiivisesti. Koneellisesti ilmastettuihin aumoihin johdettiin ilmaa puhaltimella (EG&G Rotron, Kent, Kanada). Puhaltimien tuottama ilma lämmitettiin 2 kW:n lämmityselementeillä (Watlow, St. Louis, Kanada), ennen kun se johdettiin aumojen ilmastusputkiin. Kosteuden ylläpitämiseen tarvittava vesihöyry tuotettiin vesijohdon päähän asennettujen suulakkeiden avulla ja esilämmitettiin 50 °C lämpötilaan ennen johtamista puhaltimen ilmavirtaan.

Käsiteltävä maamassa kasattiin aumoihin ilmastusputkien päälle, jotka oli sijoitettu 5 cm paksulle hiekkapatjalle. Ilmastusputkista nostettiin havainto-/huokosputket aumojen laille ja tehostetusti ilmastetut koeaumat suojattiin huokoisella aumamuovilla (Polyair™, Toronto, Kanada). Aumamuovi aseteltiin myös tehostetusti ilmastettujen aumojen hiekkapetien alle siten, että ne muodostivat oman suljetun systeemin. Näin pyrittiin minimoimaan mahdolliset lämpöhäviöt.

Aumojen öljyhiilivety- ja ravinnepitoisuutta sekä pH:ta tarkkailtiin säännöllisten näytteenottojen avulla. Tutkimuksen aikana aumoista otettiin näytteet yhteensä kuusi kertaa. Jokainen näytteenotto sisälsi kymmenen eri syvyyksiltä otettua erillisnäytettä per auma. Aumojen pinnalta (0-10 cm syvyydeltä) näytteet kerättiin kertakäyttöisillä näytelapioilla ja auman sisäosista (60–80 cm syvyydeltä) otetut näytteet vastaavasti näytekairalla. Näytteet pakattiin steriileihin muoviasioihin ja toimitettiin tutkittaviksi laboratorioon kylmälaukkuihin pakattuina. Öljyhiilivetyanalyytit kiintoainenäytteistä suoritettiin liekki-ionisaatioon perustuvalla kaasukromatografilla (GC/FID, menetelmä US. EPA 2000). Öljyhiilivedyt analysoitiin ja jaettiin kolmeen eri fraktioluokkaan; alle 11 hiiliatomia, 11–15 hiiliatomia sekä yli 15 hiiliatomia sisältäviin öljyhiilivety-yhdisteisiin.

Haihtuvia öljyhiilivetyjakeita seurattiin huokoskaasuanalyysin. Kahden ensimmäisen tarkkailukuukauden aikana ilmastettujen koeaumojen läpi suotautuneet huokoskaasut kerättiin aktiivihiiliputkiin (GAC, AC Carbon, St-Jean-sur-Richelieu, Kanada). Aktiivihiiliputkien käytöstä jouduttiin kuitenkin pian luopumaan, sillä huokoskaasun mukana aktiivihiileen kertynyt kosteus jäädettiin ne käyttökelvottomiksi. Loput tutkimuksen huokoskaasuanalyysit toteutettiin pumppaamalla ilmaa tehostetusti ilmastettujen koeaumojen läpi hiilellä (*charcoal*) täytettyihin suodatinputkiin. Analyysivaiheessa huokoskaasuilla kyllästettyyn hiileen lisättiin nestemäistä rikkihiiltä (CS₂) ja näytteet analysoitiin liekki-ionisaatioon perustuvalla kaasukromatografilla (GC/FID, menetelmä NIOSH 2003 mukailen). Passiivisesti ilmastetun koeauman huokoskaasuja ei tämän tutkimuksen yhteydessä analysoitu.

Aumojen lämpötila- sekä kosteuspitoisuuksia seurattiin reaaliaikaisilla mittaustantureilla tunnin välein. Jokaiseen koeaumaan asennettiin viisi lämpötila-anturia (105 T, Campbell Scientific, Edmonton, Kanada) sekä kolme kipsistä kosteustanturia (223, Campbell Scientific). Aumojen happipitoisuudet mitattiin kannettavalla kaasuanalysointorilla (TMX-410, Industrial Scientific, Oakdale, Kanada) aumoihin asennetuista huokoskaasuputkista.

Sanscartier ym. (2008) havaitsivat, että öljyhiilivetytitoisuudet kaikissa koeaumoissa vähenivät merkittävästi kymmenen kuukauden koejakson aikana. Kostutetussa koeaumassa hajotusolosuhteet (lämpötila ja kosteuspitoisuus) pysyivät suotuisina koko tutkimuksen ajan, jonka seurauksena auman kokonaisöljyhiilivetytitoisuus saavutti alemman loppupitoisuuden (noin 300 mg/kg) muihin koeaumoihin verrattuna. Tulosten perusteella voidaan päätellä, että kosteuttamalla käsiteltävää maamassaa, saadaan öljyhiilivetyjen biologisia hajotusolosuhteita parannettua vähentäen samalla haitallisten kaasuyhdisteiden syntyä.

3.9.2. Orgaanisen aineksen vaikutus kompostoitavuuteen

Jörgensen ym. (2000) tutkivat orgaanisen aineksen ja mikrobilisäyksen merkitystä voitelu- ja diesel-öljyllä pilaantuneen maaperän kompostointikunnostuksen yhteydessä. Pilaantunut maa-aines, yhteensä 400 m³, oli kaivettu ja kuljetettu käsittelylaitokselle kolmelta Helsingin alueella sijaitsevalta huoltoasemalta. Keskimääräinen öljyhiilivetytitoisuus voiteluöljyllä pilaantuneissa maa-ainekerissä ennen käsittelyä oli noin 2400 mg/kg ja vastaavasti diesel-öljyllä pilaantuneissa massoissa 700 mg/kg.

Tutkimusta varten käsittelykeskukseen rakennettiin viisi 40 m³ koeaunaa, joihin käsiteltävän maa-aineksen joukkoon lisättiin puuhaketta sekä kaupallisia ravinteita, typpeä, fosforia sekä kaliumia (Typpirikas Y-lannos 1, Kemira, Suomi). Voiteluöljyllä pilaantuneet maa-ainekerät kasattiin 1,5 m korkeisiin, 3,5 m leveisiin ja 20 m pitkiin käsittelyaumoisiin. Vastaavasti diesel-öljyllä pilaantuneet maa-ainekerät sekoitettiin ja käsiteltiin yhdessä 45 m pitkässä aumassa. Massojen lähtölämpötilat vaihtelivat 15–20 °C ja pH kalkkilisäyksen (Kalkki 2, Nordkalk Oy, Sipoo, Suomi) jälkeen 7,1–7,4 välillä. Tukiaineena aumoissa käytettiin kuusihaketta, yhteensä noin 150 m³, jota sekoitettiin käsiteltävän maa-aineksen kanssa suhteessa 1:3. Lisäravinteita sekoitettiin tukiaineen ja pilaantuneen maa-aineksen seokseen noin 1 kg yhtä kuutiota käsiteltävää seosmassaa kohden.

Koeaumoja käännettiin kaksi kertaa kahden ensimmäisen kuukauden aikana ja tämän jälkeen kerran kuussa happitasapainon ja sopivien hajotusolosuhteiden ylläpitämiseksi. Tarkkailua jatkettiin viiden kuukauden ajan. Komposteista otettiin kokoomanäytteitä öljyhiilivetyjen määrittämiseksi jokaisen kääntökerran yhteydessä. Aumakohtaiset yksikkönäytteet, 10–12 kpl/auma, sekoitettiin yhdeksi kokoomanäytteeksi, joka seulottiin 8 mm:n seulaverkolla ennen näyteastioihin sulkemista. Öljyhiilivetynäytteet säilytettiin 4 °C lämpötilassa ja analysoitiin viikon sisällä näytteenotosta. Käsittelyaumoissa syntyviä kaasumaisia yhdisteitä tarkkailtiin aktiivihiiliputkien sekä Dräger-monikaasuanalysointilaitteen (Dräger, Drägerwerk AG Lubeck, Saksa) avulla. Aumojen lämpötilat mitattiin manuaalisesti aumalämpömittarilla (Testo 700, Testoterm GmbH and co., Lenzkirch, Saksa) noin 50 cm:n syvyydeltä aumojen pinnalta. Aumojen pH- ja ravinneanalyysit suoritettiin sertifioitussa laboratorioissa (Novalab Oy, Karkkila, Suomi).

Jörgensen ym. (2000) havaitsivat, että sekä voitelu- ja diesel-öljypitoisuudet laskivat alkuperäisistä lähtöpitoisuuksista noin kolmasosaan viiden käsittelykuukauden aikana. Voiteluöljypitoisuudet vähenivät koeaumoissa keskimäärin 2400 mg/kg:sta 800 mg/kg:aan kun vastaavasti diesel-öljypitoisuudet vähenivät 700 mg/kg:sta reiluun 200 mg/kg:aan. Voiteluöljyllä pilaantuneiden maamassojen käsittelyaumoissa öljyhiilivetypitoisuuksien osalta esiintyi pientä aumakohtaista hajontaa (keskimäärin 300 mg/kg), johtuen pääasiassa käsiteltävien massojen heterogeenisuudesta. Öljyhiilivedyt vähenivät merkittävästi kahden ensimmäisen käsittelykuukauden aikana, jonka jälkeen väheneminen hidastui ja jatkui tasaisen laskevana saavuttaen edellä esitetyt loppupitoisuudet. Hajoamisnopeuksissa ei koeaumojen välillä ollut merkittäviä eroavaisuuksia.

Haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (TVOC) havaittiin pieninä pitoisuuksina (keskimäärin noin 300 mg/m³) vain ensimmäisen kahden käsittelyviikon aikana, jonka jälkeen pitoisuudet vähenivät merkittävästi ollen käytännössä vastaavia mitattujen taustapitoisuuksien kanssa. TVOC- pitoisuudet olivat selvästi pienimmät vertailuaumassa (ei ravinnelisäystä), noin yksi kolmasosa muiden koeaumojen vastaaviin pitoisuuksiin verrattuna.

Voiteluöljyllä pilaantuneiden käsittelyaumojen lämpötilat nousivat tutkimuksen alkuvaiheessa lähtötasosta saavuttaen maksimilämpötilat, 40 °C, noin kuukauden kuluttua käsittelyn alkamisesta. Vastaavasti vertailuaumassa, johon ei lisätty ulkopuolisia ravinteita, maksimilämpötilan saavuttaminen kesti noin kuukauden verran muita aumoja kauemmin. Maksimilämpötilojen osalta koeaumojen välillä ei havaittu merkittäviä eroja. Viimeiset lämpötilamittaukset suoritettiin marraskuussa, aumojen sisälämpötilojen ollessa noin 5 °C ja ulkolämpötila -2 °C. Jörgensen ym. (2000) havaitsivat myös, että aumojen mikrobiologinen hengitys (hiilidioksidin, CO₂, tuotto) korreloi selvästi aumojen lämpötilakehityksen kanssa. Kyseinen havainto vahvistaa yleistä käsitystä siitä, että aumojen lämpötilan sekä hiilidioksidin tuoton avulla voidaan kompostin hajoamisprosessin tilasta tehdä varsin luotettavia päätelmiä.

4. AINEISTO JA MENETELMÄT

4.1. Jätteenkäsittely Mustankorkealla

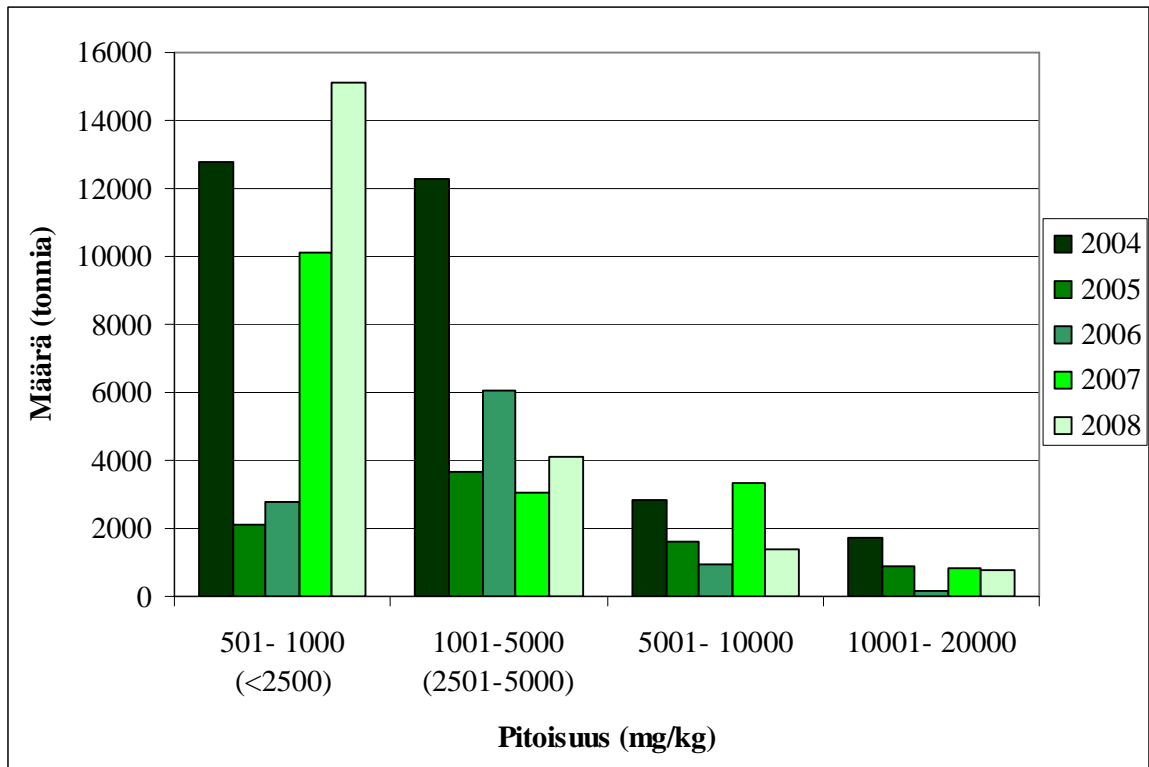
Mustankorkea Oy on alueellinen jätteenkäsittely-yhtiö, joka hoitaa yhtiön toiminta-alueella syntyneiden yhdyskuntajätteiden käsittelyä sekä edistää jätteiden kierrätystä ja hyötykäyttöä. Mustankorkea tarjoaa myös jätehuollon kokonaispalveluratkaisuja elinkeinoelämän ja julkisyhteisön toimijoille. Mustankorkea ottaa vastaan ja käsittelee kuiva-, bio- ja muuta yhdyskuntajätettä sekä pilaantuneita maa-aineksia. Jätteenkäsittelykeskus ottaa myös vastaan ongelma- ja hyötyjätteitä, jotka toimitetaan eteenpäin luvanvaraisiin käsittelypaikkoihin. Mustankorkea Oy on aloittanut toimintansa vuoden 1998 alussa ja omistajina ovat Jyväskylän kaupunki, Laukaa, Muurame ja Vapo Oy. Omistajakuntien lisäksi asiakkaina on 13 keskisuomalaista kuntaa. Yhtiön toimialueella asuu noin 220 000 asukasta (Mustankorkea Oy 2009a).

Mustankorkealla biojätteet sekä puhdistamoliete käsitellään kompostointilaitoksessa, jonka lopputuloksena syntyy maanparannusainetta ja multaa. Kompostiaumojen tukiaineena käytetään murskattua puujätettä. Mustankorkean kompostointilaitoksessa voidaan käsitellä biojätettä 14 000 t/a ja puhdistamolietettä 20 000 t/a. Jätteet käsitellään laitoksessa kompostoimalla ne erillään toisistaan (Mustankorkea Oy 2006).

Nykyisin öljy-yhdisteillä pilaantuneita maa-aineseriä käsitellään Mustankorkealla kompostiaumoissa, kunnes käsiteltävien massojen haitta-ainepitoisuudet laskevat alle jatkokäyttöä koskevien raja-arvojen. Keskimääräinen käsittelyaika vaihtelee puolesta vuodesta muutamiiin vuosiin pilaantuneiden massojen haitta-ainepitoisuuksista riippuen (Burman & Huttunen 2006). Kuvassa 6 on esitetty Mustankorkean jäteasemalle vastaanotetut ja siellä käsitellyt öljyllä pilaantuneet maa-massat vuosina 2004- 2008 (Mustankorkea Oy 2009b & 2007a-d).

Mustankorkealla kompostoitavien pilaantuneiden maa-ainesten käsittelykenttä on pinta-alaltaan noin 10 000 m² (liite 1). Käsittelykentästä noin 8 000 m² on varattu varsinaiseksi kompostointialueeksi ja 2 000 m² varastointialueeksi. Käsittelykentällä voidaan käsitellä samanaikaisesti noin 14 000 tonnia (10 500 m³) maamassoja. Käsittelykentän kompostointialue on päällystetty tiiviillä asfaltilla ja koko käsittelykenttä on varustettu pintavesien keräilyjärjestelmällä. Kaikki kenttäalueelta tulevat vedet johdetaan öljynerotusjärjestelmän kautta muiden kaatopaikalla syntyvien jätevesien kanssa Jyväskylän kaupungin viemäriverkostoon. Syntyvien sade- ja valumavesien määrää sekä laatua käsiteltävien maa-ainesten sisältämien haitta-aineiden osalta seurataan erillisen tarkkailuohjelman mukaisesti (Burman & Huttunen 2006).

Mustankorkean käsittelykentälle otetaan vastaan vain maamassoja, joiden käsittely tai varastointi on voimassa olevassa ympäristöluvassa hyväksytty. Maamassojen toimittajilta vaaditaan luotettava selvitys käsittelyyn tuotavan maa-aineksen laadusta sekä haitta-ainepitoisuuksista. Maamassojen vastaanotto suoritetaan siten, että alle 200 tonnin massaerät yhdistetään kentällä muihin vastaavasti pilaantuneisiin maamassoihin. Yli 200 tonnin kertaerät käsitellään kentällä aina omissa aumoissaan. Mikäli käsittelyyn tuotavan maa-aineksen haitta-ainepitoisuutta eikä kaatopaikkakelpoisuutta ole ylöskaivamisen yhteydessä määritetty riittävän luotettavasti, sijoitetaan kyseinen maa-aineseriä ensin varastointikentälle. Väliaikaisvarastointiin sijoitetuille maamassoille tehdään tarvittavat tutkimukset massojen laadun selvittämiseksi, jonka jälkeen tehdään päätös niiden käsittelyn aloittamisesta tai vaihtoehtoisesti toimittamisesta jatkokäsittelyyn luvanvaraiseen laitokseen, mikäli massojen käsittely Mustankorkealla ei ole mahdollista (Burman & Huttunen 2006).



Kuva 6: Öljyllä pilaantuneiden maiden vastaanotto ja käsittely Mustankorkean jäteasemalla vuosina 2004- 2008. Vuoden 2008 osalta lievästi pilaantuneiden (<5000 mg/kg) maiden pitoisuudet on esitetty suluissa olevien pitoisuusluokitusten mukaisesti (Mustankorkea Oy 2009b & 2007a-d).

Mustankorkealla on tehty aiemmin kenttäkokeita tukiaineiden ja ilmastusputkien käytöstä vuonna 2006 valmistuneeseen kompostointisuunnitelman tehostamisraporttiin perustuen (Burman & Huttunen 2006). Näiden kokeilujen tuloksia ei ole kuitenkaan seurattu eikä raportoitu tarkemmin. Pääasiassa pilaantuneiden maamassojen kompostointi on hoidettu edelleen kasaamalla käsiteltävät massat suoraan aumoiksi.

Pilaantuneiden maiden kaatopaikkakelpoisuuden arviointi tehdään Mustankorkealla voimassa olevan ympäristölupapäätöksen (KSU-2003-Y-243/121) sekä voimassa olevien lakien ja asetusten mukaisesti. Käsiteltyjen maa-ainesten täyttäessä kaatopaikkasijoittamiselle asetetut raja-arvot, voidaan käsitellyt maa-ainekset sijoittaa Mustankorkealla täytenpkkoihin tai käyttää täyttöalueilla luiskaverhoiluun.

4.2. Tutkimuksen toteutus

Kompostoinnin tehostamistoimenpiteet pyrittiin toteuttamaan aumarakennetta sekä huokosilman kierrätystä kehittämällä ja luomalla näin optimaaliset olosuhteet kompostin luonnollisille hajotusprosesseille. Työssä pyrittiin nopeuttamaan öljyhiilivedyillä pilaantuneiden maamassojen käsittelyaikaa, parantamaan lopputuotteen jatkokäsittelymahdollisuuksia sekä samalla vähentämään kompostointiin vaadittavaa kenttäalaa Mustankorkean jätteenkäsittelykeskuksessa. Tutkimuksen avulla pyrittiin lisäksi selvittämään, kuinka aumoihin tehtävillä rakenneratkaisuilla pystytäisiin öljyllä pilaantuneiden maamassojen kompostointia suorittamaan tehokkaasti myös talvikauden aikana.

Kompostointikokeet toteutettiin Mustankorkean jätteenkäsittelykeskuksessa 2.6.2008–16.1.2009 välisenä aikana. Hankkeen suunnittelu aloitettiin jo muutamaa kuukautta aiemmin maaliskuussa 2008, jolloin tehtiin päätökset tutkimuksessa käytettävistä aumarakenteista sekä seurattavista parametreista. Tutkimuksen toteuttamiseksi rakennettiin Mustankorkean pilaantuneiden maiden käsittelykentälle neljä koeaamaa (aumat nro 0-3, liite 2) 2.-4.6.2008 välisenä aikana. Koeaumojen rakenteet poikkesivat toisistaan lähinnä ilmankiertoon sekä lämmöneristykseen liittyvien rakenneratkaisuiden osalta, muuten aumojen perusrakenteet pyrittiin pitämään identtisinä vertailukelpoisten tutkimustulosten takaamiseksi. Koeaumojen yksityiskohtaisemmat rakenteet on kuvattu tarkemmin kappaleessa 4.3 sekä liitteenä olevissa tyyppipiirustuksissa 3-6.

Tutkimushankkeessa käytetty pilaantunut maa-aines oli tuotu jätteenkäsittelykeskukseen Äänekoskelta sijaitsevasta puhdistuskohteesta. Ennen koeaumoihin sijoittamista maa-aines oli välivarastoitu käsittelykentälle aumaksi. Koeaumoissa käytetyt tukimateriaalit, kuten puuhake ja lietekomposti, saatiin Mustankorkealta. Koeaumoihin sijoitettavat ilmastusputket (110 mm:n salaojaputket tarvittavine liitososineen) sekä routamatto (polyeteeni, 2 x 50 x 0,1 m, Meltex Oy, Suomi) hankittiin paikallisesta tukkuliikkeestä. Koeamat rakennettiin pyöräkuormaajan, dumpperin sekä kahden työmiehen voimin.

Tehostamistoimenpiteiden seuranta ja koeaumojen tilan tarkkailu järjestettiin manuaalisen näytteenoton, kenttämittausten sekä reaaliaikaisten lämpötila-antureiden (APL- Systems, Kuopio, Suomi) avulla. Manuaalinen näytteenotto käsitti kiinteiden maaperänäytteiden ottamisen aumoista sekä niiden analysoinnin, joko PetroFLAG™-kenttätestausmenetelmää (Dexsil, Hamden, USA, U.S. EPA SW-846 Method 9074) hyväksi käyttäen tai laboratorio-olosuhteissa (Eurofins Scientific Finland Oy, Tampere, Suomi). Manuaalisen näytteenoton avulla seurattiin pääasiassa öljyhiilivetyjen hajoamista koeaumoissa sekä kompostointiprosessien yleistä tilaa.

Kenttämittaukset kattoivat sekä kaasumaisten yhdisteiden tarkkailun että koeaumojen manuaalisen lämpötilaseurannan. Koeaumoista haihtuvia kaasumaisia yhdisteitä seurattiin Dräger- monikaasuanalysointilaitteella (Dräger X-am 7000, Drägerwerk AG Lubeck, Saksa) sekä PID- kenttäanalysointilaitteella (GasAlertMicro 5, BW Technologies, Banbury, Iso-Britannia). Analysointilaitteilla pyrittiin kartoittamaan sekä aumojen läpi haihtuvia kaasumaisia yhdisteitä, kuten haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, sekä suoraan käsiteltävässä maa-aineksessa muodostuvia yhdisteitä, kuten hiilidioksidia sekä metaania. Lisäksi monikaasuanalysointilaitteella seurattiin myös aumojen happipitoisuuksia.

Koeaumojen lämpötiloja seurattiin sekä manuaalisin mittauksin aumalämpömittarilla (Temppi -aumalämpömittari, Kasvutaito Oy, Rauma, Suomi) että jatkuvatoimisilla lämpötila-antureilla. Aumojen lämpötilaseuranta oli tutkimuksen kannalta merkittävässä asemassa, sillä lämpötilan on todettu kuvaavan aumoissa tapahtuvan hajotustoiminnan tilaa ja on näin ollen hyvä indikaattori öljyhiilivetyjen hajoamiselle (Beaudin ym. 1999).

Koeaumat 1-3 käännettiin koneellisesti marraskuun 10. päivä ja kaikki kompostiaumat purettiin pari kuukautta myöhemmin 16.1.2009, jolloin aumoista otettiin kattavat öljyhiilivetynäytteet (neljä erillisnäytettä per koeauma) laboratorioissa analysoitavaksi. Lisäksi aumojen lämpötilat sekä kaasupitoisuudet, myös VOC -pitoisuudet, mitattiin loppuarvojen varmistamiseksi. Koska laboratorioissa analysoidut öljyhiilivetyypitoisuudet alittivat kaatopaikkasijoittamiselle asetetut ohjearvot, voitiin aumojen massat näin ollen sijoittaa Mustankorkealla kaatopaikan luiskatäyttöihin.

Tutkimustulosten pohjalta pyrittiin luomaan tehokas toimintamalli öljyhiilivedyillä pilaantuneiden maa-ainesten aumakompostoinnille. Tavoitteena oli löytää pilaantuneiden maa-ainesten käsittelyyn soveltuva aumarakenne, jonka avulla massojen kompostointia voidaan jatkossa hoitaa jätteenkäsittelykeskuksessa tehokkaasti vuodenaajoista riippumatta.

4.3. Pilaantunut maa-aines sekä käytetyt seosaineet

Koeaumoissa käytettiin käsiteltävänä maa-aineksena keskiraskailla ja raskailla öljyhiilivedyillä pilaantunutta maa-ainesta. Käsiteltävä maa-aines oli pääasiassa hienoa moreenimaata, jossa esiintyi myös jonkin verran savimaata ja orgaanista maa-ainesta. Maa-aineksen poistamisen yhteydessä sen öljyhiilivetyypitoisuudeksi oli kenttätestein määritetty 5 000- 10 000 mg/kg. Mustankorkealla pilaantunut maa-aines oli kasattu n. 4 m korkeaan, 10 m leveään ja 40 m pitkään tilapäisaumaan odottamaan jatkokäsittelyä.

Toukokuun 8. päivä tutkimushanketta varten tilapäisaumasta suoritettiin esinäytteenotto. Esinäytteenotto käsitti viisi kappaletta kokoomanäytteitä eri puolilta aumaa, joista määritettiin tarkemmat öljyhiilivetyypitoisuudet laboratoriossa. Taulukossa 4 on esitetty yhteenveto viiden kokoomanäytteen öljyhiilivetyypitoisuuksien tuloksista.

Taulukko 4: Esinäytteenoton mukaiset öljyhiilivetyypitoisuudet tilapäisaumassa. Esitetyt öljyhiilivetyypitoisuudet edustavat viiden osanäytteen tuloksia.

Arvo	Öljyhiilivetyypitoisuus (mg/kg)
Minimi	2 900
Maksimi	15 000
Keskiarvo	10 500

Ennen koeaumojen rakentamista, osaan käsiteltävää maa-ainesta sekoitettiin laituskäsittelystä jälkikypsytyksentälle 9.5.2008 läjitettyä seulomatonta puhdistamolietekompostia. Käsiteltävä maa-aines sekä lietekomposti sekoitettiin keskenään kompostointikentällä koneellisesti käyttäen apuna kauhakuormaajaa. Käsiteltävän maa-aineksen ja lietekompostin seossuhteeksi valittiin 2:1. Tutkimuksessa käsiteltävän maa-aineksen sekä lietekompostin seosta käytettiin koeaumoissa 1-3. Koeauma 0, ns. vertailuauma, sisälsi ainoastaan käsiteltävää maa-ainesta.

Koeaumoihin 1-3 lisätty lietekomposti sisälsi runsaasti orgaanista hiiltä (33,6 massa - % kuiva -ainetta) sekä todennäköisesti mikrobipopulaation, minkä arvioitiin nopeuttavan myös öljyhiilivetyjen hajotustoiminnan käynnistymistä aumoissa. Toisaalta lietekompostin tehtävänä oli lisätä aumojen ilmavuutta sekä kosteuspitoisuutta ja näin osaltaan parantaa aumojen hajotusolosuhteita.

Esikompostoitua lietekompostia levitettiin lisäksi koeaumojen 1-3 päälle 0,5 m paksuksi kerrokseksi. Päälimmäisen lietekompostikerroksen tehtävänä oli toimia lämpöeristeenä sekä toisaalta sitoa pilaantuneesta maa-aineksesta mahdollisesti haihtuvia kaasumaisia yhdisteitä (VOC). Yksityiskohtaisemmat analyysitiedot käytetyn puhdistamolietekompostin koostumuksesta on esitetty liitteessä 7.

Koeaumat rakennettiin kesäkuun 3.-4. päivä, jonka yhteydessä suoritettiin myös aumakohtainen näytteenotto sekä lämpötilanmittaus tarkempien lähtöarvojen ja -pitoisuuksien määrittämiseksi.

4.4. Koeaumat

Tätä tutkimustyötä varten rakennettiin Mustankorkean jäteasemalle neljä koeaumaa (koeaumat 0-3), jotka olivat noin 8 m leveitä, 10 m pitkiä sekä 3,5 m korkeita. Jokaisen koeauman pohjalle asennettiin noin 0,5 m paksu rakennuspuuhakekerros ($d = 25\text{--}30$ mm) valumavesien sekä tarvittavan ilmakierron varalle. Jokaiseen koeaumaan läjitettiin hakekerroksen päälle noin 2,5 m kerros pilaantunutta maa-ainesta (n. 200 m^3 /auma). Pilaantuneen maa-aineksen seossuhteet sekä aumojen pintakerroksien rakenteet vaihtelivat aumoittain. Koeaumojen rakenteita havainnollistavat tyypikuvat on esitetty liitteissä 3-6.

4.4.1. Vertailuauma, koeauma 0

Koeauma 0 (kuva 7) toimi tutkimuksessa vertailuaumana. Sen rakenne oli koeaumoista yksinkertaisin (taulukko 5). Käsiteltävään pilaantuneeseen maa-ainekseen ei auman rakentamisen yhteydessä sekoitettu erillisiä tuliaineita. Käsiteltävää maa-ainesta ei myöskään peitetty puhdistamolietekompostikerroksella, päinvastoin kuin toimittiin muiden tutkimuksessa käytettyjen koeaumojen osalta. Vertailuauman rakennepoikkileikkaus on esitetty liitekuvassa 3.



Kuva 7: Vertailuauma (koeauma 0 edessä) ja lämpöeristetty auma (koeauma 2 taustalla) valmiiksi rakennettuina.

Taulukko 5: Vertailuauman (koeauma 0) rakennekerrokset alimmasta päällimmäiseen.

Rakennekerros	Kerrospaksuus (m)
Rakennuspuuhake, karkea (d = 25 -30 mm)	0,5
Käsiteltävä maa-aines	2,5

Taulukossa 6 on esitetty vertailuauman (koeauma 0) lähtöarvot ja -pitoisuudet, jotka määritettiin auman rakentamisen yhteydessä 4.6.2008.

Taulukko 6: Vertailuauman lähtölämpötilat sekä -pitoisuudet, jossa 1) neljän mittauspisteen lämpötilojen keskiarvo (mitattu manuaalisella aumalämpömittarilla), 2) kahden kokoomanäytteen keskiarvo (kenttämäärittäminen) ja 3) kahden kokoomanäytteen keskiarvo (laboratorioanalyysi).

Kenttämäärittäykset	
Lämpötila °C, ilma	21,5
Lämpötila °C, massa ¹⁾	17,5
Öljyhiilivedyt, mg/kg (PetroFLAG) ²⁾	3 350
Laboratorioanalyysit	
Öljyhiilivedyt, mg/kg (TPH GC) ³⁾	1 850
Kuiva-ainepitoisuus, % (ISO 11465 CMA) ³⁾	84,2
pH (ISO 10390) ³⁾	7,6
TOC, % ka (laskennallinen) ³⁾	2,2

4.4.2. Painovoimaisesti ilmastettu auma, koeauma 1

Koeaumassa 1 tutkittiin painovoimaisen ilmastuksen vaikutusta öljyhiilivetyjen hajoamisnopeuteen. Ilmastuksen avulla pyrittiin luomaan auman sisäosiin mikrobiologiselle hajotustoiminnalle otolliset happiolosuhteet. Painovoimaisesti ilmastetun auman (kuva 8) rakennekerrokseen asennettiin auman rakentamisen yhteydessä halkaisijaltaan 110 mm:n salaojaputket ilmakierron parantamiseksi. Kolme salaojaputkea asennettiin noin 2 m:n välein rinnakkain siten, että ensimmäinen putkirivistö sijoitettiin 0,5 m paksuisen rakennuspuuhakekerroksen päälle. Hakekerroksen sekä salaojaputkien päälle kasattiin tämän jälkeen 1,5 m kerros käsiteltävää maa-ainesta. Seuraavassa työvaiheessa salaojaputket käännettiin katkomatta käsiteltävän maa-aineskerroksen päälle. Ylemmän salaojaputkikerroksen päälle läjitettiin vielä metrin kerros käsiteltävää maa-ainesta sekä 0,5 m kerros seulomatonta puhdistamolietekompostia. Ylimmistä salaojaputkista nostettiin umpiputkea (110 mm:n PVC- putki) käyttäen havaintoputket auman pintakerroksen yläpuolelle. Auman päästä ulostulevat salaojaputkien päät tasattiin ja jätettiin avoimiksi auman ulkopuolelle painovoimaisen ilmakierron mahdollistamiseksi. Taulukoissa 7 ja 8 on esitetty yhteenveto painovoimaisesti ilmastetun auman rakennekerroksista sekä 4.6.2008 määrittetyistä lähtöarvoista ja -pitoisuuksista. Koeauman rakennepoikkileikkaus on esitetty liitekuvassa 4.



Kuva 8: Painovoimaisesti ilmastettuun aumaan asennettiin ilmakiertoa parantavat salaojaputket (3 kpl) kahteen kerrokseen. Ylemmistä putkista nostettiin havaintoputket auman pintakerroksen yläpuolelle näytteenottoa varten.

Taulukko 7: Painovoimaisesti ilmastetun auman (koeauma 1) rakennekerrokset alimmasta päällimmäiseen.

Rakennekerros	Kerrospaksuus (m)
Rakennuspuuhake, karkea (d = 25 -30 mm)	0,5
Salaojaputket (d = 110 mm, 3 kpl rinnan)	-
Pilaantunut maa-aines-/lietekompostiseos (2:1)	1,5
Salaojaputket (d = 110 mm, 3 kpl rinnan)	-
Pilaantunut maa-aines-/lietekompostiseos (2:1)	1,0
Lietekompostikerros (seulomaton)	0,5

Taulukko 8: Painovoimaisesti ilmastetun auman lähtölämpötilat sekä -pitoisuudet, jossa 1) neljän mittauspisteen lämpötilojen keskiarvo (mitattu manuaalisella aumalämpömittarilla), 2) kahden kokoomänäytteen keskiarvo (menetelmä) ja 3) kahden kokoomänäytteen keskiarvo (analyysimenetelmä).

Kenttämääritykset	
Lämpötila °C, ilma	18,0
Lämpötila °C, massa ¹⁾	15,9
Öljyhiilivedyt, mg/kg (PetroFlag) ²⁾	4 051
Laboratorioanalyysit	
Öljyhiilivedyt, mg/kg (TPH GC) ³⁾	2 650
Kuiva-ainepitoisuus, % (ISO 11465 CMA) ³⁾	81,6
pH (ISO 10390) ³⁾	6,8
TOC, % ka (laskennallinen) ³⁾	3,4

4.4.3. Lämpöeristetty auma, koeauma 2

Koeaumassa 2 (kuva 9) pilaantunut maa-aines eristettiin koko auman laajuudelta routaeristematolla (polyeteeni, 2 x 50 x 0,1 m, Meltex Oy). Eristämällä auma ulkoapäin, pyrittiin auman lämpötilaolosuhteet pitämään mikrobiologisen hajotustoiminnan kannalta termofiilisellä (40–70 °C) lämpötila-alueella mahdollisimman pitkään. Lämpöeristeen tarkoitus oli pidättää hajotustoiminnassa syntyvä lämpöenergia auman sisällä sekä osaltaan myös estää auman ulkopuolelta tulevan viileämmän ilman pääsy auman sisäosiin. Lämmöneristyksen tehostamiseksi routaeristeen päälle läjitettiin lisäksi 0,5 m kerros seulomatonta puhdistamolietekompostia (kuva 9, taulukko 9). Lämpöeristetyn auman rakennepoikkileikkaus on esitetty liitekuvassa 5.



Kuva 9: Lämpöeristetyssä aumassa pilaantunut maa-aines eristettiin routamatolla sekä seulomattomalla puhdistamolietekompostilla.

Taulukko 9: Lämpöeristetyn auman (koeauma 2) rakennekerrokset alimmasta päällimmäiseen.

Rakennekerros	Kerrospaksuus (m)
Rakennuspuuhake, karkea (d = 25 -30 mm)	0,5
Pilaantunut maa-aines-/lietekompostiseos (2:1)	2,5
Routaeristematto (Meltex Oy)	0,1
Lietekompostikerros (seulomaton)	0,5

Lämpöeristetyn auman (koeauma 2) lähtöarvojen määrittämisen tulokset on esitetty taulukossa 10. Näytteidenotto ja mittaukset suoritettiin 3.6.2008.

Taulukko 10: Lämpöeristetyin auman lähtölämpötilat sekä -pitoisuudet, jossa 1) neljän mittauspisteen lämpötilojen keskiarvo (mitattu manuaalisella aumalämpömittarilla), 2) kahden kokoomanäytteen keskiarvo (menetelmä) ja 3) kahden kokoomanäytteen keskiarvo (analyysimenetelmä).

Kenttämääritykset	
Lämpötila °C, ilma	14,7
Lämpötila °C, massa ¹⁾	16,1
Öljyhiilivedyt, mg/kg (PetroFLAG) ²⁾	4 708
Laboratorioanalyysit	
Öljyhiilivedyt, mg/kg (TPH GC) ³⁾	3 450
Kuiva-ainepitoisuus, % (ISO 11465 CMA) ³⁾	82,8
pH (ISO 10390) ³⁾	6,7
TOC, % ka (laskennallinen) ³⁾	2,8

4.4.4. Ilmastettu sekä lämpöeristetty auma, koeauma 3

Koeaumassa 3 pyrittiin tuomaan esiin sekä tehostettu ilmastuksen että parannetun lämmöneristysten avulla saavutettavat edut. Aumaan asennettiin rakentamisen yhteydessä salaojaputket kahteen eri kerrokseen painovoimaisesti ilmastetun auman (koeauma 1) tavoin. Alempi putkirivistö asennettiin 0,5 m:n paksuiseen rakennuspuuhakekerrokseen, jonka jälkeen putket käännettiin hakekerrokselle kasatun maa-aineskerroksen päälle. Ylemmän salaojaputkirivistön päälle läjitettiin vielä metrin kerros käsiteltävää maa-ainesta, jonka peitettiin kauttaaltaan routaeristematolla (kuva 10). Lopuksi auma peitettiin 0,5 m:n paksuisella puhdistamolietekompostikerroksella.



Kuva 10: Ilmastettussa sekä lämpöeristetyssä aumassa pilaantunut maa-aines eristettiin routamatolla ja ilmakiertoa parannettiin salaojaputkituksen sekä imupumpun avulla.

Ylemmän salaojaputkikerroksen ulostulevat putkien päät lyhennettiin ja jätettiin avoimiksi auman ulkopuolelle. Alemman salaojaputkikerroksen kolme putkea yhdistettiin auman sisällä ja johdettiin ulos yhtenä umpiputkena. Umpiputki liitettiin käsittelykentällä sijaitsevaan aktiivihiehellä täytettyyn kontin imupumppuun. Kun imupumppua ei pidetty käynnissä, vallitsi aumassa (koeauma 3) vertailuauman tapaan painovoimainen ilmanvaihto. Imupumpun avulla auman ilmakiertoa voitiin kuitenkin huomattavasti tehostaa aktiivisimman hajotustoiminnan vallitessa. Imupumppua käytettiin 25.7.–8.10.2008 välisenä ajanjaksona. Tutkimuksen aikana poistoilman laatua voitiin tarkkailla imuputkessa sekä aktiivihiekkontissa sijaitsevien näytteenottoyhteiden kautta.

Ilmastetussa sekä lämpöeristetyssä aumassa käsiteltävään maa-ainekseen oli sekoitettu seulomatonta puhdistamolietekompostia suhteessa 2:1. Alla olevassa taulukossa 11 on esitetty auman rakennekerrokset alimmasta päällimmäiseen. Koeauman rakennepoikkileikkaus on esitetty liitekuvassa 6.

Taulukko 11: Ilmastetun sekä lämpöeristetyin auman (koeauma 3) rakennekerrokset.

Rakennekerros	Kerrospaksuus (m)
Rakennuspuuhake, karkea (d = 25 -30 mm)	0,5
Salaojaputket (d = 110 mm, 3 kpl rinnan)	-
Pilaantunut maa-aines-/lietekompostiseos (2:1)	1,5
Salaojaputket (d = 110 mm, 3 kpl rinnan)	-
Pilaantunut maa-aines-/lietekompostiseos (2:1)	1,0
Routaeristematto (Meltex Oy)	0,1
Lietekompostikerros (seulomaton)	0,5

Ilmastetun sekä lämpöeristetyin (koeauman 3) lähtöarvot on esitetty taulukossa 12. Näytteenotto sekä kenttämittaukset suoritettiin 3.6.2008.

Taulukko 12: Ilmastetun sekä lämpöeristetyin auman lähtölämpötilat sekä -pitoisuudet, jossa 1) neljän mittauspisteen lämpötilojen keskiarvo (mitattu manuaalisella aumalämpömittarilla), 2) kahden kokoomanäytteen keskiarvo (menetelmä) ja 3) kahden kokoomanäytteen keskiarvo (analyysimenetelmä).

Kenttämittaukset	
Lämpötila °C, ilma	14,9
Lämpötila °C, massa ¹⁾	7,4
Öljyhiilivedyt, mg/kg (PetroFLAG) ²⁾	3 869
Laboratoriomääritykset	
Öljyhiilivedyt, mg/kg (TPH GC) ³⁾	5 750
Kuiva-ainepitoisuus, % (ISO 11465 CMA) ³⁾	75,6
pH (ISO 10390) ³⁾	6,8
TOC, % ka (laskennallinen) ³⁾	5,6

4.5. Kenttäanalyysit

4.5.1. Näytteenotto ja öljyhiilivetyanalyysit PetroFLAG™- kenttätestauslaitteistolla

Koeaumojen öljyhiilivetypitoisuuksia seurattiin tarkkailujakson aikana sekä kenttätestein että laboratorioanalyysin. Kenttätesteihin käytettiin Dexilin PetroFLAG™-kenttätestausmenetelmää, jonka avulla kiinteiden maanäytteiden kokonaisöljyhiilivetypitoisuudet määritettiin yksinkertaisilla reagensseilla. Kenttätestejä tehtiin 4.6.–1.8.2008 välisenä aikana.

Öljyhiilivetynäytteet otettiin aumoista näytekairalla aikavälillä 12.6.–8.10.2008 ja vastaavasti aumojen poikkileikkauksista puutarhalapiolla aikavälillä 10.11.2008–16.1.2009. Näytekairalla suoritettua näytteenotossa jokaisesta koeaumasta otettiin 6-10 pistenäytettä eripuolilta aumaa noin 1,5–2,0 m syvyydestä auman pinnalta. Aumojen pistenäytteet sekoitettiin tämän jälkeen huolellisesti 10 litran muovisangossa yhdeksi kokoomanäytteeksi, jonka jälkeen maamassa siivilöitiin 5,7 mm näytesiivilän lävitse. Siivilöidystä kokoomanäytteestä otettiin kaksi rinnakkaisnäytettä, jotka pakattiin tiiviisiin näytepusseihin. Kenttätestit suoritettiin Mustankorkea Oy:n koehallissa, jonka jälkeen rinnakkaisnäytteet lähetettiin kylmälaukkuun pakattuina tutkittavaksi laboratorioon (Eurofins Scientific Finland Oy, Tampere, Suomi).

4.5.2. Lämpötilaseuranta

Kompostiaumojen sisälämpötiloja seurattiin manuaalisin lämpötilamittauksin tarkastuskäyntien yhteydessä 3.6.2008–16.1.2009 välisenä aikana. Mittaukset suoritettiin elektronisella aumalämpömittarilla (Temppi -aumalämpömittari, Kasvutaito Oy, Rauma, Suomi). Lämpötilat mitattiin pitkittäissuunnassa aumojen laelta molemmista päädyistä sekä aumojen vastakkaisilta reunoilta noin 1,0–1,5 m syvyydestä auman pintakerroksesta. Manuaaliset mittaukset pyrittiin suorittamaan aina mahdollisimman läheltä kiinteitä lämpötila-antureita, jotta manuaalisten ja reaaliaikaisten lämpötilamittausten keskinäinen vertailu olisi luotettavaa. Reaaliaikaisten lämpötila-antureiden sijainnit aumoittain on esitetty liitteenä 2 olevassa asemapiirustuksessa.

4.5.3. Reaaliaikaiset lämpötila-anturit

Koeaumojen lämpötiloja seurattiin manuaalisten lämpötilamittausten lisäksi reaaliaikaisten lämpötila-antureiden (APL Systems, Kuopio, Suomi) avulla. Kaikkiin koeaumoihin asennettiin reaaliajassa aumojen lämpötiloja seuraavia antureita (3-4 kpl/auma). Lämpötila-anturit mittasivat ja lähettivät aumojen lämpötilatietoja puolen tunnin välein Mustankorkean toimistotiloissa sijaitsevalle seurantapääteelle. Tietokoneelta käsin aumoissa tapahtuvia lämpötilojen muutoksia voitiin tarkastella graafisten esitysten ja Excel -taulukoiden muodossa.

Lämpötila-anturit koostuvat lähetinosasta, eli dataloggerista sekä 2 metriä pitkstä asetinputkesta, jonka päässä lämpötilasensorit sijaitsivat (kuva 11). Antureiden asennussyvyys auman pinnasta pyrittiin valitsemaan niin, että ne edustaisivat kattavasti pilaantuneen maamassan lämpötiloja auman eri osissa. Antureiden asennussyvyys vaihteli noin 1,3–1,8 m välillä riippuen mm. käsiteltävän massan läpäisevyydestä ja kivisyydestä.



Kuva 11: Lämpötila-anturi (APL Systems)

Koeaumoihin 0-2 asennettiin neljä lämpötila-anturia aumaa kohden, siten että kaksi anturia sijaitsi aumojen huipuilla ja yksi anturi aumojen molemmilla reunoilla. Ilmastettuun sekä lämpöeristettyyn aumaan (koeauma 3) antureita asennettiin kolme kappaletta, kaksi auman huipulle ja yksi auman oikealle reunalle.

4.5.4. Kaasumaisten yhdisteiden kenttäanalyysit

Aumojen huokoskaasun hiilidioksidi-, happi- ja metaanipitoisuutta seurattiin 25.7.–8.12.2008 välisenä ajanjaksona Dräger -monikaasuanalysointilaitteen (Dräger X-am 7000, Drägerwerk AG Lubeck, Saksa) avulla. Mittaukset suoritettiin käyttäen apuna halkaisijaltaan 30 mm:stä ja 1,7 m pitkää metallista näyteputkea, jonka päähän porattiin 0,5 m matkalle kaasureikiä. Näyteputki yhdistettiin muoviletkulla analysointilaitteeseen, jolloin aumojen kaasupitoisuuksia voitiin mitata suoraan käsiteltävästä massakerroksesta, noin 1,5 m syvyydestä auman pinnasta (kuva 12). Koeaumakohtainen kaasukartoitus käsitti kerralla 2-4 kaasumittauskohtaa per auma, auman laelta sekä pitkittäissuuntaisilta kyljiltä. Kaasua kerättiin analysointilaitteelle noin kymmenen minuutin ajan näytepistettä kohden, jonka jälkeen mittaus tulokset kirjattiin muistiin analysointilaitteen näytöltä.



Kuva 12: Kaasumaisten yhdisteiden mittaus Dräger- monikaasuanalysointilaitteella.

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) tarkkailu suoritettiin PID-kenttäanalysaattorilla (GasAlertMicro 5, BW Technologies, Banbury, Iso-Britannia). Laaja aumakohtainen VOC -kartoitus suoritettiin heinäkuun 7. päivä aumojen pinnoilta sekä koeaumojen 1 (painovoimainen ilmastus) ja 3 (tehostettu ilmastus ja lämpöeristys) osalta myös havainto- ja kiertoilmaputkista. Apuna VOC -määrittämisessä käytettiin imumotorista keräyshuuvaa, joka asennettiin kartoitettavan auman pinnalle (kuva 13).

Kaikille koeaumoille suoritettiin lisäksi ns. vuotokaasuanalyysi, jossa aumoista pyrittiin määrittämään vuotokohtia sekä kartoittamaan mahdollista savupiippuilmiötä mittaamalla aumojen pintakerrokset systemaattisesti PID -analysaattorilla. Heinäkuusta lähtien laboratoriomäärittelyyn lähtevien maanäytteiden VOC -pitoisuuksia mitattiin satunnaisesti, PID- analysaattorin saatavuudesta riippuen, näytteiden siivilöimisen jälkeen suoraan näytenäytteistä kymmenen minuutin keräysajalla.



Kuva 13: VOC- pitoisuuden määrittäminen PID- analysaattorin sekä keräyshuuvun avulla.

4.6. Laboratorioanalyysit

4.6.1. Öljyhiilivetyanalyysit

Tarkkojen öljyhiilivetypitoisuuksien määrittämiseksi aumanäytteet tutkittiin sertifioidussa maalaboratoriossa (Eurofins Scientific Finland Oy, Tampere, Suomi). Laboratorio-olosuhteissa keskiraskaat ja raskaat (C₁₀-C₄₀) öljyhiilivedyt määritettiin kromatografisesti (GD-FID) 174 °C - 525 °C kiehumispistevälillä menetelmää ISO/DIS 16703 mukailleen. Menetelmällä voidaan analysoida maanäytteistä pentaaniin uuttuvat öljyhiilivedyt, jotka eivät poistu puhdistettaessa neutraalilla alumiinidioksidilla ja joiden kiehumispiste on edellä esitetyissä lämpötilarajoissa. Öljyhiilivedyt mitattiin puhdistetusta pentaanista kaasukromatografia hyväksikäyttäen. Kromatografisen määrittämisen tuloksena saadaan näytteiden öljyhiilivetytitoisuudet määritettyä kahden hiilivetyfraktion (C₁₀-C₂₁ sekä C₂₁-C₄₀) avulla, joiden yhteispitoisuudesta saadaan näytteiden kokonaishiilivetytitoisuus (C₄₀) eli summafraktio. Summafraktion mittausepävarmuus (taulukko 13) kromatografisessa määrittämisessä vaihtelee 32–40 % välillä määritettävästä haitta-ainepitoisuudesta riippuen (Eurofins Scientific Finland Oy 2008).

Taulukko 13: ISO/DIS 16703 mukaisen kromatografisen analyysimenetelmän mukaiset määrittämissrajat sekä mittausepävarmuus eri öljyhiilivetyfraktioille (Eurofins Scientific Finland Oy 2008).

Fraktio	Määrittämissraja, mg/kg ka	Mittausalue, mg/kg ka	Mittausepävarmuus, % 55–1000 mg/kg ka	Mittausepävarmuus, % >1000 mg/kg ka
>C ₁₀ -C ₂₁	10			
>C ₂₁ -C ₄₀	45			
>C ₁₀ -C ₄₀	55	55–10 000	40	32

4.6.2. Kuiva-ainepitoisuus, pH sekä orgaaninen hiili (TOC)

Maanäytteiden pH-arvot määritettiin standardin ISO 10390 ”*Soil quality – determination of pH*” mukaisesti. Maanäytteiden pH-arvot mitattiin käyttäen manuaalista potentiometrasta yhdistelmälasielektrodia, johon oli kiinnitetty lämpötila-anturi. Ennen pH:n mittaamista maanäyte uutettiin veteen suhteessa 1:5 ja annettiin seistä yhden vuorokauden ajan (Eurofins Scientific Finland Oy 2009).

Laboratoriossa suoritettavan kokonaishiilivety määrityksen yhteydessä määritettiin aina myös näytteiden kuiva-ainepitoisuudet. Kunkin maanäytteen kuiva-aineprosentti määritettiin kahdesta rinnakkaisnäytteestä. Ennen määrittämistä analyyseihin käytettävät upokkaat kuumennettiin lämpökaapissa 105 °C:ssa 30 minuutin ajan, jonka jälkeen ne jäähdytettiin eksikaattorissa huoneen lämpöön. Näytemääränä maanäytteille käytettiin $5,0 \pm 0,1$ g per näyte. Punnituksen jälkeen näytteet siirrettiin lämpökaappiin 105 °C:een kahden tunnin ajaksi. Lämpökäsittelyn jälkeen jäähdytetyt näytteet punnittiin uudelleen, jonka jälkeen saatujen punnitustulosten perusteella maanäytteille laskettiin näytekohtaiset kuiva-ainepitoisuudet (Eurofins Scientific Finland Oy 2009).

Maanäytteiden TOC- pitoisuudet määritettiin kuiva-ainemääritysten yhteydessä. Punnitut näytteet käsiteltiin 550 °C:ssa muhveliuunissa kahden tunnin ajan. Käsittelyn jälkeen jäähtyneet näytteet punnittiin, jonka jälkeen näytekohtaiset hehkutushäviöt sekä laskennallinen TOC- pitoisuus eli orgaanisen aineksen voitiin selvittää laskennallisesti (Eurofins Scientific Finland Oy 2009).

5. TULOKSET

5.1. Öljyhiilivedyt

Koeaumojen öljyhiilivetyypitoisuuksia (C₁₀-C₄₀) seurattiin kahdeksan kuukauden ajan öljyhiilivetyjen kompostoitumisen sekä biohajoamisen etenemisen määrittämiseksi. Aumojen öljyhiilivetyypitoisuuksia seurattiin aluksi kenttämääritysten (PetroFLAG™) sekä laboratorioanalyysien avulla. PetroFLAG™- kenttätesteistä päätettiin luopua 1.8.2008 tehtyjen määritysten jälkeen, sillä kenttätesteillä saadut määritystulokset poikkesivat merkittävästi vastaavista laboratoriotuloksista. Tähän oli syynä todennäköisesti tukiaineen mukana aumoihin tullut orgaaninen aines, joka häiritsi värinmäärittämiseen perustuvan kenttätestausmenetelmän analyysituloksia samentaan näytekolonin reagenssiliuoksen.

Kyseisen havainnon perusteella voidaan todeta, ettei PetroFLAG™-kenttätestausmenetelmä sovellu orgaanista ainesta sisältävien massojen öljyhiilivetyypitoisuuksien testaamiseen, vaan sitä voidaan pitää luotettavana testausmenetelmänä vain mineraalipitoisten massojen, kuten hiekka- ja soramaiden, haitta-ainepitoisuuksien analysoinnissa. Koska PetroFLAG™-analyysien perusteella saatuja tutkimustuloksia ei voida pitää edellä mainituista syistä kovinkaan luotettavina, ei tarkkailujakson alkuvaiheessa saatuja määritystuloksia ole esitetty tämän tutkimuksen yhteydessä tarkemmin. Jatkossa esitettävät öljyhiilivetyypitoisuuksia koskevat tulokset perustuvat laboratoriossa tehtyihin määrittäisiin.

Kesäkuussa 2008 määritetyt aumakohtaiset kokonaisöljyhiilivetyypitoisuudet vaihtelivat 1800–5700 mg/kg välillä. Kompostointikäsitellyn käynnistyessä kokonaisöljyhiilivetyjen osalta alin lähtöpitoisuus määritettiin vertailuaumasta (koeauma 0) ja korkein vastaavasti ilmastetusta sekä lämpöeristetyistä aumasta (koeauma 3). Heinäkuussa 2008 määritettyjen näytteiden osalta kokonaisöljyhiilivetyypitoisuudet olivat kaikissa aumoissa koeaumaa 3 lukuun ottamatta korkeampia, kuin kesäkuussa määritetyt lähtöpitoisuudet. Tammikuussa 2009 määritettyjen loppupitoisuuksien osalta kokonaisöljyhiilivetyypitoisuudet olivat kuitenkin vähentyneet kaikissa koeaumoissa, pitoisuuksien vaihdellessa välillä 600–1500 mg/kg. Korkein kokonaisöljyhiilivetyjen jäännöspitoisuus määritettiin ilmastetusta sekä lämpöeristetyistä aumasta (koeauma 3) ja alin vertailuaumasta (koeauma 0).

Määritettyihin lähtöpitoisuuksiin verrattuna prosentuaalisesti (%) suurimmat öljyhiilivetyreduktiot saavutettiin koeaumoissa 0 ja 3 (noin 60–70 %), kun vastaavasti massayksikköä (mg/kg) kohden suurin öljyhiilivetyreduktio saavutettiin koeaumassa 3 (noin 3400 mg/kg). Mikäli aumakohtaisia öljyhiilivetyjen lähtöpitoisuuksia verrataan koko tarkkailujakson aikana tehtyjen öljyhiilivety määritysten keskiarvoihin, ovat saavutetut öljyhiilivetyreduktiot hieman suurempia.

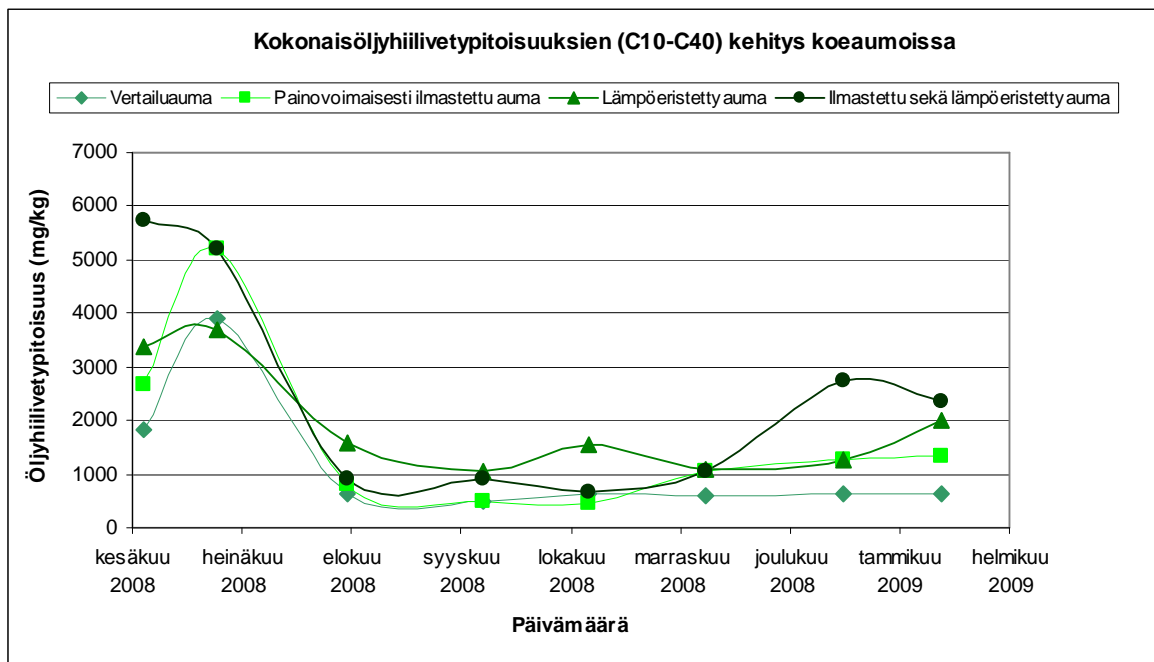
Vertailuamaa (koeauma 0) lukuun ottamatta, kaikki öljyhiilivety pitoisuudet määritettiin seosmassoista, joiden pilaantuneeseen maa-ainekseen oli lisätty auman rakentamisen yhteydessä tukiaineeksi puhdistamolietekompostia suhteessa 2:1. Aumakohtaisten öljyhiilivety pitoisuuksien kehittyminen on kuvassa 14. Vastaavasti tehtyjen aumakohtaisten öljyhiilivety määritysten tunnuslukuja fraktioittain tarkkailujakson ajalta on esitetty taulukossa 14.

Vertailuamasta määritetty kokonaisöljyhiilivetyjen lähtöpitoisuus oli kesäkuussa 2008 1840 mg/kg saavuttaen 650 mg/kg jäännöspitoisuuden tammikuussa 2009. Elokuun 2008 jälkeen auman öljyhiilivety pitoisuuksissa ei tapahtunut enää merkittäviä muutoksia.

Painovoimaisesti ilmastetussa aumassa (koeauma 1) kokonaisöljyhiilivetyjen lähtöpitoisuus oli 2685 mg/kg. Tarkkailujakson aikana alimmat öljyhiilivety pitoisuudet analysoitiin aumasta marraskuussa 2008 otetusta kokoomanäytteestä, kokonaisöljyhiilivety pitoisuuden ollessa tuolloin 465 mg/kg. Tammikuussa 2009 tehtyjen laboriomi määritysten mukaisesti painovoimaisesti ilmastetun auman (koeauma 1) kokonaisöljyhiilivetyjen jäännöspitoisuudeksi saatiin 1325 mg/kg.

Lämpöeristetyssä aumassa (koeaumassa 2) kokonaisöljyhiilivetyjen lähtöpitoisuus oli 3385 mg/kg. Tarkkailujakson aikana alimmat öljyhiilivety pitoisuudet analysoitiin aumasta syyskuussa 2008 otetusta kokoomanäytteestä, kokonaisöljyhiilivety pitoisuuden ollessa tuolloin 1060 mg/kg. Tammikuussa 2009 tehtyjen laboriomi määritysten mukaisesti lämpöeristetyn auman (koeauma 2) kokonaisöljyhiilivetyjen jäännöspitoisuudeksi saatiin 2000 mg/kg.

Ilmastetun sekä lämpöeristetyn auman (koeauman 3) öljyhiilivetytyypitoisuuksien kehitys tarkkailujakson ajalta on esitetty kuvassa 20. Kesäkuussa 2008 koeaumasta 3 määritetty kokonaisöljyhiilivetyjen lähtöpitoisuus oli 5725 mg/kg. Seurantajakson alimmat öljyhiilivetytyypitoisuudet analysoitiin aumasta lokakuussa 2008 otetusta kokoomanäytteestä, kokonaisöljyhiilivetytyypitoisuuden ollessa tuolloin 685 mg/kg. Merkittävin öljyhiilivetyjen vähenemä aumassa havaittiin heinä-elokuun 2008 aikana. Tammikuussa 2009 tehtyjen laboratorioanalyysien mukaisesti ilmastetun sekä lämpöeristetyn auman (koeauma 3) kokonaisöljyhiilivetyjen jäännöspitoisuudeksi määritettiin 2350 mg/kg.



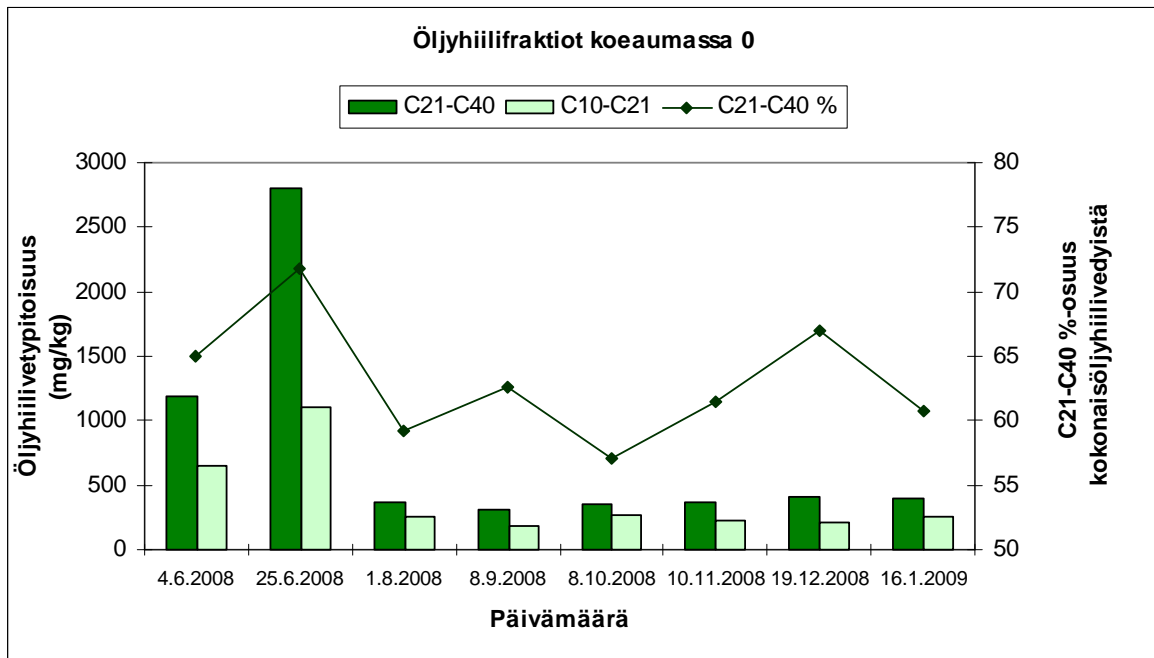
Kuva 14: Kokonaisöljyhiilivetytyypitoisuuksien (C₁₀-C₄₀) kehitys koeaumoissa tarkkailujakson 4.6.2008–16.1.2009 aikana. Esitetyt pitoisuudet ovat kahden kokoomanäytteen keskiarvoja lukuun ottamatta 16.1.2009 määritettyjä pitoisuuksia, jotka edustavat neljän kokoomanäytteen keskiarvoja.

Taulukosta 14 voidaan havaita, että öljyhiilivetyjen vähenemä vertailuauimassa (koeauma 0) on ollut lähes yhtä suuri sekä kevyillä (C_{10} - C_{21}) että raskaillakin (C_{21} - C_{40}) öljyhiilivedyillä. Tehostetuissa koeaumoissa puolestaan kevyemmät öljyhiilivetyfraktiot ovat hajonneet raskaampia öljyhiilivetyjä nopeammin. Taulukosta käy myös ilmi, että tehtyjen rinnakkaismääritysten hajonta seurantajakson aikana on ollut varsin suurta etenkin tehostetuissa koeaumoissa 1-3.

Taulukko 14: Aumakohtaisten öljyhiilivety määritysten tunnuslukuja esitettyinä fraktioittain (A-C), jossa A) kevyet öljyhiilivedyt C_{10} - C_{21} , B) raskaat öljyhiilivedyt C_{21} - C_{40} sekä C) kokonaisöljyhiilivedyt C_{10} - C_{40} .

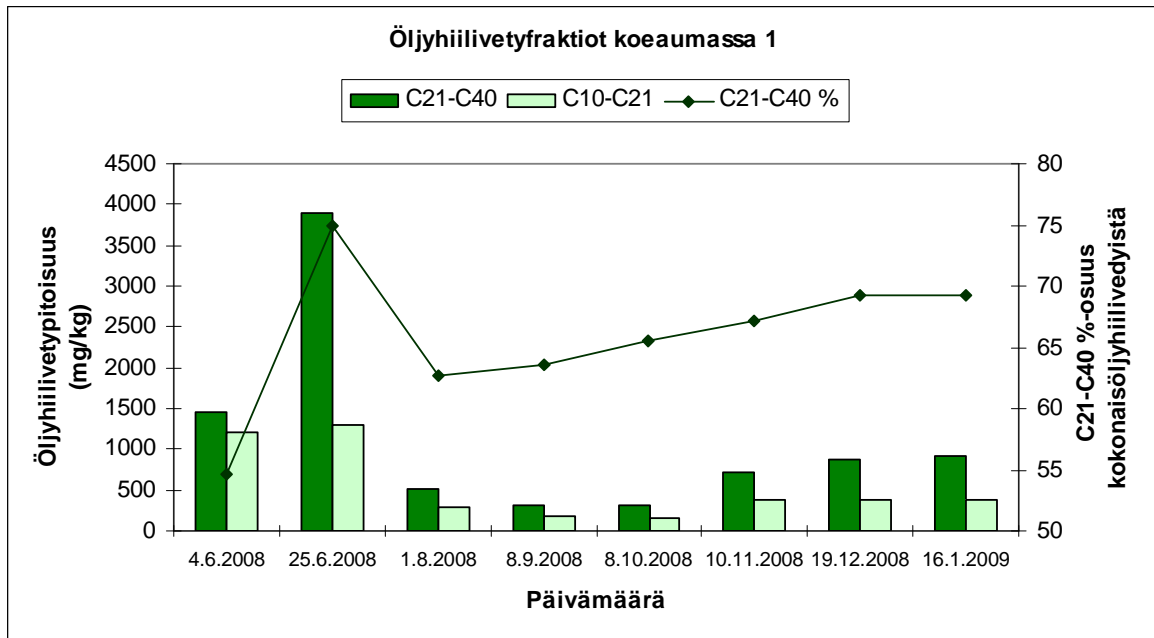
	4.6.2008	Öljyhiilivety määritykset 1.8.2008–16.1.2009 välisenä aikana (mg/kg)					
	Lähtöpitoisuus (mg/kg)	Maksimi	Minimi	Keskiarvo	Mediaani	Keskiahajonta	Loppupitoisuus
AUMA 0							
A	645	270	185	231	243	32	256
B	1195	415	310	365	370	36	395
C	1840	650	495	594	623	55	650
AUMA 1							
A	1220	383	155	294	335	105	383
B	1465	918	305	602	610	271	918
C	2685	1325	465	898	935	375	1325
AUMA 2							
A	2000	799	460	645	663	150	799
B	1385	1143	495	774	788	220	1143
C	3385	2000	1060	1423	1400	357	2000
AUMA 3							
A	1775	695	175	356	265	209	533
B	3950	2105	515	1102	768	680	1815
C	5725	2750	685	1447	988	872	2350

Kuvassa 15 on esitetty kevyiden (C_{10} - C_{21}) sekä raskaiden (C_{21} - C_{40}) öljyhiilivetyfraktioiden suhteellinen jakautuminen vertailuaumassa (koeauma 0) tarkkailujakson aikana. Raskaiden öljyhiilivetyjen prosentuaalinen osuus kokonaisöljyhiilivedyistä (C_{10} - C_{40}) on esitetty trendikäyrän avulla. Kuvan avulla on pyritty havainnollistamaan hitaammin hajoavien raskaiden öljyhiilivetyjakeiden rikastumista käsiteltävään kompostimassaan.



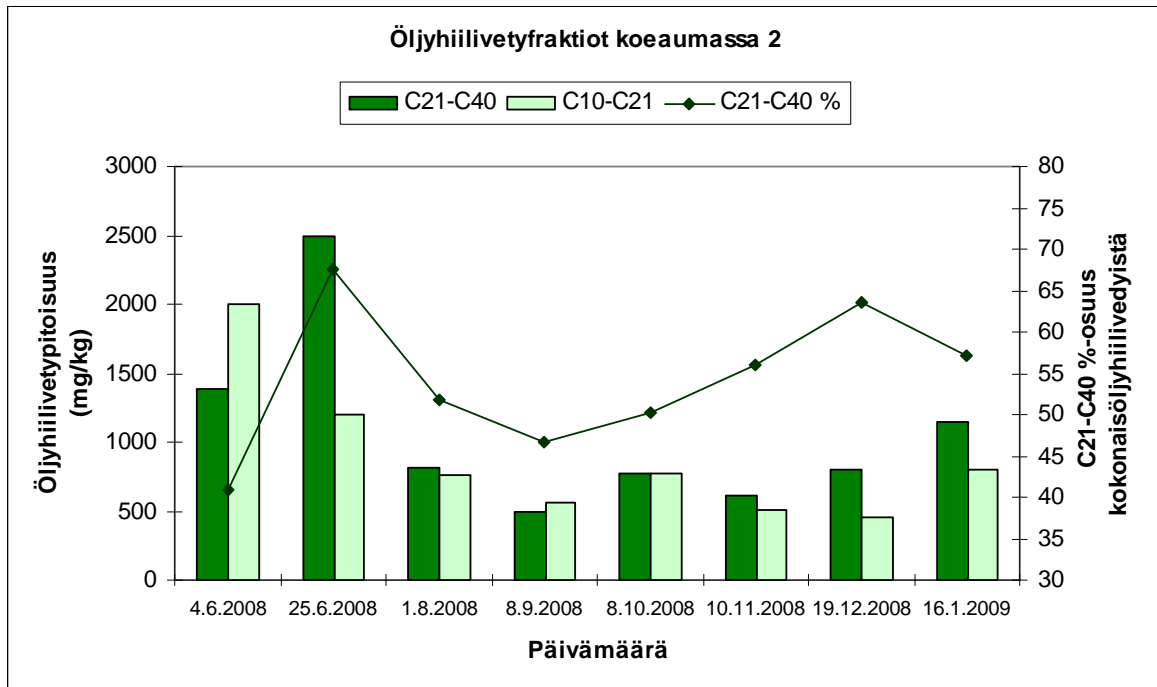
Kuva 15: Öljyhiilivetyfraktioiden C_{10} - C_{21} sekä C_{21} - C_{40} (pylväsdiagrammit) jakautuminen vertailuaumassa (koeauma 0) tarkkailujakson aikana. Trendikäyrä (viivadiagrammi) kuvaa raskaamman öljyhiilivetyfraktion (C_{21} - C_{40}) prosentuaalista osuutta analysoiduista kokonaisöljyhiilivedyistä (C_{10} - C_{40}), eli osoittaa hitaammin hajoavien öljyhiilivetyjen rikastumista kompostimassaan.

Kuvassa 16 on esitetty kahden öljyhiilivetyfraktion suhteellinen jakautuminen painovoimaisesti ilmastetussa aumassa (koeauma 1) tarkkailujakson aikana. Raskaamman öljyhiilivetyfraktion (C_{21} - C_{40}) suhteellinen osuus kokonaisöljyhiilivedyistä (C_{10} - C_{40}) kasvoi tarkkailujakson aikana 55 %:sta 70 %:iin.



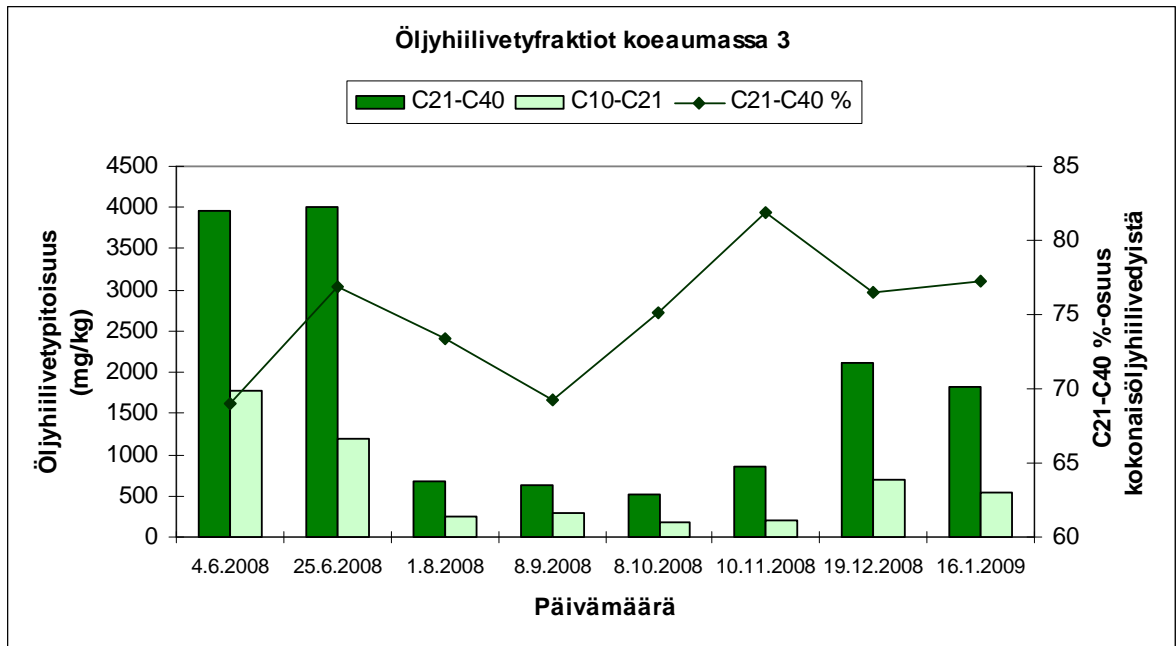
Kuva 16: Öljyhiilivetyfraktioiden C_{10} - C_{21} sekä C_{21} - C_{40} (pylväsdiagrammit) jakautuminen painovoimaisesti ilmastetussa aumassa (koeauma 1) tarkkailujakson aikana. Trendikäyrä (viivadiagrammi) kuvaa raskaamman öljyhiilivetyfraktion (C_{21} - C_{40}) prosentuaalista osuutta analysoiduista kokonaisöljyhiilivedyistä (C_{10} - C_{40}), eli osoittaa hitaammin hajoavien öljyhiilivetyjen rikastumista kompostimassaan.

Kuten edellä esitetystä taulukosta 14 (sivulta 64) sekä kuvasta 17 voidaan havaita, on raskaampien öljyhiilivetyjakeiden (C_{21} - C_{40}) loppupitoisuus lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 2) ollut kevyempiä öljyhiilivetyjakeita (C_{10} - C_{21}) suurempi. Tammikuussa 2009 analysoidussa kokoomanäytteessä on kevyempien öljyhiilivetyjakeiden jäännöspitoisuus kokonaisöljyhiilivedyistä (C_{10} - C_{40}) käsittänyt noin 45 % ja raskaampien öljyhiilivetyjen vastaavasti 55 %.



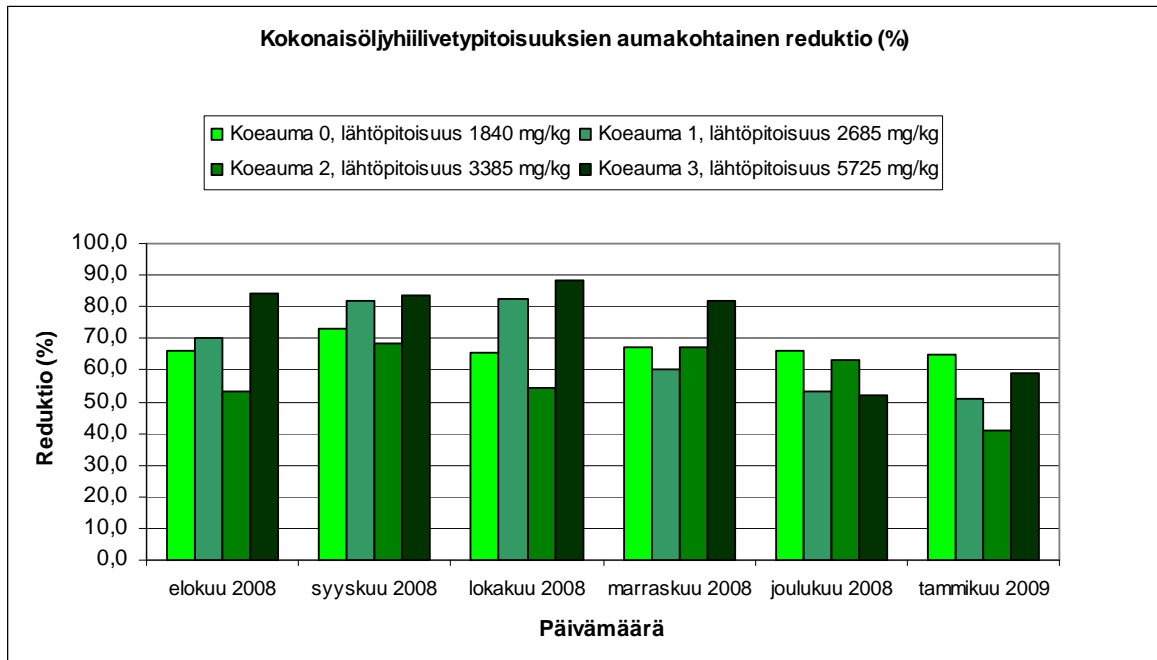
Kuva 17: Öljyhiilivetyfraktioiden C_{10} - C_{21} sekä C_{21} - C_{40} (pylväsdiagrammit) jakautuminen lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 2) tarkkailujakson aikana. Trendikäyrä (viivadiagrammi) kuvaa raskaamman öljyhiilivetyfraktion (C_{21} - C_{40}) prosentuaalista osuutta analysoiduista kokonaisöljyhiilivedyistä (C_{10} - C_{40}), eli osoittaa hitaammin hajoavien öljyhiilivetyjen rikastumista kompostimassaan.

Kuvassa 18 on esitetty kevyiden (C_{10} - C_{21}) ja raskaiden (C_{21} - C_{40}) öljyhiilivetyjakeiden jakautuminen ilmastetussa sekä lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 3) tarkkailujakson aikana. Raskaiden öljyhiilivetyjakeiden osuus kokonaisöljyhiilivedyistä (C_{10} - C_{40}) on ollut varsin merkittävä. Kesäkuussa 2008 raskaiden öljyhiilivetyjakeiden osuus oli noin 68 % ja seurannan päättyessä tammikuussa 2009 noin 77 % kokonaishiilivedyistä.

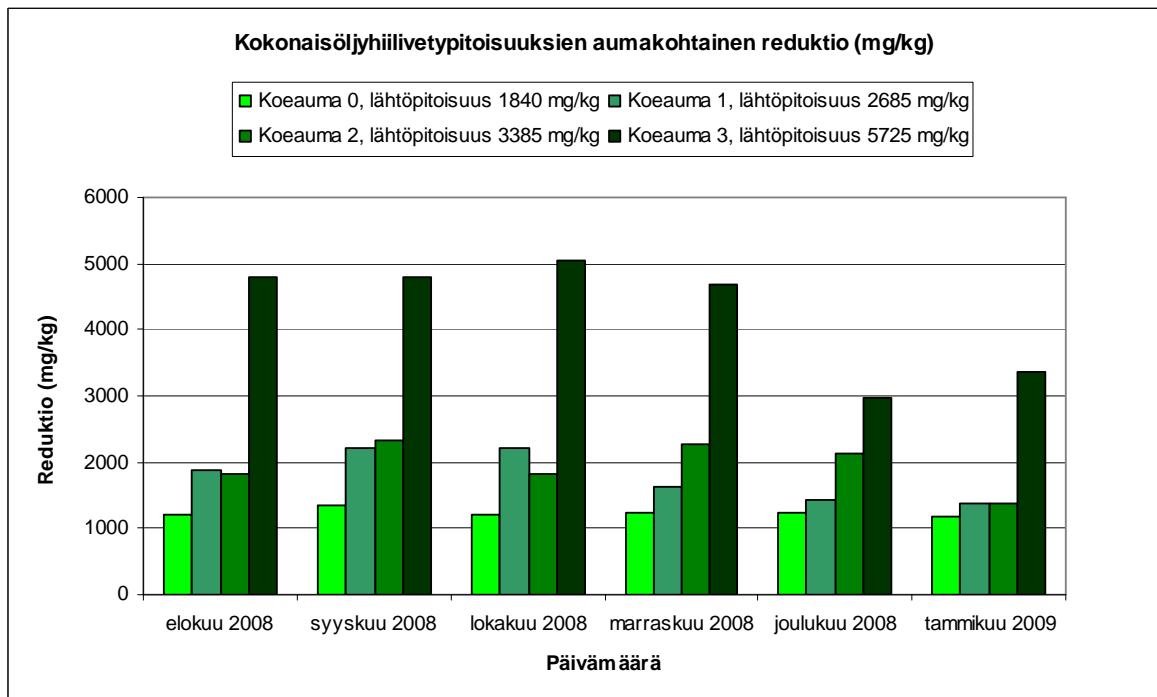


Kuva 18: Öljyhiilivetyfraktioiden C_{10} - C_{21} sekä C_{21} - C_{40} (pylväsdigrammit) jakautuminen ilmastetussa sekä lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 3) tarkkailujakson aikana. Trendikäyrä (viivadiagrammi) kuvaa raskaamman öljyhiilivetyfraktion (C_{21} - C_{40}) prosentuaalista osuutta analysoiduista kokonaisöljyhiilivedyistä (C_{10} - C_{40}), eli osoittaa hitaammin hajoavien öljyhiilivetyjen rikastumista kompostimassaan.

Kokonaisöljyhiilivetypitoisuudet (C_{10} - C_{40}) alenivat kaikissa koeaumoissa nopeasti kahden ensimmäisen käsittelykuukauden aikana. Kesä- ja heinäkuun 2008 aikana kokonaisöljyhiilivetypitoisuudet alenivat keskimäärin 50–80 % verrattuna aumakohtaisiin lähtöpitoisuuksiin (kuva 14 sivulla 63). Ajanjaksolla elokuusta 2008 tammikuuhun 2009 ei aumojen öljyhiilivetypitoisuuksissa tapahtunut enää havaittavia muutoksia. Lopulliset aumakohtaiset reduktiopitoisuudet tarkentuivat joulutammikuussa määritettyjen kokoomanäytteiden osalta 40–60 % tasolle (kuva 19). Aumakohtaiset öljyhiilivetypitoisuuksien vähenemät massayksikköä kohti on esitetty sekä kuvassa 20 että taulukossa 15.



Kuva 19: Kokonaisöljyhiilivetyypitoisuuksien (C_{10} - C_{40}) keskimääräinen prosentuaalinen (%) vähenemä koeaumoittain ajanjaksolla 1.8.2008-16.1.2009. Vähenemä (%) ilmoitettu analysoitujen kokoomanäytteiden keskiarvoista suhteessa 4.6.2008 määritettyihin aumakohtaisiin lähtöpitoisuuksiin.

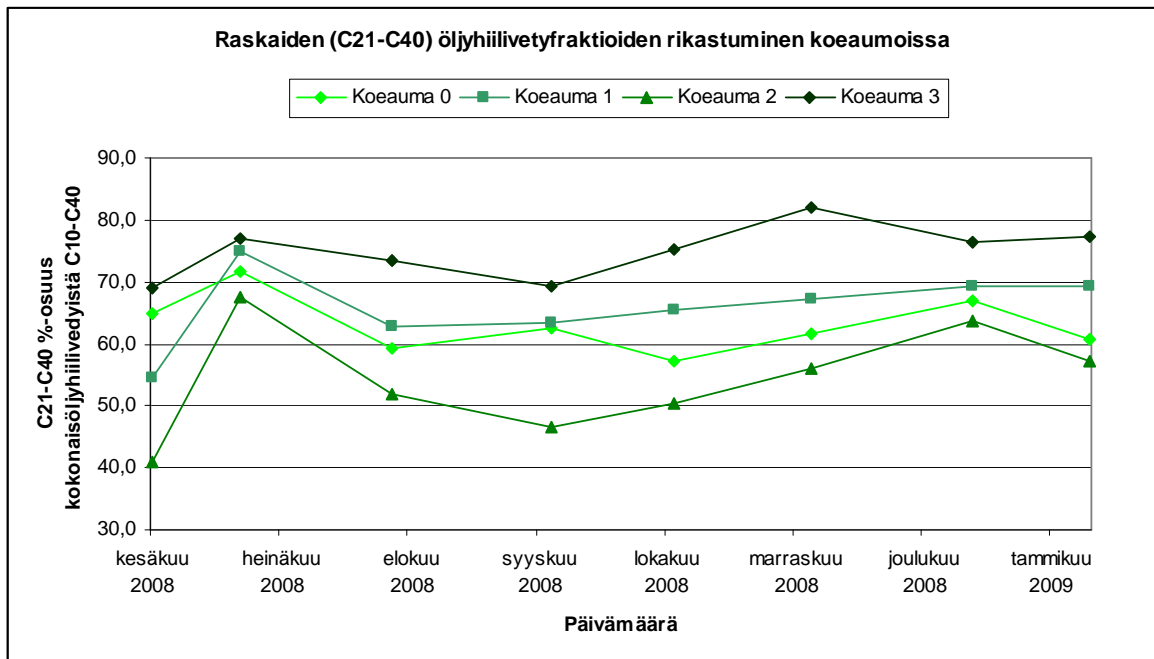


Kuva 20: Kokonaisöljyhiilivetyypitoisuuksien (C_{10} - C_{40}) vähenemä massayksikköä kohti (mg/kg) koeaumoittain ajanjaksolla 1.8.2008-16.1.2009. Vähenemä (mg/kg) ilmoitettu analysoitujen kokoomanäytteiden keskiarvoista suhteessa 4.6.2008 määritettyihin aumakohtaisiin lähtöpitoisuuksiin.

Taulukko 15: Koeaumojen kokonaisöljyhiilivetyreduktio (C_{10} - C_{40}) massayksikköä kohti. Reduktiopitoisuudet esitetty 1.8.2008-16.1.2009 tehtyjen laboratoriomääritysten keskiarvoista sekä keskihajonnat määritysten maksimi- ja minimipitoisuuksien keskiarvoista suhteessa loppupitoisuuden keskiarvoon.

Koeauma	Lähtöpitoisuus (mg/kg)	Öljyhiilivetyreduktio (mg/kg)	Loppupitoisuus (mg/kg)
Koeauma 0	1840	1240	600 ± 55
Koeauma 1	2685	1790	900 ± 375
Koeauma 2	3385	1960	1425 ± 360
Koeauma 3	5725	4280	1450 ± 870

Kuvassa 21 on esitetty raskaiden (C_{21} - C_{40}) öljyhiilivetyjakeiden prosenttiosuudet aumojen kokonaisöljyhiilivetyjakeiden pitoisuuksista (C_{10} - C_{40}). Hitaammin hajoavien raskaampien öljyhiilivetyjakeiden suhteellinen osuus aumojen kokonaisöljyhiilivedyistä kasvoi tehostetuissa aumoissa (koeaumot 1-3). Vertailuaumassa (koeauma 0) raskaampien öljyhiilivetyjakeiden rikastumista ei havaittu. Raskaampien öljyhiilivetyjakeiden rikastuminen oli merkittävä painovoimaisesti ilmastetussa (koeauma 1) sekä lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 2), joissa raskaampien öljyhiilivetyfraktioiden osuus kokonaisöljyhiilivedyistä kasvoi noin 25–45 % kompostointikäsitteilyn aikana.



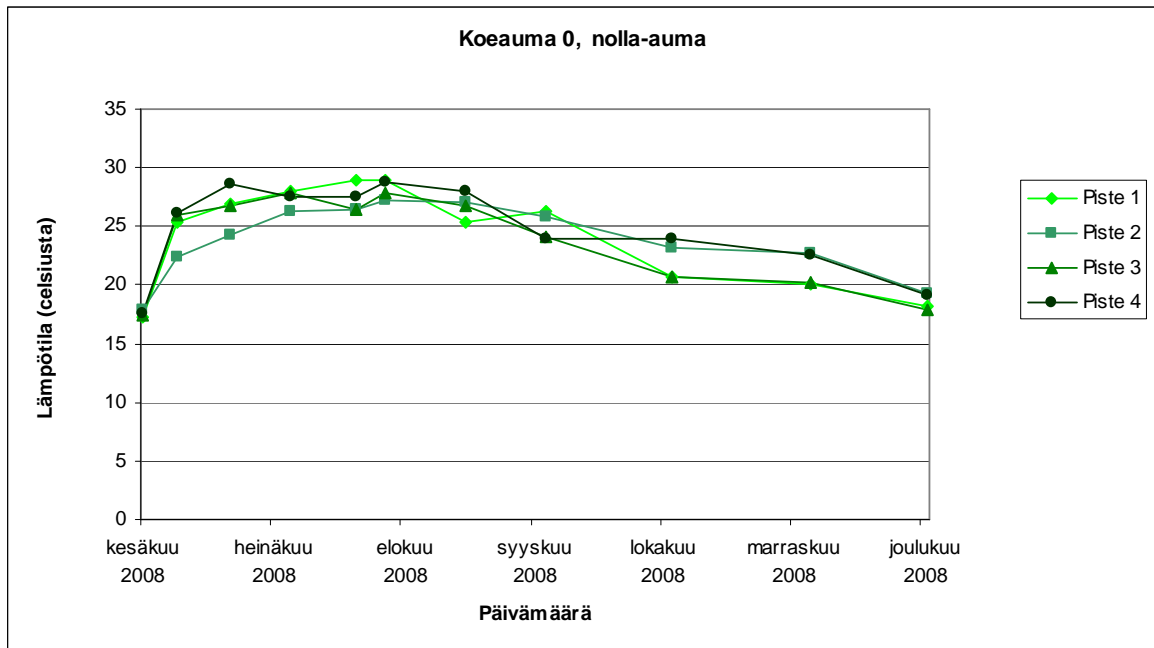
Kuva 21: Raskaiden (C_{21} - C_{40}) öljyhiilivetyfraktioiden prosentuaaliset osuudet kokonaisöljyhiilivedyistä (C_{10} - C_{40}) aumoittain.

5.2. Lämpötilat

Koeaumojen lämpötiloja seurattiin säännöllisesti tehtyjen manuaalisten mittausten sekä jatkuvatoimisten lämpötila-antureiden avulla. Aumojen lämpötiloja käytettiin höydyksi havainnoitaessa aumojen mikrobiologista hajotustoimintaa sekä aumojen yleisiä olosuhteita. Kuvissa 22–25 on esitetty manuaalisesti mitatut koeaumakohtaiset lämpötilatrendit 4.6.2008–16.1.2009 väliseltä tarkkailujaksolta. Reaaliaikaisten lämpötila-antureiden mittaustuloksia käsitellään tarkemmin tämän luvun loppupuolella.

Vertailuauman (koeauma 0) lämpötilavaihtelut olivat koeaumoista vähäisimmät (kuva 22). Auman lämpötila nousi tarkkailujakson aikana lähtötasosta, 17,9 °C, reilut 10 °C saavuttaen huippulämpötilan, 28,8 °C, elokuun 2008 alussa. Tämän jälkeen auman lämpötila laski tasaisesti ollen tarkkailun lopussa joulukuussa vajaat 20 °C. Vaikka vertailuaumaan ei lisätty lainkaan orgaanista tukiainetta, pysyi auman lämpötila yli 20 °C:ssa aina joulukuun ensimmäisiin pakkasiin saakka.

Viimeisin mittaus aumasta suoritettiin 8.12.2008, jonka jälkeen lämpötilaseuranta estyi auman pintakerrosten jäätyessä. Koeaumaan 0 ei käännetty tarkkailujakson aikana. Aumojen purun yhteydessä 16.1.2009 suoritetuissa mittauksissa (tulosta ei esitetty kuvassa 22), auman keskiosien lämpötila oli edelleen selvästi nollan yläpuolella, ollen 5,9 °C.

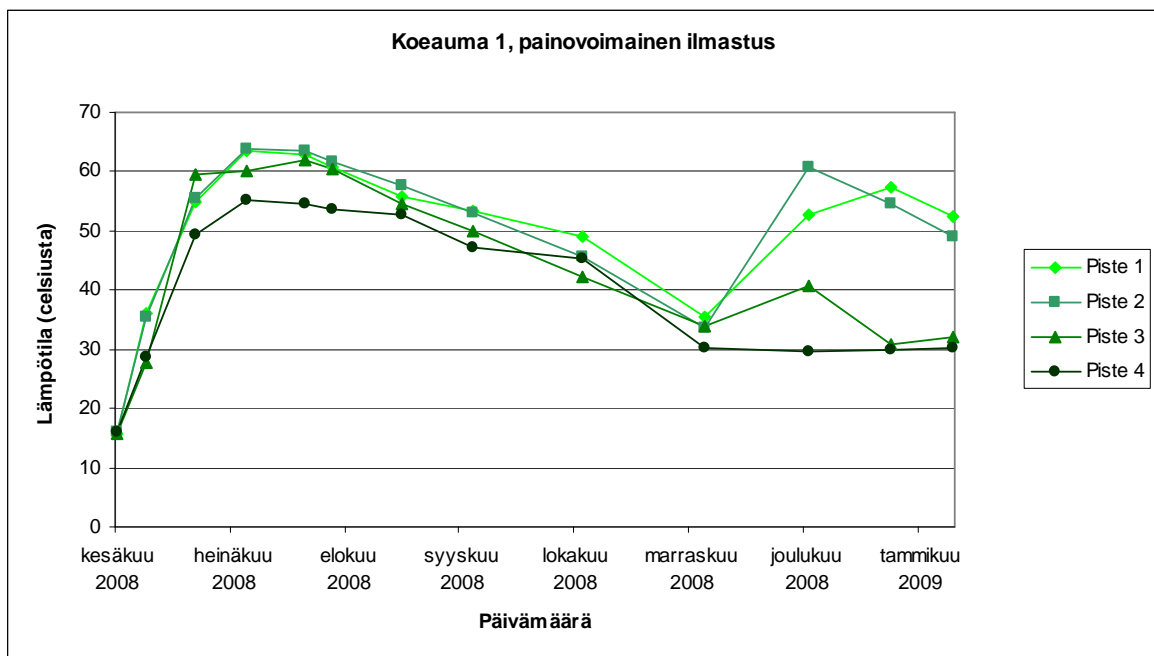


Kuva 22: Lämpötilat vertailuaumassa (koeauma 0) tarkkailujakson 4.6.2008-8.12.2008 aikana. Mittauspisteet 1-2 sijaittivat auman laella (eri päädyissä) ja mittauspisteet 3-4 vastaavasti auman vastakkaisilla pituussuuntaisilla reunoilta.

Painovoimaisesti ilmastetussa aumassa (koeauma 1) lämpötila nousi voimakkaasti ensimmäisen käsittelykuukauden aikana, saavuttaen noin 60 °C lämpötilan heinä- elokuun 2008 aikana (kuva 23). Elo- marraskuun välisenä ajanjaksona koeauman lämpötila laski tasaisesti, noin 30 °C heinäkuun huippulämpötiloista. Auma käännettiin marraskuun 10. päivä ja koottiin uudelleen vastaamaan alkuperistä rakennetta, jonka jälkeen auman sisäosien (mittauspisteet 1 ja 2) lämpötilat nousivat jälleen termofiiliselle (40–70 °C) tasolle.

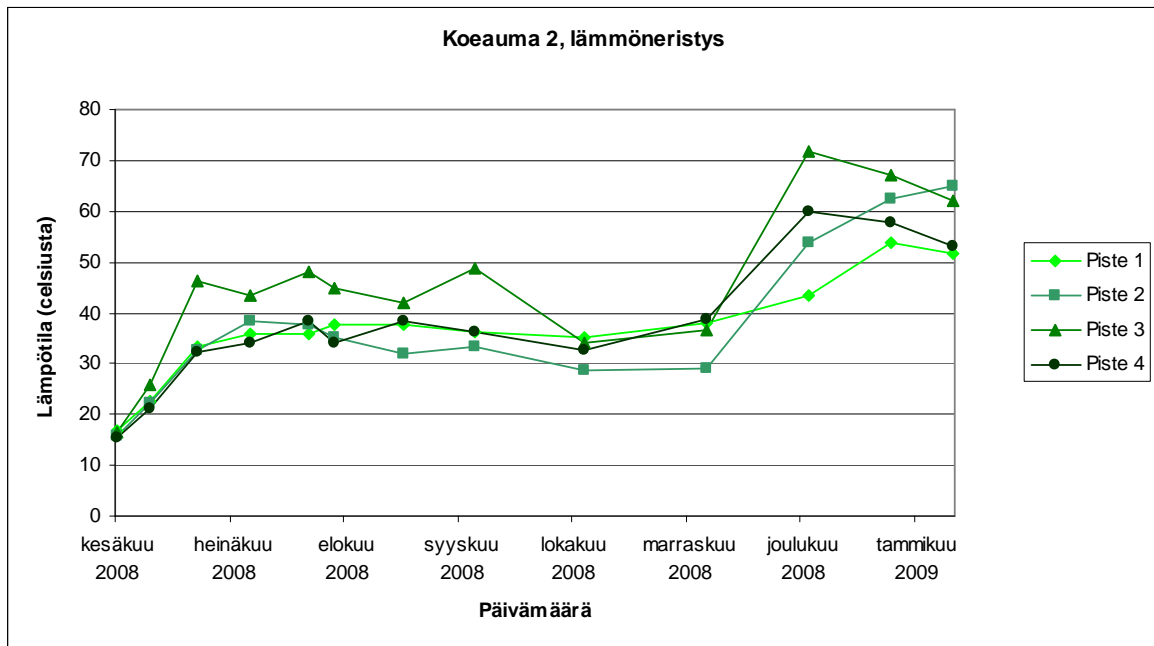
Kuvasta 23 on havaittavissa, kuinka talvikaudella, marras-tammikuussa, auman laelta mitatut lämpötilat (mittauspisteet 1 ja 2) ovat keskimäärin yli 20 °C auman reunoilta mitattuja (mittauspisteet 3 ja 4) lämpötiloja korkeammat. Mittaustulosten perusteella voidaan päätellä, että auman kaasujen- ja lämmönvaihto tapahtui pääasiassa auman reunojen kautta, joiden kaasun- ja lämmönvaihtopinta-ala on auman lakea suurempi.

Lisäksi aumaan asennetut avoimet ilmastusputket kulkivat lähellä auman reunoja ja kuljettivat mukanaan viileää ulkoilmaan auman sisäosiin. Tammikuussa 2009, auman purkamisen yhteydessä, painovoimaisesti ilmastetun auman sisälämpötila oli edelleen termofiilisellä lämpötila-alueella, ollen noin 50 °C.



Kuva 23: Lämpötilat painovoimaisesti ilmastetussa aumassa (koeauma 1) tarkkailujakson 4.6.2008-16.1.2009 aikana. Mittauspisteet 1-2 sijaittivat auman laella (eri päädyissä) ja mittauspisteet 3-4 vastaavasti auman vastakkaisilla pituussuuntaisilla reunoilta.

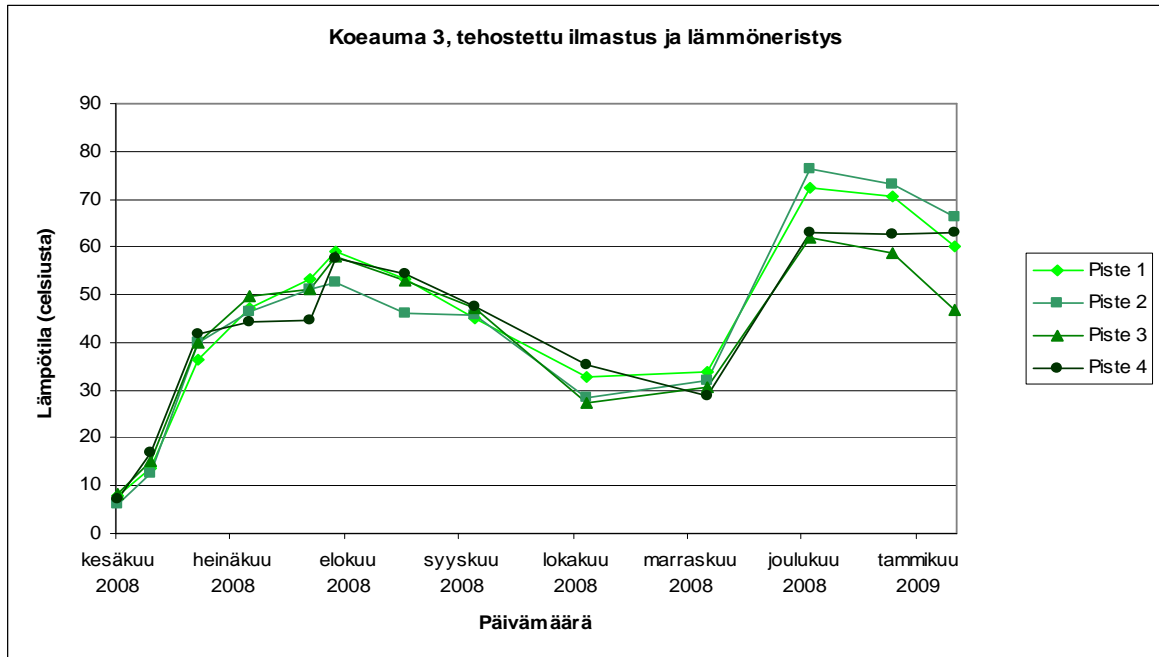
Lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 2) käsittelylämpötila nousi kesä-heinäkuun 2008 aikana keskimäärin 20 °C, 17 °C:sta noin 40 °C:een (kuva 24). Auman lämpötila pysyi tasaisena aina marraskuussa tehtyyn kääntöön asti, jonka jälkeen lämpötila nousi nopeasti kuukauden aikana yli 20 °C. Talvikauden aikana auman sisälämpötiloissa ei tapahtunut merkittävää muutosta, vaan lämpötila pysyi 50–60 °C:ssa aina tammikuussa 2009 suoritettuun auman purkamiseen saakka.



Kuva 24: Lämpötilat lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 2) tarkkailujakson 4.6.2008-16.1.2009 aikana. Mittauspisteet 1-2 sijaitsivat auman laella (eri päädyissä) ja mittauspisteet 3-4 vastaavasti auman vastakkaisilla pituussuuntaisilla reunoilta.

Ilmastetussa sekä lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 3) ensimmäinen lämpötilahuippu saavutettiin elokuussa 2008, noin kaksi kuukautta käsittelyn alkamisesta (kuva 25). Kesä - elokuun aikana auman lämpötila nousi keskimäärin hieman yli 50 °C, 7 °C:sta 58 °C:een. Koeauma 3 oli varustettu lämpöeristeellä sekä ilmastusputkilla, jotka toimivat passiivisesti 3.6.–25.7.2008 sekä 8.10.2008–16.1.2009 välisenä ajanjaksona. Aumaa ilmastettiin tehostetusti imupumpun avulla loppukesästä, 25.7.–8.10.2008 välisenä aikana.

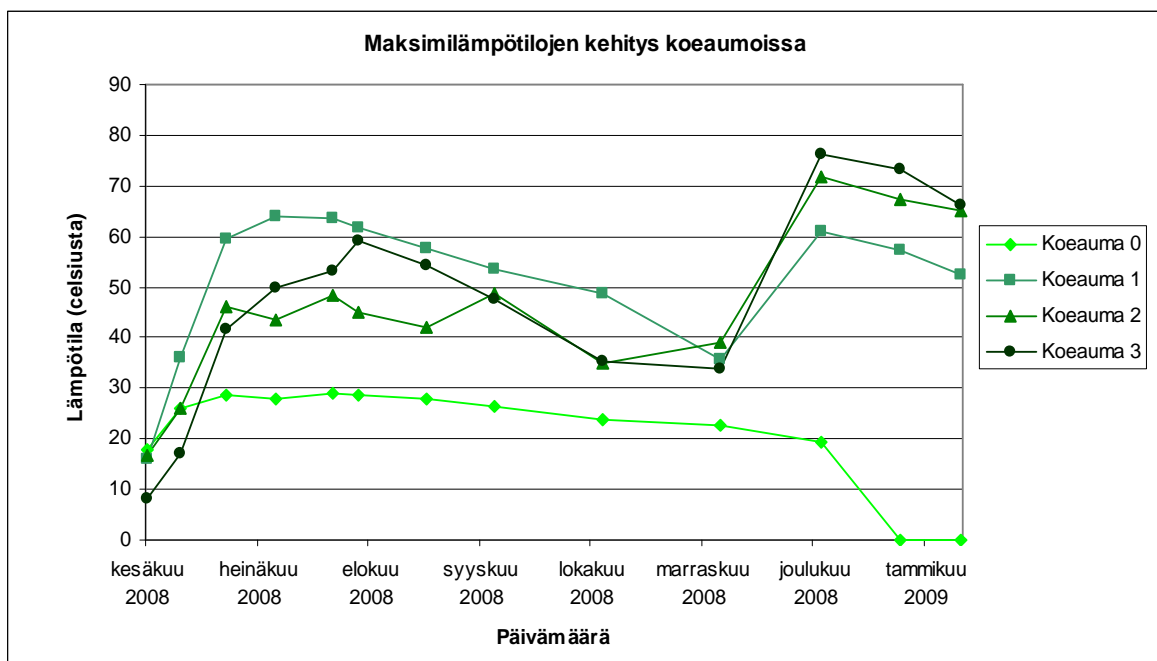
Ilmastuksen aloittamisen jälkeen auman sisälämpötilat nousivat kahden viikon aikana noin 10 °C, mutta alkoivat laskea tasaisesti heti elokuun alun jälkeen. Koeauma 3 käännettiin aumojen 1 ja 2 tapaan marraskuun 10. päivä ja kasattiin alkuperäiseen muotoonsa uudelleen. Kääntämisen jälkeen auman lämpötila nousi nopeasti saavuttaen paikoin 80 °C käsittelylämpötilat. Vielä tammikuussa 2009 aumasta mitattiin 60–70 °C lämpötiloja.



Kuva 25: Lämpötilat ilmastetussa sekä lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 3) tarkkailujakson 4.6.2008-16.1.2009 aikana. Mittauspisteet 1-2 sijaitsivat auman laella (eri päädyissä) ja mittauspisteet 3-4 vastaavasti auman vastakkaisilla pituussuuntaisilla kyljillä.

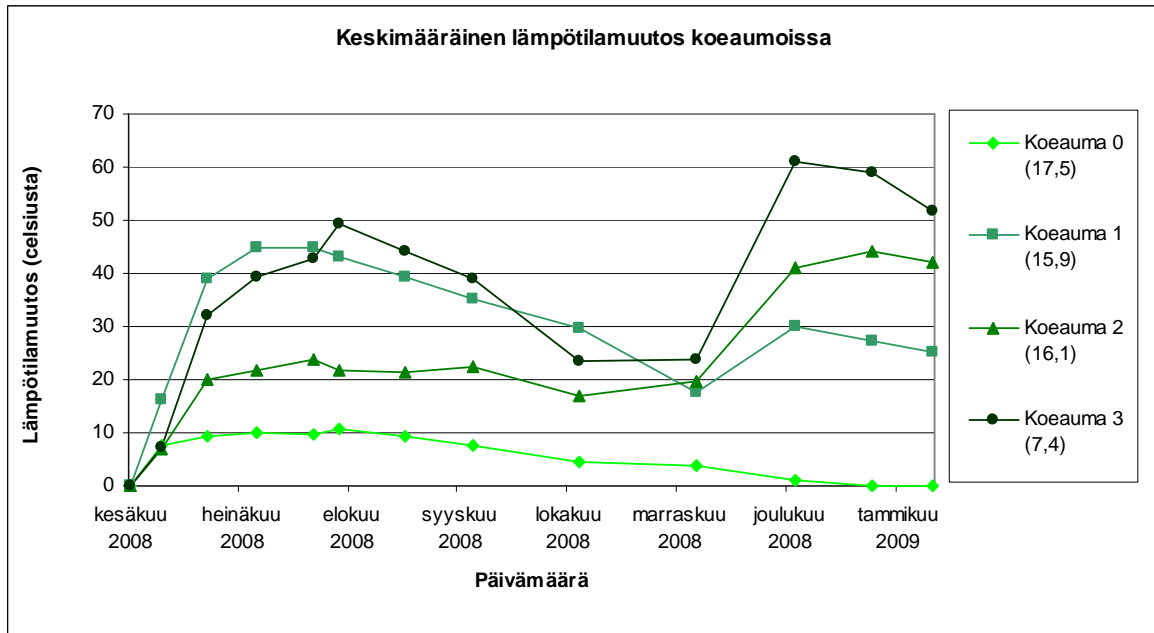
Tehostettujen aumojen (koeaumot 1-3) maksimilämpötilat nousivat kahden ensimmäisen käsittelykuukauden aikana peräti 30–50 °C, kun vastaavasti vertailuauman (koeauma 0) lämpötilan nousu jäi noin 10 °C:een (kuva 26). Koeaumojen 1-3 lämpötilat saavuttivat termofiilisen (40–70 °C) tason vain reilun kahdenkymmenen käsittelypäivän jälkeen, vertailuauman jäädessä mesofiiliselle (20–40 °C) lämpötila -alueelle. Kesä-elokuun aikana maksimilämpötilat kohosivat ilmastetuissa koeaumoissa 1 ja 3 noin 60 °C:een, saavuttaen vastaavasti koeaumassa 2 noin 50 ja vertailuaumassa 30 °C käsittelylämpötilat.

Kaikkien koeaumojen saavutettua lämpötilahuippunsa heinäkuun 2008 loppupuolella, vajaan kaksi kuukautta kompostointikäsitteilyn alkamisesta, lähtivät käsitteilylämpötilat tasaiseen laskuun. Marraskuuhun 2008 mennessä tehostettujen aumojen (koeaumat 1-3) käsitteilylämpötilat olivat laskeneet huipustaan noin 15–20 °C saavuttaen 35–40 °C sisälämpötilat. Koeaumat 1-3 käännettiin koneellisesti marraskuun 10. päivä, jonka jälkeen kyseisten koeaumojen lämpötilat nousivat 25–40 °C vajaan kuukauden aikana. Käännettyjen koeaumojen lämpötilat lähtivät hienoiseen laskuun joulukuun 2008 alussa, mutta pysyivät termofiilisellä lämpötila-alueella (50–70 °C) tarkkailujakson loppuun saakka.



Kuva 26: Maksimilämpötilat koeaumoissa tarkkailujakson 4.6.2008-16.1.2009 aikana. Ensimmäiset lämpötila-arvot edustavat aumojen lähtölämpötiloja. Vertailuauaman (koeauma 0) kahta viimeistä tarkkailumittausta (30.12.2008 sekä 16.1.2009, esitetty lämpötila 0 °C ei siis edusta auman todellista lämpötilaa) ei voitu suorittaa auman pintakerrosten jäätyksen takia.

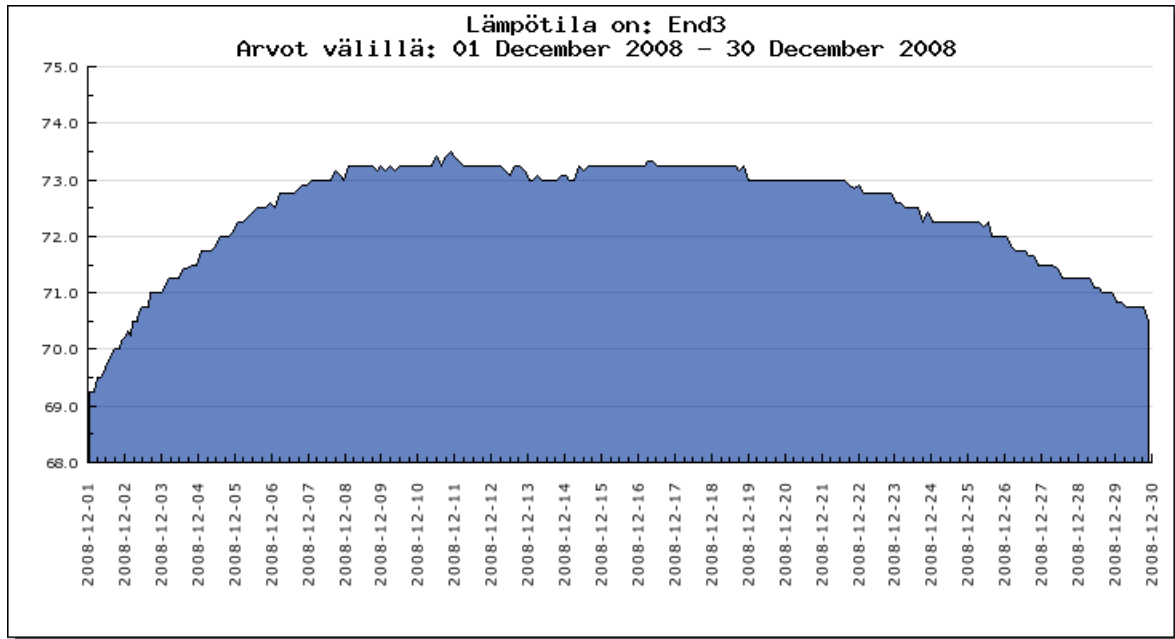
Kuvassa 27 on esitetty koeaumojen keskimääräinen lämpötilanmuutos suhteessa kompostoitavien massojen lähtölämpötiloihin. Lämpötilat vaihtelivat eniten ilmastetuissa koeaumoissa 1 ja 3. Aumojen käännon vaikutus lämpötilojen kehitykseen on selvästi havaittavissa aumojen 1-3 osalta.



Kuva 27: Keskimääräinen, neljän aumakohtaisen lämpötilamittauksen keskiarvo, lämpötilanmuutos koeaumoissa tarkkailujakson 4.6.2008-16.1.2009 aikana. Käsiteltävien massaerien lähtölämpötilat ($^{\circ}\text{C}$) on esitetty sulkeissa ja ne on mitattu heti aumojen rakentamisen jälkeen. Vertailuauman (koeauma 0) kahta viimeistä tarkkailumittausta (30.12.2008 sekä 16.1.2009, esitetty lämpötila 0°C ei siis edusta auman todellista lämpötilaa) ei voitu suorittaa auman pintakerrosten jäätyksen takia.

Tarkkailujakson alussa reaaliaikaisten lämpötila -antureiden lähettämän lämpötiladatan ongelmaksi muodostui tiedonsiirron katkonaisuus, jonka johdosta antureiden tuottamasta mittausaineistosta ei voitu esittää yhtenäistä lämpötiladataa. Tiedonsiirto-ongelmat johtuivat pääasiassa antureiden ja seurantapäättimen välille asennetun reitittimen toimintahäiriöistä, jonka johdosta lähetetty lämpötiladata ei tallentunut päätietokoneelle.

Seurantajakson alussa jokainen anturi oli asennettu lähettämään lämpötilatietoja seurantapäätteelle kuuden minuutin välein. Jo muutaman viikon seurannan jälkeen havaittiin, että antureilta tulevan tiedon määrä on liian suuri. Suuren datamäärän johdosta seurantapäättimen toiminta hidastui ja käyttö muuttui raskaaksi. Antureiden toimintaa ja lämpötilojen seurattavuutta parannettiin korvaamalla anturikohtaiset paristot litium-akuilla sekä muuttamalla lämpötilojen mittausfrekvenssi kuudesta minuutista puoleen tuntiin. Parannustoimenpiteiden ansiosta seurantapäätteelle tallentunutta mittausdataa voitiin tarkastella tarkkailujakson loppupuolella (marras-tammikuussa) myös Excel -muodossa aiemman kuvaformaatin ohella (kuva 28).



Kuva 28: Lämpötila-anturin mitaamat lämpötilat ilmastetusta sekä lämpöeristetyistä aumasta (koeauma 3) joulukuun 2008 ajalta.

Koejakson alkuvaiheessa esiintyneistä tiedonsiirto-ongelmista huolimatta seurantapääteelle tallentuneet lämpötila-arvot korreloivat varsin hyvin manuaalisten mittausarvojen kanssa. Koetoiminnan aikana lämpötila-antureiden toimintavarmuus ja seurattavuus parantuivat huomattavasti mm. internet -pohjaisen seurantaportaalien avulla, jolloin antureiden lähettämää mittausdataa voitiin seurata verkkoyhteyden välityksellä olinpaikasta riippumatta. Lisäksi aumojen käynnön yhteydessä 16.11.2008 lämpötila-antureiden lukumäärää vähennettiin kahteen anturiin per koeauma. Antureiden vähentämisellä parannettiin oleellisesti seurantalaitteiston toimivuutta sekä vähennettiin mittausdatan käsittelytarvetta.

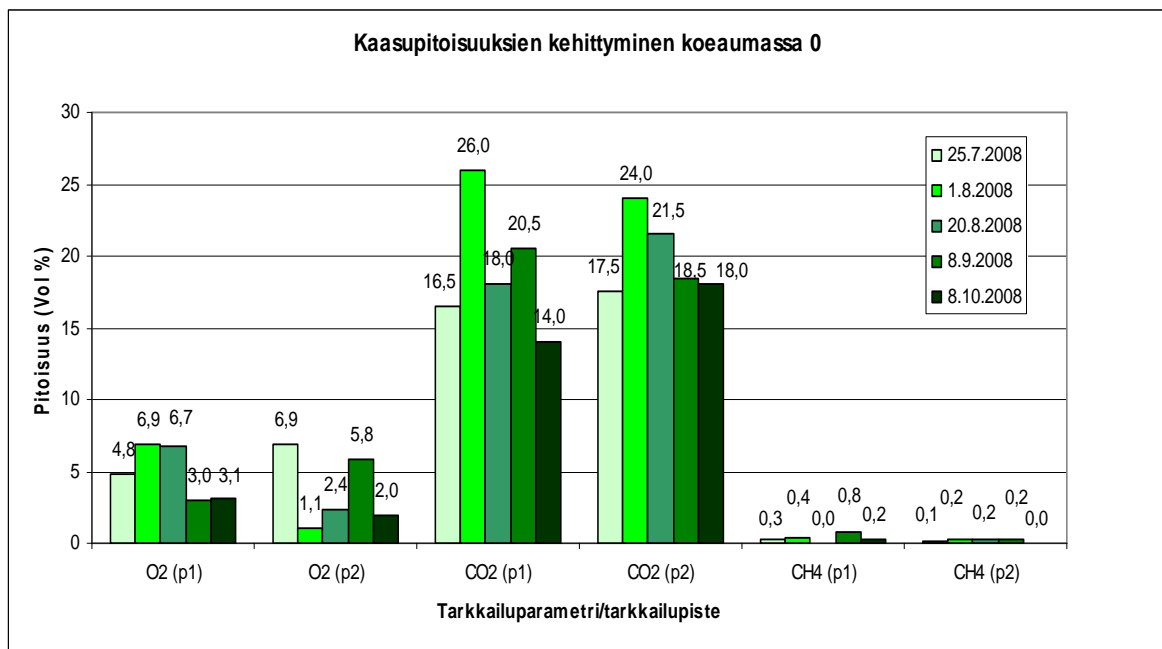
5.3. Kaasumaiset yhdisteet

Koeaumojen happi- (O_2), hiilidioksidi- (CO_2) sekä metaanipitoisuuksia (CH_4) seurattiin 25.7.–8.12.2008 välisenä aikana aumojen mikrobiaktiivisuuden sekä hajotusolosuhteiden arvioimiseksi. Kuvissa 29–32 on esitetty aumojen O_2 -, CO_2 - sekä CH_4 -pitoisuudet suoraan käsiteltävästä massaseoksesta mitattuna.

Vertailuaumassa (koeauma 0) ei tarkkailujakson aikana tapahtunut merkittäviä muutoksia huokoskaasujen pitoisuussuhteissa (kuva 29). Auman happipitoisuus pysyi koko seurantajakson ajan melko alhaisena (1,1–6,9 %). Vertailuaumaan ei asennettu erillisiä ilmastusputkia eikä lisätty käsiteltävän massan huokospitoisuutta parantavaa lietekompostia. Lisäksi kesän sateiden johdosta auman huokoinen ja hiekkapitoinen rakenne tiivistyi ja painui kasaan, mikä osaltaan heikensi auman happiolosuhteita.

Vaikka vertailuaumaan ei lisättykään ulkopuolista orgaanista ainesta, esiintyi aumassa merkittävää huokoskaasujen muodostusta sekä mikrobiologista hajotustoimintaa. Tämä voidaan havaita aumassa muodostuneen hiilidioksidin määrästä (CO₂:n vaihteluväli 14–26 %). Syntyneen hiilidioksidikaasun perusteella voidaan olettaa, että aumassa käsitelty pilaantunut maa-aines sisälsi itsessään riittävästi mikrobiologisesti hajoavaa orgaanista ainesta.

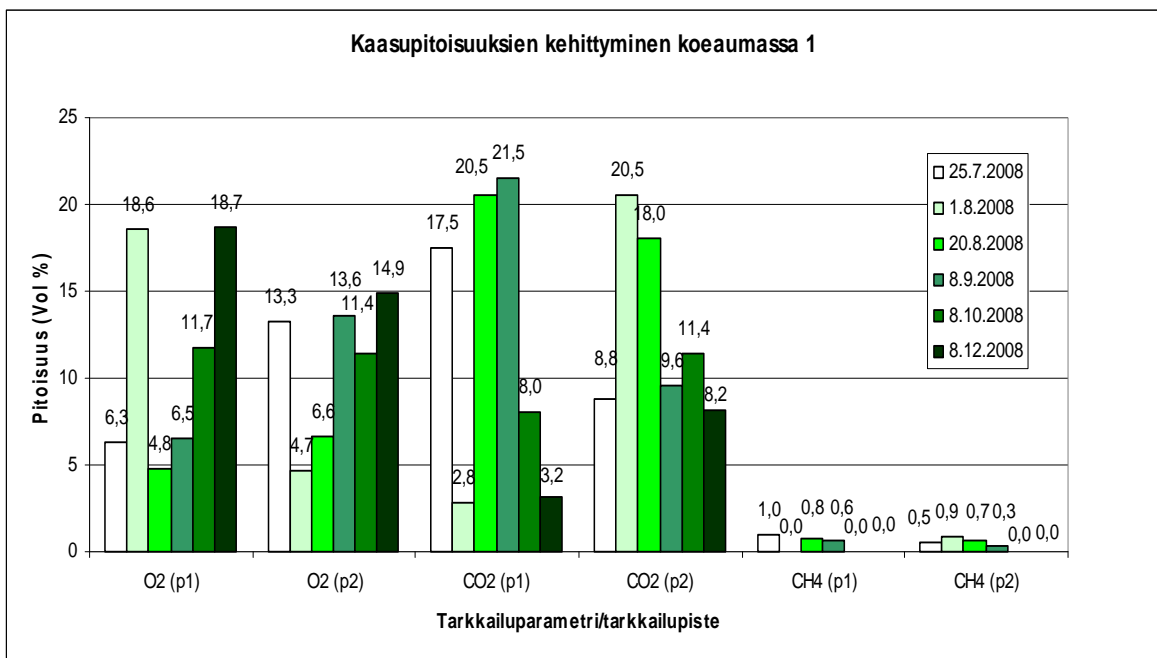
Metaanin muodostusta ei vertailuaumassa juurikaan havaittu (CH₄:n vaihteluväli 0,0–0,8 %). Metaanin esiintymisen vähyys osoittaa, että hajotusolosuhteet aumassa pysyivät aerobisina koko seurantajakson ajan. Hajotustoiminnan voidaan olettaa hidastuneen merkittävästi joulukuusta 2008 alkaen, jolloin auman pintakerrokset jäättyivät.



Kuva 29: Kaasumaiset yhdisteet vertailuaumassa (koeauma 0) ajanjaksolla 25.7.-8.10.2008. Happi- hiilidioksidi- sekä metaanipitoisuusmittaukset suoritettiin kahdesta eri pisteestä (p1 ja p2), jotka sijaitsivat auman laella pituussuunnassa auman vastakkaisissa päädyissä.

Painovoimaisesti ilmastetussa aumassa (koeauma 1) happi- ja hiilidioksidipitoisuudet vaihtelivat suuresti tarkkailujakson aikana (kuva 30). Hajotustoiminnan ollessa aktiivisimmillaan heinä-elokuussa 2008, auman happipitoisuus oli melko alhainen, vaihdellen noin 5–11 % välillä. Samana ajanjaksona auman hiilidioksidin määrä huokoskaasussa vaihteli vastaavasti välillä 8,8–21,5 %. Lokakuun 8. päivä määritetyistä mittaustuloksista voidaan havaita, kuinka hajotustoiminta aumassa alkoi hiipua syyskuun 2008 jälkeen. Tämä voidaan havaita auman happipitoisuuden nousuna sekä hiilidioksidipitoisuuden laskuna.

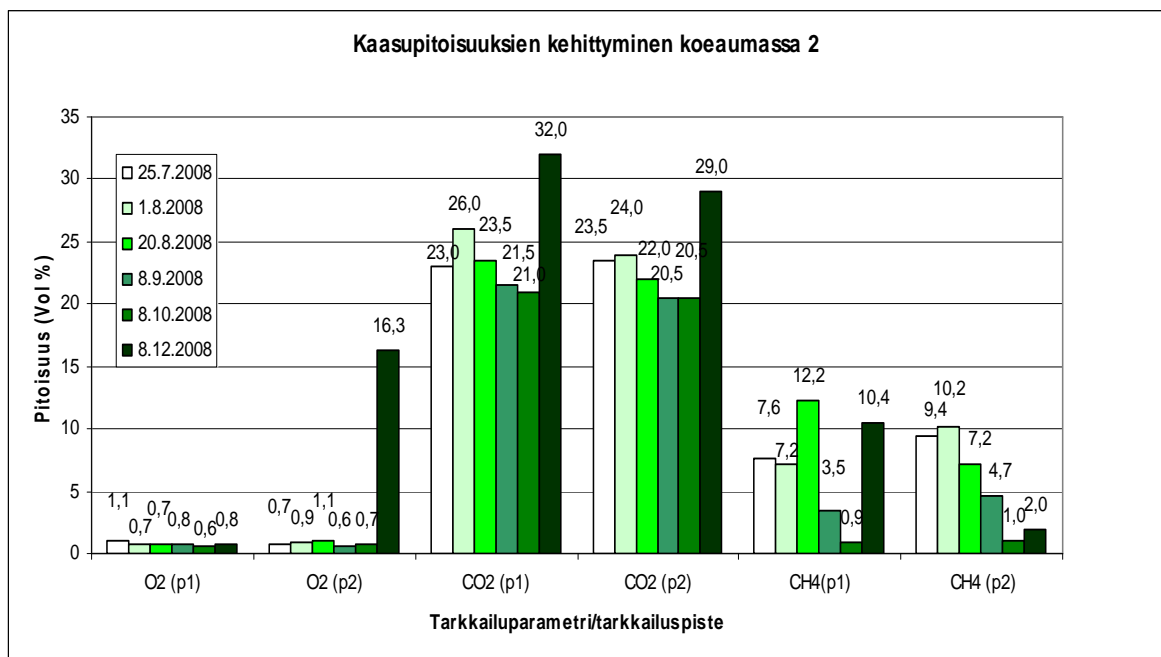
Marraskuussa tehty auman kääntö ei vaikuttanut merkittävästi painovoimaisesti ilmastetun auman happi-hiilidioksidisuhteeseen (mittaustulokset 8.12.2008). Auman tehostetusta ilmankierrosta johtuen, toimi se aerobisesti koko tarkkailujakson ajan. Tätä havaintoa tukee metaanikaasun vähäinen esiintyminen koeaumassa (CH₄:n vaihteluväli 0–1 %).



Kuva 30: Kaasumaiset yhdisteet painovoimaisesti ilmastetussa aumassa (koeauma 1) ajanjaksolla 25.7.-8.12.2008. Happi-, hiilidioksidi- sekä metaanipitoisuusmittaukset suoritettiin kahdesta eri pisteestä (p1 ja p2), jotka sijaitsivat auman laella pituussuunnassa auman vastakkaisissa päidyissä.

Kuvassa 31 esitetyistä happipitoisuuksista voidaan havaita, kuinka lämpöeristetty auma (koeauma 2) siirtyi anaerobiseen hajotustilaan auman rakentamisen jälkeen. Aumaan asennettu lämmöneriste esti ilmeisesti painovoimaisen kaasujenvaihdon auman sekä sitä ympäröineen ilman välillä. Tämän seurauksena auman sisäosien vapaa happi loppui nopeasti aktiivisen hajotustoiminnan alkaessa. Lämpöeristetyssä aumassa havaittiin ainoana tarkkailussa mukana olleista aumoista merkittävää metaanin muodostusta (CH_4 :n vaihteluväli 0,9–12,2 %), mikä osaltaan vahvistaa auman anaerobiset hajotusolosuhteet.

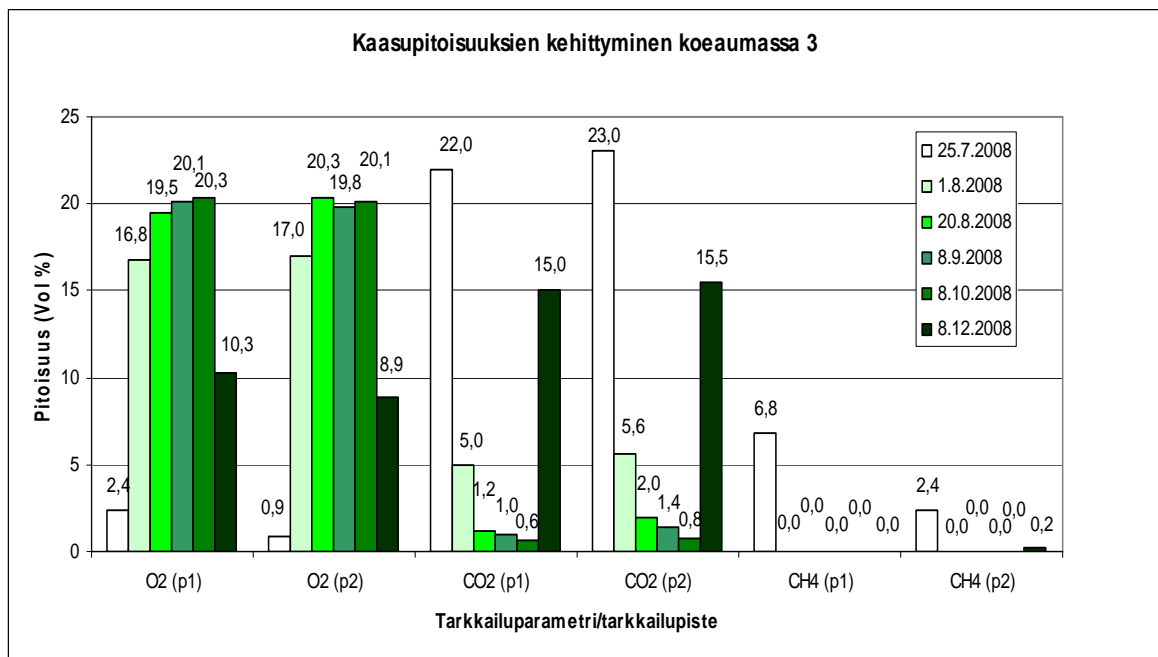
Merkillepantavaa kuitenkin oli, että marraskuussa tehdyn auman käynnön jälkeen, lämpöeristetyn auman (koeauma 2) metaanipitoisuus väheni merkittävästi hapettomien sisäosien päästessä kosketuksiin ulkoilman vapaan hapen kanssa. Korkeiden metaanipitoisuuksien lisäksi lämpöeristetyssä aumasta mitattiin myös tarkkailuaumoista korkeimmat hiilidioksidipitoisuudet. Hiilidioksidipitoisuudet pysyivät korkeina koko tarkkailujakson ajan, vaihteluvälin ollessa 20,5–32,0 %.



Kuva 31: Kaasumaiset yhdisteet lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 2) ajanjaksolla 25.7.-8.12.2008. Happi-, hiilidioksidi- sekä metaanipitoisuusmittaukset suoritettiin kahdesta eri pisteestä (p1 ja p2), jotka sijaitsivat auman laella pituussuunnassa auman vastakkaisissa päädyissä.

Ilmastetusta sekä lämpöeristetystä aumasta (koeauma 3) mitattiin tarkkailujakson aikana korkeimmat happipitoisuudet (O_2 -pitoisuus noin 20 %). Tämä havainto selittynee auman tehostetulla ilmankierrolla, joka toimi passiivisesti 3.6.–25.7.2008 ja 8.10.2008–16.1.2009 välisinä ajanjaksoina sekä imupumpun avulla tehostetusti 25.7.–8.10.2008 välisenä aikana.

Kuvasta 32 on havaittavissa, kuinka ilmastetun sekä lämpöeristetyn auman hiilidioksidipitoisuudet tippuivat 25.7.2008 aloitetun tehostetun ilmastuksen jälkeen. Auman hiilidioksidipitoisuudet palautuivat noin 15 % tasolle siirryttäessä takaisin passiiviseen ilmanvaihtoon 8.10.2008 alkaen. Samaan aikaan auman happipitoisuus laski noin 10 % -yksikköä. Tehokkaasta ilmanvaihdosta johtuen, ei ilmastetun sekä lämpöeristetyn auman huokoskaasussa havaittu metaania 25.7.2008 suoritetuista mittauksista lukuun ottamatta.



Kuva 32: Kaasumaiset yhdisteet ilmastetussa sekä lämpöeristetystä aumassa (koeauma 3) ajanjaksolla 25.7.-8.12.2008. Happi-, hiilidioksidi- sekä metaanipitoisuusmittaukset suoritettiin kahdesta eri pisteestä (p1 ja p2), jotka sijaitsivat auman laella pituussuunnassa auman vastakkaisissa päädyissä.

Koeaumoista haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) määrittämiseksi, suoritettiin heinäkuun 2008 aikana kaikkien koeaumojen pinnoilta huokoskaasumittauksia PID – analysaattorin ja keräyshuuvan avulla. Ilmastusputkilla varustetuista aumoista (koeumat 1 ja 3) VOC – pitoisuudet määritettiin myös kiertoilma- ja havaintoputkista. Lisäksi laboratoriomääritykseen lähtevistä kokoomanäytteistä suoritettiin satunnaisia VOC – mittauksia heinäkuusta alkaen.

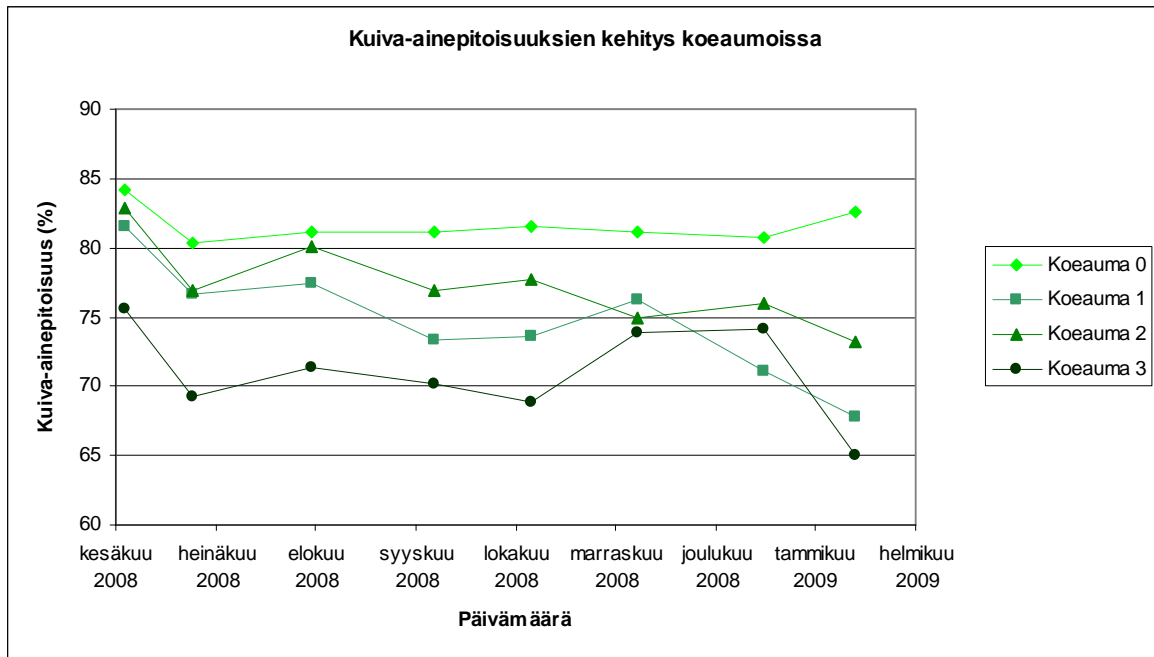
Koeaumojen pinnoilta, kiertoilmaputkista sekä näytepusseista mitatut VOC – pitoisuudet vastasivat määritettyjä taustapitoisuuksia (0,00–0,05 ppm). Mittauksista saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, etteivät koeaumojen huokoskaasut sisältäneet taustapitoisuuksia ylittäviä määriä haihtuvia orgaanisia yhdisteitä.

5.4. Kuiva-ainepitoisuus, pH sekä orgaaninen hiili (TOC)

Maanäytteiden kuiva-ainepitoisuudet, pH sekä orgaaninen hiili (TOC) määritettiin jokaisen öljyhiilivetyanalyysin yhteydessä. Tarkkailujakson tulokset on esitetty kuvissa 33–35. Esitetyt tulokset edustavat kahden tai useamman aumakohtaisen rinnakkaisnäytteen keskiarvoja.

Koeaumojen kuiva-ainepitoisuuksien kehitys tarkkailujakson ajalta on esitetty kuvassa 33. Kuiva-ainepitoisuus oli suurin vertailuaumassa (koeauma 0, > 80 %), johon pilaantuneen maa-aineksen sekaan ei lisätty orgaanista tukiainetta. Kyseisen koeauman kuiva-ainepitoisuus pysyi myös lähes muuttumattomana koko seurantajakson ajan.

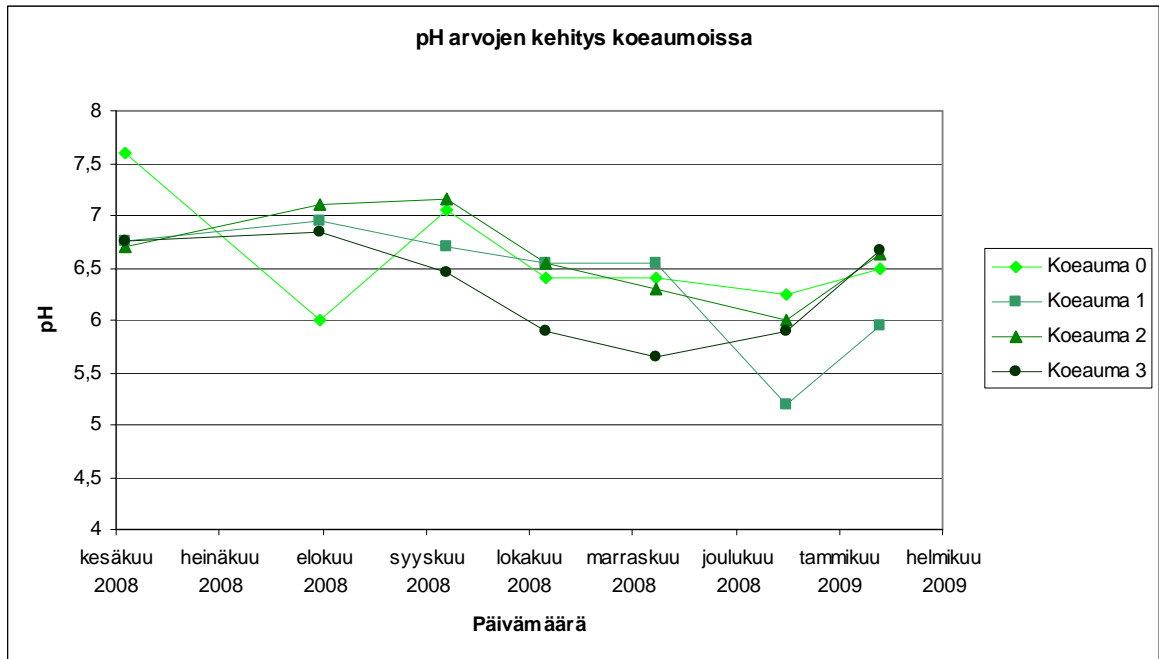
Vastaavasti tehostetuissa aumoissa (koeumat 1-3) kuiva-ainepitoisuudet laskivat tarkkailujakson aikana määritettyihin lähtöpitoisuuksiin verrattuna 9–14 %. Näiden koeaumojen käsiteltävän massan sekaan lisättiin tukiaineeksi orgaanista puhdistamolietekompostia aumojen rakentamisen yhteydessä. Painovoimaisesti ilmastetun auman (koeauma 1) kuiva-ainepitoisuus laski seurantajakson aikana 82 %:sta 68 %:iin, lämpöeristetyn auman (koeauma 2) 83 %:sta 74 %:iin ja vastaavasti ilmastetun sekä lämpöeristetyn auman (koeauma 3) 76 %:sta 65 %:iin.



Kuva 33: Kuiva-ainepitoisuudet koeaumoissa. Arvot edustavat aumoittain analysoitujen näytteiden keskiarvoja.

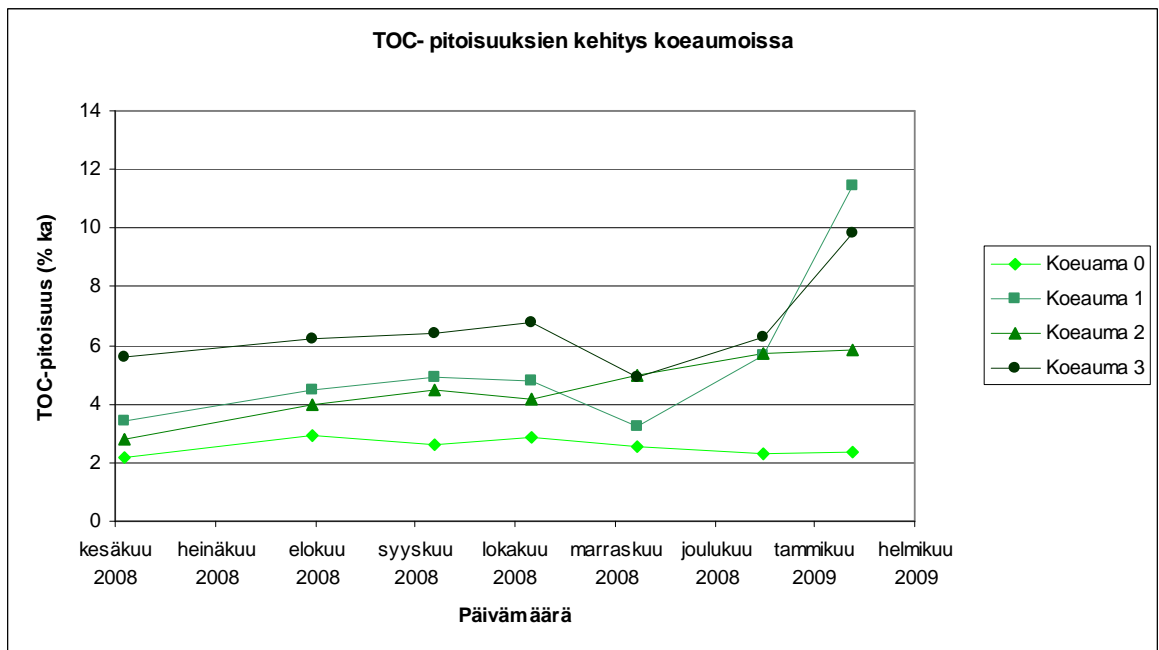
Koeaumojen pH- arvot vaihtelivat tarkkailujakson aikana välillä 5,3–7,6 (kuva 34). Korkein pH- arvo (7,6) määritettiin vertailuaumasta (koeauma 0) tarkkailujakson alussa kesäkuussa 2008 ja vastaavasti matalin pH (5,3) lämpöeristetystä aumasta (koeauma 2) joulukuussa 2008 analysoidusta näytteestä. Kaikkien koeaumojen pH:t laskivat suhteessa lähtöpitoisuuksiin tarkkailujakson aikana syys- joulukuussa 2008, palautuen tammikuussa 2009 takaisin lähelle lähtötasoa. pH – taso vaihteli 6,0–7,5 välillä vertailuaumassa (koeauma 0), johon ei lisätty orgaanista tukiainesta. Puolestaan tehostetuissa aumoissa (koeaumat 1-3), joihin lisättiin tukiaineeksi jätelietekompostia, pH- tasot noudattelivat tarkkailujakson aikana pääsääntöisesti yhteneväistä, maltillista, trendiä seuraten pienellä viiveellä aumojen lämpötilamuutoksia.

pH- tasot laskivat tehostetuissa aumoissa (koeaumat 1-3) vasta noin kolmen käsittelykuukauden jälkeen, kun ensimmäinen lämpötilahuippu (termofiilinen hajoamisvaihe) aumoissa oli saavutettu. Tämän jälkeen aumojen pH- tasot laskivat tasaisesti, kunnes kääntyivät taas hitaaseen nousuun marraskuussa 2008 tehtyjen aumojen kääntöoperaatioiden jälkeen.



Kuva 34: pH arvot koeaumoissa. Arvot edustavat aumoittain analysoitujen näytteiden keskiarvoja.

Aumojen TOC- pitoisuudet kasvoivat maltillisesti kaikissa koeaumoissa joulukuuhun 2008 asti (kuva 35). Tammikuussa 2009 ilmastetuissa aumoissa (koeaumat 1 ja 3) TOC – pitoisuudet nousivat merkittävästi, kun ne vastaavasti noudattelivat hienoista kasvua vertailuaumassa (koeauma 0) sekä lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 2).



Kuva 35: TOC-pitoisuudet koeaumoissa. Arvot edustavat aumoittain analysoitujen näytteiden keskiarvoja.

6. TULOSTEN TARKASTELU

6.1. Öljyhiilivetyjen reduktio koeaumoissa

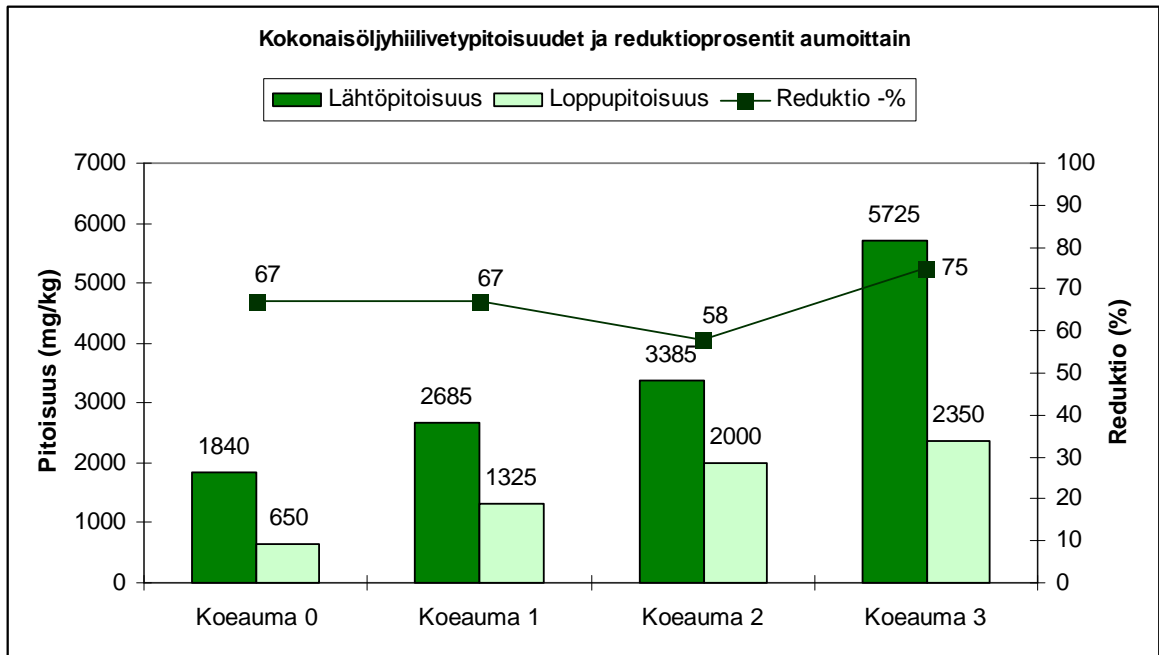
Mustankorkealla suoritettujen kahdeksan kuukautta kestäneiden kompostointikokeiden aikana koeaumojen öljyhiilivetypitoisuudet vähenivät keskimäärin 1200–4300 mg/kg. Massayksikköä kohti (mg/kg) suurin öljyhiilivetyreduktio (4300 mg/kg) saavutettiin ilmastetussa sekä lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 3) ja pienin (1200 mg/kg) vertailuaumassa (koeauma 0). Prosentuaalisesti suurimmat keskimääräiset öljyhiilivetyreduktiot (67–75 %) auman lähtöpitoisuuksiin verrattuna saavutettiin vertailuaumassa sekä ilmastetuissa aumoissa (koeaumat 0, 1 ja 3) ja vastaavasti pienin vähenemä (58 %) lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 2). Edellä esitetyt vähenemät on laskettu vertaamalla aumoista kesäkuussa 2008 määritettyjä lähtöpitoisuuksia koko kahdeksan kuukautta kestäneen tarkkailujakson aikana analysoitujen näytteiden keskiarvoihin. Mustankorkealla saavutetut öljyhiilivetyjen reduktiopitoisuudet ovat yhteneväisiä aiempien tutkimustulosten kanssa.

Sanscartier ym. (2008) saavuttivat kymmenen kuukautta kestäneen aumakäsittelyn aikana 60–72 ($\pm 9-12$) % öljyhiilivetyreduktion käsiteltävässä maa-aineksessa. Jörgensen ym. (2000) saavuttivat kompostoimalla puolestaan noin 60 % vähenemän sekä voitelu- että diesel-öljypitoisuuksissa viiden käsittelykuukauden aikana. Mustankorkealla koeaumoissa saavutetut keskimääräiset öljyhiilivetyreduktiot olivat 58–75 ($\pm 3-15$) % välillä käsiteltyjen massojen lähtöpitoisuuksiin verrattuna.

Öljy-yhdisteen pitoisuus käsiteltävässä maa-aineksessa vaikuttaa sen hajoamisnopeuteen. Ellei öljy-yhdisteen lähtöpitoisuus ole sitä hajottavalle mikrobipopulaatiolle toksisella tasolla, hajoaa se sitä nopeammin, mitä suurempi sen lähtöpitoisuus on (Scherr ym. 2007).

Scherr ym. (2007) esittämän havainnon voidaan todeta soveltuvan myös Mustankorkealla suoritettuihin tutkimuksiin. Ilmastetussa sekä lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 3) öljyhiilivetyjen lähtöpitoisuus oli 5725 mg/kg, kun se esimerkiksi vertailuaumassa (koeauma 0) oli 1840 mg/kg ja painovoimaisesti ilmastetussa aumassa (koeauma 1) 2685 mg/kg. Koeaumassa 3 saavutettu öljyhiilivetyreduktio massayksikköä kohti (mg/kg) oli lähes nelinkertainen koeaumassa 0 ja kolminkertainen koeaumassa 1 saavutettuun öljyhiilivetypitoisuuden vähenemään verrattuna.

Tässä yhteydessä ilmastettujen aumojen (koeamat 1 ja 3) vertailu lienee mielekkäämpää, sillä niiden hajotusolosuhteiden voidaan katsoa olleen lähempänä toisiaan kuin vertailuaman (koeauma 0) ja ilmastetun sekä lämpöeristetyn auman (koeauma 3). Tarkasteltaessa puolestaan koeaumojen prosentuaalisia öljyhiilivetyreduktioita Mustankorkealla, ei aumakohtaisella öljyhiilivetyjen lähtöpitoisuudella voida katsoa olleen vaikutusta öljyhiilivetyjen hajoamisnopeuteen (kuva 36).



Kuva 36: Koeaumojen kokonaisöljyhiilivetyjen (C_{10} - C_{40}) lähtö- ja loppupitoisuudet sekä pitoisuuksien muutos prosentteina. Lähtö- (3.-4.6.2008) ja loppupitoisuudet (16.1.2009) edustavat kahden tai useamman rinnakkaisnäytteen keskiarvoa, kun reduktioprosentti on vastaavasti laskettu koko tarkkailujakson ajalta (3.6.2008-16.1.2009) määritettyjen rinnakkaisnäytteiden keskiarvoista.

Sanscartier ym. (2008) tutkimuksissa öljyhiilivetyjen jäännöspitoisuudet saavutettiin kahden - kolmen kuukauden kuluttua kompostointikäsitteilyn aloittamisesta. Tämän jälkeen öljyhiilivetypitoisuuksissa ei havaittu merkittävää vähenemistä. Myös Ouyang ym. (2005) havaitsivat, että kompostoimalla öljy-yhdisteillä pilaantunutta maamassaa yhdessä lannan kanssa kenttäolosuhteissa, öljy-yhdisteiden hajoaminen oli nopeinta ensimmäisen käsitteilykuukauden aikana, jonka jälkeen hajoamisnopeus väheni merkittävästi. Myöskään Mustankorkealla ei kahden ensimmäisen käsitteilykuukauden jälkeen havaittu merkittäviä muutoksia kompostiaumojen kokonaisöljyhiilivetypitoisuuksissa.

Edellä kuvattua öljyhiilivetyjen hajoamiskinetiikkaa on aiempien tutkimusten yhteydessä kutsuttu myös ”jäähiekkomaila ilmiöksi” (*hockey stick phenomenon*). Kyseisessä ilmiössä maaperän orgaaniset yhdisteet, mukaan lukien orgaaniset haitta-aineet, hajoavat käsittelyn alkuvaiheessa hyvin nopeasti, mikäli hajoamisolosuhteet ovat otolliset. Nopean hajoamisvaiheen jälkeen haittayhdisteiden hajoamisnopeus laskee merkittävästi tai sitä ei tapahdu juuri ollenkaan. ”Jäähiekkomaila kinetiikka” voidaan parhaiten selittää ravinneaineiden ja elinvoimaisten mikrobipopulaatioiden nopealla vähenemisellä sekä alentuneella haitta-aineiden biosaatavuudella (Alexander 1999).

Mustankorkealla kompostointikokeiden yhteydessä tehtyjen laboratorioanalyysien öljyhiilivetynäytteiden virhemarginaali oli melko suuri, 32–40 %. Lisäksi näytekohtaista hajontaa aiheuttivat todennäköisesti kompostimassan heterogeenisuus, käytetyt näytteenottomenetelmät sekä kompostin tila eri käsittelyvaiheissa. Vaikka kompostimassa seosaineineen pyrittiin sekoittamaan koneellisesti tasalaatuiseksi sekä aumojen rakennus-että kääntövaiheessa, oli käsiteltävä pilaantunut maa-aines lähtökohtaisesti melko epätasalaatuista, sisältäen mm. moreenia, savea ja orgaanista ainesta kuten puunpaloja.

Mustankorkealla tehtyjen tutkimuksen yhteydessä havaittiin, että näytekairalla ja auman poikkileikkauksesta näytelapiolla otettujen osanäytteiden kesken esiintyi suurempaa vaihtelua analysoiduissa öljyhiilivetypitoisuuksissa, kuin samalla tekniikalla otettujen osanäytteiden kesken. Tämä selittyy sillä, että näytekairalla päästiin vain 1,5–2,0 metrin syvyyteen aumojen pinnoilta. Käsittelyn edetessä orgaaninen maa-aines hajosi pienempiin partikkeleihin ja kertyi suotoveden sekä hajotustoiminnan mukanaan synnyttämän kosteuden mukana painovoimaisesti aumojen alaosiin. Koska orgaaninen aines sitoo itseensä tehokkaasti öljy-yhdisteitä, voidaan öljy-yhdisteiden olettaa vajonneen aumojen pohjakerrokseen orgaanisten partikkelien mukana (Van Gestel ym. 2003). Mustankorkealta koejakson lopussa otetut öljyhiilivetynäytteet osoittivat, että määritetyt öljyhiilivetypitoisuudet olivat suurempia aumojen pohjakerroksissa verrattuna aumojen keskiosista otettuihin osanäytteisiin.

Aiempien tutkimusten mukaan, seuraamalla öljyhiilivetypitoisuuden reduktiota fraktioittain, saadaan kattavampi kuva pilaantuneen maa-aineksen puhdistumisnopeudesta sekä mekanismeista, verrattuna pelkän kokonaisöljyhiilivetypitoisuuden (THP) seurantaan (Sanscartier ym. 2008). Tämän tutkimuksen yhteydessä öljyhiilivetyjen fraktiosuhteiden seuraaminen mahdollistettiin analysoimalla Mustankorkealta otetuista öljyhiilivetynäytteistä kokonaisöljyhiilivetypitoisuuksien (C₁₀-C₄₀) lisäksi sekä näytteen kevyet (C₁₀-C₂₁) että raskaat (C₂₁-C₄₀) öljyhiilivetyfraktiot.

Ouyang ym. (2005) mukaan, haaroittuneiden, yli 29 hiiliatomia sisältävien, öljyhiilivety-yhdisteiden mikrobiologinen hajoaminen on huomattavasti yksinkertaisia *n*-alkaanisia öljyhiilivetyjä hitaampaa. Kevyempien öljyhiilivetyjakeiden on todettu poistuvan käsiteltävästä maa-aineksesta nopeammin, osa haihtumalla ja osa mikrobiologisen hajotustoiminnan seurauksena. Käsiteltävään maamassaan jäävä öljyhiilivetyjäännös sisältääkin usein vain raskaita öljyhiilivetyjä, jotka ovat kevyempiä hiilivetyjakeita myrkyttömämpiä ja hitaammin biohajoavia (Sanscartier ym. 2008; Namkoong ym. 2002).

Mustankorkealla tehtyjen tutkimusten mukaan kevyemmät öljyhiilivetyfraktiot (C_{10} - C_{21}) hajosivat raskaampia öljyhiilivetyfraktioita (C_{21} - C_{40}) nopeammin. Tämä voidaan havaita aumakohtaisista öljyhiilivetyfraktiosuhteita esittävistä kuvaajista sekä sivulla 70 esitetystä kuvaajasta 21, josta nähdään kuinka raskaampien öljyhiilivetyjakeiden osuus suhteessa kokonaisöljyhiilivetyihin (C_{10} - C_{40}) kasvoi käsittelyjakson aikana. Raskaampien öljyhiilivetyjakeiden rikastuminen korostui etenkin tehostetuissa aumoissa (koeaumot 1-3), joiden luonnollista hajotustoimintaa tehostettiin aumakohtaisten rakenneratkaisuiden avulla. Aumakohtaisen ilmakierron parantamisella voidaan olettaa olleen vaikutusta koeaumojen 1 ja 3 kevyempien öljyhiilivetyjen hajoamisnopeuteen.

Orgaanisen aineksen, kuten jätevesilietteen tai kompostimassan, lisäys käsittelyauman tukiaineeksi on aiempien havaintojen mukaan todettu nopeuttavan öljyhiilivetyjen hajotustoiminnan alkamista sekä nostavan käsittelylämpötiloja (Namkoong ym. 2002). Orgaaniset massat sisältävät myös hajotustoiminnan kannalta hyödyllisiä ravinteita sekä kuohkeuttavat ja tasapainottavat kompostiaumojen rakennetta (Jørgensen ym. 2000). Van Gestel ym. (2003) tukivat kolmen eri seossuhteen vaikutusta öljyhiilivetyjen hajotukseen 85 päivää kestäneissä laboratorio-olosuhteissa. Paras lopputulos saavutettiin runsaasti biojätettä (osuus 90 % massaseoksesta) sisältävässä kompostiseoksessa, öljyhiilivetyreduktion ollessa 84 %.

Mustankorkealla koeaumoihin 1-3 lisättiin pilaantuneen maa-aineksen sekaan esikäsiteltyä puhdistamolietekompostia, joka sisälsi runsaasti orgaanisesti hajoavaa ainesta. Vertailuaumassa (koeauma 0) käytettiin puolestaan pelkkää pilaantunutta maa-ainesta, joka silmämääräisesti sisälsi vain vähän orgaanista ainesta, kuten puuta ja humusmaata. Tukiaineena ja ravinteena käytetyn lietekompostin tehtävänä oli kuohkeuttaa kompostirakennetta sekä tuoda mukanaan elinvoimainen mikrobipopulaatio, jonka avulla hajotustoiminta aumoissa saataisiin käyntiin nopeammin. Lähtökohtaisesti tukiainetta ei saa kuitenkaan käyttää laimentamaan käsiteltävän maa-aineksen haitta-ainepitoisuutta.

Mustankorkealla suoritettiin ennen käsiteltävän maamassa ja tukiaineena käytettävän lietekompostin sekoittamista pelkkää pilaantunutta maa-ainesta sisältävästä varastoaumasta esinäytteenotto, joka käsitti yhteensä yksitoista erillisnäytettä. Analysoitujen erillisnäytteiden öljyhiilivetyypitoisuudet vaihtelivat 2900–15000 mg/kg välillä. Koeaumojen rakentamisen yhteydessä suoritettiin aumakohtainen näytteenotto, jossa tukiaineettoman vertailuauaman (koeauma 0) kokonaisöljyhiilivetyypitoisuudeksi määritettiin 1840 mg/kg ja tukiaineellisten koeaumojen 1-3 lähtöpitoisuuksiksi vastaavasti 2685–5725 mg/kg.

Edellä esitettyjen öljyhiilivetyypitoisuuksien perusteella ei lietekompostin käytöllä voida katsoa olleen haitta-ainepitoisuuksia laimentavaa vaikutusta. Lisäksi, koska tehostettujen aumojen (koeaumat 1-3) öljyhiilivetyjen lähtö- ja loppupitoisuudet määritettiin lietekompostia sisältävästä kompostimassasta, ovat määritysten tulokset vertailukelpoisia keskenään.

Tämän tutkimuksen yhteydessä ei koeaumoista lähtevien suotovesien öljyhiilivetyypitoisuuksia tarkkailtu. Vertailuauaman (koeauma 0) suurta öljyhiilivetyreduktiota voidaan kenties osaltaan selittää sillä, että osa öljyhiilivedyistä pääsi suotautumaan auman läpi sade- ja valumavesien mukana. Tätä ongelmaa ei muissa koeaumoissa esiintynyt, sillä niiden päälle kasattu orgaaninen lietekompostikerros pidatti todennäköisesti itsessään huomattavasti huokoista hiekkamaata enemmän vettä. Kesä 2008 oli varsin sateinen. Tästä johtuen aumojen kosteuspitoisuudet pysyivät varsin suotuisalla tasolla, vaikka aumojen sisälämpötilat olivatkin korkeat. Toisaalta runsaat sateet tiivistivät aumoja heikentäen niiden kaasujenkuljetusta. Tämä ilmiö korostui etenkin suojaamattomassa vertailuauamassa (koeauma 0). Edellä esitettyjen havaintojen nojalla voidaan todeta, ettei pilaantuneiden maamassojen käsittelyä ns. hiekkakakuissa voida pitää hallittuna käsittelyprosessina.

Mustankorkealla suoritetuissa kompostointikokeissa koeaumojen kokonaisöljyhiilivetyjen (C_{10} - C_{40}) jäännöspitoisuudet laskivat tasolle 650–2350 mg/kg. Kaikkien koeaumojen öljyhiilivetyypitoisuudet alittivat näin kaatopaikkasijoittamiselle asetetun ohjearvon (2500 mg/kg) kahdeksan kuukautta kestäneen käsittelyjakson aikana. Näin ollen kompostimassojen jatkokäyttöä mm. kaatopaikan luiskatäytyöissä voidaan pitää perusteltuna.

6.2. Lämpötilojen kehitys koeaumoissa

Mustankorkealla suoritettut kompostointikokeet osoittivat, että kompostiaumojen aumarakenteilla voidaan vaikuttaa merkittävästi saavutettavaan käsittelylämpötilaan. Aumoissa, joiden kompostointia pyrittiin tehostamaan seosaineen lisäyksen (lietekomposti), ilmastusputkistojen sekä lämpöeristeen avulla, saavutettiin lähes 50 °C korkeammat käsittelylämpötilat verrattuna perinteiseen aumarakenteeseen. Myös aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että varsinkin orgaanisen aineksen lisäyksen ja ilmakierron tehostamisen on todettu vaikuttavan suoraan kompostiaumojen lämpötilakehitykseen (Ouyang ym. 2005; Sanscartier ym. 2007).

Vertailuauman (koeauma 0) lämpötila nousi kesä-heinäkuun 2008 aikana vain 10 °C vajaan 30 °C:een. Heinäkuun alun jälkeen auman lämpötila alkoi laskea hitaasti, kunnes sen ulkokerrokset jäätivät joulukuun 2008 alussa. Vertailuaumassa ei siis saavutettu termofiilistä (40–70 °C) lämpötila-aluetta lainkaan. Koska auman pintakerroksia ei suojattu lietekompostilla, kuten koeaumoissa 1-3, pääsi sade- ja valumavedet kulkeutumaan vapaasti auman läpi. Mineraalimaan huokosiin varastoitunut vesi ja kosteus jäätivät välittömästi ensimmäisten marraskuun pakkasten aikaan, jolloin myös auman hajotustoiminnan voidaan olettaa hidastuneen merkittävästi.

Mustankorkealla koeaumoihin 2 ja 3 asennetun erillisen lämmöneristykseen (routamatto) merkityksen voidaan saatujen tutkimustulosten pohjalta katsoa olleen kaksijakoinen. Lämpöeriste sääteli aumojen lämpötilaolosuhteita hajotustoiminnan kannalta eri tavoin vuodenajasta riippuen. Lämpiminä käsittelykuukausina (kesä - lokakuu) lämmöneristys todennäköisesti hidasti luonnollista kaasujen ja lämmönvaihtoa auman pintojen ja ympäröivän ilmassan välillä, heikentäen samalla aumojen sisäosien happipitoisuutta. Heikentynyt happipitoisuus vähensi puolestaan auman mikrobiaktiivisuutta ja sitä kautta hajotustoimintaa, jolloin hajotustoiminnassa syntyvä lämpöenergia myös väheni. Kylminä käsittelykuukausina (marras-tammikuu) lämmöneristys vastaavasti esti viileän ulkoilman pääsyn aumojen sisäosiin, tasaten niiden lämpötiloja pitäen olosuhteet hajottajamikrobeille otollisimpina. Lämpöeristeen asentaminen korkeisiin aumoihin tuulisissa olosuhteissa osoittautui varsin haastavaksi tehtäväksi vaatien kahden työmiehen ja yhden pyöräkuormaajan työpanoksen.

Tarkkailtaessa Mustankorkean koeaumojen maksimilämpötilojen kehitystä (sivu 75 kuva 26), voidaan havaita kuinka aumojen lämpötilojen nousu on ollut kesäkaudella hitaampaa lämpöeristetyissä koeaumoissa 2 ja 3 verrattuna painovoimaisesti ilmastettuun aumaan (koeauma 1). Vastaavasti lämpöeristetty auma (koeauma 2) ei menettänyt lämpöä yhtä nopeasti talvikauden aikana verrattuna ilmastettuihin aumoihin (koeamat 1 ja 3). Talvikauden aikana (marras-tammikuussa) aumojen lämpövuodot voitiin havaita silmämääräisesti sulina laikkuina aumojen pinnoilta. Tehostetuissa aumoissa (koeamat 1-3) lämpötilaerot auman eri osissa sijainneiden mittauspisteiden välillä (mittauspisteet 1-4) vaihtelivat suuresti. Tämä johtui todennäköisesti käsiteltävän massan heterogeenisuudesta sekä hapen epätasaisesta jakautumisesta auman sisäosien välillä.

Van Gestel ym. (2003) havaitsivat, että pilaantuneen maamassan käsittelylämpötilalla on merkittävä vaikutus öljyhiilivetyjen loppupitoisuuteen. He saavuttivat laboratorio-olosuhteissa ja 40 °C käsittelylämpötilassa 86 % vähenemän öljyhiilivetypitoisuuksissa, kun vastaava vähenemä jäi 35 %:iin 20 °C käsittelylämpötilassa. Van Gestel ym. (2003) havaitsivat myös, että lämpötilan, happipitoisuuden sekä mikro-organismien osuus öljyhiilivetyjen kokonaisreduktiosta voi olla jopa 82,5 %. Näin ollen vain 17,5 % öljyhiilivetyjen kokonaisreduktiosta olisi riippuvaisia muista kompostoitumiseen vaikuttavista tekijöistä, kuten saatavilla olevista ravinteista tai orgaanisesta aineksesta. Toisaalta, orgaanisen aineksen on todettu edesauttavan ja ylläpitävän hajoamisprosessin kannalta merkittäviä ympäristötekijöitä, kuten juuri elinvoimaista mikrobikantaa sekä kosteus- ja happiolosuhteita, joten sen osuutta kompostoitumisprosessissa onnistumisessa ei sovi myöskään vähätellä (Van Gestel ym. 2003).

Orgaanisen lietekompostin lisäksi voidaan katsoa olleen suora vaikutus Mustankorkealla tehostettujen aumojen (koeamat 1-3) lämpötilakehityksiin. Kyseisten koeaumojen maksimilämpötilat nousivat kahden ensimmäisen käsittelykuukauden aikana peräti 30–50 °C, kun vastaavasti vertailuauman (koeauma 0) lämpötilan nousu jäi noin 10 °C:een. Tehostettujen aumojen (koeamat 1-3) lämpötilatrendit noudattelivat sivulla 20 kuvassa 3 esitettyä yleistä kompostoinnin lämpötilakehitystä, kun vastaavasti vertailuauman (koeauma 0) lämpötilatrendi oli koko seurantajakson ajan loivasti laskeva.

Mikrobitoiminnan mukanaan synnyttämä lämpöenergia piti osaltaan tehostetut aumat (koeaumamat 1-3) sulina koko tarkkailujakson ajan vertailuauman (koeauma 0) jäätyessä ensimmäisten pakkasten aikana marraskuun 2008 alkupuoliskolla. Suurimman osan koeaumoista 1-3 syntyneestä lämpöenergiasta voidaan olettaa olleen peräisin orgaanisen aineksen hajoamisesta. Orgaanisen aineksen hajotessa, tehostettujen aumojen (koeaumamat 1-3) sisälämpötilat nousivat tasolle (20–40 °C). Tällä lämpötila-alueella myös öljyhiilivetyjen hajoamisen on todettu kiihtyvän (Sarkkila ym. 2004). Näin ollen orgaanisen aineksen hajoamisesta aiheutuvalla lämpötilan nousulla voidaan katsoa olevan yhteys myös öljyhiilivetyjen hajoamisnopeuteen.

Mustankorkealla tehostetuissa aumoissa (koeaumamat 1-3) sisälämpötilat nousivat paikoin jopa yli 70 °C. Merkittävin tekijä näiden aumojen lämpötilan nousulle lienee ollut runsas orgaanisen aineksen määrä, jonka mikrobiologisesta hajoamisesta syntyi lämpöenergiaa. Myös aumojen riittäväällä hapensaannilla näyttää olleen suora vaikutus lämpötilojen nousuun. Etenkin marraskuussa 2008 suoritettujen koeaumojen kääntöjen jälkeen tehostettujen aumojen (koeaumamat 1-3) lämpötilat nousivat merkittävästi.

Koeaumojen kääntöjen jälkeinen lämpötilan nousu oli huomattavin lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 2), mikä on selitettävissä lisääntyneellä happipitoisuudella ja sitä kautta hajotustoiminnan aktivoitumisella myös auman aikaisemmin hapettomissa sisäosissa. Ilmastettujen aumojen (koeaumamat 1 ja 3) käsittelylämpötilat nousivat myös aumojen kääntämisen jälkeen, mikä viittaisi siihen, ettei ilmastusputkien avulla johdettua happea saatu jaettua riittävän tasaisesti aumojen sisäosiin jolloin aumojen sekoittaminen tehosti kompostoitumista.

Beudin ym. (1999) tutkimusten mukaan lyhyellä termofiilisellä laboratorioskäsitelyllä (viisi päivää yli 50 °C) ei saavuteta merkittävää etua tasaiseen mesofiiliseen (23 °C) lämpötilakäsittelyyn verrattuna öljyhiilivetyjen hajoamisen suhteen. Paras öljyhiilivetyjen kokonaisreduktio saavutetaan kuitenkin käsittelemällä pilaantuneet maamassat riittävän pitkään (yli 30 päivää) termofiilisellä (50–70 °C) lämpötila-alueella. Termofiilisten bakteerien toiminta kompostissa on tehokkaampaa, koska entsyymitoiminta on tehokkainta lähellä lämpötilaa, jossa mesofiilit inaktivoituvat (Beudin ym. 1999). Edellä esitettyjen tutkimustulosten perusteella näyttäisi saavutettavalla ja ylläpidettävällä käsittelylämpötilalla olevan suora vaikutus saavutettavaan öljyhiilivetyjen jäännöspitoisuuteen. Termofiilisten lämpötilojen saavuttaminen näyttäisi kuitenkin Mustankorkealla suoritettujen tutkimusten mukaan vaativan runsasta tukiaineen käyttöä.

Mustankorkealla termofiilinen lämpötila-alue saavutettiin kaikissa tehostetuissa aumoissa (koeaumat 1-3), kun vastaavasti vertailuaumassa (koeauma 0) jäätettiin käsittelylämpötilojen osalta alle 30 °C. Painovoimaisesti ilmastettu auma (koeauma 1) saavutti termofiilisen lämpötila-alueen kesäkuun 2008 loppupuolella pysyen siellä aina syyskuun alkupäiviin asti. Auman lämpötila nousi uudestaan yli 50 °C marraskuun lopulla auman käännön jälkeen. Ilmastetun sekä lämpöeristetyn auman (koeauma 3) lämpötilat vastasivat painovoimaisesti ilmastetun auman (koeauma 1) lämpötilakehitystä.

Ilmastetussa sekä lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 3) termofiilinen lämpötila-alue saavutettiin heinäkuussa 2008 ja auman sisälämpötila kesti yli 50 °C:ssa aina syyskuun alkuun saakka. Koeauman 3 huippulämpötilat (noin 78 °C) mitattiin kuitenkin vasta joulukuussa 2008, marraskuussa tehdyn auman käännön jälkeen. Lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 2) termofiilinen lämpötilataso saavutettiin vasta auman käännön jälkeen marraskuussa 2008. Mikäli kompostoitumisprosessissa ei saavuteta yli 45 °C lämpötilaan, tulee varmistua, että lopputuotteen kannalta haluttu käsittelytulos saavutetaan mesofiilisella (20–40 °C) alueella tapahtuneen hajotustoiminnan ansiosta (Sarkkila ym. 2004).

Sanscartier ym. (2008) tutkimusten mukaan tehostetulla ilmanvaihdolla sekä koneellisella kostutuksella voidaan taata aumojen pysyminen aktiivisessa hajotustilassa myös talvikauden aikana. Siinä missä passiivisesti ilmastettu koeauma seurasi ulkoilman lämpötiloja ja jäätysi, säilyi tehostetusti ilmastetun koeauman sisälämpötila keskimäärin 6 °C ja vastaavasti kostutetun 12 °C pakkaajaksojen aikana. Aiemmat tutkimukset osoittavat myös, että käsittelylämpötilojen ollessa 5-10 °C välillä säilyy aktiivinen hajotustoiminta sekä haitta-aineiden saatavuus tasolla, joka ei ole kuitenkaan haitallinen psykrofiilisille (< 25 °C) mikro-organismeille (Coulon ym. 2005).

Sanscartier ym. (2008) havaitsivat, että talviolosuhteissa passiivisesti ilmastettu ja lämpöeristämätön aumarakenne jäätysi. Samalla myös auman mikrobiologinen hajotustoiminta laski merkittävästi. Mustankorkealla tehdyssä tutkimuksessa passiivisesti ilmastettu auma (koeauma 1) pysyi sulana ja auman sisälämpötila yli 50 °C:ssa myös talvikauden aikana (marras-tammikuussa) ulkolämpötilan ollessa alhaisimmillaan noin -20 °C. Vastaavasti vertailuauama (koeauma 0) jäätysi marraskuussa, jonka jälkeen auman kompostoitumisprosessin seuranta estyi.

Edellä esitettyjen tulosten nojalla voidaan päätellä, että Mustankorkealla painovoimaisesti ilmastetun auman (koeauma 1) päälle läjitetty 0,5 metrin paksuinen lietekompostikerros toimi tehokkaana lämmöneristeenä. Auman sisäosien lämpötila laski joulu- tammikuun aikana ainoastaan 10 °C, vaikka auman sisäosiin pääsi jatkuvasti kylmää ulkoilmaa ilmastusputkien kautta. Sisäosien lämpötilan voidaan olettaa pysyneen suotuisalla tasolla myös toisaalta aktiivisesti jatkuneen mikrobiologisen hajotustoiminnan ansiosta.

Kaikki neljä koeaumaa purettiin 16. tammikuuta 2009. Tuolloin marraskuussa 2008 tehdystä tehostettujen aumojen (koeaumat 1-3) käännoistä oli ehtinyt kulua noin kaksi kuukautta ja aumojen lämpötilat olivat lähteneet lievään laskuun, ollen kuitenkin edelleen 50–70 °C. Kompostoitavan massan ja ulkoilman lämpötilaerot voitiin havaita tällöin sankkana lämpöhöyryn muodostuksena aumojen purun yhteydessä (kuva 37). Vertailuauman (koeauma 0) jäätyneen pintakerroksen alla oli auman sisäosa kuitenkin pysynyt sulana. Vertailuauman sisälämpötilaksi mitattiin auman purkamisen yhteydessä 5,9 °C.



Kuva 37: Koeaumojen purkua Mustankorkealla tammikuussa 2009.

Reaaliaikaisten lämpötila -antureiden käyttö koeaumojen lämpötilojen seurannassa ei tuonut Mustankorkealla suoritettuun tutkimukseen merkittävää lisäarvoa. Lähinnä tiedonsiirto-ongelmista johtuen jatkuvaa lämpötiladataa saatiin aumoista vasta marraskuun 2008 aikana aumojen käännön jälkeen. Lämpötila-anturit osoittautuivat kuitenkin mittaustarkkuudeltaan luotettaviksi, verrattaessa niiden antamia tuloksia Mustankorkean manuaalisiin lämpötilamittauksiin. Koska pilaantuneessa maamassassa tapahtuvat lämpötilavaihtelut olivat kuitenkin varsin hitaita, ei lämpötiladatan tallentaminen tuntitasolla ollut mielekästä.

Lämpötila-antureiden käyttöä voisi perustella paremmin suuremmissa käsittelykeskuksissa, joissa käsittelyaumoja on enemmän käytössä yhtä aikaa. Tällöin aumakohtaiset lämpötilatiedot tallentuisivat suoraan seurantapäätteelle ja olisivat näin helposti hallittavissa sekä käsiteltävissä. Seurantapäätteelle tallentuneen lämpötiladatan avulla pystyttäisiin tällöin aumakohtaisesti havainnoimaan kompostoitumisen tilaa sekä tekemään päätöksiä mahdollisista tehostamistoimenpiteistä ja käsittelytarpeen jatkamisesta.

6.3. Kaasumaisten yhdisteiden kehitys koeaumoissa

Mustankorkealla kompostointikokeiden yhteydessä suoritettut aumojen huokoskaasumittaukset osoittivat, että aumojen luonnollista ilmakiertoa tulee tehostaa esimerkiksi aumoihin tehtävien rakenneratkaisuiden avulla riittävän happipitoisuuden (O_2) saavuttamiseksi myös aumojen sisäosissa. Painovoimaisesti ilmastettuun (koeauma 1) ja tehostetusti/painovoimaisesti ilmastettuun sekä lämpöeristettyyn aumaan (koeauma 3) kahteen eri rakennekerrokseen asennetut 110 millimetriset salaojaputket riittivät varmistamaan tarpeellisen hapensaannin myös kyseisten aumojen sisäosiin. Ilmastettujen aumojen happipitoisuudet vaihtelivat keskimäärin 15–20 % välillä.

Lämpöeristetyn auman (koeauma 2) luonnollinen kaasujenvaihto ympäröivän ilman kanssa hidastui aumaan asennetun routaeristematon johdosta. Kyseisessä aumassa saavutettu happipitoisuus (keskimäärin < 1 %) ei riittänyt ylläpitämään aerobista hajotustoimintaa, jonka seurauksena auman hajotustoiminta kehittyi anaerobiseksi. Anaerobinen hajotustila voitiin havaita kasvaneena metaanin muodostuksena. Lämpöeristetyn auman happiolosuhteet kohentuivat kuitenkin merkittävästi marraskuussa 2008 tehdyn auman käännön jälkeen.

Vertailuauaman (koeauma 0) happipitoisuudet ($< 7 \%$) jäivät myös selvästi ilmastettuja aumoja (koeaumamat 1 ja 3) alhaisemmalle tasolle. Tämä selittynee sillä, ettei käsiteltävän maa-aineksen sekaan kyseisessä aumassa lisätty tukiainetta eikä auman päälle asennettu sateelta ja valumavesiltä suojaavaa lietekompostikerrosta. Runsaiden sateiden seurauksena vertailuauama painui kasaan ja tiivistyi, minkä johdosta myös huokostilavuus auman sisäosissa pieneni.

Sanscartier ym. (2008) suorittamissa kenttätutkimuksissa koeaumojen keskimääräinen happipitoisuus oli $20,4 \pm 0,5 \%$. Alimmat mitatut happipitoisuudet tehostetusti ilmastetussa sekä kostutetussa koeaumassa olivat $17,6 \pm 0,1 \%$ ja passiivisesti ilmastetussa koeaumassa vastaavasti $13,8 \pm 0,1 \%$. Mustankorkealla suoritetuissa tutkimuksissa vastaaviin happipitoisuuksiin päästiin vain ilmastettujen aumojen (koeaumamat 1 ja 3) osalta. Vastaavasti vertailuauamassa ja lämpöeristetyssä aumassa happipitoisuudet jäivät huomattavasti Sanscartier ym. (2008) vertailututkimusta pienemmiksi.

Aumojen käynnön todettiin parantavan niiden happiolosuhteita. Käynnön yhteydessä kompostoituva maamassa pääsee kosketuksiin hapen kanssa ja samalla sen rakenne kuohkeutuu, mikä osaltaan edesauttaa kaasujen liikkumista. Tehostettujen aumojen (koeaumamat 1-3) marraskuussa 2008 suoritettujen käynnöjen jälkeen aumojen lämpötilat nousivat selvästi. Lämpötilojen nousu johtui todennäköisesti happitilanteen parantumisen vuoksi kasvaneesta mikrobiaktiivisuudesta. Aumojen käynnöjä seurannut parantunut mikrobiaktiivisuus voitiin havaita myös lämpöeristettyjen aumojen (koeaumamat 2 ja 3) kasvaneella hiilidioksidin tuotolla joulukuussa (8.12.2008) tehdyistä huokoskaasumittauksista.

Aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että käsiteltävissä massoissa syntyvä hiilidioksidin (CO_2) määrä on hyvä indikaattori kompostissa tapahtuvalle öljyhiilivetyjen hajoamiselle (Namkoong ym. 2002). Mustankorkealta saadut tutkimustulokset eivät ole tältä osin täysin yhteneväisiä Namkoong ym. (2002) tutkimustulosten kanssa. Mustankorkealla vertailuauamassa sekä painovoimaisesti ilmastetussa ja lämpöeristetyssä aumassa (koeaumamat 0-2) mitattiin korkeita hiilidioksidipitoisuuksia ($> 20 \%$), kun vastaavasti ilmastetussa sekä lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 3) hiilidioksidipitoisuus nousi yli 20% vain heti kompostointikokeen käynnistämisen jälkeen. Koeauaman 3 öljyhiilivetypitoisuus väheni kuitenkin määrällisesti tarkkailtavista koeaumoista eniten.

Tarkasteltaessa aumakohtaisia hiilidioksidipitoisuuksia Mustankorkealla, voidaan tehdä muutama mielenkiintoinen havainto. Vertailuauman (koeauma 0) hiilidioksidipitoisuudet (14–26 %) olivat suhteellisen korkeita, ottaen huomioon ettei kyseiseen aumaan lisätty orgaanista tukiainetta. Tämä havainto viittaisi siihen, että pilaantuneen maa-aineksen seassa oli lähtökohtaisesti tarpeeksi orgaanista ainesta, joka riitti ylläpitämään aumassa tapahtuvaa hajotustoimintaa. Lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 2) saavutettiin puolestaan koeaumoista korkeimmat hiilidioksidipitoisuudet (20,5–36,0 %), happipitoisuuksien ollessa vastaavasti tarkkailtavista aumoista alhaisimmat.

Ilmastetun sekä lämpöeristetyn auman (koeauma 3) hiilidioksidipitoisuuksia tarkasteltaessa voidaan selvästi havaita, kuinka auman CO₂-pitoisuudet aikavälillä 1.8.–8.10.2008 olivat huomattavasti 25.7. ja 8.12.2008 tehtyjä mittauksia alhaisemmat. Tästä voidaan päätellä, että 25.7.–8.10.2008 välillä toiminnassa ollut tehostettu ilmastus korvasi tehokkaasti aumassa syntyneen hiilidioksidin ilmastusputkissa kiertäneellä ilmalla. Koeauman 3 sisälämpötilat nousivat vain hetkellisesti imupumpun käynnistämisen jälkeen. Auman happitaso pysyi korkealla (20 %) pumpun ollessa päällä ja osin tästä johtuen auman hiilidioksiditaso (< 5 %) oli vastaavasti alhainen. Mustankorkealla suoritettujen huokoskaasumittaukset osoittivatkin, että aumojen happi- ja hiilidioksidipitoisuudet ovat lähes kääntäen verrannollisessa suhteessa toisiinsa. Korkea happipitoisuus aumassa johtaa alhaiseen hiilidioksidipitoisuuteen ja päinvastoin.

Jos vielä tarkastellaan öljyhiilivetyjen hajoamista Mustankorkean koeaumoissa, havaitaan, että ilmastetun sekä lämpöeristetyn auman (koeauma 3) öljyhiilivetyreduktio oli määrällisesti (yli 4000 mg/kg kahdeksan käsittelykuukauden aikana) selvästi tutkimuksessa mukana olleista koeaumoista suurin. Tämän tuloksen nojalla voidaan päätellä, että auman ilmakierron tehostamisella saattaisi olla vaikutusta etenkin kevyempien öljyhiilivetyjen hajoamisnopeuteen.

Tehostetun ilmastuksen käyttö voisi tulla kyseeseen etenkin kompostoinnin alkuvaiheessa, jolloin mikrobien hapen tarve on suurin. Käytettäessä koneellista ilmastusta, tulee kuitenkin varmistua riittävän kosteuspitoisuuden säilymisestä aumassa. Tehostetun ilmastuksen vaikutuksia öljyhiilivetyjen hajoamisnopeuteen on Mustankorkean tapauksessa kuitenkin vaikea arvioida. Näin ollen tehostetun ilmastuksen vaikutuksia kompostoitumisen ja öljyhiilivetyjen hajoamisnopeuteen tulisikin jatkossa tutkia tarkemmin.

Mustankorkealla suoritettujen tutkimusten mukaan passiiviseen ilmakiertoon perustuva aumaratkaisu (koeauma 1) toimi varsin hyvin taaten riittävästi happea myös auman sisäosien mikrobien käyttöön. Painovoimaisesti toteutettu ilmakiertoputkisto oli lisäksi toteutukseltaan varsin yksinkertainen eikä se vaatinut toimiakseen sähköisiä laitteita, kuten imupumppua tai puhallinta.

Metaanin (CH₄) muodostuminen kompostoitavassa aineksessa on yleensä merkki anaerobisesta hajoamisesta eli mätänemisestä (Jørgensen ym. 2000). Mustankorkealla suoritetuissa kompostointikokeissa merkittävää metaanin muodostusta voitiin havaita vain lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 2). Auman metaanipitoisuudet vaihtelivat välillä 0,9–12,2 %, kun muissa koeaumoissa jäätettiin metaanipitoisuuksien osalta pääasiassa alle 1 %. Yhtä aikainen metaanin ja hiilidioksidin tuotto lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 2) viittasi kuitenkin siihen, että aumassa tapahtui aktiivista anaerobista hajotustoimintaa.

Lämpöeristetyn auman (koeauma 2) huokoskaasumittaukset osoittivat, että vaikka kaasujenvaihto aumassa ei ollutkaan muiden koeaumojen tasolla, täytti se silti auman rakenteelle asetetut pääperiaatteet. Hiilidioksidipitoisuudet auman laelta mitattuna olivat korkeampia, kuin auman reunoilta mitatut vastaavat arvot. Kyseinen havainto viittaa ns. savupiippuefektin esiintymiseen. Auman alaosissa hiilidioksidipitoisuudet vaihtelivat välillä 8,2–21,0 % ja vastaavasti auman laella välillä 20,5–32,0 %.

Verrattaessa lämpöeristetyn auman (koeauma 2) eri pisteistä mitattuja happipitoisuuksia keskenään, voidaan havaita, että happipitoisuudet auman alaosissa olivat auman laelta mitattuja vastaavia arvoja korkeampia. Auman alaosissa happipitoisuudet vaihtelivat välillä 0,9–15,3 %, kun vaihteluväli auman laella oli 0,6–16,3 % painottuen 1 % tuntumaan. Vaikka mitatut happipitoisuudet ja niiden keskinäiset vaihteluvälit olivatkin suhteellisen pieniä, voidaan auman luonnollisen ilmanvaihdon todeta toimineen aumarakenteen tavoiteltujen periaatteiden mukaisesti. Tulokset lämpöeristetyssä aumasta osoittavat, että huokoskaasut pääsevät kulkeutumaan aumassa alhaalta ylöspäin. Tällöin auman rakenteen ei voida katsoa olevan kaasujen kulkeutumiselle liian tiivis.

Aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että haihtuminen on merkittävä poistumisreitti ainoastaan vain kaikkein keveimmille öljyhiilivedyille (< C₁₀, *volatile organic compounds*, VOC). Haihtumiseen vaikuttavat ennen kaikkea hiilivetyketjun pituuden lisäksi öljykontaminaatiosta kulunut aika, kompostin ilmanvaihto sekä orgaanisen aineksen määrä kompostissa. Vastaavasti raskaimpien öljyhiilivetyjakeiden osalta biohajoamisen on todettu olevan merkittävin poistumisreitti (Namkoong ym. 20002).

Mustankorkealla tehtyjen PID -mittausten mukaan koeaumojen huokoskaasut eivät sisältäneet VOC – yhdisteitä, vaan aumoista mitatut VOC -pitoisuudet vastasivat määritettyjä taustapitoisuuksia (0,00–0,05 ppm). Haihtuvimmat yhdisteet ovat todennäköisesti poistuneet pilaantuneesta maa-aineksesta jo puhdistuskohteessa ylöskaiivun yhteydessä. Koska Mustankorkealla suoritetuissa huokoskaasumittauksissa ei havaittu kevyempiä öljyhiilivetyjä, voidaan tämän tutkimuksen yhteydessä saavutettujen öljyhiilivetyreduktioiden olettaa johtuvan pääasiassa mikrobiologisesta hajotustoiminnasta.

6.4. Kuiva-ainepitoisuus, pH sekä orgaaninen hiili (TOC)

Kahdeksan kuukautta kestäneen käsittelyjakson aikana aumojen kuiva-ainepitoisuudet laskivat kaikissa kolmessa koeaumassa (1-3), joihin oli lisätty orgaanista tukiaainesta. Merkillepantavaa on, että kyseisten koeaumojen tammikuussa 2009 viimeisten maanäytemääritysten yhteydessä analysoidut kuiva-ainepitoisuudet olivat reilut 10 % kesäkuussa 2008 määritettyjä lähtöpitoisuuksia pienempiä. Tämä selittyy osin sillä, että joului- ja tammikuussa määritetyt osanäytteet kerättiin näytelapiolla aumojen leikkauksista koko auman korkeudelta. Aumojen alaosissa sijaitsevat todennäköisesti kosteampaa kompostia, kuin 1,5–2,0 metrin syvyydellä, josta aiemmat näytteet otettiin näytekairaa käyttäen. Lisäksi on oletettava, että koeaumoihin 1-3 satanut vesi on osittain päässyt suotautumaan auman sisäosiin, jossa oleva orgaaninen aine on sitonut kosteuden. Myös orgaanisen aineksen hajoamisesta peräisin oleva kosteus on voinut päästä kertymään aumojen sisäosiin korkeista kompostointilämpötiloista huolimatta.

Vertailuaumassa (koeauma 0), johon ei lisätty tukiaineeksi orgaanista puhdistamolietekompostia, kuiva-ainepitoisuus pysyi lähes muuttumattomana (80–85 %) koko käsittelyjakson ajan. On oletettavaa, että pelkää pilaantunutta maa-ainesta sisältänyt kompostiauma päästi lähes kaikki sadevedet läpi sitomatta kosteutta juuri lainkaan lähtökohtaisesti hyvin vähän orgaanista ainesta sisältävään maa-ainekseen.

Sarkkila ym. (2004) mukaan kompostoinnin alkuvaiheessa kompostimassan pH – tason tulisi sijoittua 6,5–8,0 välille. Sanscartier ym. (2008) suorittamissa kompostointikokeissa käsiteltävän maa-aineksen pH oli käsittelyn alkaessa 8,5–8,6 ja vastaavasti kymmenen käsittelykuukauden jälkeen 7,7–8,1. Alin hetkellinen pH (6,9) mitattiin kostutetusta koeaumasta.

Mustankorkealla suoritetuissa tutkimuksissa koeaumojen pH – tasot vaihtelivat 6,5–7,5 välillä kompostoinnin alkaessa kesäkuussa 2008. Aumojen pH-tasot sijoittuvat näin Sarkkilan ym. (2004) mainitsemaalle pH-alueelle. Koeaumoihin 1-3, joihin oli lisätty tukiaineeksi orgaanista lietekompostia, pH – tasot olivat lähtötilanteessa vertailuaumaa (koeauma 0) noin 1,0 yksikköä pienempiä. Tämä on selitettävissä orgaanisen tukiaineen humuspitoisuudella, joka on luontaisesti kivennäismaata happamampaa.

Tehostettujen aumojen (koeaumat 1-3) pH-tasot noudattelivat kompostoitumisproessin yleistä pH-kehitystä (kuva 3, sivu 20) seuraten viiveellä aumojen lämpötilamuutoksia. pH-tasojen lasku koeaumoissa 1-3 tapahtui noin kolmen käsittelykuukauden jälkeen, kun ensimmäinen lämpötilahuippu aumoissa oli saavutettu. Tämän jälkeen kyseisten aumojen pH- tasot laskivat tasaisesti, kunnes kääntyivät taas hitaaseen nousuun marraskuussa 2008 tehtyjen aumojen kääntöoperaatioiden jälkeen.

Tehostettujen aumojen (koeaumat 1-3) pH-tasojen vaihteluiden voidaan katsoa olleen melko maltillista, sillä aumojen pH-tasot vaihtelivat pääasiassa 6,0–6,5 välillä. Vertailuaumassa (koeauma 0) vaihteluväli oli hieman suurempi, 6,0–7,6. Pääsääntöisesti kaikkien Mustankorkean koeaumojen pH-tasojen voidaan katsoa pysyneen kompostoitumisen kannalta suotuisella pH-alueella (5,5–8,0; Sundberg ym. 2008) koko kahdeksan kuukautta kestäneen seurannan ajan. Mustankorkealla aumojen pH-tasot olivat Sanscartier ym. (2008) suoritettuun vertailututkimukseen verrattuna hieman alhaisempia, mikä on todennäköisesti selitettävissä Mustankorkealla käytetyn orgaanisen tukiaineen (puhdistamolietekomposti) määrällä ja laadulla.

Mustankorkealla koeaumojen orgaanisen hiilen määrää seurattiin tutkimalla maanäytteiden TOC – pitoisuudet laboratoriossa tehtyjen öljyhiilivety määritysten yhteydessä. Koeaumojen TOC – pitoisuudet olivat kesäkuussa määritetyissä maanäytteissä välillä 2-6 % kuiva-aineesta. Vertailuauman (koeauma 0) TOC – pitoisuus pysyi lähes muuttumattomana koko seurantajakson ajan. Tammikuussa 2009 tehdyn loppumäärityksen mukaan vertailuauman TOC -pitoisuus oli noin 2 % kuiva-aineesta.

Kaikkien kolmen tehostetun koeauman (1-3) TOC – pitoisuudet noudattelivat hienoista kasvua aina lokakuuhun 2008 saakka. Loka-marraskuun aikana kyseisten aumojen TOC – pitoisuudet laskivat hieman, kunnes ne kääntyivät jyrkkään nousuun marraskuussa 2008 tehtyjen aumojen kääntöjen jälkeen. TOC – pitoisuuksien nopea nousu marraskuun jälkeen selittyy todennäköisesti sillä, että aumojen kääntöjen seurauksena suurikokoinen orgaanisen aines hajosi pienemmiksi partikkeleiksi tehostuneen kompostoitumisprosessin seurauksena. Näin ollen pienemmiksi partikkeleiksi hajonnutta orgaanista ainesta kertyi myös todennäköisesti enemmän analysoitaviin maanäytteisiin.

Myös marraskuussa tehdyllä näytteenottomenetelmien muutoksella kairanäytteenotosta aumojen leikkauksista tapahtuneisiin näytteenottoihin saattoi olla vaikutusta analysoituihin TOC – pitoisuuksiin. Aumojen leikkauksista otetuissa näytteissä voitiin näytteenotto ulottaa aina auman alimpiin rakennekerroksiin asti. On oletettavaa, että pienemmiksi partikkeleiksi hajonnut orgaaninen aines on vajonnut auman pohjakerroksiin kosteuden ja suotovesien mukana, jolloin sitä on kertynyt myös enemmän analysoituihin maanäytteisiin.

6.5. Käsittelyprosessin seuranta ja hallinta

Pilaantuneen maa-aines on hyvin usein heterogeenista ja koostumukseltaan vaihtelevaa. Kompostoitavalla maalajilla ja sen sisältämällä orgaanisen aineksen määrällä on suuri vaikutus haitta-aineiden kompostoitavuuteen. Käytettäessä pilaantuneen maa-aineen seassa tukiainetta, esimerkiksi lietekompostia, saattaa tukiaineen heikko sekoittuminen heterogeeniseen maa-ainekseen sekä seulomattoman tukiaineen koostumuksen vaihtelu aiheuttaa ongelmia kompostoitumisprosessissa. Kompostoitessa puolestaan hienojakeisia maalajeja, kuten savimaita, tulee kompostin sisäosien riittävästä hapensaannista varmistua lisäämällä siihen huokoista tukiainetta, parantamalla auman ilmastusta tai kääntämällä aumat riittävän usein. Mustankorkealla kompostoitu öljyhiilivedyillä pilaantunut maa-aines oli laadultaan varsin heterogeenista, sisältäen pääasiassa moreenia, savea ja hiukan orgaanista maa-ainesta.

Mustankorkealla koeaumoissa 1-3 käytettiin pilaantuneen maa-aineksen seassa tukiaineena ja ravinnelisänä kompostointilaitoksessa käsiteltyä puhdistamolietettä. Tutkimuksen aikana saatujen kokemusten sekä tutkimustulosten perusteella voidaan Mustankorkealla käytetyn puhdistamolietekompostin katsoa sisältäneen hajottajamikrobien toiminnan kannalta tärkeitä ravinteita, hivenaineita, epäorgaanisia mineraaleja sekä hajotustoiminnan vaatimaa vapaata hiiltä. Ravinnepitoisen lietekompostin, joka todennäköisesti sisälsi myös aktiivisen mikrobipopulaation, voidaan yhdessä riittävän happipitoisuuden kanssa katsoa aiheuttaneen merkittävän lämpötilan nousun koeaumoissa painovoimaisesti ilmastetussa (koeauma 1) ja tehostetusti ilmastetussa sekä lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 3).

Orgaanisen tukiaineen puuttumisen voidaan katsoa rajoittaneen merkittävästi hajotustoimintaa ja sitä kautta lämpötilan nousua vertailuaumassa (koeauma 0). Vastaavasti aerobisen hajotustoiminnan kannalta oleellisen vapaan hapen vähäisen määrän voidaan katsoa olleen tärkein hajotustoimintaa rajoittanut tekijä lämpöeristetyssä aumassa (koeauma 2).

Tutkimuksen yhteydessä aumojen hajotusolosuhteita seurattiin pääasiassa lämpötila- ja huokoskaasumittauksin. Aumojen sisälämpötilojen mittaaminen osoittautui luotettavaksi ja käyttökelpoiseksi menetelmäksi kompostointiprosessin seurannassa. Koska lämpötilan nousu kuuluu olennaisesti osaksi kompostoitumisprosessia, jonkinlainen lämpötilantarkkailu on yleensä aina välttämätöntä järjestää (Van Gestel ym. 2003).

Lämpötilan avulla pystytään tekemään johtopäätöksiä auman sisällä vallitsevista hajotusolosuhteista. Usein muutokset auman sisälämpötilassa ovat merkki mikrobitoiminnan muutoksista. Kompostointiprosessin aikana lämpötilan nopea nousu indikoi mikrobitoiminnan aktivoitumista ja se on usein seurausta auman happiolosuhteiden muutoksesta. Mustankorkealla kyseinen havainto voitiin tehdä lämpöeristetyn auman (koeauma 2) osalta 8.10.2008 tehdyn auman käännön jälkeen. Auman hapettomien sisäosien päästessä kosketuksiin hapen kanssa auman uudelleen kokoamisen jälkeen sen sisälämpötila nousi noin 20 °C korkeammalle tasolle, kuin mitä se oli ollut ennen auman kääntämistä. Aumakompostoinnissa käsiteltävän massan lämpötilat laskevat yleensä melko hitaasti. Lämpötilan lasku on usein merkki auman happipitoisuuden laskusta, mikä voidaan varmistaa huokoskaasumittausten avulla. Mustankorkealla tehdyt lämpötila- ja huokoskaasumittaukset tukivat hyvin toisiaan.

Kompostoitumisprosessin hallittavuuden varmistamiseksi aumojen kuiva-aine- ja TOC -pitoisuuden sekä pH:n määrittäminen on suositeltavaa. Kuiva-ainepitoisuusanalyysi tehdään usein näytekohtaisesti yhdessä öljyhiilivety määritysten yhteydessä, joten sen teettäminen ei näin ollen aiheuta erillisiä lisäkustannuksia. Kuiva-ainemääritysten perusteella voidaan tehdä päätöksiä auman kostutustarpeen ja tukiainelisäysten suhteen. Usein myös pelkkä silmämääräinen tai ns. nyrkkitesti riittää kertomaan auman kosteustasosta.

TOC – pitoisuuden avulla voidaan selvittää kompostoitavan maa-aineksen orgaanisen hiilen määrä. TOC – pitoisuus on varsin hyvä indikaattori määritettäessä kompostin yleistä tilaa, sillä orgaaninen hiili toimii ravinnelähteenä useille hajottajamikrobeille. Kompostimassaan voidaan tarvittaessa lisätä orgaanista ainesta, kuten lietettä tai lantaa, esimerkiksi kompostin käynnön yhteydessä. Samalla käsiteltävään massaan siirtyy myös tärkeitä ravinteita fosforin ja typen muodossa.

Käsiteltävän maa-aineksen pH:ta on hyvä tarkkailla, jotta se saadaan säilymään mikrobitoiminnan kannalta optimaalisella tasolla (noin 5,5 – 8,0) koko käsittelyjakson ajan. pH-seuranta voidaan järjestää kenttäolosuhteisiin soveltuvalla mittarilla tai se voidaan määrittää edullisesti öljyhiilivety näytteiden analysoinnin yhteydessä laboratoriossa.

Kompostointiprosessin ympäristövaikutusten voidaan katsoa olevan melko vähäisiä, mikäli kompostointi suoritetaan vesitiiviillä kompostointikentällä ja mahdollisesti aumoista vapautuvat huokoskaasupäästöt minimoidaan peittämällä tai käsittelemällä ne asianmukaisesti. Mustankorkealla tehdyt kompostointikokeet suoritettiin hallitusti asianmukaisella kompostointikentällä. Kentällä syntyvät suoto- ja valumavedet johdettiin keskitetysti öljyn- ja hiekanerotinkaivojen kautta viemäriverkostoon. Tutkimusta varten rakennetut koeaumot 1-3 peitettiin lietekompostilla mahdollisten haihtuvien öljyhiilivety päästöjen (VOC) minimoimiseksi. Aumojen pinnoilta suoritettujen VOC -mittausten mukaan määritetyt taustapitoisuudet eivät ylittyneet yhdenkään koeauman osalta.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

7.1. Tutkimustavoitteiden toteutuminen

Mustankorkealla suoritettujen kompostointikokeiden tuloksena kaikkien koeaumojen öljyhiilivetypitoisuudet laskivat merkittävästi kahdeksan kuukautta kestäneen seurantajakson aikana. Koeauman 0 öljyhiilivetypitoisuus laski 1840 mg/kg:sta 640 mg/kg:aan, koeauman 1 2685 mg/kg:sta 1325 mg/kg:aan, koeauman 2 3385 mg/kg:sta 2000 mg/kg:aan ja koeauman 3 5725 mg/kg:sta 2350 mg/kg:aan. Aumakohtaiset prosentuaaliset öljyhiilivetyreduktiot olivat vastaavasti 67 % (koeaumat 0 ja 1), 58 % (koeauma 2) ja 75 % (koeauma 3) määritettyinä tarkkailujakson ajalta tehtyjen öljyhiilivetyanalyyysien keskiarvoista. Tämän tutkimuksen yhteydessä saavutetut öljyhiilivetyreduktiot ovat yhteneviä aiemmin suoritettujen kenttämittakaavan kompostointitutkimusten kanssa (Sanscartier ym. 2008; Jörgensen ym. 2000). Mustankorkean koeaumojen öljyhiilivetyjen jäännöspitoisuudet alittivat kaatopaikkasijoittamiselle asetetun 2500 mg/kg ohjearvopitoisuuden.

Tämän tutkimuksen yhteydessä selvitettiin orgaanisen tukiaineen (esikäsitelty puhdistamolietekomposti) käytön vaikutuksia öljyhiilivedyillä pilaantuneen maa-aineksen kompostoitavuuteen. Saatujen tutkimustulosten perusteella, orgaanisen tukiaineen lisäämisellä voidaan katsoa olleen suora vaikutus kompostointiprosessissa saavutettuihin käsittelylämpötiloihin. Sekä Mustankorkealla suoritettujen että aiempien tutkimusten perusteella (Beaudin 1999; Jörgensen ym. 2000; Namkoong ym. 2002; Van Gestel ym. 2003) öljyhiilivetyjen kompostoituminen näyttäisi olevan tehokkainta termofiilisellä lämpötila-alueella (40–70 °C).

Toiseksi merkittäväksi tekijäksi kompostoitumisen onnistumisen kannalta tämän tutkimuksen yhteydessä osoittautui riittävän happipitoisuuden varmistaminen myös aumojen sisäosiin. Kahteen koeaumaan asennettu ilmakiertoa parantava putkitus osoittautui tässä suhteessa onnistuneeksi ratkaisuksi. Koneellisesta ilmanvaihdosta saatavaa lisäetu passiiviseen ilmanvaihtoon nähden ei tämän tutkimuksen yhteydessä pystytty todistamaan. Orgaanista hiiltä sisältävän ja elinvoimaisen mikrobipopulaation omaavan tukiaineen käytön, tehokkaan ilmankierron sekä riittävän suuren öljyhiilivetyjen lähtöpitoisuuden ja sitä kautta saavutettavan biosaatavuuden voidaan katsoa olleen merkittävimmät tekijät öljyhiilivetyjen nopealle ja tehokkaalle hajoamiselle.

Kahteen koeaumaan asennettujen erillisten lämpöeristeiden (routamatto) avulla ei saavutettu merkittävää lisäetua kompostoitumisen kannalta. Kolmen koeauman pinnalle läjitetty lietekompostilietekerros osoittautui puolestaan toimivaksi rakenneratkaisuksi useastakin eri syystä. Ensiksi se toimi lämpöä eristävä kerroksena auman ja ulkoilman välillä estämättä kuitenkaan auman luonnollista kaasujenvaihtoa. Toiseksi se toimi vettä pidättävänä rakenteena estäen aumojen painumista ja tiivistymistä. Lisäksi aktiivisen kompostikerroksen voidaan olettaa toimivan myös tehokkaana biosuotimena aumoista mahdollisesti haihtuville orgaanisille kaasumaisille yhdisteille.

Mustankorkealta saatujen kokemusten perusteella öljyhiilivetyanalyytit on hyvä suorittaa asianmukaisessa maa-aineslaboratoriossa. Etenkin orgaanista materiaalia sisältäville maanäytteille ei markkinoilla vielä löydy luotettavaa kenttätetauslaitteistoa. Öljyhiilivetyanalyytien ohella voidaan laboratoriossa samasta maanäytteestä analysoida luotettavasti myös muita kompostoinnin tilaa kuvaavia parametreja, kuten näytteen kuivaainepitoisuus sekä pH. Mikäli kompostoinnista aiheutuvia ympäristövaikutuksia halutaan seurata tarkemmin, tulee edellä esitettyjen analyyseihin lisäksi kerätä alueellisia sadantatietoja sekä suorittaa aumojen suotovesianalyysejä aika ajoin.

Tämän tutkimuksen yhteydessä suoritettut lämpötila- ja huokoskaasumittaukset osoittautuivat luotettaviksi ja helpoiksi menetelmiksi toteuttaa seurattaessa kompostoinnin etenemistä. Lämpötila- ja kaasumittaukset on hyvä suorittaa vähintään kahden viikon välein kompostoinnin alkuvaiheessa, kahden – kolmen ensimmäisen käsittelykuukauden aikana. Tämän jälkeen mittaustiheyttä voidaan tarvittaessa pidentää. Lämpötila- ja huokoskaasuanalyytien perusteella voidaan tehdä päätöksiä kompostoinnin tehostamistoimista, kuten aumojen käynnön tarpeesta. Vaikka tämän työn yhteydessä suoritettujen PID – mittausten perusteella ei Mustankorkean koeaumoista havaittukaan taustapitoisuudet ylittäviä määriä haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, voidaan VOC – pitoisuuksien seuranta katsoa tarpeelliseksi ainakin aumojen rakennusvaiheessa sekä kompostoinnin ensikuukausina.

Reaaliaikaisten lämpöantureiden käyttö kompostoinnin monitoroinnissa ei tuonut Mustankorkealla suoritettuihin tutkimuksiin merkittävää lisäarvoa. Tämä johtui osin siitä, että käytettyjen laitteiden toiminnassa esiintyi ajoittaisia ongelmia. Lisäksi antureille määritetty mittaustiheys osoittautui aumoissa tapahtuviin lämpötilanmuutoksiin nähden liian nopeaksi. Myös Mustankorkean kompostointikokeen voidaan katsoa olleen laajuudeltaan ja aumojen määrän suhteen niin suppea, että sen seuranta voitiin järjestää manuaaliseen tarkkailuun perustuen.

Reaaliaikaisten lämpötila -antureiden käyttöä voidaan jatkossa kuitenkin suositella isommissa kompostointiyksiköissä, joissa lämpötilojen mittaaminen manuaalisesti vaatisi kohtuuttoman paljon miestyövoimaa. Lisäksi antureiden käyttö on perusteltua silloin, kun kompostointikäsitteilyn yhteydessä halutaan varmistaa, että prosessin aikana saavutetaan kaikki tarvittavat lämpötila-alueet. Tällöin antureiden lähettämän mittausdatan avulla voidaan tehdä päätöksiä mm. aumojen kääntämisen ajankohdasta tai muiden tehostamistoimenpiteiden tarpeellisuudesta. Mustankorkealta saatujen kokemusten pohjalta, voidaan kahta anturia per auma pitää riittävänä määränä.

Mustankorkealla kompostointikokeesta aiheutuneet kustannukset jäivät varsin maltillisiksi. Tämä johtui suurimmaksi osaksi siitä, että hankkeessa pystyttiin hyödyntämään jätteenkäsittelykeskuksen omia materiaaleja sekä resursseja. Suurimmat kustannuserät aiheutuivat tehdyistä laboratorioanalyysistä sekä putki- ja lämpöeristemateriaalihankinnoista. Tässä yhteydessä kustannuksiksi ei ole laskettu mies- ja konetyötunteja eikä käytettyä energiaa, kuten imupumpun vaatimaa sähköä.

7.2. Toimintamalli öljyhiilivedyillä pilaantuneen maa-aineksen kompostointiin

Mustankorkealta saatujen tutkimustulosten sekä tutkimusten yhteydessä hankittujen käytännön kokemusten pohjalta laadittiin pilaantuneiden maa-ainesten kompostoinnille toimintamalli. Toimintamallilla tarkoitetaan tässä yhteydessä pilaantuneiden maamassojen kompostointia halliten hajotusolosuhteet ja mahdollisesti syntyvät päästöt sekä mahdollistaen pilaantuneiden maiden tehokkaan kompostointikäsitteilyn vuodenajasta riippumatta.

Painovoimaisesti ilmastettu auma (koeauma 1) osoittautui tarkkailujakson aikana rakenteeltaan toimivammaksi aumaksi. Auman käyttökustannukset olivat kohtuulliset ja yksinkertainen aumarakenne oli helppo sekä nopea toteuttaa kahden työmiehen ja yhden pyöräkuormaajan avulla. Painovoimaisesti toimineet ilmastusputket takasivat happipitoiset hajotusolosuhteet myös auman sisäosiin ja pilaantuneen maa-aineksen sekaan sekoitettu (seossuhde 2:1) kompostointilaitoksessa käsitelty puhdistamoliete sisälsi todennäköisesti elinvoimaisen mikrobipopulaation, jolloin hajotustoiminta käynnistyi heti auman rakentamisen jälkeen. Auman pinnalle kasattu 0,5 metrin paksuinen lietekompostikerros toimi riittävänä lämmöneristeenä myös talviolosuhteissa.

Verrattaessa ilmastettujen aumojen (koeaumat 1 ja 3) toimintaa, voidaan todeta, ettei tämän tutkimuksen yhteydessä tehostetulla ilmastuksella saavutettu merkittävää etua painovoimaiseen ilmastukseen verrattuna. Tehostetun ilmastuksen tuoma etu hajotustoiminnan nopeuteen voidaan katsoa olevan varsin lyhytaikainen ja sen käyttöä voidaankin perustella vain hetkellisesti (1-2 viikkoa) hajotustoiminnan aktiivisimpana ajankohtana, jolloin myös mikrobien hapentarve on suurin. Tehostettuun ilmastukseen käytettävät laitteet vaativat sähköä toimiakseen ja lisäävät näin aiheutuvia käyttö- ja käsittelykustannuksia. Painovoimaisesti toimiva ilmastus riitti takaamaan hajotustoiminnan kannalta edulliset happiolosuhteet koeauman 1 sisäosiin koko tarkkailujakson ajan.

Koeaumojen 1-3 pinnalle kasattu 0,5 metrin paksuinen puhdistamolietekompostikerros osoittautui varsin monitoimiseksi rakenteeksi. Painovoimaisesti ilmastetussa aumassa (koeauma 1), johon ei asennettu erillistä lämpöeristettä, lietekompostikerros toimi huokoisena lämpöeristeenä pitäen auman sisäosat sulana myös käsittelyjakson talvikuukausina (marras-tammikuu). Huokoisuutensa ansiosta se myös mahdollisti luonnollisen kaasujen vaihdon auman sekä ympäröivän ilman välillä. Lisäksi aumojen orgaaninen pintakerros imi itseensä tehokkaasti sadevettä estäen sen suotautumista aumojen läpi liuottaen näin haitta-aineita ympäristöön. Puhdistamolietekompostin sisältäessä aktiivisen mikrobipopulaation, voidaan sen myös katsoa toimivan eräänlaisena aktiivisuodattimena orgaanisille haihtuville kaasuyhdisteille (VOC -päästöt). Edellä esitettyjen havaintojen perusteella voidaan lietekompostikerroksen käyttöä käsittelyaumojen pinnalla suositella käytettäväksi myös jatkossa. Mikäli kompostointikäsittely suoritetaan kuitenkin pääasiassa kesäaikana, voidaan lietekompostikerroksesta tehdä ohuempi, noin 0,2–0,3 metriä paksu.

Koeaumoille 1 ja 3 oli yhtenäistä aumojen sisäosien ilmakierron parantaminen putkituksen avulla sekä lietekompostin sekoittaminen osaksi käsiteltävää maamassaa. Kyseisissä aumoissa aumojen sisälämpötilat nousivat varsin korkeiksi, jopa yli 70 °C:een käsittelyjakson aikana. Koska voidaan olettaa, että merkittävin osa syntyneestä lämpöenergiasta oli peräisin orgaanisen aineksen hajoamisesta, voidaan jatkossa aumoissa käytettävän lietekompostin seososuutta tarvittaessa pienentää.

Pilaantuneen maamassan ja käytettävän tukiaineen, esimerkiksi lietekompostin, seossuhteet tuleekin valita pilaantuneen maamassan orgaanisen aineksen lähtöpitoisuuden mukaan. Mikäli käsiteltävä maa-aines sisältää lähtökohtaisesti runsaasti orgaanista ainesta ja se on koostumukseltaan huokoista, tulee lietekompostin ja ilmastusputkien tarve harkita aina tapauskohtaisesti. Jos orgaanista tukiainetta päätetään kuitenkin lisätä pilaantuneen maa-aineksen sekaan, tulee massojen seossuhde valita siten, että käsittelyn aikana saavutetaan haluttu käsittelylämpötila sekä kosteuspitoisuus. Mikäli aumojen ilmankiertoa ei tehosteta putkituksin, tulee aumat kääntää useammin. Kääntötiheyttä voidaan säädellä aumojen kaasu- ja lämpötilaseurannasta saatuja tuloksia seuraamalla.

Manuaaliset lämpötila- sekä kaasumittaukset osoittautuivat luotettaviksi ja kustannuksiltaan edullisiksi analyysimenetelmiksi kompostoinnin tilan seurannassa. Lämpötila- sekä huokoskaasuanalyysijä (O_2 , CO_2 sekä CH_4) tuleekin käyttää pääasiallisena kompostoinnin seurantaindikaattoreina myös jatkossa. Kenttäkäyttöinen öljyhiilivetyanalyysimenetelmä (PetroFLAG™) ei vastaavasti osoittautunut kovinkaan luotettavaksi analyysimenetelmäksi orgaanista ainesta sisältävien maanäytteiden analysoinnissa. Lisäksi, koska yksittäisten kenttä- ja laboratorioanalyysien kustannusero ei ole merkittävä, on suositeltavaa suorittaa öljyhiilivety määritykset myös jatkossa sertifioidussa laboratoriossa. Aumakohtaiset öljyhiilivety näytteet, joiden yhteydessä analysoidaan myös näytteiden pH sekä kuiva-ainepitoisuudet, on hyvä määrittää vähintään kahden kuukauden välein.

Öljyhiilivedyillä pilaantuneiden maamassojen käsittely on jatkossakin hyvä suorittaa Mustankorkealla kompostoimalla massat aumoissa. Tässä luvussa esitetyt näkökohdat huomioon ottaen, aumakompostoinnin voidaan katsoa olevan kustannustehokas menetelmä öljy-yhdisteillä pilaantuneiden maa-ainesarjen käsittelyyn myös jatkossa. Kompostoinnin tehostaminen ei vaadi suuria taloudellisia panostuksia, sillä aumoissa voidaan hyödyntää pääasiassa jätteenkäsittelykeskuksen omia materiaaleja, kuten puuhaketta ja esikompostoitua puhdistamolietettä.

7.3. Jatkotutkimus

Mustankorkealla suoritetuissa kompostointikokeissa saatiin arvokasta tietoa kompostiaumojen rakenteiden sekä orgaanisen tukiainelisäyksen vaikutuksista öljyhiilivetyjen hajoamiseen. Jotta pilaantuneiden maa-ainesten kompostointia voidaan edelleen kehittää jatkossa, on aiheeseen liittyvää lisätutkimus tarpeen.

Eräs mielenkiintoinen jatkotutkimuskohde voisi käsitellä pilaantuneiden maa-massojen sekä seosaineena käytettävien orgaanisten massojen seossuhteiden optimointia. Mustankorkealla suoritetuissa tutkimuksissa pilaantuneen maa-aineksen ja esikäsitellyn lietekompostin seossuhteena käytettiin 2:1. Kuten jo aiemmin tämän työn yhteydessä on todettu, nousivat kompostointilämpötilat Mustankorkean koeaumoissa lähes 80 °C:een. Suurin syy lämpötilojen nousulle lienee ollut tukiaineena käytetyn lietekompostin suhteellisen suuri orgaanisen aineksen määrä. Käytettävän tukiaineen seossuhteen sekä sen koostumuksen optimoinnilla voitaisiin pilaantuneiden maamassojen kompostoinnissa saavuttaa kompostoitumisen kannalta suotuisimmat lämpötilaolosuhteet (< 70 °C).

Toisaalta Mustankorkean koeaumoissa saavutetut korkeat käsittelylämpötilat yhdessä tehostetun ilmastuksen kanssa mahdollistaisivat kyseisten aumarakenteiden käytön myös haihtuvia haitta-yhdisteitä, kuten kevyitä öljyjakeita, sisältävän maa-aineksen käsittelyyn. Tällöin käsittelyaumat tulisi kuitenkin peittää huokoisella aumamuovilla ja imupumpulla imetty poistoilma suodattaa aktiivihiiilen avulla, jotta haitallisten kaasupäästöjen leviäminen ympäristöön voitaisiin estää mahdollisimman tehokkaasti. Kyseistä tutkimushanketta voisi edelleen laajentaa kompostiaumojen huokoskaasukoostumusten tarkempaan analysointiin.

Mustankorkealta saatujen kokemusten perusteella tehostettua aumakäsittelyä voidaan soveltaa myös jatkossa, kun tarkastellaan esimerkiksi biojätteen ja jätevedenpuhdistamoiden yhdyskuntalietteiden sekä kompostointilaitoksesta ns. hylättyjen panosten aumakompostointia ja jälkikypsytyksen tehostamista.

Yksi tavoite Mustankorkealla suoritetuille tutkimuksille oli selvittää, kuinka tehostamistoimenpiteiden avulla voitaisiin taata kompostoinnin jatkuminen myös talviolosuhteissa. Tutkimukset osoittivat, että mikäli kompostoitumisprosessi saadaan alulle ennen talvikautta, pystytään hajotustoimintaa ylläpitäminen aumoissa myös pakkasjaksojen aikana. Mahdollisten jatkotutkimushankkeiden yhteydessä tulisikin selvittää, onko pilaantuneiden maa-aineserien aumakompostoinnin käynnistäminen mahdollista talvikuukausien aikana ja minkälaisia tehostamistoimenpiteitä kompostointiprosessin ylläpitäminen tällöin vaatii.

Aumakompostoinnin optimointi vaatii sopivan lämpötilan lisäksi myös muiden kompostoitumiseen vaikuttavien olosuhteiden tarkkaa hallintaa. Mustankorkealla suoritettujen tutkimusten yhteydessä ei aumojen ravinnepitoisuuksia (typpi ja fosfori) seurattu tarkemmin. Myös aumojen kosteuspitoisuuksien seuranta rajoittui öljyhiilivetyäytteen yhteydessä tehtyjen kuiva-ainepitoisuuksien määrittämiseen. Aikaisempien tutkimusten mukaan kompostin ravinnesuhteilla sekä kosteuspitoisuudella on kuitenkin merkittävä vaikutus kompostoitumisprosessin onnistumisen kannalta (Chaîneau ym. 2005; Heusemann 1997). Tulevien kenttätutkimusten yhteydessä olisikin kompostiaumojen ravinnesuhteiden sekä kosteuspitoisuuden vaikutuksia öljyhiilivetyjen hajoamisnopeuteen syytä tutkia tarkemmin.

KIITOKSET

Haluan kiittää koko Mustankorkea Oy:n henkilökuntaa, joiden kautta sain mahdollisuuden tämän työn tekemiseen. Erityiset kiitokset kuuluvat laitospäällikkö Jani Burmanille käytännön ohjauksesta sekä toimitusjohtaja Veikko Tissarille ja käyttöpäällikkö Timo Nissiselle hyvistä neuvoista hankkeen aikana. APL Systems Oy:n henkilökuntaa, erityisesti toimitusjohtaja Antti Leskistä, haluan kiittää hyvin sujuneesta yhteistyöstä. Suuret kiitokset haluan esittää myös työni ohjaajalle tohtori Kai Sormuselle sekä professori Jukka Rintalalle Jyväskylän yliopistosta. Kiitokset kuuluvat myös FCG Planeko Oy:n henkilökunnalle tuesta ja mahdollisuudesta saattaa opiskeluni päätökseen työnteon ohessa.

Lopuksi haluan kiittää vaimoani, vanhempiani sekä ystäviäni siitä tuesta ja kannustuksesta, jota olen heiltä saanut näiden vuosien aikana. Ilman teitä tämä ei olisi ollut mahdollista.

KIRJALLISUUS

- Alexander, M. 1999: Biodegradation and bioremediation - 2nd edition. Academic Press, San Diego. 453.
- Beaudin, N., Caron, R.F., Legros, R., Ramsay, J. & Ramsay, B. 1999: Identification of the key factors affecting composting of a weathered hydrocarbon-contaminated soils. *Biodegradation* 10. 127-133.
- Barrena, R., Canovas, C. & Sánchez, A. 2006: Prediction of temperature and thermal inertia effect in the maturation stage and stockpiling of a large composting mass. *Waste Management* 26. 953–959.
- Burman, J. & Huttunen, J. 2006: Aumakompostointi ja huokosilmäkäsittely – käsittelytoimintojen tehostaminen, Mustankorkea Oy. Suomen IP- tekniikka Oy, 18343. 1-9.
- Chaíneau, C.H., Rougeux, G., Yéprémian, C. & Oudot, J. 2005: Effects of nutrient concentration on the biodegradation of crude oil and associated microbial populations in the soil. *Soil Biology & Biochemistry* 37. 1490–1497.
- Coulon, F., Pelletier, E., Gourhant, L., Delille, D. 2005: Effect of nutrient and temperature on degradation of petroleum hydrocarbons in contaminated sub-Antarctic soil. *Chamosphere* 58. 1439-1448.
- Dräger Safety AG & Co. KGaA 2004: Dräger X-am 7000, Monikaasumittarin käyttöohje nro 90 23 725-GA 4638.100 de/en – A.022. 1. painos.
- Eijkelkamp Agrisearch Equipment 2008. Saatavissa:
<http://www.eijkelkamp.com/Home/tabid/54/Default.aspx>. Viitattu 15.12.2008.
- Eurofins Scientific Finland Oy 2008: Maa- ja sedimenttinäytteiden öljyhiilivetyypitoisuuksien C₁₀-C₄₀ määrittäminen – menetelmän soveltuvuus ja periaatteet. Sähköpostiviesti 27.10.2008, Mirjamartta Yritys.
- Eurofins Scientific Finland Oy 2009: Maaperänäytteen pH-arvon, kuiva-aine- sekä TOC-pitoisuuden määrittäminen. Sähköpostiviesti 15.4.2009, Tarja Vikman.

- Forsbacka, A. 1996: Öljy-yhdisteiden biologinen hajoaminen ja saastuneen maan biosaneeraus. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 2/96. Helsinki. 46.
- Gråsten, J. & Kiukas, I. 2004: Öljyvahingot Etelä-Savon, Kaakkois-Suomen ja Keski-Suomen alueilla – Rekisteri, tutkimussuunnitelma ja toimintamalli. Etelä-Savon ympäristökeskuksen moniste 59. 5-43.
- Haus, F., German, J. & Junter, G-A. 2001: Primary biodegradability of mineral base oils in relation to their chemical and physical characteristics. *Chemosphere* 45. 983-990.
- Heusemann, M. E. 1997: Incomplete hydrocarbon biodegradation in contaminated soils: Limitations in bioavailability or inherent recalcitrance? *Bioremediation Journal* 1. 27–39.
- Häikiö, M. 2000: Pilaantuneiden maa-ainesten käsittelylaitosten tarveselvitys – Etelä-Savo, Keski-Suomi, Pohjois-Karjala ja Pohjois-Savo. Alueelliset ympäristöjulkaisut 176, Pohjois-Savon ympäristökeskus. Kuopio. ISBN 952-11-0757-X. 15.
- Järvinen S. 2000: Polyaromaattisilla hiilivedyillä saastuneen maan kompostointi. Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Ympäristötekniikan osasto, Vesi- ja ympäristötekniikka. 1-98.
- Jørgensen, K.S., Puustinen, J. & Suortti, A-M. 2000: Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by composting in biopiles. *Environmental Pollution* 107. 245-254.
- Kim, S-J., Choi, D.H., Sim, S.S. & Oh, Y-S. 2005: Evaluation of bioremediation effectiveness on crude oil-contaminated sand. *Chemosphere* 59. 845–852.
- Mroueh, U-M., Vahanne, P., Eskola, P., Pasanen, A., Wahlström, M. & Laaksonen, A. 2004: Pilaantuneiden maiden kunnostushankkeiden hallinta. VTT Tiedotteita 2245. Dark Oy, Vantaa.. ISBN 951-38-6468-5. 196–216.
- Mustankorkea Oy 2009a: Mustankorkean jätteenkäsittelykeskus. Kirjallinen tiedonanto 13.5.2009, palvelupäällikkö Pia Aho.
- Mustankorkea Oy 2009b: Pilaantuneiden maiden käsittely ja vastaanotto vuonna 2008. Kirjallinen tiedonanto 3.7.2009, käyttöpäällikkö Timo Nissinen.
- Mustankorkea Oy 2007a: Pilaantuneiden maiden vastaanotto ja käsittely vuonna 2004.

- Mustankorkea Oy 2007b: Pilaantuneiden maiden vastaanotto ja käsittely vuonna 2005.
- Mustankorkea Oy 2007c: Pilaantuneiden maiden vastaanotto ja käsittely vuonna 2006.
- Mustankorkea Oy 2007d: Pilaantuneiden maiden vastaanotto ja käsittely vuonna 2007.
- Mustankorkea Oy 2006: Vuosikertomus ja ympäristöselonteko 2006.
- Namkoong, W., Hwang, E-Y., Park, J-S. & Choi, J-Y. 2002: Bioremediation of diesel-contaminated soil with composting. *Environmental Pollution* 119. 23–31.
- Neste Oil Oyj 2006: Raskaan polttoöljyn käyttöopas. Savion Kirjapaino Oy. ISBN 952-5656-02-0. 6-11.
- Neste Oy 1992. Neste- Öljystä muoveihin, III- painos. Frenckellin Kirjapaino Oy, Espoo. ISBN 952-9533-06-4. 244.
- Ouyang, W., Liu, H., Murygina, V., Yu, Y., Xiu, Z. & Kalyuzhnyi, S. 2005: Comparison of bio-augmentation and composting for remediation of oily sludge: A field-scale study in China. *Process Biochemistry* 40. 3763-3768.
- Pasanen, J. 1991: Öljyisen maan ja jätteen mikrobiologinen puhdistus. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja, sarja A 76. Helsinki.
- Penttinen, R. 2001: Maaperän ja pohjaveden kunnostus, yleisimpien menetelmien esittely. Suomen ympäristökeskus. Oy Edita Ab, Helsinki. ISBN 952-11-0943-2. 22-23.
- Rahman, K.S.M., Thahira-Rahman, J., Lakshmanaperumalsamy, P. & Banat, I.M. 2002: Towards efficient oli degradation by a mixed bacterial consortium. *Biosource Technology* 85. 257-261.
- Sabaté, J., Viñas, M. & Solanas, A.M. 2004: Laboratory-scale bioremediation experiments on hydrocarbon-contaminated soils. *International Biodeterioration & Biodegradation* 54. 19-25.
- Sanscartier, D., Zeeb, B., Koch, I. & Reimer, K. 2008: Bioremediation of diesel-contaminated soil by heated and humified biopile system in cold climates. *Cold Regions Science and Technology* [painossa].

- Sarkkila, J., Mroueh, U-M. & Leino-Forsman, H. 2004: Pilaantuneen maan kunnostaminen ja laadunvarmistus, Ympäristöopas 110. Suomen ympäristökeskus. Edita Prima Oy, Helsinki. ISBN 952-11-1601-3 (PDF). 97–103.
- Scherr, K., Aichberger, H., Braun, R. & Loibner, A.P. 2007: Influence of soil fractions on microbial degradation behaviour of mineral hydrocarbons. *European Journal of Soil Biology* 43. 341-350.
- Singh, A. & Ward, O.P. 2004: *Soil Biology - Biodegradation and bioremediation*. Germany, Springer, ISBN 1613-3382. 309.
- Sillanpää, P. 2007: Öljyhiilivedyillä saastuneen maan puhdistaminen puiden avulla. Pirkanmaan ympäristökeskus 02/2007. Kirjapaino Oy, Tampere. ISBN 978-952-11-2562-1. 7-10.
- Song, H-G., Wang, X. & Bartha, R. 1990: Bioremediation potential of terrestrial fuel spills. *Applied Environmental Mikrobiology* 56. 652-656.
- Sundberg, C. & Jönsson, H. 2008: Higher pH and faster decomposition in biowaste composting by increased aeration. *Waste Management* 28. 518-526.
- Tajada, M., Gonzalez, J.L., Hernandez, M.T. & Garcia, C. 2008: Application of different organic amendments in a gasoline contaminated soil – effect on soil microbial properties. *Bioresource Technology* 99. 2872–2880.
- Tuomi, P. & Vaajasaari, K. 2004: Monitoroidun luontaisen puhdistumisen (MLP) käyttö pilaantuneiden maiden kunnostuksessa. Suomen ympäristökeskus. Edita Prima Oy, Helsinki, ISBN 952-11-1637-4. 54.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) 1999: Monitored natural attenuation of petroleum hydrocarbons – U.S. EPA remedial technology fact sheet. EPA/600/F-98/021. 1-3.
- Van Gestel, K., Mergaert, J., Swings, J., Coosemans, J. & Ryckeboer, J. 2003: Bioremediation of diesel oil-contaminated soil by composting with biowaste. *Environmental Pollution* 125. 361-368.
- Vieira, P.A., Vieira, R.B., de Franca, F.T. & Cardoso, V.L. 2007: Biodegradation of effluent contaminated with diesel fuel and gasoline. *Journal of Hazardous Materials* 140. 52-59.

- Wahlström, M., Laine-Ylijoki, J., Veistostola, E., Vaajasaari, K. & Joutti, A. 2006: Jätteiden kaatopaikkakelpoisuuden toteaminen, Ympäristöhallinnon ohjeita 2/2006. Ympäristöministeriö. Edita Prima Oy, Helsinki. ISBN 952-11-2335-4 (PDF). 30–37.
- Woods End Research Laboratories (WERL) 2005: Principles and practice: Compost sampling for lab analysis. Saatavissa: <http://woodsend.org/pdf-files/sampli~1.pdf>. Viitattu 15.12.2008.
- Valtion ympäristöhallinto 2005: Öljyn käyttäytyminen maaperässä. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=3033&lan=fi>. Viitattu 26.1.2009.
- Ympäristöministeriö 2007: Maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arviointi, Ympäristöhallinnon ohjeita 2/2007. Edita Prima Oy, Helsinki. 1-210.
- Ympäristöministeriö 2006: Pilaantuneen maa-alueen tutkimuksen ja kunnostuksen työsuojeluopas. Ympäristöhallinnon ohjeita 7/2006. Edita Prima Oy, Helsinki. 1-85.

Nykyinen täyttöalue

Pima-kenttä

Vaaka-asema

Portti

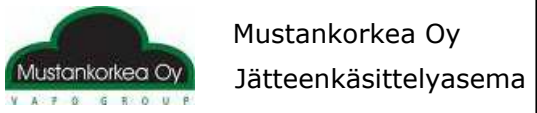
Toimisto

Hek
Öek
Nok

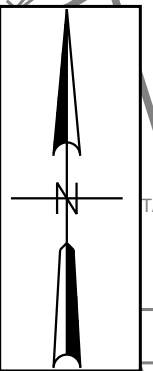
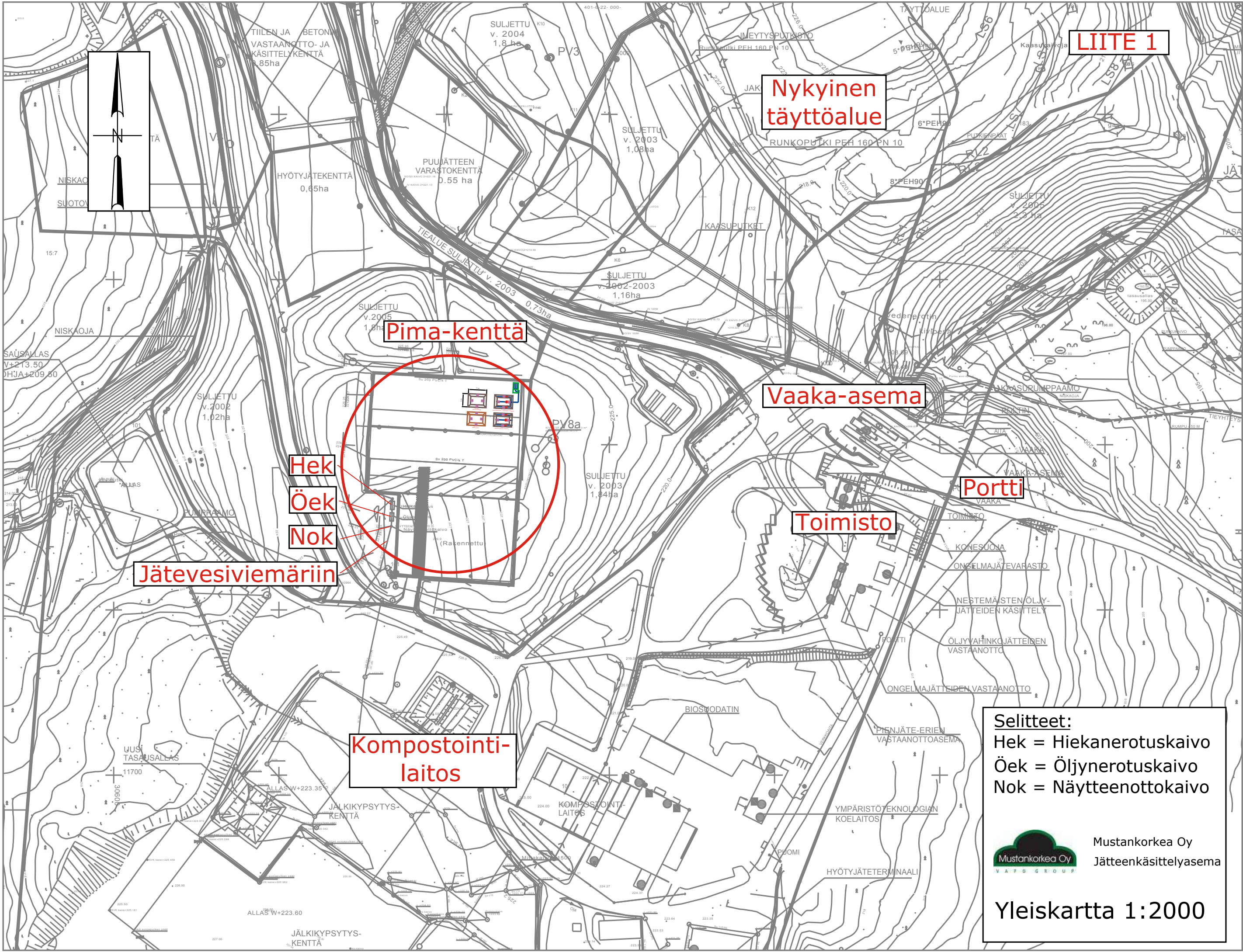
Jätevesiviemäriin

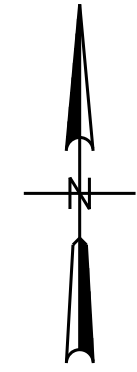
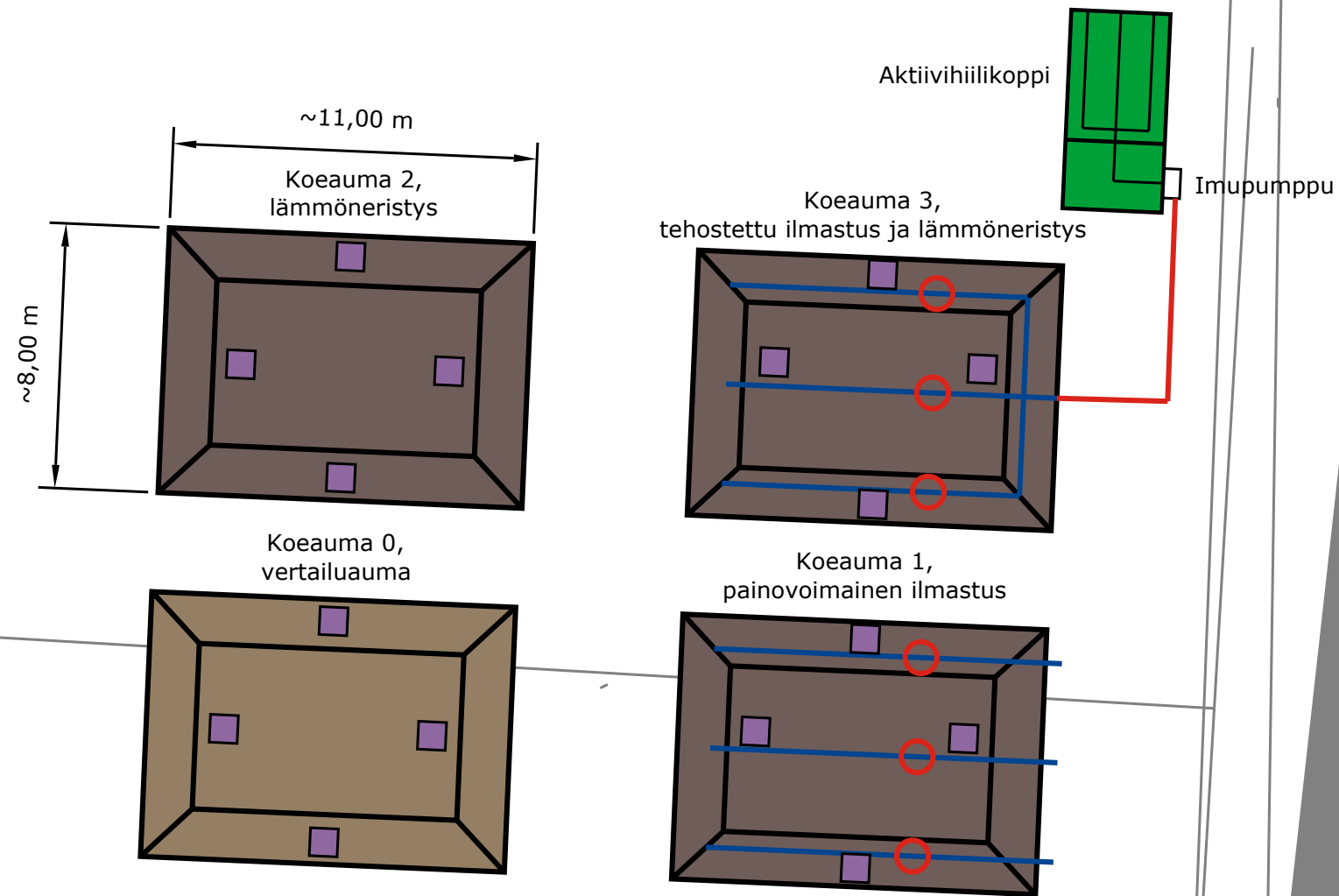
Kompostointilaitos

Selitteet:
Hek = Hiekanerotuskaivo
Öek = Öljynerotuskaivo
Nok = Näytteenottokaivo



Yleiskartta 1:2000









PV8

KIVIPESÄ #32 - 100 m

KOMPOSTISUODATIN 5

KAASUNKERÄYSPUTKI

Selitteet:

-  Lämpötila-anturi
-  Havaintoputki (umpinainen 110 mm)
-  Salaojaputki (reijitetty 110 mm)
-  Umpiputki (110 mm)

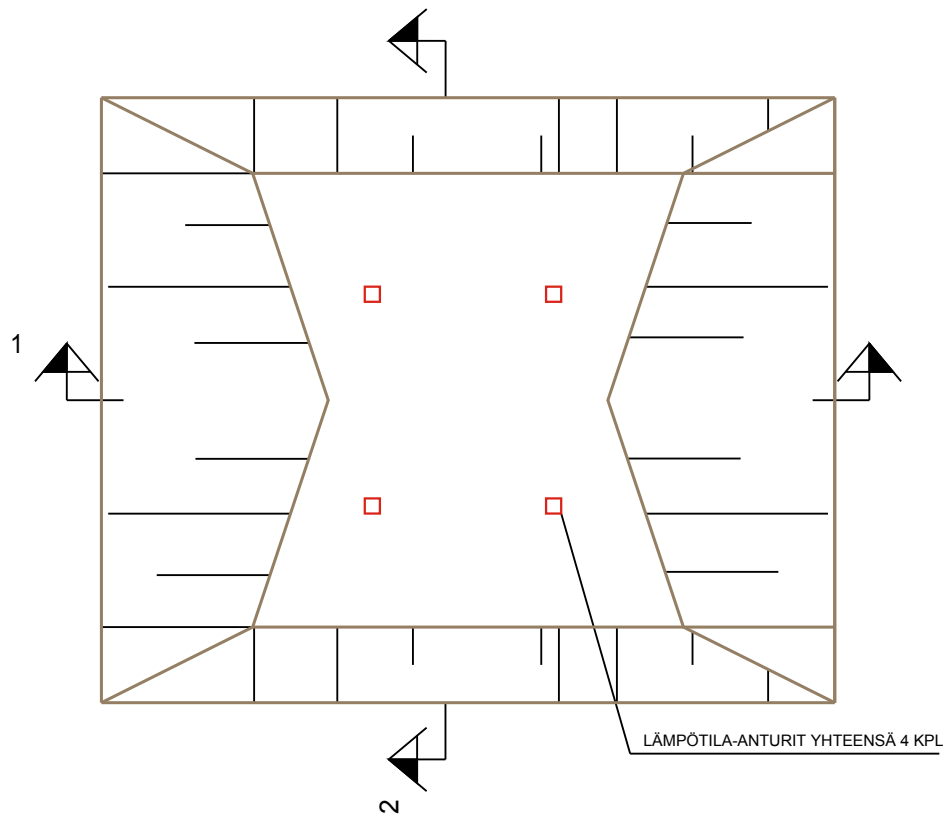
VC/k T



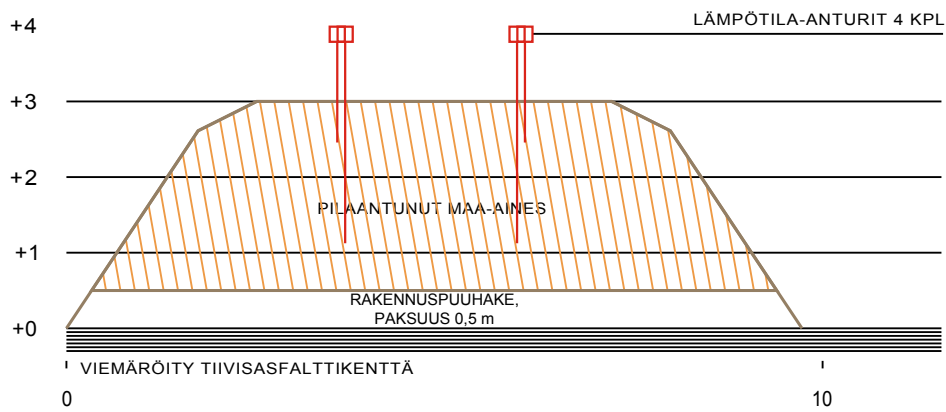
Mustankorkea Oy
Koeaumat

Asemapiirustus 1:200

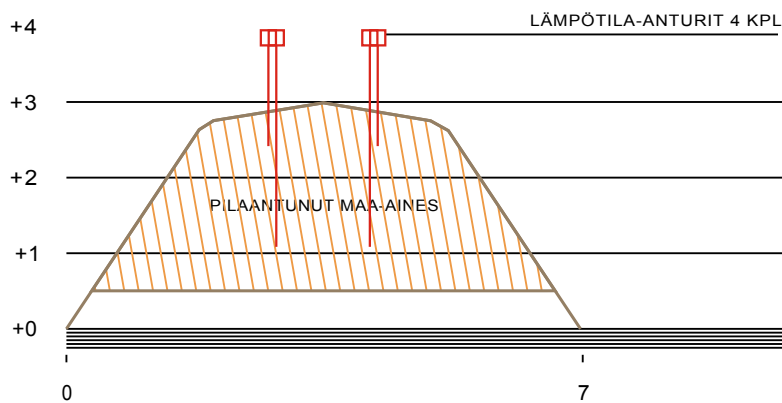
KOEAUMA 0 - nolla-auma, LIITE 3



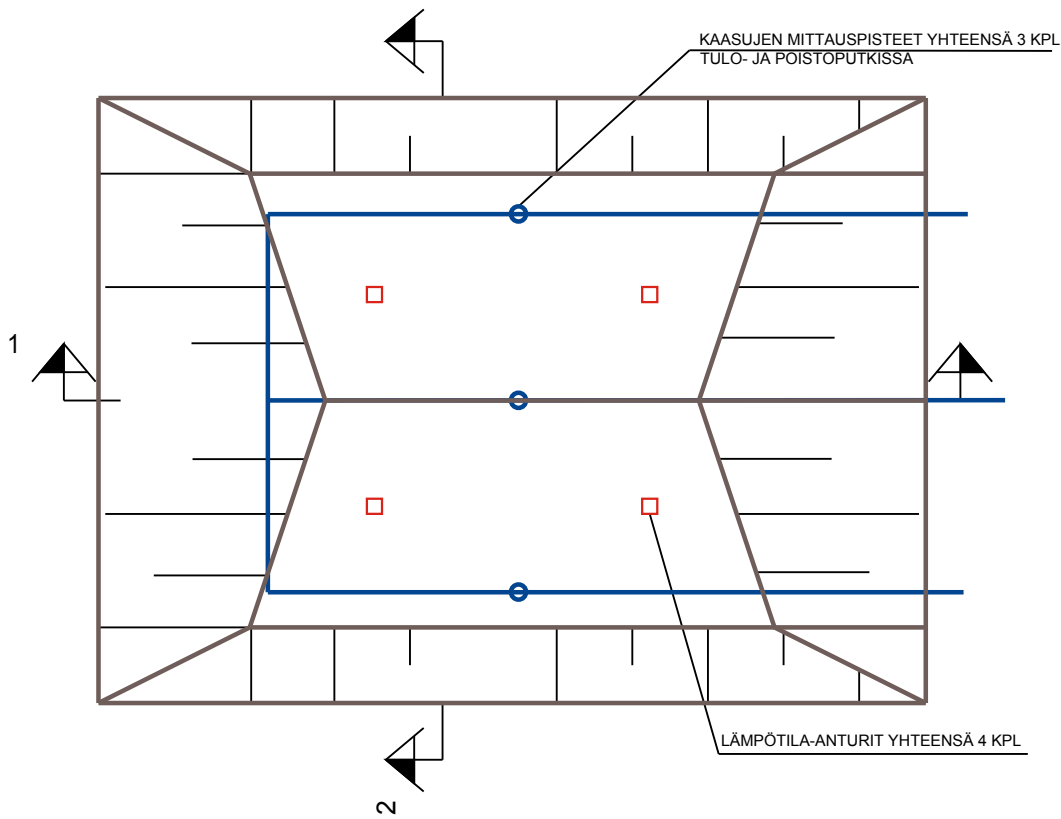
Pituusleikkaus 1-1, 1:100



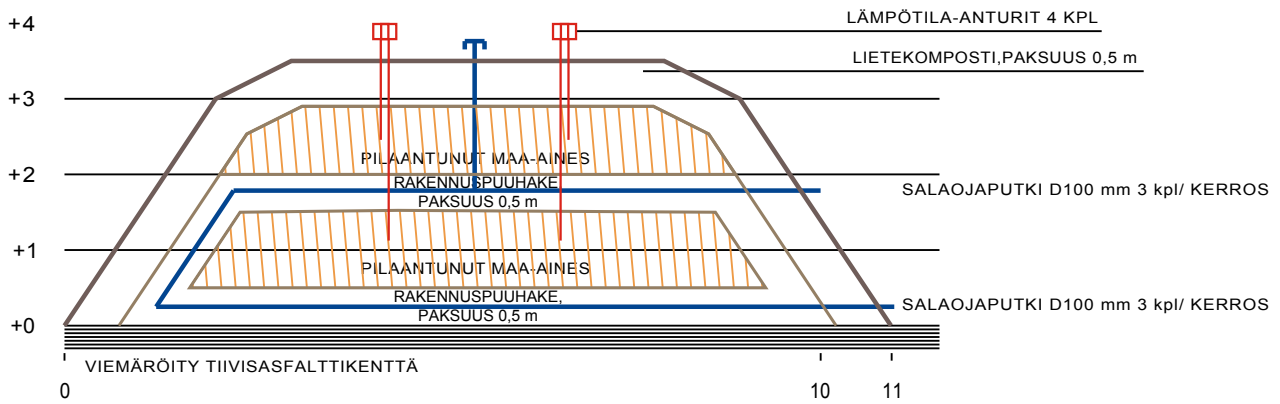
Poikkileikkaus 2-2, 1:100



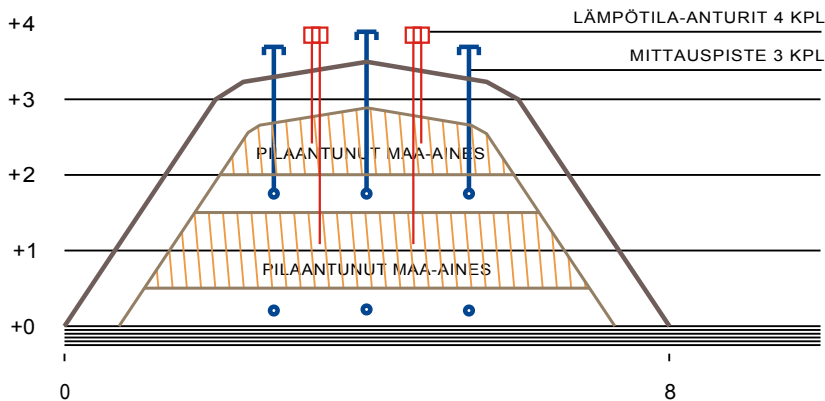
KOEAUMA 1 - painovoimainen ilmastus, LIITE 4



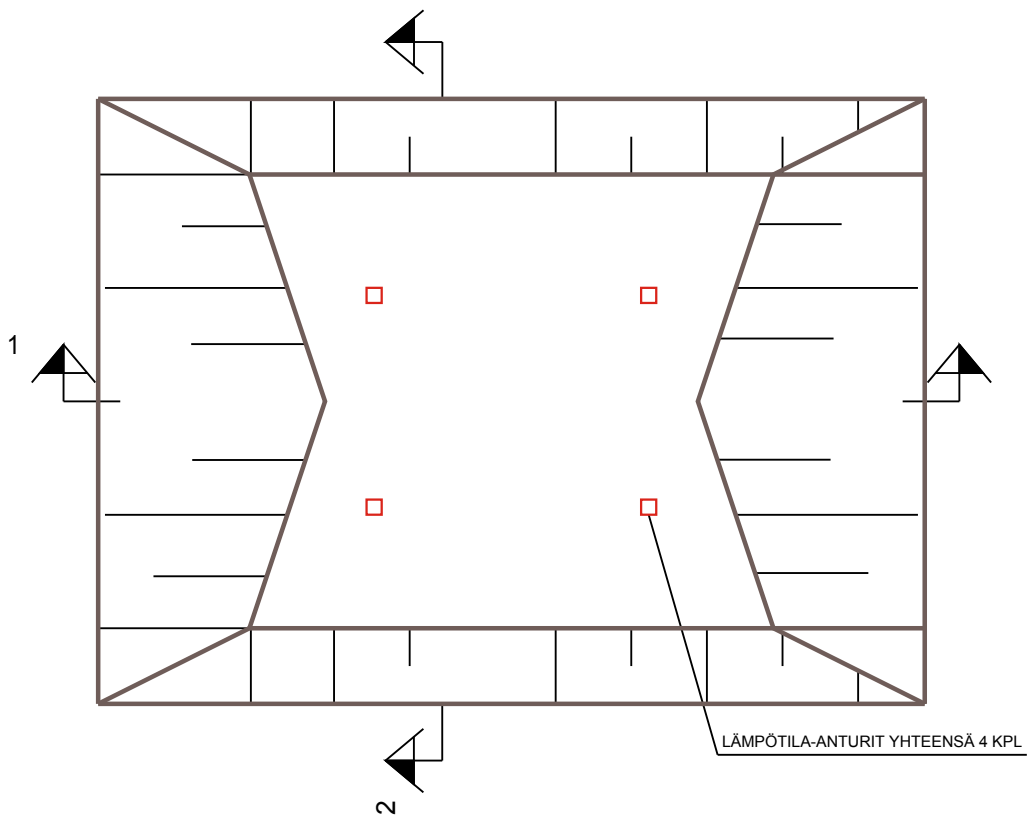
Pituusleikkaus 1-1, 1:100



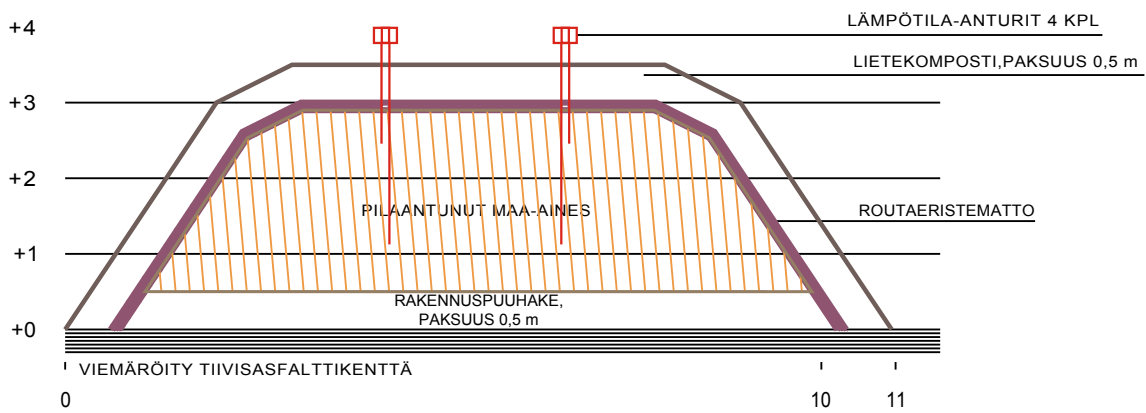
Poikkileikkaus 2-2, 1:100



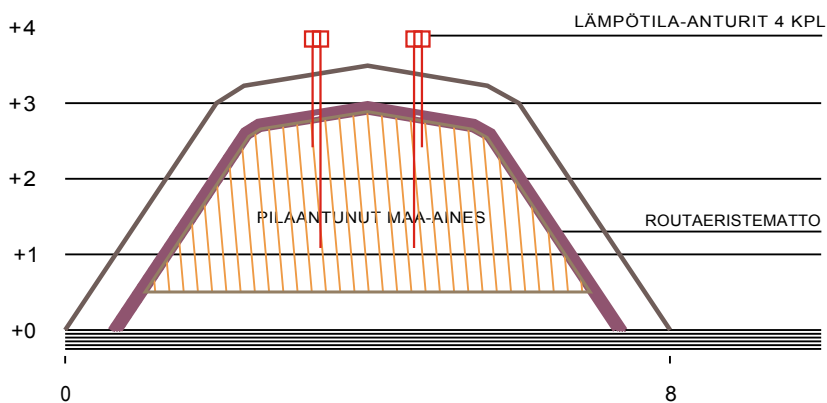
KOEAUMA 2 - lämmöneristys, LIITE 5



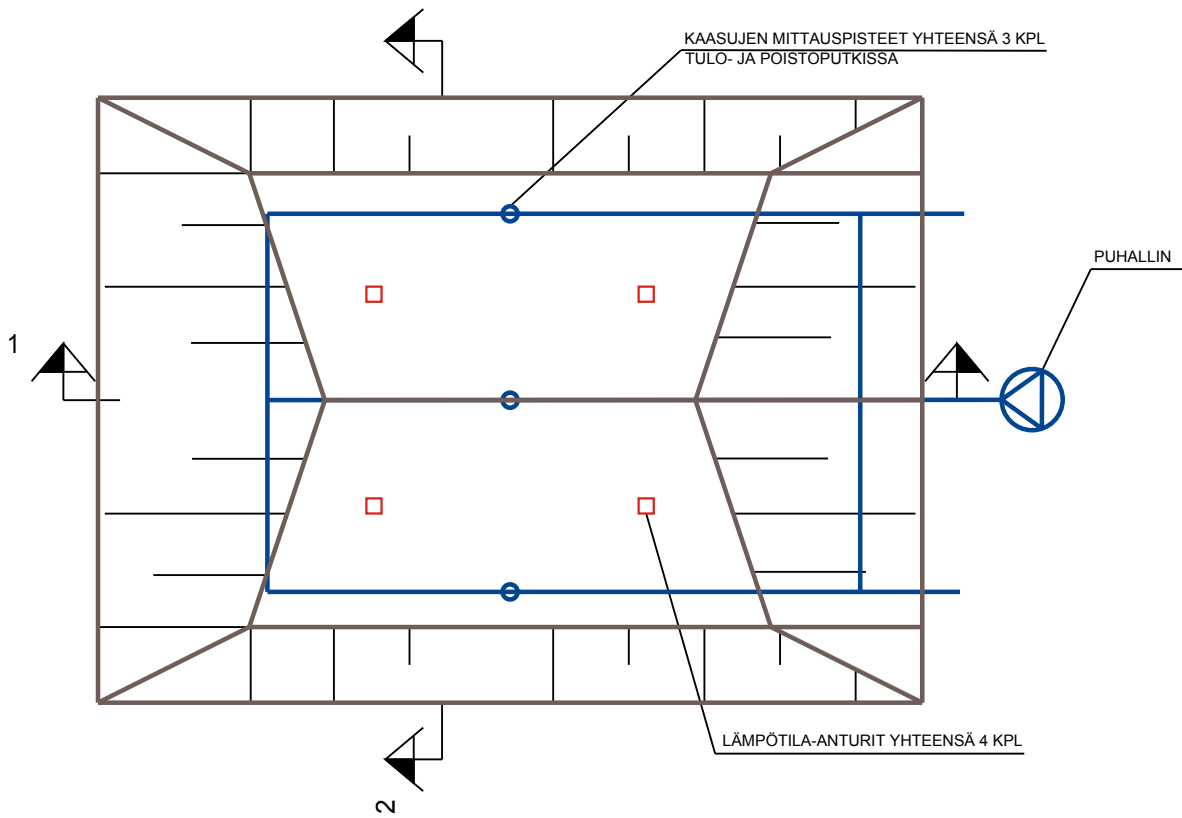
Pituusleikkaus 1-1, 1:100



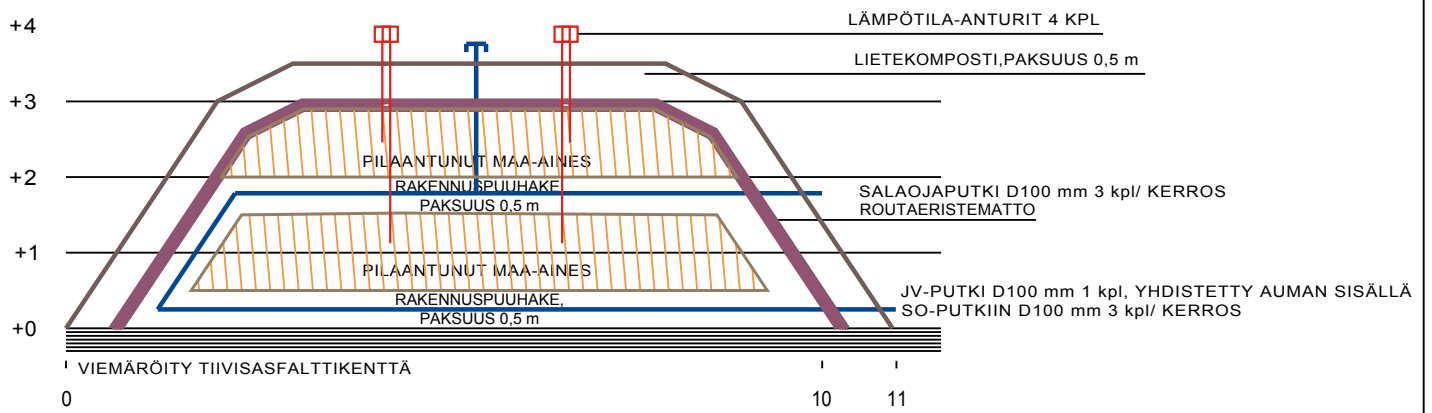
Poikkileikkaus 2-2, 1:100



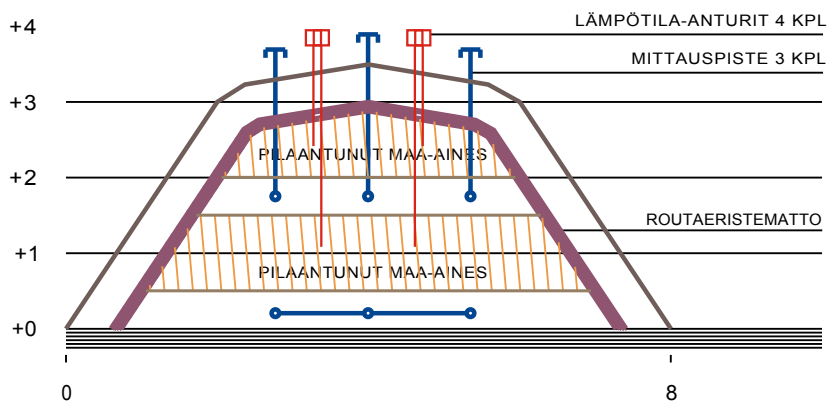
KOEAUMA 3 - tehostettu ilmastus ja lämmöneristys, LIITE 6



Pituusleikkaus 1-1, 1:100



Poikkileikkaus 2-2, 1:100



Laitoskäsitteilyn jälkeistä kompostia Y



ANALYYSITODISTUS

J0800061-00

1 (1)

03.06.2008

Tilaaaja

Mustankorkea Oy

PL 22

40101 Jyväskylä

Näytetiedot

8043 2/ LIETE/ tyhjennys

Näytetyyppi

Komposti

Tilausnumero

Näyte otettu

20080509

Saapumispvm

09.05.2008

Tutk. valmistuspvm

03.06.2008

Analyysi	Tulos	Yksikkö	Menetelmä
Kompostin perusanalyysit	*****		
pH (1+5)	8.3		SFS-EN 13037:en
Johtokyky (1+5)	156.1	mS/m	SFS-EN 13038:en
Tuhkapitoisuus	34.3	m-% k-a	TYO 3.059
Saapumiskosteus	56.2	m-%	SFS-EN 13040:en
Tilavuuspaino	527	g/l	SFS-EN 13040:en
C/N-suhde	16		
C	33.6	m-% k-a	CEN/TS 15104, ISO/TS 12902
N	2.09	m-% k-a	CEN/TS 15104, ISO/TS 12902
Rottegrad	*****		TYO 3.091
Tmax	30.4	°C	
Rottegrad-luokka	IV		
Aloituskosteus	63.5	m-%	

Markku Herranen

Toimitusjohtaja/Man. Dir.

Analyytitulos koskee vain tutkittua näytettä. Asiakirjan osittainen kopioiminen kielletty.

ENAS OY

Koivurannantie 1
40400 JYVÄSKYLÄ

Puhelin 010 617 1130 ja 010 617 1140

Fax 010 617 1101

etunimi.sukunimi@enas.fi

www.enas.fi

ROTTEGRAD

