



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Santeri Suokas

Huokoskaasututkimustulosten vertailu maanäytetuloksiin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

2.5.2019

Tekijä Otsikko	Santeri Suokas Huokoskaasututkimustulosten vertailu maanäytetuloksiin
Sivumäärä Aika	45 sivua 2.5.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine	-
Ohjaajat	johtava asiantuntija Pasi Vahanne lehtori Esa Toukoniitty
<p>Tämän insinöörityön aiheena oli tutkia maaperän pilaantuneisuustutkimuksiin kuuluvia huokoskaasututkimuksia ja erityisesti niiden edustavuutta maaperässä havaittuihin haitta-ainepitoisuuksiin. Tarkoitus oli kerätä tietoa huokoskaasututkimusten tilasta ja saada käsitys niiden hyödyllisyydestä ympäristöteknisissä tutkimuksissa. Työn toimeksiantaja oli FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy.</p> <p>Työn teoriaosuudessa käytiin läpi pilaantuneiden maa-alueiden tutkimukset, keskittyen huokoskaasun tutkimisen teoriaan ja käytäntöihin. Tämän jälkeen käsiteltiin kohdealue, jolla FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy on suorittanut ympäristötekniisiä tutkimuksia. Lopuksi tutkimusaineistoja vertailtiin keskenään ja muodostettiin johtopäätöksiä huokoskaasututkimusten edustavuudesta.</p> <p>Huokoskaasututkimusten tulokset edustivat kohtalaisen hyvin maaperänäytteiden tuloksia. Haihtuvat haitta-aineet havaittiin hyvin huokoskaasusta, mutta levinneisyys ja pitoisuudet eivät näkyneet kovinkaan tarkasti tarkasteltavista haitta-aineista. Tarkempien johtopäätösten muodostaminen vaatisi useita vertailututkimuksia erilaisilla pilaantuneisuusalueilla.</p>	
Avainsanat	FCG, pilaantuneisuustutkimukset, maaperä, huokoskaasu

Author Title Number of Pages Date	Santeri Suokas Comparison of Research Results of Soil Gas and Soil Contamination Levels 45 pages 2 May 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Energy and Environmental engineering
Professional Major	-
Instructors	Pasi Vahanne, Leading Adviser Esa Toukoniitty, Senior Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to examine soil gas investigations, and in particular their representativeness for soil contamination levels. The aim was to gather information on the current state of soil gas investigations and to gain insight of their usefulness in environmental investigations.</p> <p>The theoretical part of the thesis examines the contaminated land studies, focusing on the theory and practice of soil gas investigations. After this, the target area where FCG Design and Engineering has conducted contaminated land studies is introduced. Finally, the research data is compared and conclusions about the representativeness of the soil gas studies are drawn.</p> <p>The results of the soil gas studies represented the soil samples fairly well. The volatile organic compounds were detected in the soil gas, but the distribution and concentrations did not appear very accurate for the contaminants being examined. In order to draw more specific conclusions, several comparative studies in different types of contaminated land are required.</p>	
Keywords	FCG, contaminated land investigation, soil, soil gas

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Pilaantuneet maa-alueet	1
2.1	Lainsäädäntö ja riskinarviointi	1
2.2	Pilaantuneisuustutkimukset	3
2.3	Pilaantuneisuuden aiheuttajat	4
2.4	Haitta-aineiden kulkeutuminen ja leviäminen	5
3	Maaperänäytteenotto	6
3.1	Maaperän ominaisuuksia	7
3.2	Näytteenottomenetelmät	9
3.2.1	Koekuopitus	10
3.2.2	Kairatutkimukset	10
3.3	Laboratorioanalyysit	11
4	Maaperän huokoskaasu	13
4.1	Huokoskaasututkimuksia käsittelevät julkaisut Suomessa	13
4.2	Huokoskaasututkimusten soveltuvuus Suomeen	14
4.3	Haitta-aineet huokoskaasussa	14
4.4	Kulkeutuminen ja liikkuminen	16
4.5	Huokoskaasunäytteenotto	19
4.5.1	Aktiivinen näytteenotto	20
4.5.2	Passiivinen näytteenotto	21
4.5.3	Kenttätestit	22
4.6	Laboratorioanalyysit	23
5	Huokoskaasututkimukset Ruotsissa	23
5.1	Huokoskaasututkimuksia käsittelevät julkaisut Ruotsissa	23
5.2	MIP	24
6	Kohdetiedot ja aineisto	25

6.1	Tutkimusalueen tiedot	25
6.2	Pilaantuneisuustutkimukset kohteessa	26
6.2.1	Maaperänäytteet	27
6.2.2	Huokoskaasunäytteet	29
6.3	Analyysit ja tulokset	30
7	Tutkimusten vertailu	31
7.1	Vertailun rajaus	31
7.2	Läsnäolo	32
7.3	Pitoisuudet ja levinneisyys	33
8	Johtopäätökset	39
8.1	Havaintojen edustavuus	39
8.2	Pohdinta	40
9	Yhteenveto	41
	Lähteet	43

Lyhenteet

BTEX	Bentseeni, tolueeni, etyylibentseeni ja ksyleeni.
$\log K_{oc}$	Orgaaninen hiili-vesi –jakautumiskerroin
$\log K_{ow}$	Oktanoli-vesi –jakautumiskerroin
M	Moolimassa (mg/l).
PAH	Polysykliset aromaattiset hiilivedyt.
PIMA	Pilaantunut maa-alue.
S	Vesiliukoisuus (g/mol).
VOC	<i>Volatile Organic Compound</i> . Haihtuva orgaaninen yhdiste.
V_p	Höyrynpaine (Pa).

1 Johdanto

Maaperällä on monta tehtävää niin elollisen luonnon ylläpitäjänä, kuin myös raaka-aineiden lähteenä ja perustana rakennetulle ympäristölle. Ihmisen toiminnan seurauksena maaperään päässeet haitta-aineet muodostavat pilaantumisriskin, joka voi koskea maaperän lisäksi myös pohjavettä. Pilaantuneella alueella tarkoitetaan aluetta, jolla haitta-aineet muodostavat riskejä, joista voi aiheutua vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäristölle. [1, s. 1–2.]

Tässä työssä käsitellään maaperän pilaantuneisuustutkimuksia ja erityisesti niihin liittyviä huokoskaasututkimuksia. Työn alussa kerrotaan tutkimuksia oleellisesti ohjaavasta lainsäädännöstä ja riskinhallinnasta, ja selvitetään tutkimuksiin kuuluvat teoria ja toimenpiteet. Vertailuosuudessa käsitellään FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy:n pilaantuneisuustutkimuskohdetta Helsingissä, vertaillaan tutkimustuloksia toisiinsa ja muodostetaan johtopäätöksiä huokoskaasututkimusten edustavuudesta. Lisäksi luvussa 5 tarkastellaan, millä tavoin huokoskaasututkimuksia toteutetaan Ruotsissa.

Maaperän haihtuvien haitta-aineiden määrittäminen huokosilmaa tutkimalla on suhteellisen uusi käytäntö. Huokosilmaa tutkimalla pyritään saamaan kustannustehokkaasti tietoa maaperän pilaantuneisuudesta tai rakennuksen sisäilmaan kulkeutuvista haitta-aineista. Kattavia vertailututkimuksia huokoskaasun haitta-ainepitoisuuksista suhteessa maaperän pitoisuuksiin ei ole olemassa, joten vertailu on tarpeellista.

2 Pilaantuneet maa-alueet

2.1 Lainsäädäntö ja riskinarviointi

Pilaantuneiden alueiden päätöksentekoa ja toimia ohjaa ympäristönsuojelulaki 527/2014. Laki sisältää säännöksiä maaperän, vesistön ja ilman suojelusta. Laissa määritellään keskeiset käsitteet ympäristön pilaantumiseen liittyen ja yleiset velvollisuudet ja periaatteet. Niitä ovat velvollisuus ehkäistä ja rajoittaa ympäristön pilaantumista, maape-

rän ja pohjaveden pilaamiskielto ja puhdistamisvelvollisuus, selvitysvelvollisuus puhdistustarpeesta sekä velvollisuus ilmoittaa pilaantuneiden alueiden puhdistamisesta valtion viranomaiselle. [2, s. 19, 22–28.]

Riskinarviointi on prosessi, jossa alueen maaperän ja pohjaveden haitallisten aineiden aiheuttamat haitat ja riskit tunnistetaan, määritetään ja niiden merkittävyys arvioidaan. Haitta tai riski kohdistuu joko ympäristön laatuun, ihmisen terveyteen tai eliöstöön. Ympäristön kannalta tarkistellaan ympäristönsien ja luonnonvarojen käyttöä, ihmisten ja eliöiden kannalta altistumista mahdollisille haitoille ja niiden vaikutuksia. [2, s. 37.] Kuva 1 on havainnollistettu riskinarvioinnin perustaa.



Kuva 1. Haitan ja riskin muodostuminen pilaantuneella maa-alueella. [2, s. 37.]

Valtioneuvoston asetuksessa Vna 214/2007 maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista määritellään, mitä riskinarvioinnissa tulee ottaa huomioon. Pykälän 2 kohdat ovat seuraavat:

- 1) haitallisten aineiden pitoisuudet, kokonaismäärät, ominaisuudet, sijainti ja taustapitoisuudet maaperässä; *taustapitoisuudella* tarkoitetaan haitallisten aineiden luontaisesti tavanomaisia pitoisuuksia maaperässä tai sellaisia kohonneita pitoisuuksia, jotka esiintyvät pintamaassa laajalla alueella pilaantuneeksi epäillyn alueen ympäristössä;
- 2) pilaantuneeksi epäillyn alueen maaperä- ja pohjavesiolosuhteet sekä tekijät, jotka vaikuttavat haitallisten aineiden kulkeutumiseen ja leviämiseen alueella ja sen ulkopuolella;

- 3) pilaantuneeksi epäillyn alueen ja sen ympäristön tai pohjaveden nykyinen ja suunniteltu käyttötarkoitus;
- 4) mahdollisuus haitallisille aineille altistumiseen lyhyen ja pitkän ajan kuluessa;
- 5) altistumisen seurauksena terveydelle ja ympäristölle aiheutuvan haitan vakavuus ja todennäköisyys sekä haitallisten aineiden mahdolliset yhteisvaikutukset,
- 6) käytettävien tutkimustietojen ja muiden lähtötietojen sekä arviointimenetelmien epävarmuustekijät. [3.]

Pilaantuneisuustutkimuksissa saatuja näytetuloksia verrataan valtioneuvoston asetuksen kynnysarvoihin, ja tutkimuksissa huomioidaan haitta-aineiden taustapitoisuusarvot. Jos tutkimustulosten tulokset ylittävät nämä vertailuarvot, riskienarvioinnissa edetään haittojen ja riskien tunnistamiseen. Jos kynnysarvot eivät ylity tutkimustuloksissa, alue voidaan todeta pilaantumattomaksi. [2, s. 41–42.]

2.2 Pilaantuneisuustutkimukset

Maaperän ja pohjaveden pilaantumista selvitetään ympäristöteknisillä tutkimuksilla. Ympäristölainsäädäntö velvoittaa tutkimuksiin, ja niitä ohjaa erityisesti siihen kuuluva valtioneuvoston asetus 214/2007 maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen määrittämisestä. Pilaantuneiden maa-alueiden tutkimukset aloitetaan usein tekemällä tutkimussuunnitelma, josta selviää kohteen tärkeimmät tiedot, kuten sijainti, käyttöhistoria, nykyiset ja tulevat käyttötarkoitukset sekä aikaisemmat ympäristötekniset tutkimukset. [2, s. 28, 41.]

Selvitystarve tietyn maa-alueen pilaantuneisuudesta voi syntyä useasta eri syystä. Yleisimmät syyt ovat maankäytön muutokset, suunnitellut rakennustyöt, muutokset omistusta tai hallintasuhteissa, alueella harjoitetun toiminnan päättymisen ja havaintoihin perustuvat epäilyt. Arviointi rajataan joko yhdelle kiinteistölle tai laajemmalle kokonaisuudelle, kuten rakennus- tai kaava-alueelle. [2, s. 40.]

Kun pilaantuneisuutta epäillään, alueesta vastuussa olevan tahon on selvitettävä alueen pilaantuneisuus ja puhdistustarve. Tutkimuksia varten palkataan usein ulkopuolinen konsultti. Konsultti suorittaa tarvittavat ympäristötekniset tutkimukset ja tekee yhteistyötä valvontaviranomaisen kanssa. Viranomaistahoja ovat ELY-keskukset tai kunnan oma

ympäristönsuojeluviranomainen. Valvovalle viranomaiselle tehdään riittävän kattavien tutkimusten, riskinarvioinnin ja kunnostussuunnittelun jälkeen ilmoitus maaperän puhdistamisesta. Ilmoituksessa ja kunnostussuunnitelmassa määritellään, missä laajuudessa toimenpiteitä tarvitaan. Viranomainen hyväksyy ilmoituksen ottaen kantaa haittojen ja riskien hyväksyttävyyteen ja alueen puhdistustavoitteisiin. [2, s. 25–27; 4.]

2.3 Pilaantuneisuuden aiheuttajat

Maaperän tai pohjaveden pilaantuminen johtuu orgaanisista tai epäorgaanisista päästöistä tai jätteistä, jotka pääsevät maaperään. Tyypillisesti maaperä pilaantuu ihmisen toiminnan seurauksena. Yleisimmät maaperän tai pohjaveden pilaajat Suomessa ovat polttoaineenjaku- ja huoltamotoiminta, vanha teollinen toiminta, saha- ja kyllästystoiminta, kemialliset pesulat, ampuradat ja taimitarhat. Näistä lähteistä maaperään tai pohjaveteen voi levitä erilaisia orgaanisia yhdisteitä kuten öljyhiilivedyt, aromaattisia yhdisteitä, kloorattuja liuottimia, metalleja ja torjunta-aineita. [5, s. 8.] Kuvan 2 taulukossa on esitetty yleisimmät haitta-aineet ja pilaantumisen lähteet.

Kohde	Haitta-aineet	
Faasi	Maaperä	Pohjavesi
polttoainejakelu	öljyhiilivedyt, BTEX, bensiinin lisäaineet	öljyhiilivedyt, BTEX, bensiinin lisäaineet
sahat ja kyllästämöt	PCP, PCDD/F, PAH, fenolit, arseeni (As), kromi (Cr), kupari (Cu)	PCP, PAH, fenolit, arseeni (As), kromi (Cr), kupari (Cu)
ampumaradat	lyijy (Pb), antimoni (Sb), PAH	lyijy (Pb), antimoni (Sb)
jätteenkäsittely ja romuttamo	öljyhiilivedyt, raskasmetallit	raskasmetallit
taimitarhat ja kauppa-puutarhat	torjunta-aineet	torjunta-aineet
kemialliset pesulat	Kklooratut liuottimet (TRI, PER)	klooratut liuottimet (TRI, PER)
muut teollisuuslaitokset	raskasmetallit, PAH, öljyhiilivedyt, muut tapauskohtaiset haitta-aineet	öljyhiilivedyt, raskasmetallit, muut tapauskohtaiset haitta-aineet

BTEX = haihtuvat yhdisteet: bentseeni, tolueeni, etyylibentseeni, ksyleeni

MTBE = Metyyli-tertääributyyleetteri, bensiinin komponentti

PCP = pentakloorifenoli

PCDD/F = dioksiinit ja furaanit

PAH = polyaromaattiset hiilivedyt

TRI = trikloorietyleeni

PER = perkloorietyleeni

Kuva 2. Haitta-aineet maaperässä ja pohjavedessä. [5, s. 8.]

Keskeistä maaperätutkimusten onnistumisen kannalta ovat hyvät lähtötiedot, jotta oikeita haitta-aineita osataan etsiä. Tutkimuksissa otetut näytteet tutkitaan yleensä kenttämittareilla, jotka mittaavat haihtuvia yhdisteitä ja eräitä metalleja. Tietty otos näytteistä toimitetaan laboratorioon tarkempia tutkimuksia varten.

2.4 Haitta-aineiden kulkeutuminen ja leviäminen

Maaperän ominaisuudet kuten huokoisuus ja kerroksellisuus määrittävät yhdessä haitta-aineiden ominaisuuksien kanssa sen, kuinka haitta-aineet leviävät maaperässä. Pilaantuminen voi koskea maa-ainesta tai ulottua myös pohjaveteen. Haitta-aineet kulkeutuvat maaperässä kaasumuodossa, pölyhiukkasiin sitoutuneena huokosilmassa, omana faasinaan veden pinnalla tai liuenneena veteen. [5, s. 8; 1, s. 1.] Kuvan 3 taulukossa on ryhmitelty haitta-aineita havainnollisesti tärkeimpien ominaisuuksien mukaan.

Ominaisuus	Ryhmittely	Esim.	Jakautuminen maaperässä	Leviäminen ja kulkeutuminen
Haihtuvuus	haihtuvat	bensiini-komponentit	maaperän huokoskaasu	kulkeutuvat helposti ilman mukana, kulkeutumiskäsi esim. rakennusten sisätiloihin
	heikosti haihtuvat	torjunta-aineet, metallit	maaperä	kulkeutuminen vähäistä ilman mukana haihtuneessa muodossa
Vesiliukoisuus	veteen liukenevat	bensiini-komponentit	huokosvesi, pohjavesi, pintavesi	kulkeutuvat helposti veden mukana, kulkeutumiskäsi esim. pohjaveden mukana laajalle alueelle
	veteen niukka-liukoiset	raskaat öljyjakeet	maaperä	kulkeutuminen veteen liuenneena vähäistä
Kiinnittyminen maa-aineksiin	ei kiinnity maaperään		huokosvesi, pohjavesi, huokoskaasu	voivat levitä kaasumaisena tai veteen liuenneena
	kiinnittyvä maaperään	PCDD/PCDF, PCB	maaperä	voivat levitä maa-partikkeleihin sitoutuneina tuulen ja veden mukana
Hajoavuus	maaperässä helposti hajoavat	öljyjakeiden keskittisleet	muuntuvat maaperässä	pitoisuus pienenee, syntyy hajoamistuotteita
	maaperässä pysyvät	PAH-yhdisteet	pysyviä maaperässä	pitoisuus pienenee hyvin hitaasti

MTBE = Metyyli-tertiäributyyleetteri, bensiinin komponentti

PCDD/F = dioksiinit ja furaanit

PCB = polyklooratut bifenyylit

PAH = polyaromaattiset hiilivedyt

Kuva 3. Haitta-aineiden ominaisuuksia. [5, s. 9.]

Pilaantuneessa maaperässä ja pohjavedessä tapahtuu kulkeutumisen lisäksi haitta-aineiden hajoamista ja muuntumista eri yhdisteiksi, joko haitattomampaan tai haitalliseen muotoon. Maaperässä haitta-aineet jakautuvat omiin faaseihinsa maa-ainekseen, huokosveteen ja huokoskaasuun. [5, s. 10.]

3 Maaperänäytteenotto

Maaperänäytteenotossa pyritään ottamaan edustavia näytteitä. Edustava näyte kuvaa mahdollisimman tarkasti ja yleisesti tutkittavaa aluetta ja haitta-ainetta. Tutkimuksissa on tärkeää, että näytteenotto suoritetaan järjestelmällisesti ja jokainen näyte on yhdistettävissä näytteenottopaikkaan. Näytteenottokäytännöt vaihtelevat riippuen siitä, minkälai-

nen tutkimus on kyseessä. Kun tehdään kattavaa tutkimusta pilaantuneisuudesta puhdistustarpeen arviointia varten, huolellinen valmistautuminen ja suunnittelu ovat tärkeitä onnistumisen kannalta. Jos taas tehdään seurantanäytteenottoa esimerkiksi työmaan ollessa samaan aikaan käynnissä, toimenpiteet on suunniteltu etukäteen ja aiempi tutkimustieto ohjaa työtä. Jos näytteenotto on tehtävä välittömästi esimerkiksi onnettomuustilanteessa, työn suunnittelu ja toteutus tehdään samanaikaisesti. [5, s. 15; 6, s. 272.]

3.1 Maaperän ominaisuuksia

Suomen tärkein maalajiryhmä on moreeni, joka käsittää 53 % pintamaa-alasta. Moreeni on jäätikön mukana kulkeutunutta kiviainesta, joka sisältää kaikkia maalajitteita, aina hienorakeisesta savesta kiviin ja lohkaraisiin asti. Muut maalajiryhmät koostuvat jäätikön sulamisvesikerrostumista, turpeesta ja järvien liejuserrostumista. Nämä ryhmät jaetaan synnyn ja kerrostumisen perusteella omiin alaluokkiinsa. Oleellista maaperätutkimuksien kannalta ovat maaperän ominaisuudet, tärkeimpänä lajitepitoisuus eli yksittäisten rakeiden koko ja kokojakauma. [7, s. 55, 6.]

Valtaosa pilaantuneen maan tutkimuksesta tehdään täyttömailla. Täyttömaa on yhdestä tai useammasta kohteesta uuteen paikkaan kuljetettua maa-ainesta, usein maanrakennustarkoituksissa. Täyttömaa-aineet ovat usein sekalaisia, sisältävät montaa eri raekokoa, ja seasta saattaa löytyä jätettä. [5, s. 13.]

Suurin osa maaperän teknisistä ominaisuuksista riippuu raekokojakaumasta. Vallitsevan raekoon perusteella päätetään, mihin luokkaan otos maaperästä kuuluu. Maaperätutkimuksissa käytetään rakennusteknistä tai geoteknistä maalajiluokitusta. Rakennusteknisessä luokittelussa erotetaan kivennäismaalajit ja eloperäiset maalajit omiin luokkiinsa, geoteknisessä luokittelu tehdään karkearakeisiin maalajeihin, moreenimaalajeihin, hienorakeisiin maalajeihin ja eloperäisiin maalajeihin. [7, s. 66, 75–81.] Kuvassa 4 on esitetty geoteknisen luokittelun mukaiset, raekoon perustavat pää- ja alalajitteet.

Pääajite	Alalajite	Raekoko (mm)
Lohkareet (Lo)		>600
Kivet (Ki)		>60 ... 600
	Suuret kivet	>200 ... 600
	Pienet kivet	>60 ... 200
Sora (Sr)		>2 ... 60
	Karkeasora	>20 ... 60
	Keskisora	>6 ... 20
	Hienosora	>2 ... 6
Hiekka (Hk)		>0,06 ... 2
	Karkeahiekka	>0,6 ... 2
	keskihiekka	>0,2 ... 0,6
	hienohiekka	0,06 ... 0,2
Siltti (Si)		0,002... 0,06
	Karkeasiltti	0,02...0,06
	keskisiritti	0,006...0,02
	hienosiltti	0,002...0,006
Savi (Sa)		< 0,002

Kuva 4. Geotekninen maalajiluokittelu. [7, s. 81.]

Eloperäinen maa-aines eli humus tai turve on biologisesti hajonnutta orgaanista ainesta. Turpeella tarkoitetaan suokasvien hajoamisesta syntynyttä ainesta, humuksella kaikkea orgaanista hajonnutta ainesta. Haitta-aineet aiheuttavat eloperäisessä maa-aineessa kemiallisia reaktioita, ja usein haitta-aineet sitoutuvat eloperäiseen maa-ainekseen. [7, s. 70; 5, s. 13.] Maaperätutkimuksissa orgaaninen aine voi häiritä öljyhiilivetyjen kenttämittauksia, koska kenttämittauslaite ei erota öljyhiilivetyjä maaperän alkuperäisistä pitoisuuksista. Laboratoriossa orgaaninen aines voidaan erottaa ulkopuolisesta öljyhiilivetyjen lähteestä.

Maaperässä on aina maa-aineksen seassa huokosia, jotka sisältävät vettä tai ilmaa. Maaperän rakenne riippuu sen geologisesta synnystä tai täyttömaan tapauksessa käytettyjen täyttömaiden ominaisuuksista. Kiinteän aineksen raekokojakauma ja tiiveys määrittävät, minkä kokoisia huokokset ovat ja huokoisuuden kokonaismäärän. Tiiviissä maaperässä huokokset ovat pieniä, löyhemmässä isompia. Huokoisuus voidaan laskea tutkimalla maaperässä olevan ilman ja veden yhteistilavuus. [7, s. 84, 90.]

Vesi liikkuu maaperässä painovoiman seurauksena alaspäin, kiinnittyy maa-ainepartikkeleihin eri fysikaalisten ilmiöiden vaikutuksesta tai pysyy huokosissa. Riippuen ilmiön voimakkuudesta, vesi voi olla kiinnittyneenä maarakeiden pinnalle tai huokosiin, tiukemmin maarakeiden pinnalle tai sitoutuneena maahiukkasiin tai mineraaleihin. Maanpinnan alapuolinen vesi esiintyy nesteinä, höyrynä tai jäänä. Pohjavesivyöhykkeessä maaperän huokokset ovat täyttyneet kokonaan vedellä. Pohjaveden pinnan yläpuolisen, osittain kyllästyneen vyöhykkeen sisältämää vettä kutsutaan maavedeksi. [7, s. 88.]

Maaperän luontaiset mikrobit pystyvät hajottamaan useita orgaanisia haitta-aineita, erityisesti monia öljyhiilivetyjä. Hajoamisen seurauksena haitta-ainepitoisuudet voivat laskea, mutta jos hajoaminen on epätäydellistä, se voi johtaa haitallisempien muuntumistuotteiden syntymiseen. Orgaanisten yhdisteiden hajoamista voidaan pyrkiä osoittamaan maaperän kaasunäytteillä. Mikrobitoiminnan aiheuttama merkki on kohonnut hiilidioksidipitoisuus ja laskenut happipitoisuus huokoskaasussa. [2, s. 101.]

3.2 Näytteenottomenetelmät

Maaperänäytteenotossa pyritään ottamaan sellaisia näytteitä, joiden analyysitulosten pohjalta voidaan tehdä johtopäätöksiä haitta-aineiden levinneisyydestä ja pitoisuuksista. Näytteenottomenetelmä valitaan tutkimuksen tavoitteiden, maalajien ja käytettävissä olevan kaluston mukaan. Tutkittavat haitta-aineet määrittävät kaluston vaatimustasoa, esimerkiksi haihtuvia orgaanisia yhdisteitä tutkittaessa näyte täytyy saada eristettyä nopeasti, kun taas raskasmetalliyhdisteet eivät haihdu tuoreesta näytteestä ympäristöön. [8, s. 13, 21.]

Maaperänäytteet ovat joko yksittäisnäytteitä tai kokoomanäytteitä. Yksittäinen näyte edustaa pistemäistä, tarkkaa sijaintia. Kokoomanäyte koostuu useasta eri paikasta otetusta osanäytteestä. Kokoomanäytteestä saadaan keskimääräinen havainto tutkitun alueen haitta-ainepitoisuuksista. [8, s. 26.]

Jos maa-aines sekoittuu näytteenoton aikana, näyte on häiriintynyt. Esimerkiksi lapiolla suoraan maasta tai kaivinkoneen kauhalla nostetut näytteet ovat häiriintyneitä. Luonnon-tilassa talteen saatu näyte on häiriintymätön. Tällaisia näytteitä on mahdollista saada tarkoitukseen suunnitelluilla näytteenottoputkillla. [6, s. 270–272.]

3.2.1 Koekuopitus

Koekuopat kaivetaan tutkimusalueelle kaivinkoneella. Kaivinkone sopii maaperätutkimuksiin, kun tutkimus kohdistuu pohjaveden pinnan tason yläpuolelle ja noin 0–5 metrin syvyydelle maan pinnasta. Pohjaveden tasolle kaivattaessa materiaali sekoittuu ja on märkää. Näytteet otetaan kuopasta halutulta syvyydeltä joko suoraan kuopan seinämistä tai pohjalta tai kaivinkoneen kauhasta. Usein maat kaivetaan kerroksittain kasoille ja kasasta otetaan näyte. Kaivinkoneen käyttöä voi rajoittaa asfaltointi tai ahdas näytteenottoympäristö. [8, s. 23.] Koekuopasta tehdään näytteenoton yhteydessä havaintoja maaperän kerroksista. Tavallinen syvyys koekuopalle on 3–5 metriä, kalustosta riippuen. Syvemmälle kaivattaessa kaivuun hidastuu merkittävästi. Kallion pinta tai liian lohkareinen maaperä pysäyttävät kuopan kaivamisen.

3.2.2 Kairatutkimukset

Kairanäytteenottoa tehdään alueilla, joihin koekuopitus ei sovi. Tutkimuksissa kairausvaunu ajetaan tutkittavan pisteen kohdalle ja maahan porataan reikä. Kairaustankoihin kiinnitetty näytteenotin tunkeutuu haluttuun syvyyteen, ja maanäyte nostetaan ylös. Näytteenotin on pilaantuneisuustutkimuksissa malliltaan putkinäytteenotin tai sisäputkinäytteenotin. Putkinäytteenotin on poravaunuun kiinnitetty ontto putki, jonka sisään mahtuu kairaustanko. Sisäputkinäytteenottimessa putken sisällä on pienempi putki tai näytepussi, joihin näyte kerätään. Sisäputkion voi olla joko yläpäästä avonainen läpivirtausmalli tai suljettu malli. Kun näytteenotin on nostettu ylös, näyte irrotetaan putkesta näytteenottoastiaan tai -pussiin, tai toimitetaan eteenpäin näyteputkessa. [5, s. 30.]

Kairaamisen etuna on mahdollisuus ottaa näytteitä syvältä maaperästä. Käyttämällä poraustoimintaan soveltuvaa poravaunua voidaan läpäistä isoja kiviä ja kallioperää. Kairatutkimusten heikkous on riski näytteen sekoittumisesta syvyysuunnassa muihin kerroksiin, jos näytteenottoa ei tehdä huolellisesti. Havaintojen tekeminen maakerroksista tai jätejakeista on hankalaa. Näytteenottimet lämpenevät kairattaessa, jolloin haihtuvat yhdisteet saattavat hävitä näytteenoton yhteydessä. [5, s. 28–33.] Kuvassa 5 nähdään maaperätutkimuksissa käytettävä raskas kairakone.



Kuva 5. Raskas porakonekaira ja työryhmä. [5, s. 29.]

3.3 Laboratorioanalyysit

Kenttätutkimuksissa otetut maanäytteet toimitetaan mahdollisimman nopeasti laboratorioon. Näytteistä voidaan tutkia niiden geologisia, kemiallisia, fysikaalisia sekä teknisiä ominaisuuksia. Näytteitä esikäsittellään kentällä tai laboratoriossa, jotta niiden edustavuus ja näin ollen tutkimustulosten oikeellisuus varmistetaan. Haihtuvien yhdisteiden säilyminen varmistetaan siirtämällä näyte metanoliliuokseen, tai vaihtoehtoisesti käytetään kaasutiiviitä näytepusseja. Laboratoriossa näytteet tehdään tasalaatuisiksi eli homogeenisoidaan sekoittamalla ja murskaamalla. Lisäksi näytteitä kuivatetaan, seulotaan, ositetaan ja jaetaan pienempiin näytekokoihin. [5, s. 37–38.]

Pilaantuneisuustutkimukseen käytettävällä laboratoriolla täytyy olla voimassa akkreditointi, eli laboratorion täytyy pystyä osoittamaan, että testausmenetelmät täyttävät kansainväliset standardivaatimukset. Yleisesti esiintyvien haitta-aineiden laboratorioanalyysia ohjaavat ISO-standardit. [9.] Tässä työssä käsiteltävien maanäytteiden analysointiin

on käytetty kaasukromatografia-laitteistoa FID- ja massaspektrometri-detektoreilla sekä headspace-tekniikkaa.

Analyysitulokset ilmoitetaan haitta-ainepitoisuuden suhteena painoyksikköön. Yleinen pitoisuusyksikkö maaperänäytteille on milligrammaa kilogrammassa tai mikrogrammaa kilogrammassa maata (mg/kg tai µg/kg). Myös miljoonasosa-yksikköä (ppm), joka vastaa maanäytteille esitystapaa mg/kg käytetään. [8, s. 12.] Haitta-ainepitoisuus ilmoitetaan näytteen kuivapainoa kohden.

Kaasukromatografia

Kaasukromatografia on erotus- ja analyysimenetelmä, jota käytetään näytekomponenttien käsittelyyn. Kaasukromatografialaitteistoon syötetään kaasumainen tai nestemäinen näyte. Kiinteä näyte liuotetaan sopivaan liuottimeen. Näyte höyrystetään höyrystyskammiossa ja johdetaan kantajakaasun mukana kolonniin. Kolonnin lämpötilaa säädetään prosessin aikana, koska lämpötila vaikuttaa analyyttien erottumiseen. Kolonnissa on putken sisäpintaan kemiallisesti sidottu nestemäinen stationaarifaasi, ja höyrystyneen näytteen yhdisteet jakautuvat kolonnissa kantajakaasun ja stationaarifaasin välille. Yhdisteet voidaan erottaa niiden suhteellisten höyrynpaineiden ja liukenevuuksien mukaisesti. [10, s. 35.]

Headspace- eli höyrytilatekniikassa maanäyte laitetaan kaasutiiviiseen astiaan, jossa on tilaa kaasufaasille. Hiilivedyt vapautuvat diffuusion vaikutuksesta höyrytilaan, kunnes faasien välillä on tasapaino. Höyrytilasta otetaan kaasumainen näyte manuaalisesti ruiskulla tai automaattisella näytteensyötöllä ja johdetaan kolonniin. [11, s. 11.]

Kolonnissa erottuvat yhdisteet johdetaan detektoriin eli ilmaisimeen. Liekki-ionisaatiodektori eli FID-laite on yleisin detektori kaasukromatografiassa. Detektorin liekkiin syötetään vetyä ja synteettistä ilmaa tutkittavan aineen kanssa, ja orgaaniset analyytit hajoavat radikaaleiksi ja ioneiksi. Ionit aiheuttavat muutoksen kaasun sähkönjohtokyvyssä, ja tästä havaitaan orgaaniset yhdisteet. [10, s. 18–20.]

Massaspektrometrillä saadaan tarkkaa tietoa analyyttien rakenteesta. Näyte syötetään kaasukromatografian kolonniin, joka on liitetty suoraan massaspektrometrin ionisaa-

tiokammioon, jossa näytteen yhdisteet ionisoidaan. Muodostuneet ionit erotetaan toisistaan niiden massa-varaussuhteen perusteella, ja nämä ionit mitataan detektorilla. Havainnoista tehdään kuvaaja eli massaspektri. Massaspektriä tulkitaan vertaamalla saatua kuvaajaa tietokannassa olevaan spektrikirjastoon. [10, s. 20–22; 12.]

4 Maaperän huokoskaasu

Maaperän huokosissa olevan ilman eli huokoskaasun koostumus on tyypillisesti lähellä ilmakehän koostumusta. Huokoskaasu tunkeutuu maaperään ilmanpaineen vaihtelun ja maaperän ja ilmakehän lämpötilaerojen vaikutuksesta. Hiilidioksidin määrä on hieman ilmakehää suurempi ja vastaavasti hapen määrä pienempi, johtuen maaperän mikrobi-toiminnasta ja kasvien juurten ”hengityksestä”. Huokoskaasun koostumusta täytyy aina verrata tutkimusalueen ilman koostumukseen, koska kaupunkialueiden ilmassa on lähes aina havaittavissa haihtuvia hiilivetyjä. [13, s. 21]

Maaperän huokosissa on huokoskaasun lisäksi vettä höyrynä, nesteinä tai maarakeisiin sitoutuneena. Kaasun ja veden määrasuhteet vaihtelevat maaperän huokosten koon ja pohjaveden tason mukaan. Veden määrä huokosissa suurenee lähestyttäessä pohjaveden pintaa. Huokoskaasun koostumus vaihtelee säätilan ja sen muutosten vaikutuksesta. Ilmanpaineen vaihtelu aiheuttaa puhtaan ilman tunkeutumista maaperään tai huokoskaasun purkautumista maaperästä. Maaperän lämpötilan vaihtelu aiheuttaa muutoksia kaasumaisten epäpuhtauksien pitoisuuksiin. Yleisesti pitoisuudet laskevat maaperän lämpötilan laskiessa. Roudassa olevan maaperän kaasunläpäisevyys on niin huono, ettei maaperästä kannata ottaa huokoskaasunäytteitä ollenkaan. [8, s. 28; 13, s. 21.]

4.1 Huokoskaasututkimuksia käsittelevät julkaisut Suomessa

Huokoskaasututkimuksia ei ole käsitelty laajasti Suomessa. Huokoskaasunäytteenottoon löytyy jonkin verran ohjeistuksia, ja maaperän puhdistaminen huokoskaasumenetelmällä on kuvailtu useissa julkaisuissa.

Ympäristökeskuksen julkaisu ”Huokoskaasu maaperän ja pohjaveden saastuneisuuden kuvaajana” (1995) käsittelee huokoskaasututkimusten teoriaa ja yleistä sopivuutta Suomen ja erityisesti Helsingin olosuhteisiin. Julkaisussa todetaan, että maaperän huokoskaasun koostumuksen on todettu kuvaavan hyvin eräitä maaperän ja pohjaveden kemiallisia ominaisuuksia, erityisesti orgaanisten haitta-aineyhdisteiden läsnäoloa, levinneisyyttä ja jossakin määrin pitoisuutta. Haitta-aineiden pitoisuuksien huokoskaasussa todetaan kasvavan lähestyttäessä päästölähdettä. Ottamalla näytteitä eri syvyyksiltä voidaan rajata, onko päästölähde maaperän vedellä kyllästymättömässä vyöhykkeessä vai pohjavedessä. [13, s. 1, 34.]

Vesi ja ympäristöhallituksen julkaisussa ”Kenttätyöskentely jätealueiden ja saastuneiden maa-alueiden tutkimuksissa” (1994) käsitellään huokoskaasua muiden kenttätutkimusten lisäksi. Julkaisussa todetaan huokoskaasututkimusten antavan karkean arvion saasteista maaperässä, ja että tarpeeksi kattavia huokosilman ja maaperän pilaantuneisuuden vertailututkimuksia ei ole olemassa. [14, s. 32.]

4.2 Huokoskaasututkimusten soveltuvuus Suomeen

Huokoskaasututkimukset onnistuvat parhaiten, kun maaperäolosuhteet ovat kuivat ja lämpimät. Maaperän kaasunläpäisevyys ja homogeenisuus ovat myös oleellisia tekijöitä. Suomessa maaperä on kylmää ja kosteaa, ja huokoskaasututkimukset kohdistetaan usein täyttömaille, joiden ominaisuudet ovat satunnaisia. Vedellä kyllästymätön kerros Suomen maaperässä on tavallisesti vain muutamia metrejä. Tämä on otettava huomioon näytteenotossa, sillä pohjavedestä maaperään vapautuvat haihtuvat yhdisteet saattavat muodostaa jyrkän pitoisuustason nousun maaperään. Näytteet on suositeltavaa ottaa aina saman etäisyyden päästä pohjaveden pinnasta, ja huokoskaasun tasapainon häiriintymistä on varottava. [13, s. 44–47.]

4.3 Haitta-aineet huokoskaasussa

Yleisimmät maaperästä tutkittavat orgaaniset epäpuhtaudet eli haitta-aineet ovat peräisin poltto- tai voiteluaineista, kasvinsuojeluaineista tai orgaanisista liuottimista. Orgaani-

set yhdisteet ovat erilaisten hiilivetyjen seoksia. Nämä hiilivedyt jaetaan avainyhdisteisiin, jotka ovat oleellisia ympäristötutkimuksissa haitallisuutensa takia. [13, s.9; 2, s. 206–207.] Kuvassa 6 on esitetty öljytuotteita jaoteltuna hiililuvun perusteella.

Tuote	Hiililuku	Yhdisteet	Kiehumispistealue
Bensiini	C4-C12	BTEX-yhdisteet, muut monoaromaatit ja haaroittuneet alkaanit, pienempiä määriä n-alkaaneita, alkeeneita, sykloalkaaneita ja naftaleeneja, lisäaineina MTBE:tä ja muita hapettimia	40–200 °C
Keroseeni	C6-C16	Sykloalkaanit ja n-alkaanit, pienempiä määriä monoaromaatteja ja haaroittuneita alkaaneja, hyvin vähän BTEX- ja PAH-yhdisteitä	150–300 °C
Dieselöljy ja kevyt polttoöljy	C8-C21	N-alkaanit, haaroittuneet alkaanit ja sykloalkaanit, pienempiä määriä monoaromaatteja, naftaleeneja ja PAH-yhdisteitä	200–325 °C
Raskas polttoöljy	C12-C34 (ja yli)	N-alkaanit, haaroittuneet alkaanit ja sykloalkaanit, raskaat PAH-yhdisteet (asfalteenit ja hartsit), monoaromaatteja ja naftaleeneja, rikkiä ja tyyppiä sisältäviä hiilivetyjä	350–700 °C
Voitelu- ja moottoriöljy	C18-C34 (ja yli)	Haaroittuneet alkaanit ja sykloalkaanit, PAH-yhdisteet, mono- ja diaromaatit	325–600 °C

Kuva 6. Öljytuotteiden pääkomponentit. [2, s. 207.]

Huokoskaasusta voidaan tutkia sellaisia orgaanisia yhdisteitä, jotka haihtuvat helposti ympäristöön. Näistä hiiliyhdisteistä käytetään nimitystä VOC-yhdisteet (Volatile Organic Compounds). Helposti haihtuvat yhdisteet ovat joukko hiilivetyjä, joiden kiehumispiste on enintään 250 °C, höyrynpaine 20 °C:n lämpötilassa vähintään 0,01 kPa tai yhdistettä jonka haihtuvuus vastaa edellä mainittuja tietyissä olosuhteissa. Yhdisteen haihtuminen on sitä suurempaa, mitä alempi kiehumispiste sillä on. Haihtuvien yhdisteiden joukko on laaja, joten tavallisesti tarkastellaan erityisesti BTEX-yhdisteitä eli bentseeniä, tolueenia, etyylibentseeniä ja ksyleeniä, jotka ovat helposti haihtuvia aromaattisia yhdisteitä. Muita tarkasteltavia ryhmiä ovat haihtuvat PAH-yhdisteet, halogenoidut hiilivedyt ja oksygenoidut eli happea sisältävät hiilivedyt. [15, s. 4–7; 16.]

Päästessään maaperään nestemäiset yhdisteet leviävät maan huokosissa kapillaarivoimien ja painovoiman vaikutuksesta alaspäin pohjavettä kohti. Maaperän huokosissa oleva vesi vaikuttaa öljy-yhdisteiden suotautumisenopeuteen syrjäyttämällä öljyn pienemmistä huokosista isompiin. Hiilivety-yhdisteet pidättäytyvät maaperän huokosiin, adsorboituvat maarakeiden pinnalle, liukenevat kapillaariveteen tai suotautuvat pohjaveteen

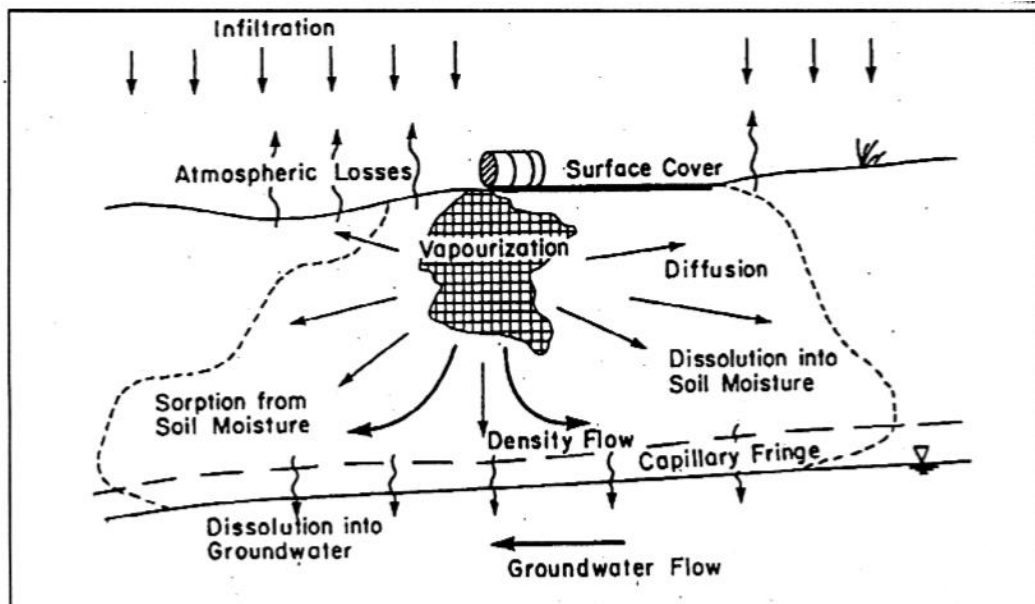
asti. Osa yhdisteistä pystyy nestemuotoisena ja osa haihtuu sekoittuen huokoskaasuun. Nestemäinen kapillaarivoimien vaikutuksesta maaperään pidähtynyt haitta-aine-esiintymä voi aiheuttaa tilanteen, jossa haihtuvat yhdisteet likaavat pohjavettä ja maaperää vielä pitkään saastumisen jälkeen. [13, s. 10, 14.]

Yhdisteiden haihtumiseen vaikuttavat yhdisteiden fysikaalis-kemialliset ominaisuudet, konsentraatiot sekä maaperän ominaisuudet ja vallitsevat olosuhteet. Yhdisteet, joilla on alhainen kiehumispiste, liikkuvat helpoimmin huokoskaasussa, ja yhdisteet, joiden höyrönpaine on korkea, kaasuuntuvat tehokkaimmin. Maaperän lämpötila ja kosteus vaikuttavat haitta-ainepitoisuuksiin, koska haihtuvat hiilivedyt reagoivat maaperässä kulkevan ilmavirran suhteellisen kosteuden muutoksiin. [13, s. 15–18; 14, s. 32.]

Huokoskaasussa esiintyville haitta-aineille ei ole asetettu virallisia raja-arvoja. Kohonneiden pitoisuuksien raja on riskinarvioinnissa arvioitu sellaisena pitoisuutena, joka ei aiheuta riskiä sisäilma-altistukselle mahdollisessa kohteeseen rakennettavassa asuinrakennuksessa.

4.4 Kulkeutuminen ja liikkuminen

Huokoskaasun ja siitä tutkittavien haitta-aineiden liikkumiseen maaperässä vaikuttavat ympäristön ja kaasun ominaisuudet. Merkittävimmät leviämiseen vaikuttavat ilmiöt ovat diffuusio ja advektio. Maaperän kannalta liikkumisnopeuteen vaikuttaa maaperän läpäisevyys. [13, s. 22–23.] Kuvassa 7 on havainnollistettu haihtuvien yhdisteiden leviämistä maaperään.



Kuva 7. Haihtuvat yhdisteet maaperässä. [13, s. 9.]

Diffuusio tarkoittaa sellaista molekyylien liikettä väliaineessa, joka johtuu molekyylien luontaisesta pyrkimyksestä konsentraatio- ja osapaine-erojen tasoittumiseen. Toisin sanoen molekyylit pyrkivät väkevämmistä pitoisuuksista laimeampiin. Väliaineena maaperässä on huokoskaasu tai vesi. Haihtuvat yhdisteet pyrkivät pois päin haitta-ainelähteestä ja leviävät ympäristöön. Diffuusio voidaan jakaa molekyylien välisistä törmäyksistä johtuvaan diffuusion tai molekyylien sekä huokoisen maan kanavien seinämien välisistä törmäyksistä johtuvaan diffuusion. Diffuusiosta johtuva haihtuvien yhdisteiden leviäminen on riippuvaista maaperän läpäisevyydestä. Huokoskanavien pienentyessä kulkeutuminen hidastuu. [13, s. 22–23.]

Huokoskaasun advektiolla tarkoitetaan liikettä paine-, lämpötila- tai tiheyserojen sekä pohjaveden pinnan vaihtelun vaikutuksesta. Haihtuvien yhdisteiden molekyylipaino voi poiketa muusta huokoskaasusta, ja raskaammat yhdisteet painuvat alaspäin, kevyempien noustessa ylöspäin. Alaspäin kulkeutuvan yhdisteen kohdatessa huonosti läpäisevän kerroksen kulkeutuminen muuttuu vaakasuuntaiseksi. Jos maaperä on hyvin läpäisevää, tiheyserot vaikuttavat kulkeutumiseen merkittävästi. Paine-erot aiheutuvat ilmanpaineen tai lämpötilan vaihtelusta, veden liikkumisesta maaperässä tai pinta-osissa tuulesta. Maaperän paine-eron kasvaessa huokoskaasun virtaus voimistuu. Pohjaveden

nousun seurauksena huokoskaasua purkautuu maanpinnalle, pinnan lasku aiheuttaa imeytymistä maaperään. [13, s. 23; 2, s. 100.]

Huokoskaasu liikkuu parhaiten karkearakeisessa maaperässä, jossa huokokset ovat suuria. VOC-yhdisteitä sisältävä huokoskaasu liikkuu arviolta noin 50 kertaa nopeammin kuin pohjavesi maaperässä. Adsorboituminen maakeiden pinnalle ja orgaaniseen ainekseen sekä liukeneminen huokosveteen hidastavat kulkeutumista. [13, s. 23]

Diffuusiokertoimen laskeminen

Molekyylien törmäämisestä toisiinsa eli molekulaarisesta diffuusiosta johtuvaa haitta-aineen kulkeutumista voidaan arvioida diffuusiokertoimella. Diffuusiokertoimen laskenta-kaava maaperässä:

$$D_s = D_a * \frac{\theta_a^{3,33}}{n^2} + D_w * \left(\frac{1}{H}\right) * \frac{\theta_w^{3,33}}{n^2}, \text{ jossa} \quad (1)$$

D_a on diffuusiokerroin ilmassa, m^2 / d

θ_a on ilmapitoisuus vajovesivyöhykkeessä, tyypillinen vaihteluväli 0,1–0,48

n on kokonaishuokoisuus, tyypillinen vaihteluväli 0,2–0,5

D_w on diffuusiokerroin vedessä, m^2 / d

H on Henryn lain vakio

O_w on vesipitoisuus vajovesivyöhykkeessä, tyypillinen vaihteluväli 0,02–0,4 [2, s. 198, 204.]

Diffuusiokertoimet ja Henryn lain vakio ovat saatavissa kirjallisuuslähteistä. Ympäristön olosuhteita kuvaavat parametrit voidaan määrittää ympäristögeoteknisillä tutkimuksilla. Kuvassa 8 on työssä käsiteltävien haitta-aineiden fysikaalis-kemiallisia ominaisuuksia kuvaavien muuttujien oletusarvoja. Haitta-aineiden diffuusiota ei arvioida matemaattisesti tässä työssä.

Aine	M mg/l	S Pa	V _p g/mol	H [-]	logK _{ow} [-]	logK _{oc} [-]	D _a m ² /h	D _w m ² /h
Bentseeni	78,1	1,99E+03	9,51E+03	1,59E-01	2,13	1,87	2,95E-02	3,55E-06
Tolueneeni	92,1	6,11E+02	2,96E+03	1,90E-01	2,73	2,09	2,65E-02	3,27E-06
Etylibentseeni	106	1,59E+02	9,53E+02	2,70E-01	3,15	2,53	2,43E-02	3,05E-06
Ksyleenit	106	2,09E+02	7,76E+02	1,68E-01	3,16	2,41	2,43E-02	3,05E-06
MTBE	882	2,89E+04	1,76E+04	2,28E-02	0,94	1,13	3,34E-02	3,34E-06
Antraseeni	178	7,13E-02	9,31E-04	9,89E-04	4,45	4,3	3,00E-02	2,35E-06
Bentso(a)antraseeni	228	1,16E-02	2,07E-07	1,73E-06	5,54	5,79	3,00E-02	2,08E-06
Bentso(a)pyreeni	252	8,42E-04	1,25E-07	1,60E-05	6,13	5,82	3,00E-02	1,98E-06
Bentso(k)fluoranteeni	252	4,84E-04	1,24E-08	2,76E-06	6,11	6,24	3,00E-02	1,98E-06
Fenantreeni	178	8,50E-01	1,51E-02	1,35E-03	4,47	4,23	3,00E-02	2,35E-06
Fluoranteeni	202	2,01E-01	3,80E-03	1,63E-03	5,16	5,18	3,00E-02	2,21E-06
Naftaleeni	128	3,18E+01	6,83E+00	1,17E-02	3,3	2,98	2,31E-02	2,77E-06
TPH_AL > EC5-EC6	81	2,80E+01	5,00E+04	4,70E+01	3,52	2,9	3,60E-02	3,60E-06
TPH_AL > EC6-EC8	100	4,20E+00	8,61E+03	5,00E+01	3,6	3,6	3,60E-02	3,60E-06
TPH_AL > EC8-EC10	130	3,25E-01	8,21E+02	5,50E+01	3,69	4,5	3,60E-02	3,60E-06
TPH_AL > EC10-EC12	160	2,61E-02	7,90E+01	6,00E+01	3,76	5,4	3,60E-02	3,60E-06
TPH_AL > EC12-EC16	200	5,90E-04	3,55E+00	6,90E+01	3,85	6,7	3,60E-02	3,60E-06
TPH_AL > EC16-EC35	270	9,99E-07	1,72E-01	8,70E+01	3,97	8,8	3,60E-02	3,60E-06
TPH_AR > EC8-EC10	120	6,50E+01	8,21E+02	3,90E-01	3,55	3,2	3,60E-02	3,60E-06
TPH_AR > EC10-EC12	130	2,50E+01	7,90E+01	1,30E-01	3,58	3,4	3,60E-02	3,60E-06
TPH_AR > EC12-EC16	150	5,80E+00	3,55E+00	2,80E-02	3,61	3,7	3,60E-02	3,60E-06
TPH_AR > EC16-EC21	19	6,50E-01	1,72E-01	1,90E-03	3,66	4,2	3,60E-02	3,60E-06
TPH_AR > EC21-EC35	240	6,60E-03	1,70E-05	1,70E-05	3,74	5,1	3,60E-02	3,60E-06
PCBt	328	6,30E-03	5,20E-04	1,13E-02	6,8	5,61	3,00E-02	1,73E-06
PCDD-PCDF-PCB	322	3,00E-04	1,40E-06	6,50E-04	5,18	3,92	1,75E-02	1,75E-06
Dikloorimetaani	84,9	1,80E+04	4,30E+04	8,61E-02	1,25	1,22	3,00E-02	3,41E-06
Vinyylilkloridi	62,5	4,28E+02	2,98E+05	1,85E+01	1,52	1,56	3,00E-02	3,97E-06
Dikloorieteenit	97	7,76E+02	1,55E+04	8,21E-01	1,27	1,82	3,19E-02	3,19E-06
Trikloorieteenit	131	1,16E+03	5,81E+03	2,78E-01	2,61	2,06	2,75E-02	2,74E-06
Tetrakloorieteenit	166	1,19E+02	1,57E+03	9,29E-01	3,4	2,42	2,51E-02	2,44E-06

Kuva 8. Orgaanisten haitta-aineiden ominaisuuksia kuvaavien muuttujien oletusarvoja. [2, s. 183.]

4.5 Huokoskaasunäytteenotto

Huokoskaasunäytteet otetaan yleisimmin kohteeseen asennetuista näytteenottoputkista. Putket voivat olla metallisia tai muovisia; materiaaliin vaikuttaa putken asennustapa. Tärkeää on, ettei putken materiaalista vapaudu ympäristöön mittausvirheitä aiheuttavia yhdisteitä. Putki voi olla alapäästä avoin tai suljettu siiviläputki. Putken pään syvyys riippuu maaperän olosuhteista, kuten pohjaveden pinnan tasosta. Putken siivilän täytyy olla sellaisella tasolla, että huokoskaasunäyte voidaan ottaa vedellä kyllästyttämättömästä vyöhykkeestä. Muita näytteenottorakenteita ovat maahan painettavat sondit ja näytteenottokaivot. Huokoskaasunäytteitä voidaan ottaa myös kellareista, ryömintätiloista ja vastaavista maanalaisista rakenteista. [13, s. 24–25; 8, s. 29.]

Kuvassa 9 nähdään tyypillinen huokoskaasun tarkkailuputki ulkoa päin. Varsinainen näytteenottoputki on teräksisen vandaaliputken sisällä.



Kuva 9. Huokoskaasun tarkkailuputki tutkimusalueella.

4.5.1 Aktiivinen näytteenotto

Aktiivisessa näytteenotossa huokoskaasua pumpataan näytteenottopumpulla näytekeräimeen. Kaasua pumpataan haluttu tilavuus tietyssä ajassa. Tavallisesti näytekeräimenä käytetään adsorptioputkia, jotka sisältävät orgaanisia yhdisteitä adsorboivaa kemikaalia. Putket ovat lasisia tai metallisia. Yleisimmät adsorptioaineet ovat Tenax ja aktiivihili. Pumppauksen jälkeen adsorptioputki suljetaan ja toimitetaan laboratorioon. Muita näytteenottimia ovat näytepussit, kokoomaputket ja injektioruiskut, joihin huokoskaasu kerätään sellaisenaan. [8, s. 29–32.] Kuvassa 8 on Drägerin valmistava huokoskaasukeräin.



Kuva 10. Dräger-aktiivihiihiputki.

4.5.2 Passiivinen näytteenotto

Passiiviset näytekeräimet sisältävät adsorptioainetta, johon tutkittavat yhdisteet kerääntyvät. Näytekeräin asennetaan näytteenottorakenteeseen ja jätetään keräämään yhdisteitä määrätyn ajaksi. Näytteenottoaika suunnitellaan tutkittavien yhdisteiden ominaisuuksien ja tutkimuksessa halutun määritystarkkuuden mukaan. Aikaväli voi olla tunteista kuukausiin. Näytekeräin haetaan pois halutun ajan jälkeen, suljetaan asianmukaisesti ja toimitetaan laboratorioon analysoitavaksi. Laboratorio tarvitsee näytteenottoon kuluneen ajan, mikäli tulokset halutaan ilmoittaa pitoisuuksina. [8, s. 34.]

Passiivikeräimet sopivat toistuviin tarkkailumittauksiin, koska tulokset edustavat tiettyä, halutessa pitkääkin aikaväliä. Näin ollen säätilojen vaihtelu tai ympäristön muutokset eivät näy keräinten tuloksissa, toisin kuin yksittäisiä näytteitä otettaessa. Passiiviset keräimet sopivat tutkimukseen, jossa halutaan pitkäaikaispitoisuuksia haitta-aineista. Tutkittavasta alueesta ja ongelmasta täytyy olla riittävästi tietoa, jotta passiivikeräinten käyttö on perusteltua. [13, s. 37.]

4.5.3 Kenttätestit

Yleisimmät huokoskaasututkimuksiin käytettävät kenttämittarit ovat PID-mittari ja monikaasumittari. PID- eli fotoionisaatiodektektoiri analysoi haihtuvien yhdisteiden kokonaismäärää ilmasta. Tekniikalla voidaan havaita yli sata haihtuvaa yhdistettä, joskaan kaikkia mahdollisia yhdisteitä mittari ei tunnista. Mittariin imetään ilmaa pumpulla, ja sisällä oleva UV-lamppu ionisoi ilman. Ionisoinnista vapautuva sähkövirta on verrannollinen ionisoituneihin molekyyleihin, mistä laite tunnistaa ja ilmoittaa yhdisteiden pitoisuuden ilmassa miljoonasosina (ppm). [5, s. 48.] Kuvan 9 PID-mittaria käytetään myös maaperänäytteiden kenttätutkimuksiin.



Kuva 11. MiniRae 3000 -PID-mittari.

Monikaasumittari mittaa yleisimmin kaatopaikkakaasuja eli happea, hiilidioksidia tai metaania tai muita palavia kaasuja, kuten hiilimonoksidia ja rikkivetyä. Mittarin erilaiset sensorit analysoivat sisään imetyn ilman ja antavat tulokset tilavuusprosentteina tai miljoonasosina. Monikaasumittareita käytetään tyypillisesti työsuojelutarkoituksiin, mutta huokoskaasututkimuksissa niiden avulla voidaan tutkia maaperän mikrobitoimintaa. [17.]

4.6 Laboratorioanalyysit

Huokosilmanäytteiden analyysiin käytetään kaasukromatografiaa. Tässä työssä käsiteltävät näytteet on kerätty Tenax-, XAD- ja Carbograph-näytekeraimiin ja analysoitu termodesorptio-kaasukromatografialla käyttäen massaspektrometria detektorina.

Termodesorptio on yleisin haihtuvien yhdistelmien määrittämiseen käytetty tekniikka. Adsorptioputkeen kerätty kaasunäyte lämmitetään korkeaan lämpötilaan, ja inertti kaasu johdetaan putken läpi. Höyrystyneet analyytit huuhtoutuvat kylmäloukkuun, johon ne kerääntyvät ja fokusoituvat. Kylmäloukku lämmitetään, ja kantajakaasu kuljettaa analyytit kaasukromatografian kolonniin ja eteenpäin detektorille. [18, s. 13.]

Analyysitulokset ilmoitetaan haitta-ainepitoisuutena suhteessa tilavuusyksikköön. Yleisesti käytetään yksikköä $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mikrogrammaa kuutiossa).

5 Huokoskaasututkimukset Ruotsissa

Tässä osiossa työtä käytiin läpi, millaisia ohjeistuksia ja linjauksia huokoskaasututkimuksista on saatavilla ruotsinkielisissä julkaisuissa. Luvussa 5.2 esitellään tekniikkaa, jota tutkimuksissa voitaisiin hyödyntää.

5.1 Huokoskaasututkimuksia käsittelevät julkaisut Ruotsissa

Ruotsin ympäristönsuojeluviranomaisen julkaisussa "Hållbar sanering: Inventering av provtagningsstrategier för jord, grundvatten och porgas" (2009) esitetään näytteenottostrategioita pilaantuneelle maaperälle. Huokoskaasusta todetaan, että kokemus ja tie-

tämys näytteenottomenetelmistä ja strategioista on suhteellisen vähäistä verrattuna esimerkiksi maaperänäytteenottoon. Huokoskaasututkimuksia varten suositellaan luomaan käsitteellinen malli, jossa otetaan ajallinen ja alueellinen ulottuvuus sekä maaperän ja haitta-aineyhdisteiden parametrit huomioon. Mallinnusohjelmista mainitaan esimerkiksi VSP (Visual Sampling Plan) ja SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance), joiden avulla huokoskaasututkimuksia voisi tehostaa. Julkaisussa todetaan passiivisten huokoskaasunäytteiden edustavan noin muutaman kuutiometrin aluetta. [19, s. 29–31.]

Ruotsin geoteknisen yhdistyksen julkaisussa ”Fälthandbok: Undersökningar av förorenade områden” (2013) ohjeistetaan pilaantuneiden maa-alueiden kenttätutkimuksia. Huokoskaasun osalta suositukset ovat vastaavia suomalaisten näytteenotto-ohjeistuksien kanssa, joskin huokoskaasututkimuksia on käsitelty tarkemmin. [20, s. 65–69.]

Ruotsin leveysasteilla huokoskaasun ilmankosteus on yleensä 100 % eli ilma on vesihöyryn kyllästämää. Kosteus voi kerääntyä huokoskaasukeräimen adsorptioaineeseen, ja sen kapasiteetti voi pienentyä. Näytteenottimen täytyy olla vuorattu vettä hylkivällä kuitumateriaalilla, jotta edustava adsorptionäyte voidaan ottaa kosteasta ilmasta. Aktiivisessa näytteenotossa on tärkeää, että pumppausnopeus säädetään alhaiseksi, jotta näyte ei häiriinny. Pumppausnopeudeksi haihtuville aineille suositellaan 100 ml/min (millilitraa minuutissa). Kenttätestien osalta julkaisussa ehdotetaan vaihtoehtoksi liikuteltavaa kaasukromatografia, jolla huokoskaasussa olevat hiilivety-yhdisteet voidaan erotella ja tunnistaa kenttäolosuhteissa. [20, s. 65-69, 76.]

5.2 MIP

MIP (Membrane Interface Probe) on huokoskaasun kenttämittausjärjestelmä, jossa kairareikään asennetaan mittaussondi, joka esittää tutkimustuloksia reaaliajassa. Kairareikään tutkittavaan syvyyteen laskettava sondi lämmitetään ja kantajakaasun avulla ilmanäyte kuljetetaan laitteistolle analysoitavaksi. Näyte analysoidaan haihtuvia hiilivety-yhdisteitä havaitsevilla detektoreilla vastaavasti kuin laboratoriotutkimuksissa. Järjestelmällä saadaan ensi käden tietoa maaperän geologiasta sekä pilaantuneisuuden laadusta ja sijainnista. [21.]

Geoprobe on Yhdysvalloissa kehitetty järjestelmä, jossa samalla kairakoneella voidaan ottaa maaperä-, pohjavesi- ja huokoskaasunäytteitä. Kairakone on yhteydessä kenttälaboratorioon, jossa huokoskaasua voidaan tutkia MIP-tekniikalla. Tanskalainen konsulttiyritys NIRAS on kehittänyt tekniikkaa eteenpäin, ja nykyään tutkimuksissa saadaan tietoa maaperän vedenjohtavuudesta, pohjavedestä haihtuvista haitta-aineista ja PAH-yhdisteistä. Geoprobe-laitteistoa on käytetty kenttätutkimuksiin pohjoismaissa Tanskassa ja Ruotsissa. [22.]

6 Kohdetiedot ja aineisto

Tässä luvussa esitellään tutkimuskohde ja siellä tehdyt ympäristötekniset tutkimukset, jotka muodostavat aineiston vertailututkimukselle.

6.1 Tutkimusalueen tiedot

Helsingissä sijaitseva kohdealue on tällä hetkellä pysäköintialue, joka tullaan rakentamaan asuinkäyttöön. Alue jakautuu rakennettavaan suunnittelualueeseen ja sen lähiympäristöön. FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy on tehnyt alueella useita pilaantuneisuustutkimuksia vuosina 2012 ja 2015–2018. Tutkimuksissa on otettu maaperänäytteitä koe-kuopista ja kairapisteistä, huokoskaasunäytteitä alueella asennetuista havaintoputkista sekä pohjavesinäytteitä pohjaveden havaintoputkista. [23.]

Tutkimusalue sijaitsee vanhalla, isomman alueen käsittävällä soranottoalueella. Soranotto on jatkunut ainakin 1960-luvulle asti, jonka jälkeen alue on täytetty sekalaisilla, rakennusjätettä sisältävillä täyttömailla seuraavan kahden vuosikymmenen aikana. Soranotto on ulottunut pohjaveden tasolle, noin kymmenen metriä nykyisen maanpinnan tason alapuolelle. Täyttömaan kerrokset sisältävät pääosin hiekkaa, kiviä ja soraa sekä joissakin pisteissä savea ja silttiä. Täytön alapuolinen pohjamaa on hiekkaa noin kaksikymmentä metriä alaspäin, ja sen alla on moreenia vähintään 2–7 metriä. Kallion pinta on erittäin syvällä, eikä sitä ole tavoitettu geoteknisissä kairauksissa. [23.]

Kohteen riskinarvioinnissa on todettu maaperän olevan pilaantunutta. Kulkeutumisen osalta on todettu, että haitta-aineiden leviäminen veden mukana syvemmälle maaperään

ja pohjaveteen sekä haihtuvien haitta-aineiden kulkeutuminen kohteeseen suunniteltujen rakennusten sisäilmaan on mahdollista. [23.]

Kohde sijaitsee vedenhankinnalle tärkeäksi luokitellulla pohjavesialueella. Pohjaveden taso on ollut keskimääräisesti noin 10 metriä maanpinnan tason alapuolella. [23.]

6.2 Pilaantuneisuustutkimukset kohteessa

Maanäytteet otettiin koekuopista kaivinkoneella kerroksittain 0,5–3 metrin kerrosvälein riippuen kerrosten erottuvuudesta. Kairausnäytteet otettiin metrin välein. Kairapisteet ulotettiin enintään 15 metrin syvyyteen. Keskiraskaalla kairakalustolla näytteenotto osoitautui hankalaksi kovien maakerrosten takia, ja näytteenotto vaati useita yrityksiä tai jouduttiin keskeyttämään ennen tavoitesyvyyden saavuttamista. Kone vaihdettiin tutkimusten edetessä raskaaksi porakonekairaksi, jolloin näytteenotto helpottui. Osasta näytteistä mitattiin haihtuvien yhdisteiden pitoisuudet PID-mittarilla. Huokoskaasunäytteet otettiin havaintoputkista passiivi- ja aktiivimenetelmiä käyttäen. [23.]

Toteutuneiden tutkimusten avainluvut on esitetty taulukossa 1. Kairatutkimuksissa otettujen näytteiden tarkkaa lukumäärää ei ole merkitty lähdeaineistoon, joten arvio kaikista näytteistä on muodostettu muistiinpanojen perusteella.

Taulukko 1. Tutkimusten lukumäärä [24; 25.]

Tutkimukset 2015 - 2018				
Maaperätutkimukset		Yhteensä	Näytteitä otettu	Näytteitä analysoitu laboratoriossa
Koekuopat		3	8	6
Kairatutkimukset		56	350 (arvio)	256
Huokoskaasututkimukset				
Havaintoputket		30	92	92

Pilaantuneisuustutkimusten lisäksi alueella suoritettiin koeluontoinen huokoskaasukäsittely, jossa suunnittelualueen keskeltä maaperästä imettiin huokoskaasua aktiivihiihikäsittely-

telyyn samalla, kun alueen reunoille syötettiin lämmitettyä paineilmaa. Koetta varten alueelle asennettiin 15 kappaletta uusia huokoskaasun imu- ja syöttöputkia. Kokeen tarkoituksena oli arvioida, soveltuuko menetelmä kyseisen alueen maaperän puhdistamiseen. Koekunnostus toteutettiin ajanjaksolla kesäkuu-lokakuu 2017. Johtopäätöksenä oli, että huokosilmakäsittelyllä ei voida merkittävästi laskea maaperän huokosilman haitta-ainepitoisuuksia. Kokeen aikana otettiin useita huokoskaasunäytteitä aktiivimenetelmää käyttäen. [26.]

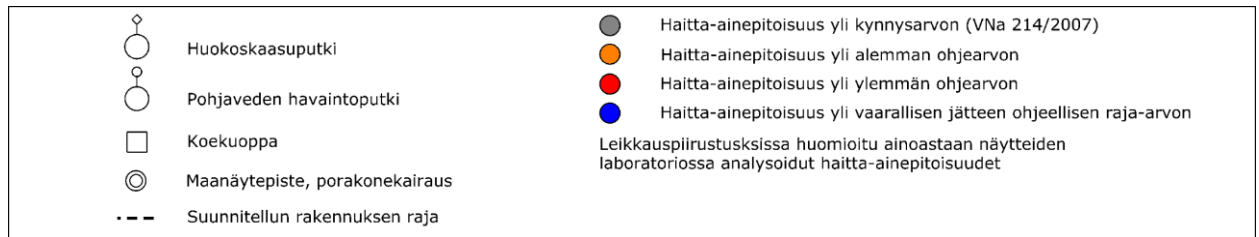
6.2.1 Maaperänäytteet

Vuoden 2012 tammikuussa kohteessa tehtiin maaperän jätetäyttötutkimus, jossa kaivettiin kahdeksan koekuoppaa, enintään 3,3 metrin syvyydelle. Suurimmassa osassa kuoppia todettiin rakennusjätettä. Kahdesta näytteestä analysoitiin PAH-yhdisteet. Näytteistä ei todettu valtioneuvoston asetuksen 214/2007 kynnyksarvoja ylittävää pilaantuneisuutta. [23.]

Vuoden 2015 toukokuussa alueella tehtiin geoteknisiä tutkimuksia, joiden yhteydessä todettiin voimakasta haitta-aineen hajua suunnittelualueen länsiosassa. Havainnon takia käynnistettiin maaperän pilaantuneisuustutkimukset touko-kesäkuun vaihteessa. Tutkimuksissa kaivettiin kolme koekuoppaa noin viiden metrin syvyydelle nykyisestä maanpinnasta, ja tehtiin viisi kairapistettä syvyydelle 8–15 metriä nykyisestä maanpinnasta. Pilaantuneisuuden laajuutta tarkennettiin vielä elokuun 2015 ja helmikuun 2016 välisenä aikana useammilla kairapistetutkimuksilla, joissa tehtiin yhteensä 35 tutkimuspistettä. [23.]

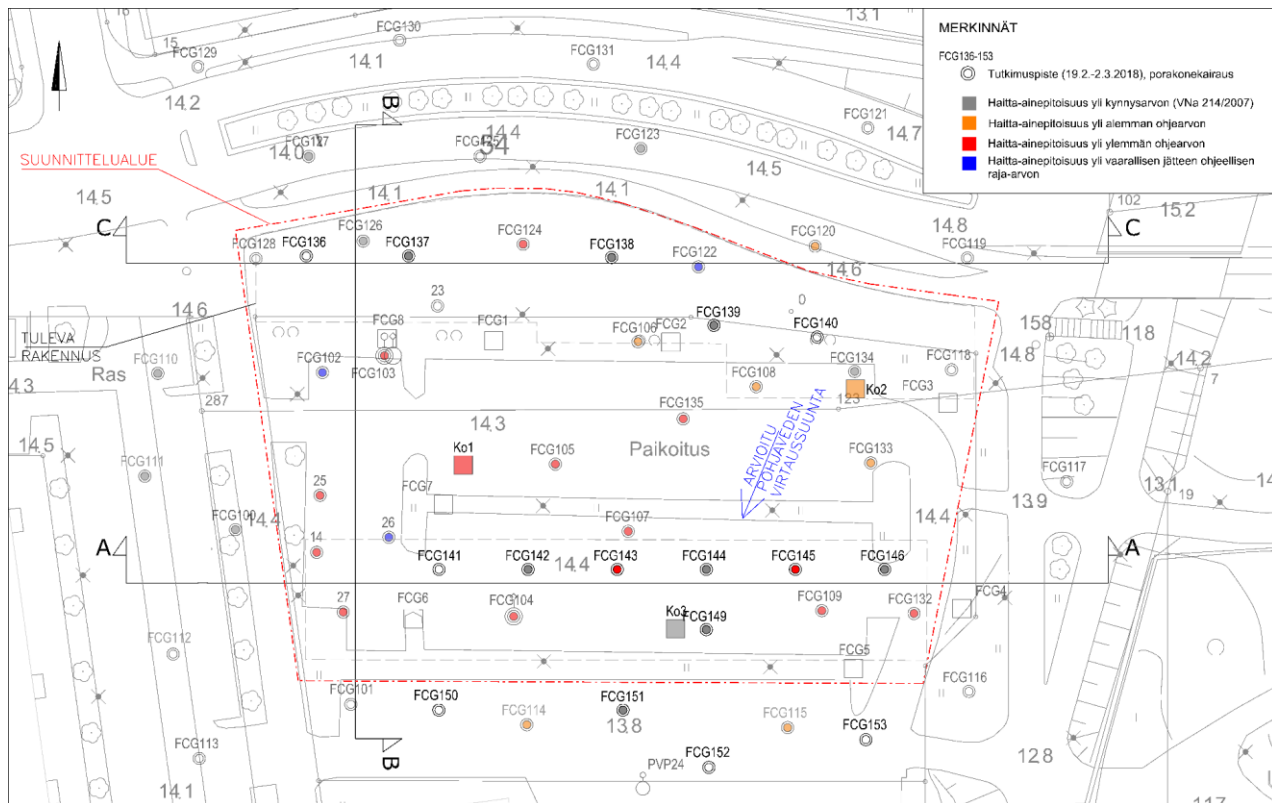
Vuoden 2018 helmi-maaliskuussa tehtiin viimeisin kairatutkimus pilaantuneisuuden edelleen tarkentamiseksi. Uusia näytepisteitä tehtiin 16. [23.]

Kuvassa 12 on esitetty tutkimuskartan selitykset.



Kuva 12. Tutkimuskartan selitteet.

Kuvassa 13 on esitetty maanäytteiden tutkimuskartta. Pisteet Ko1–Ko3 ovat koekuoppia, pisteet 14, 23, 25–27 ja FCG100–153 kairapisteitä. Pisteiden värikoodaukset osoittavat, jos näytteissä on havaittu Vna 214/2007 ohjearvot ylittäviä haitta-ainepitoisuuksia. Maanäytepisteet sijoittuvat suunnittelualueelle ja sen lähiympäristöön.



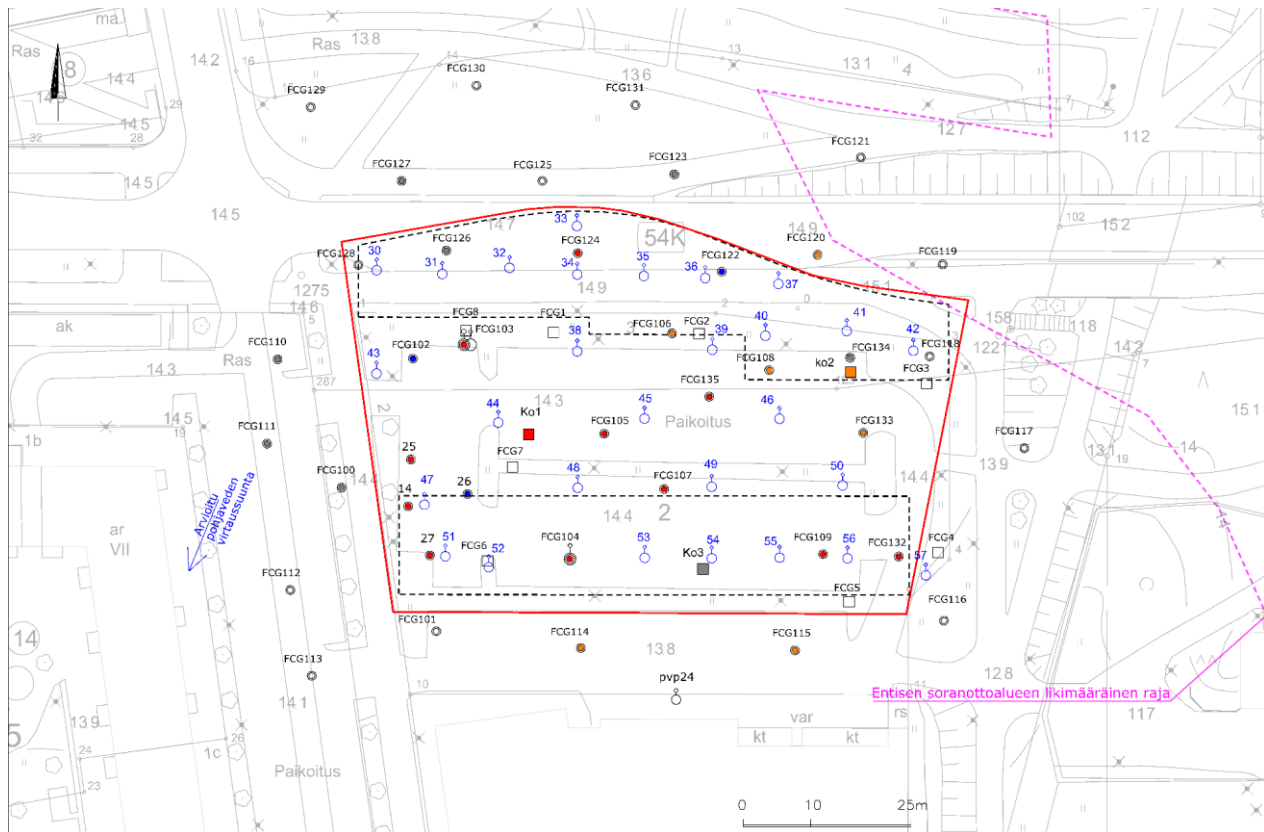
Kuva 13. Maaperänäytteiden sijaintikartta

6.2.2 Huokoskaasunäytteet

Suunnittelualueelle asennettiin kaksi huokoskaasun havaintoputkea elokuussa 2015. Putkista otettiin kolme kertaa näytteitä. Ilmanäytteet otettiin aktiivimenetelmällä ilmapumppua käyttäen aktiivihiliputkeen ja XAD-adsorbenttiputkeen elokuussa 2015, sekä passiivimenetelmällä Tenax-adsorbenttiputkeen lokakuussa 2015 ja kesäkuussa 2016. Passiivikeräinten keräysaika oli 8 päivää. Huokoskaasuputket olivat 3,2 metriä ja kolme metriä syviä ja näytteenottimet olivat 0,5–1 metrin syvyydellä maanpinnasta. [23.]

Alueelle asennettiin 28 kappaletta uusia havaintoputkia loka-marraskuussa 2016. Putkista otettiin näytteet passiivimenetelmällä Carbograph 1 TD -adsorbenttikeräimeen marraskuussa 2016 ja tammi- ja huhtikuussa 2017. Passiivikeräinten keräysaika oli 7–18 päivää. Lisäksi tammikuussa 2017 otettiin ilmapumppua käyttäen viidestä putkesta näyte Carbograph-putkeen. Huokoskaasuputket olivat 4 metriä syviä, ja näytteenottimet ulotettiin putken siiviläosuuden kohdalle 3–4 metrin syvyyteen. [25.]

Kuvassa 13 on esitetty huokoskaasun tarkkailuputkien sijainti kohteessa. Huokoskaasuputket on nimetty tunnuksin FCG103 ja FCG104, sekä HK30–HK57 (kuvassa sinisellä). Putket sijoittuvat yhtä lukuun ottamatta suunnittelualueelle.



Kuva 14. Huokoskaasuputkien sijaintikartta

6.3 Analyysit ja tulokset

Kaikista maaperänäytteistä analysointiin BTEX-yhdisteet ja suurimmasta osasta öljyhii-livedyt, PAH-yhdisteet ja klooratut hiilivedyt. 30 näytteestä analysoitiin Vna 214/2007:n mukaiset raskasmetallit. Haitta-ainepitoisuuksia esiintyi laajasti tutkimusalueella. Kohon-neet pitoisuudet havaittiin maaperästä pääosin syvyydsvälillä 2–10 metriä. [23.]

Maanäytteiden tutkimustuloksissa esiintyi kohonneita pitoisuuksia raskasmetalleja, kes-kiraskaita ja raskaita öljyhiilivety-yhdisteitä, PAH-yhdisteitä, BTEX-yhdisteitä ja kloorat-tuja hiilivetyjä. Ainoastaan yhdessä pisteessä todettiin kevyitä öljyhiilivetyjä. Öljyhiilive-

tyjen ja PAH-yhdisteiden pitoisuudet olivat merkittävimmit, koska niiden pitoisuudet ylittivät useassa pisteessä ylemmän ohjearvon. BTEX-yhdisteistä bentseeni ylitti useamassa pisteessä alemman ohjearvon. Klooratuista hiilivedyistä tetrakloorieteeni ylitti useassa pisteessä kynnysarvon ja vinyylikloridi yhdessä pisteessä ylemmän ohjearvon. [23.]

Huokoskaasunäytteistä analysoitiin haihtuvat yhdisteet. Huokoskaasunäytteissä esiintyi kohonneita pitoisuuksia kevyitä ja keskiraskaita öljyhiilivety-yhdisteitä, kloorattuja hiilivetyjä ja BTEX-yhdisteitä. Merkittävimmit kohonneet yhdisteet useissa pisteissä olivat alifaattiset ja aromaattiset öljyhiilivedyt välillä C_{8-16} , tri- ja tetrakloorieteeni ja bentseeni. Lisäksi naftaleeni oli koholla yhdessä havaintoputkessa. [24.]

Kohteessa on otettu pohjavesinäytteitä tutkimusalueelta ja sen ympäristöstä pohjavesiputkista. Pohjavesissä on todettu kohonneita haitta-ainepitoisuuksia. [23.] Pohjavesinäytteiden tulokset rajataan pois vertailusta.

7 Tutkimusten vertailu

Tässä osiossa työtä pyritään selvittämään, kuinka hyvin huokoskaasumittausten tulokset edustavat maanäytetuloksia. Selvitettävät osa-alueet ovat haitta-aineiden läsnäolo, pitoisuus ja levinneisyys.

7.1 Vertailun rajaus

Vertailuaineistoksi valitaan vuosien 2015–2018 aikana tehdyt pilaantuneisuustutkimukset. Tutkimukset rajautuvat huokoskaasuputkien osalta punaisella merkitylle suunnittelualueelle ja maaperänäytteiden osalta suunnittelualueelle ja lähiympäristöön (Kuva 13). Aineistosta rajataan pois vuoden 2017 huokoskaasukunnostuksen yhteydessä otetut huokosilmanäytteet.

Haitta-aineiden tarkastelu rajataan laboratorioissa tutkittuihin orgaanisiin hiilivety-yhdisteisiin maaperässä ja huokoskaasussa. Läsnäoloa tutkiessa vertailuaineistona käsitel-

lään kaikki yhdisteet, jotka on analysoitu huokoskaasunäytteistä. Pitoisuuksia ja levinneisyyttä tarkastellaan niiden haitta-aineiden osalta, joissa on esiintynyt selkeästi kohonneita pitoisuuksia molemmissa joukoissa.

7.2 Läsnaolo

Taulukosta 2 nähdään, mistä yhdisteistä on havaittu kohonneita pitoisuuksia pilaantuneisuustutkimuksissa. Vertailua tehdessä täytyi huomioida, että öljyhiilivetyjen fraktiointi on tehty oletuksena kaikille huokoskaasunäytteille, mutta maaperänäytteille tehtiin fraktiointi vain kahdesta näytteestä vuoden 2015 tutkimuksissa. Fraktionoinnin perusteella maaperän öljyhiilivedyt koostuvat suurilta osin alifaattisista jakeista välillä C₁₆₋₃₅ ja aromaattisista jakeista välillä C₂₁₋₃₅. [23.]

Taulukko 2. Yhdisteiden läsnäolo tutkimusalueella. [24; 25.]

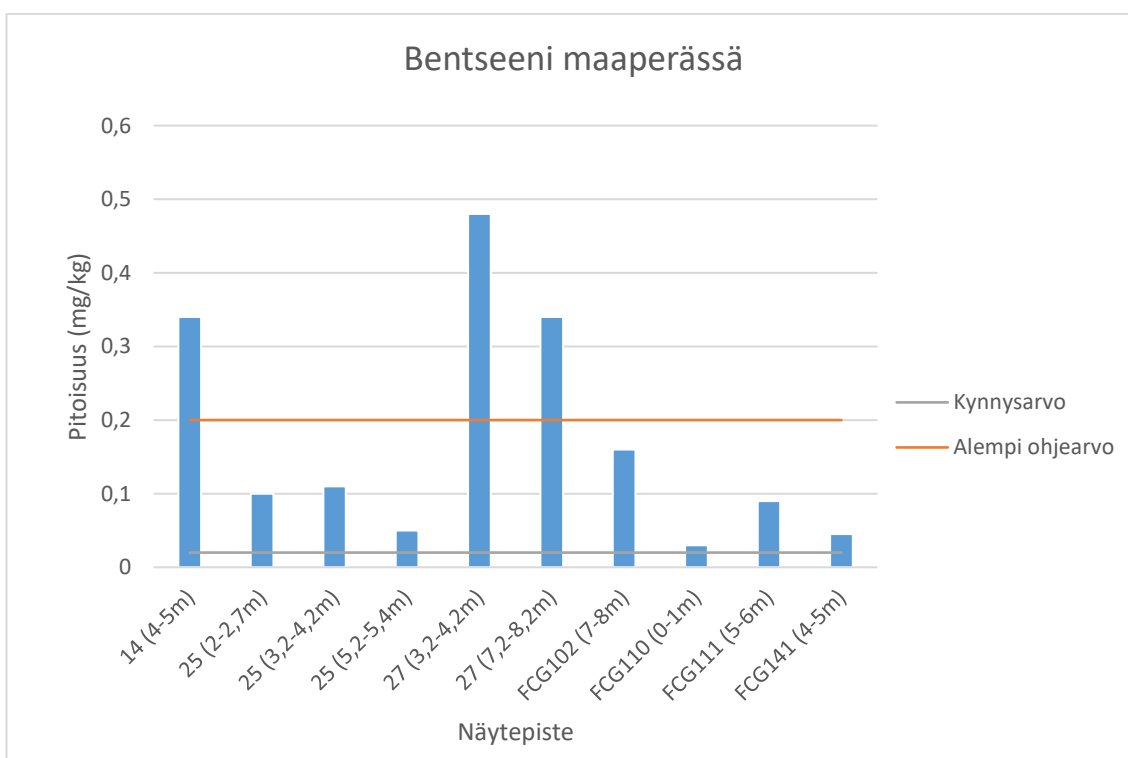
		Kohonneet pitoisuudet	
		Maaperä	Huokoskaasu
Aromaattiset	Bentseeni	x	x
	Naftaleeni	x	x
Halogenoidut	Tetrakloorieteeni	x	x
	Trikloorieteeni	x	x
	Vinyylikloridi	x	
Alifaattiset öljyhiilivedyt	Alifaattiset C5-C6		x
	Alifaattiset C6-C8		x
	Alifaattiset C8-C10	x	x
	Alifaattiset C10-C12	x	x
	Alifaattiset C12-C16	x	x
Aromaattiset öljyhiilivedyt	Aromaattiset C8-C10		x
	Aromaattiset C10-C12	x	x
	Aromaattiset C12-C16	x	x
Polyaromaattiset hiilivedyt	PAH-yhdisteet yhteensä	x	
	Naftaleeni	x	x
	Fenantreeni	x	

	Antraseeni	x	
	Fluoranteeni	x	
	Bentso(a)antraseeni	x	
	Bentso(k)fluoranteeni	x	
	Bentso(a)pyreeni	x	
	Yhteensä havaintoja	18	13

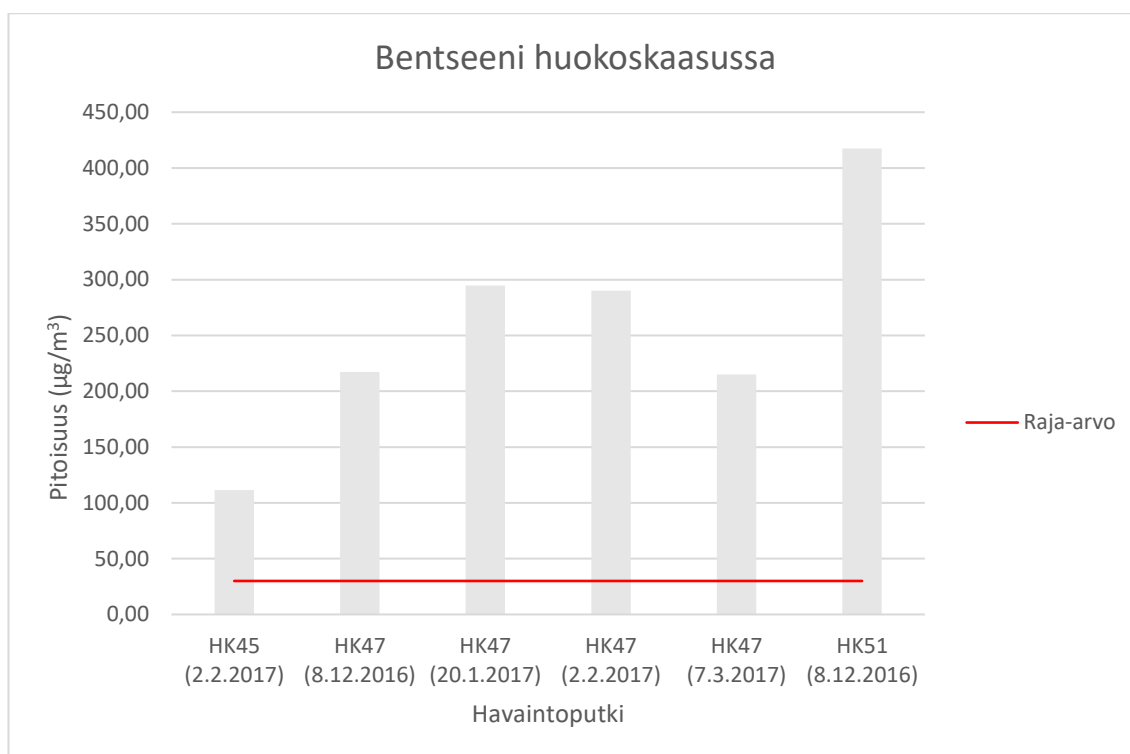
Taulukosta nähdään, että valtaosa maaperässä todetuista yhdisteistä havaittiin myös huokoskaasussa. Jos vertaillaan kaikkia huokoskaasu- ja maanäytetuloksia, huokoskaasussa havaittiin 72,2 % maanäytteistä havaituista haitta-aineista. Jos ei oteta huomioon heikosti haihtuvien PAH-yhdisteiden tuloksia, huokoskaasusta havaittiin 92,3 % maaperän haitta-aineista.

7.3 Pitoisuudet ja levinneisyys

Kuvissa 15 ja 16 on esitetty kohonneet bentseenin pitoisuudet tutkimusalueella.



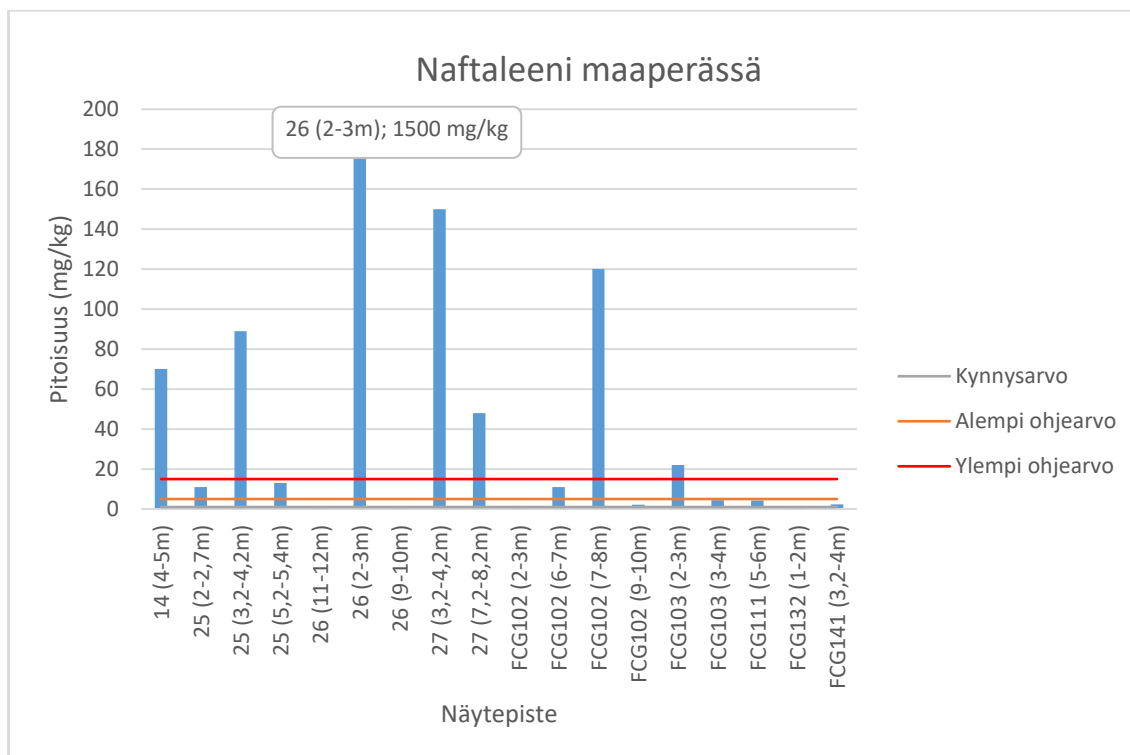
Kuva 15. Bentseeni maaperässä [24.]



Kuva 16. Bentseeni huokoskaasussa [25.]

Isoimmat maaperäpitoisuudet olivat suunnittelualueen lounaisosassa maanäytteissä 14,27 ja FCG102 syvyysvälillä 3–8 metriä. Huokoskaasun kohonneet pitoisuudet sijoittuvat samalla alueelle.

Kuvassa 17 ja taulukossa 3 on esitetty naftaleenin kohonneet pitoisuudet tutkimusalueella.



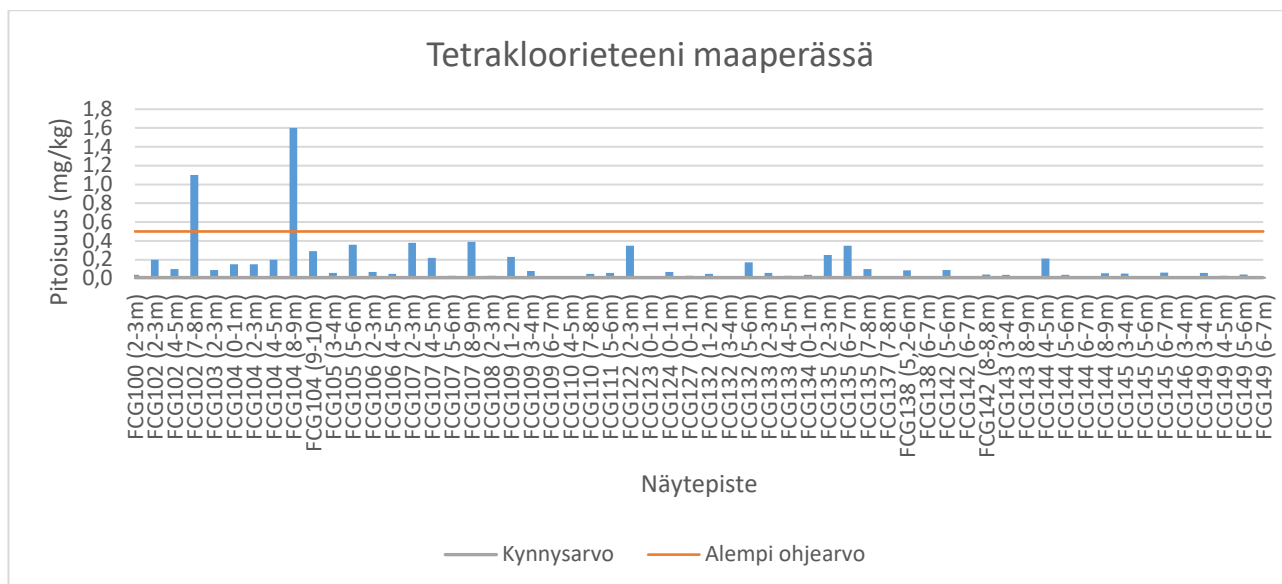
Kuva 17. Naftaleeni maaperässä [24.]

Taulukko 3. Naftaleeni huokoskaasussa [25.]

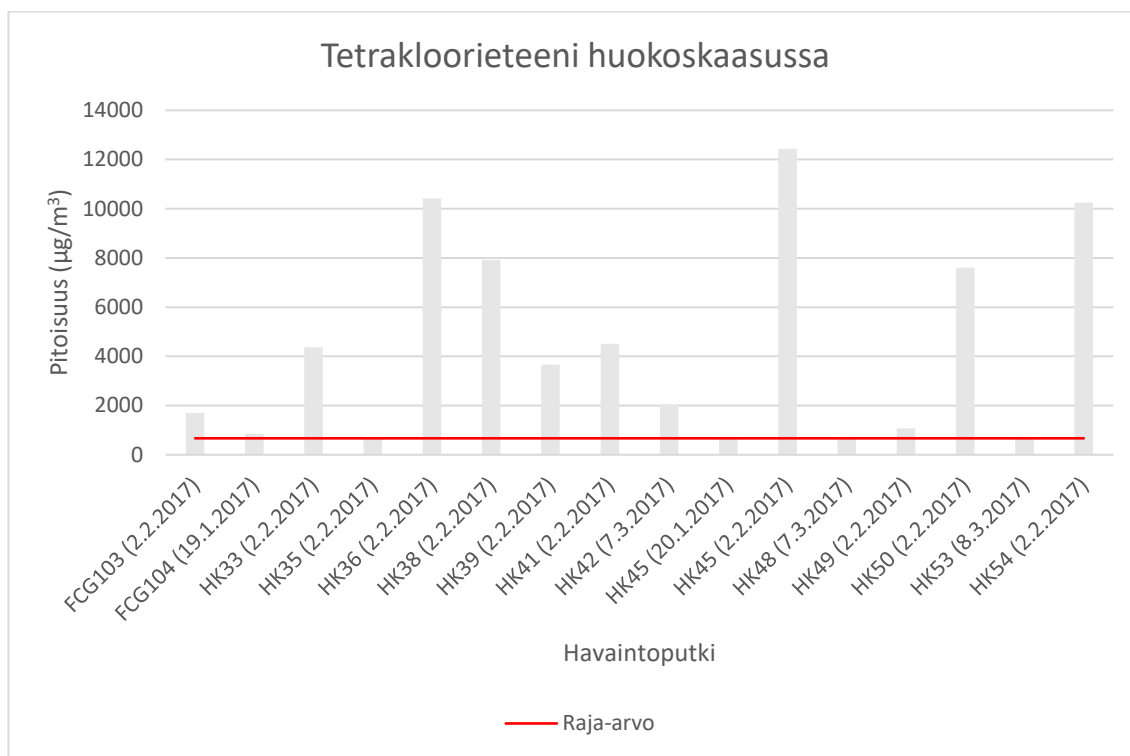
Naftaleeni huokoskaasussa	
Raja-arvo	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Näyteputki	Pitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
HK47 (8.12.2016)	32,35
HK47 (7.3.2017)	36,41

Isoimmat maaperäpitoisuudet olivat suunnittelualueen lounaisosassa pisteissä 25–27 ja FCG102 syvyysvälillä 2–8 metriä. Huokoskaasussa havaittiin raja-arvon ylittäviä pitoisuuksia vain havaintopisteessä HK47, joka sijoittuu samalle alueelle.

Kuvissa 18 ja 19 on esitetty tetrakloorieteenin kohonneet pitoisuudet tutkimusalueella.



Kuva 18. Tetrakloorieteeni maaperässä [24.]

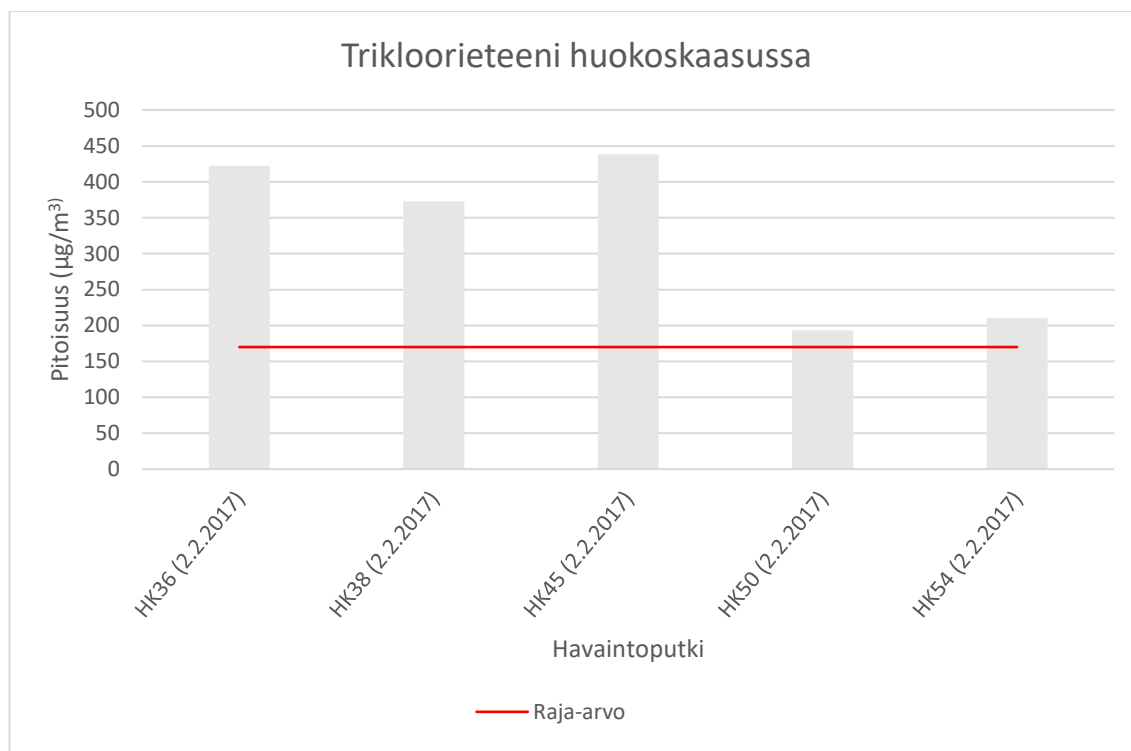


Kuva 19. Tetrakloorieteeni huokoskaasussa [25.]

Isoimmat maaperäpitoisuudet olivat tutkimusalueen keski- ja länsiosassa pisteissä FCG104 ja FCG102 syvyysvälillä 7–9 metriä. Kohonneita pitoisuuksia esiintyi koko tutkimusalueella. Huokoskaasussa havaittiin suurimmat pitoisuudet havaintoputkista

HK45, HK54, HK36, HK38 ja HK50, ja kohonneita pitoisuuksia esiintyi lähes koko alueella. Havaintoputket HK38 ja HK45 sijoittuvat samalla alueelle isoimpien maaperäpitoisuuksien kanssa.

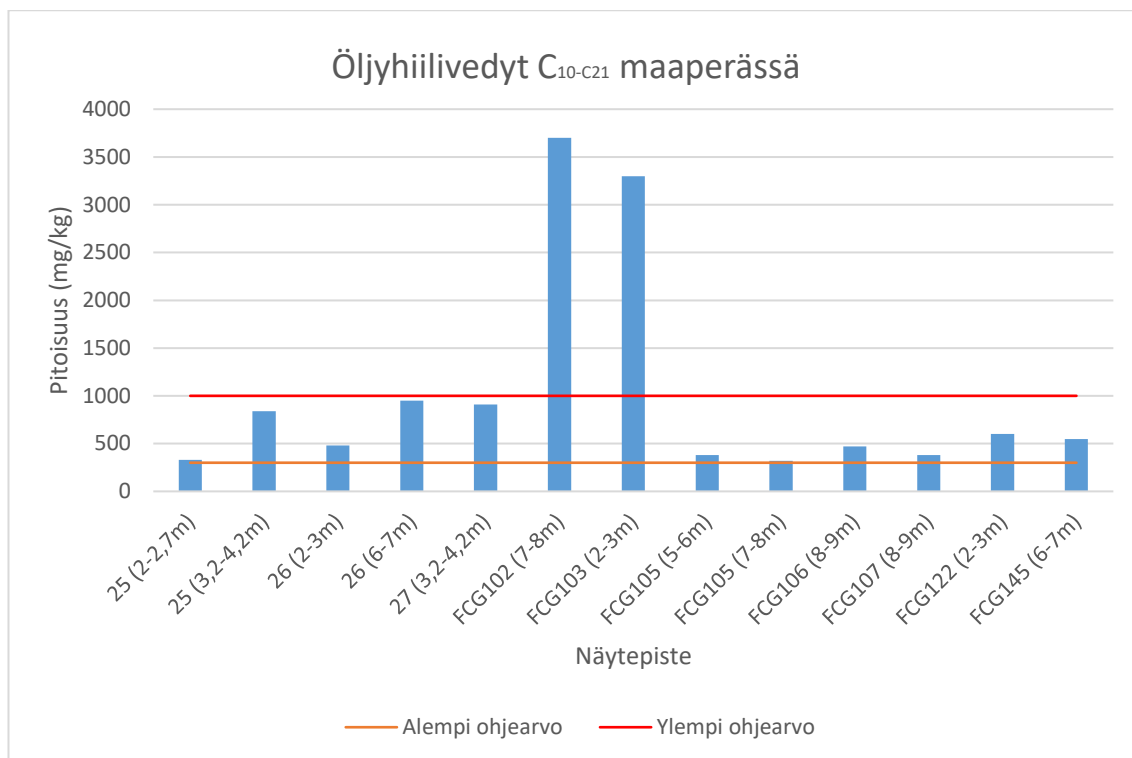
Kuvassa 20 on esitetty trikloorieteenin pitoisuudet huokoskaasussa.



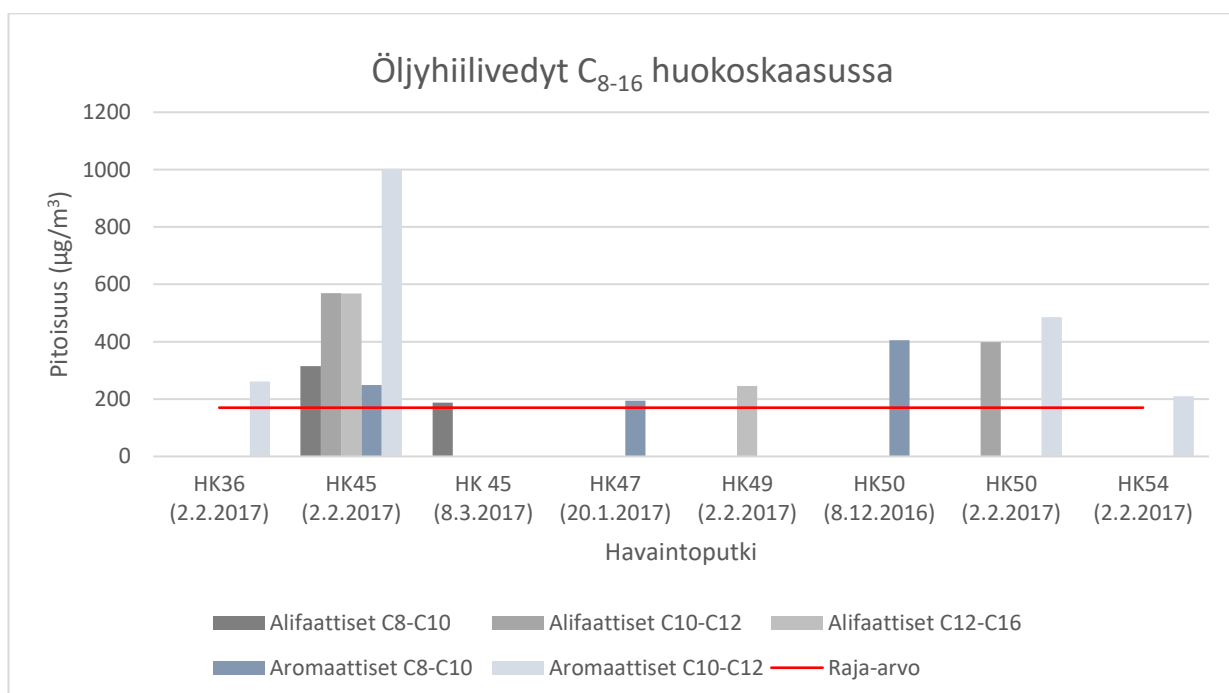
Kuva 20. Trikloorieteenin huokoskaasussa [25.]

Trikloorieteeniä havaittiin maaperässä vain pisteessä FCG102 (7–8 m) suunnittelualueen luoteisosassa, kynnysarvon ylittävänä pitoisuutena 0,03 mg/kg. Suurimmat huokoskaasupitoisuudet eivät sijoitu samalle alueelle. Huokoskaasussa pienempiä kohonneita pitoisuuksia esiintyi lähes koko alueella.

Kuvissa 21 ja 22 on esitetty kevyiden ja keskiraskaiden öljyhiilivetyjen kohonneet pitoisuudet tutkimusalueella.



Kuva 21. Öljyhiilivedyt C₁₀₋₂₁ maaperässä [24.]



Kuva 22. Öljyhiilivedyt C₈₋₁₆ huokoskaasussa [25.]

Isoimmat maaperäpitoisuudet kevyistä ja keskiraskaista öljyhiilivety-yhdisteistä esiintyivät suunnittelualueen lounaisosassa pisteissä FCG102 ja FCG103 syvyysväleillä 2–3 metriä ja 7–8 metriä. Pienempiä kohonneita pitoisuuksia esiintyi koko tutkimusalueella.

Huokoskaasussa havaittiin suurimmat pitoisuudet havaintoputkista HK45 ja HK50, ja kohonneita pitoisuuksia esiintyi useassa havaintopisteessä tutkimusalueella. Suurimmat koholla olevat pitoisuudet olivat aromaattisissa öljyhiilivedyissä välillä C_{10-12} . Havainnot sijoittuvat suurin piirtein samalla alueelle kohonneiden maaperäpitoisuuksien kanssa.

8 Johtopäätökset

8.1 Havaintojen edustavuus

Bentseeni on erittäin haihtuva ja hyvin liukeneva neste, joka ei tyypillisesti pidäty maa-ainekseen, vaan kulkeutuu helposti ja hajoaa ajan kuluessa. BTEX-yhdisteistä bentseeniä havaittiin maaperässä pitoisuuksina 0...0,48 mg/kg ja huokoskaasussa pitoisuuksina 0...417,40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Huokoskaasuhavainnot olivat kohonneiden maaperäpitoisuuksien läheisyydessä. Bentseenin huokoskaasupitoisuudet edustivat kohteessa hyvin maanäytepitoisuuksia.

Naftaleeni on PAH-yhdisteistä vesiliukoisin ja herkimmin haihtuva yhdiste, joka hajoaa maaperässä nopeammin kuin muut PAH-yhdisteet. Naftaleenia havaittiin maaperässä pitoisuuksina 0...1 500 mg/kg ja huokoskaasussa pitoisuuksina 0...36,41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Naftaleenin läsnäolo maaperässä näkyi huokoskaasussa, mutta pitoisuudet eivät olleet isoja.

Tetrakloorieteeni on haihtuva ja liukeneva neste, joka ei pidäty tiukasti maa-ainekseen, vaan kulkeutuu ja hajoaa maaperässä. Tetrakloorieteeniä todettiin maaperässä pitoisuuksina 0...1,6 mg/kg ja huokoskaasussa pitoisuuksina 0...12 431 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Yhdisteen haihtuminen maaperässä oli voimakasta, ja huokoskaasupitoisuudet edustivat hyvin maanäytepitoisuuksia.

Trikloorieteeni on haitta-aineominaisuuksiltaan tetrakloorieteeniä vastaava yhdiste. Trikloorieteeniä todettiin maaperässä yhdessä pisteessä pitoisuutena 0,03 mg/kg ja huo-

koskaasussa pitoisuuksina 0...438,5 µg/m³. Yhdisteen haihtuminen maaperässä oli voimakasta. Huokoskaasutuloksista havaittiin trikloorieteenin läsnäolo maaperässä, mutta päästön lähdettä ei voitu kohdentaa tarkemmin.

Kevyitä ja keskiraskaita öljyhiilivetyjakeita havaittiin maaperässä pitoisuuksina 0...3 700 mg/kg ja huokoskaasussa pitoisuuksina 0...1 002,5 µg/m³. Yhdisteiden läsnäolo huokoskaasussa välillä C₈₋₁₆ oli selkeästi havaittavissa, mutta päästölähteitä ei voitu kohdentaa tarkemmin.

8.2 Pohdinta

Kohteen pilaantuneisuus on täyttömaille tyypillisesti heterogeenistä, eli alueella on paljon pistemäistä jäännösfaasia. Jäännösfaasissa oleva öljy on sitoutunut maaperään, ja siitä liukenee öljyhiilivetyjä vajo- ja pohjaveteen sekä haihtuu huokoskaasuun. Ajan kuluessa kevyimmät öljyhiilivetyjakeet haihtuvat ja hajoavat biologisesti niin, että raskaampien jakeiden suhteellinen osuus kasvaa. [2, s. 129.] Kohteen maaperässä todettiin raskaita öljyhiilivetyjakeita C₂₁₋₄₀ pitoisuuksissa 0...19 000 mg/kg eli selkeästi enemmän kuin kevyempiä jakeita. Vastaavasti kaikista kevyimmät öljyhiilivetyjakeet olivat haihtuneet maaperästä (tai näytteistä), ja niistä tehtiin havaintoja vain huokoskaasusta.

Kohteessa havaitut trikloorieteeni ja vinyylikloridi ovat voineet syntyä tetrakloorieteenin biologisesta hajoamisesta. Vinyylikloridia ei havaittu huokoskaasusta, vaikka maaperään päässyt vinyylikloridi haihtuu helposti. Toisaalta vinyylikloridia havaittiin ainoastaan yhdestä maaperänäytteestä.

Kairanäytteenottoa tehtäessä näytteenotin on lämmennyt ja lämmittänyt näyteainesta. Osa haihtuvista haitta-ainesta on todennäköisesti poistunut näytteenoton yhteydessä. Näytteet on otettu kaasutiiviisiin näytepusseihin, mutta haihtumista on luultavasti tapahtunut siirättäessä näytettä pussiin. Vuonna 2018 otetuille kairanäytteille on tehty kestäväntä metanoliliuokseen, mikä ei näy tuloksissa kohonneina pitoisuuksina.

Huokoskaasunäytteet edustavat maaperässä aluetta, jonka määrittely on hankalaa. Huokoskaasun haitta-ainepitoisuuksia ei voida suoraan verrata maanäytetuloksiin, koska tutkittava aines on eri faasissa. Suurin osa huokoskaasunäytteistä otettiin 3–4

metrin syvyydeltä huokoskaasun tarkkailuputkista, joten kohonneiden pitoisuuksien voidaan olettaa olevan peräisin maaperän vedellä kyllästymättömästä vyöhykkeestä.

Maaperän pilaantuneisuus havaittiin pääosin kerroksissa 2–10 metriä. On mahdollista, että pintakerrokset ovat puhtaita haitta-aineiden tuulettumisen tai kulkeutumisen seurauksena. Pintakerrokset on toisaalta saatettu täyttää alun perin maa-aineksella, joka on tiedetty puhtaaksi.

Huokoskaasutuloksista nähdään, että saman näytepisteen pitoisuudet voivat vaihdella riippuen ajankohdasta. Pitoisuuksien vaihtelu johtuu useista tekijöistä ja saattaa liittyä vallitseviin olosuhteisiin, haitta-aineiden ominaisuuksiin tai näytteenottometodeihin. Lisäksi laboratoriotuloksissa on aina määrätty mittausepävarmuus.

9 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli selvittää, miten pilaantuneen maa-aluekohteen huokoskaasututkimukset edustavat maaperätutkimuksia. Lisäksi saatiin kerättyä tietoa Ruotsin käytännöistä huokoskaasututkimuksissa.

Ruotsin tilanne huokoskaasututkimusten ohjeistuksissa oli vastaava kuin Suomessa. Kenttätutkimuksia käsiteltiin näytteenotto-oppaassa tarkemmin kuin vastaavassa suomenkielisessä julkaisussa. Lisäksi kenttätutkimuksiin on otettu Ruotsissa avuksi laitteistoa, jonka käyttö Suomessa ei ole yleistä.

Työssä saatiin osoitettua, että huokoskaasututkimukset edustavat kohtalaisen hyvin maaperässä esiintyviä, helposti haihtuvia öljyhiilivety-yhdisteitä. Haihtuvien yhdisteiden läsnäolo näkyy huokoskaasussa kohonneina pitoisuuksina. Pitoisuudet vaihtelevat haitta-ainekohtaisesti paljon, eikä selvää yhteyttä maaperä- ja huokoskaasupitoisuuden välille saatu muodostettua. Haitta-aine-esiintymien tarkempi paikallistaminen oli hankalaa. Jos tutkimuskohteen pilaantuneisuus olisi keskittynyt enemmän tietyille, selkeille alueille, kattavilla huokoskaasututkimuksilla voisi todennäköisesti kohdentaa esiintymiä.

Toisin kuin maaperänäytteissä, huokoskaasu kuvaa näytteenottopisteen sijaan laajempaa ympäristöä. Huokoskaasun käyttäminen pilaantuneisuuden indikaattorina on toimiva, mutta haasteellinen tutkimustapa, sillä huokoskaasun koostumukseen ja liikkumiseen maaperässä vaikuttavat moninaiset tekijät.

Kohteeksi valitulla parkkipaikka-alueella on tehty kattavasti pilaantuneisuustutkimuksia, joten aineisto oli sopiva vertailuun. Vertailututkimusta voisi jatkaa eteenpäin ottamalla huomioon eri parametrit, jotka vaikuttavat huokoskaasun haitta-ainepitoisuuksiin. Myös useampia pilaantuneisuuskohteita olisi hyvä tarkastella. Ottamalla mukaan yhdisteiden käyttäytymistä kuvaavia laskentakaavoja vertailua voisi syventää edelleen.

Lähteet

- 1 Sorvari, Jaana. Pilaantuneen ympäristön riskinhallinta. Luentomoniste. Aalto-yliopisto. https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/305056/mod_folder/content/0/1%20-%20PilaantunutYmparisto.pdf?forcedownload=1. Luettu 15.4.2019.
- 2 Pilaantuneen maa-alueen riskinarviointi ja kestävä riskinhallinta. 2014. Verkkoaineisto. Ympäristöhallinto. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/136564/OH_6_2014.pdf. Luettu 9.1.2019.
- 3 Vna 214/2017. Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista. Verkkoaineisto. Finlex. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2007/20070214>. Luettu 9.1.2019.
- 4 Pilaantuneiden maa-alueiden kunnostuspäätökset. Verkkoaineisto. Ympäristöhallinto. https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/YSLn_kertaluonteisen_toiminnan_ilmoitusmenettely/Ilmoituspaatokset/Pilaantuneet_maaalueet?f=Uudenmaan_ELYkeskus. Luettu 9.1.2019.
- 5 Lepistö, Jani; Westerholm Henrik; Schultz Eija; Uljas, Jenni & Björklöf Katarina. Hyvät käytännöt pilaantuneiden maiden kenttätutkimuksissa. 2014. Verkkoaineisto. Suomen ympäristökeskus. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/42681/YO_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Luettu 9.1.2019.
- 6 Jääskeläinen, Raimo. 2009. Geotekniikan perusteet. 1. painos. Tampere: Tammermekaniikka.
- 7 Salonen, Veli-Pekka; Eronen, Matti & Saarnisto, Matti. 2002. Käytännön maaperägeologia. Turku: Kirja-Aurora.
- 8 Ympäristögeotekninen näytteenotto-opas, maa- huokoskaasu ja pohjavesinäytteet. 2002. Verkkoaineisto. Suomen Geoteknillinen Yhdistys. Ensimmäinen painos. <https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/ymparistoegeotekninen-naeytteenotto-opas-maa-huokoskaasut-ja-pohjavesinaeytteet.pdf>. Luettu 16.2.2019.
- 9 Mitä on akkreditointi? Verkkoaineisto. FF-Chemicals. <http://www.ff-chemicals.fi/images/pages/Mitä%20akkreditointi%20tarkoittaa.pdf>. Luettu 16.2.2019
- 10 Heinonen, Ville. 2015. Kaasukromatografisen menetelmän kehittäminen ja alustava validointi polymeerimateriaalien laktidipitoisuuden määrittämiseen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/23581/Heinonen.pdf?sequence=1>.

- 11 Grandell, Toni. 2013. HS-GC-MS-menetelmän kehitys ja validointi nitrometaanin määrittämiseksi in vitro –näytteistä. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 12 Massaspektroskopia. Verkkoaineisto. Orbitaali. https://peda.net/oulainen/oulaisten-lukio/oppiaineet2/kemia/kemia2/orb-v1/Orbitaali2_152/spektroskopia/61m. Luettu 16.2.2019.
- 13 Paatonen, Erkki. Huokoskaasu maaperän ja pohjaveden saastuneisuuden kuvaajana. 1995. Verkkoaineisto. Helsingin kaupungin ympäristökeskus. <https://www.hel.fi/static/ymk/julkaisut/julkaisu-02-95.pdf>. Luettu 15.1.2019.
- 14 Dahlbo Helena, Pyy, Outi & Strandberg, Tapio. Kenttätöyskentely jätealueiden ja saastuneiden maa-alueiden tutkimuksissa. 1994. Verkkoaineisto. Vesi- ja ympäristöhallitus. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/230214/Vesi-%20ja%20ymparistohallituksen%20monistesarja%20597.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Luettu 15.1.2019.
- 15 Kähkölä, Tero. 2013. VOC-yhdisteiden maaperänäytteenoton kenttätöyskentelymenetelmien vaikutukset tutkimustuloksiin. Insinööriyö. Lahden ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 16 Orgaaniset liuottimet. Verkkoaineisto. TTL. <https://www.ttl.fi/kemikaalit-ja-tyo/orgaaniset-liuottimet/>. Luettu 16.2.2019.
- 17 Dräger X-am 7000. Verkkoaineisto. Dräger. <https://www.draeger.com/Products/Content/x-am-7000-pi-9044772-us.pdf>. Luettu 16.2.2019.
- 18 Visuri, Karita. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) kvantitatiivinen määrittäminen sisäilman ja teollisen työympäristön ilmanäytteistä termodesorptio-kaasukromatografisella menetelmällä. 2010. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 19 Hållbar sanering: Inventering av provtagningsstrategier för jord, grundvatten och porgas. 2009. Verkkoaineisto. Naturvårdsverket. <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/978-91-620-5894-4.pdf>. Luettu 14.4.2019.
- 20 Fälthandbok: Undersökningar av förorenade områden. 2013. Verkkoaineisto. Svenska Geotekniska Föreningen. https://www.commonforum.eu/Documents/Questionnaires/AEIRS/Falthandbok_Publicerad_2014.pdf. Luettu 14.4.2019.
- 21 Membrane Interface Probe. Verkkoaineisto. CPEO. <http://www.cpeo.org/techtree/ttdescript/mip.htm>. Luettu 15.4.2019.

- 22 Workshop: Using Geoprobe for investigations at contaminated sites. Verkkoaineisto. NIRAS. http://nordrocs.org/wp-content/uploads/2016/06/NIRAS_Workshop_GeoProbe_Program.pdf. Luettu 15.4.2019.
- 23 Pilaantuneen maaperän kunnostuksen yleissuunnitelma. 2016. Yrityksen sisäinen dokumentti. FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy.
- 24 Maaperätutkimuksien yhteenvetotaulukko. 2018. Yrityksen sisäinen dokumentti. FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy.
- 25 Huokoskaasututkimuksien yhteenvetotaulukko. 2017. Yrityksen sisäinen dokumentti. FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy.
- 26 Maaperän kunnostuskoe. 2017. Yrityksen sisäinen dokumentti. FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy.