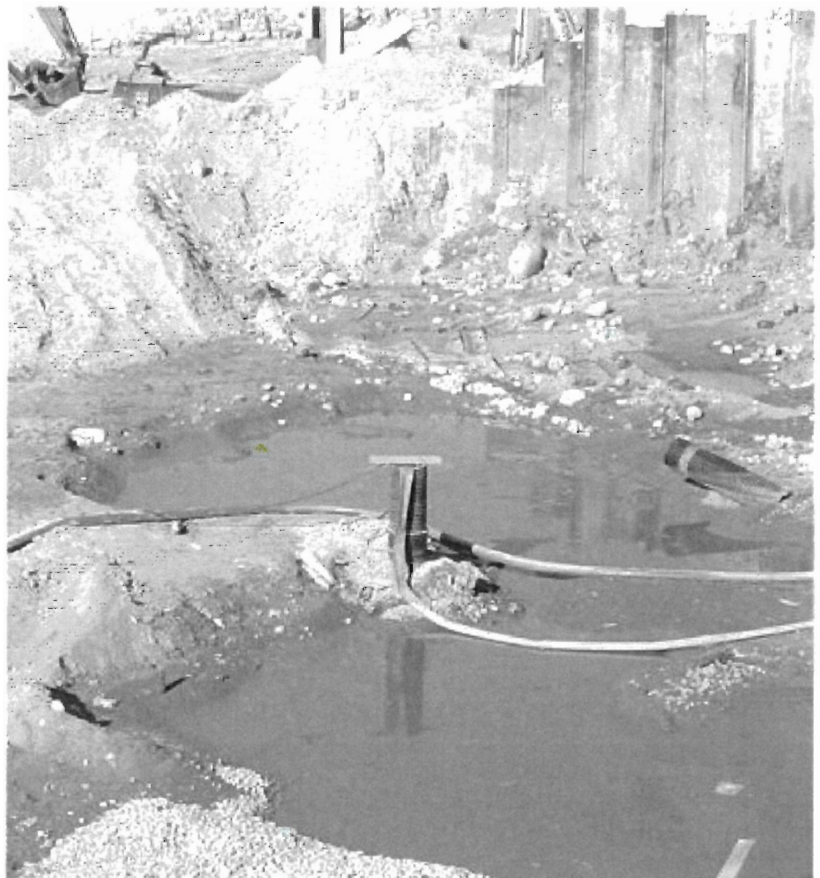


ORGAANISET LIUOTTIMET HELSINGIN MAAPERÄSSÄ

Jenni Leminen
Pekka Raudasmaa
Antti Salla



Julkaisu 84/2001

ORGAANISET LIUOTTIMET HELSINGIN MAAPERÄSSÄ

**Jenni Leminen
Pekka Raudasmaa
Antti Salla**

TIIVISTELMÄ

Selvityksessä on esitelty orgaanisten liuotinten ominaisuuksia ja käyttäytymistä maaperässä ja pohjavesissä, kuvattu Helsingin geologisia olosuhteita erityisesti aineiden liikkumisen ja pidättymisen kannalta sekä tarkasteltu liuotinhavaintoja Helsingin alueella.

Orgaanisilla liuottimilla likaantuneita alueita on löydetty mm. pesuloiden, metallivers- taiden ja graafisen alan laitosten yhteydestä. Liuottimia käytetään Suomessa lähinnä metalliteollisuudessa, kemianteollisuudessa, maalliteollisuudessa sekä kemiallisissa pesuloissa. Useita liuottimia epäillään mutageenisiksi, teratogeenisiksi sekä karsino- geenisiksi.

Orgaaniset liuottimet ovat ominaisuuksiltaan heterogeeninen ryhmä aineita, joille on yhteistä hyvä rasvanliuotuskyky sekä voimakas haihtuvuus. Niiden käyttäytyminen ympäristössä vaihtelee ominaisuuksiensa mukaisesti. Lisäksi käyttäytymiseen vai- kuttavat maaperän ominaisuudet, kuten lämpötila, vesipitoisuus, läpäisevyys, rae- koostumus sekä huokoisuus.

Maaperään päästyään liuottimet voivat haihtua maan pintakerroksista ilmakehään, jossa ne hajoavat tai kulkeutuvat sadeveden mukana takaisin maahan. Maaperässä liuottimet ominaisuuksistaan ja olosuhteista riippuen voivat pidäytyä maaperään, kul- keutua veteen liuenneena tai omana neste- tai kaasufaasinaan tai hajota kemialli- sesti tai mikrobiologisesti.

Kunnostusmenetelminä liuottimilla likaantuneissa kohteissa voidaan käyttää huokos- kaasukäsittelyä, termistä desorptiota, maan huuhtelua, pohjaveden pumppausta tai ilmastusta, joissa joudutaan myös jatkokäsittelmään kaasu- tai nestefaasi. Usein jatkokäsittely suoritetaan aktiivihiihiäsuodatuksella. Mikrobiologisilla menetelmillä voi- daan likaantunut alue puhdistaa useimmiten ilman jatkokäsittelytarvetta.

Helsingin geologiset piirteet vaihtelevat jyrkkäreunaisista kalliomäistä laajoihin savi- tasankoihin. Maaperäolosuhteet vaihtelevat suuresti sekä pysty- että vaakasuunnas- sa, etenkin lievealueilla. Pohjaveden virtausolosuhteet voivat olla hyvin mutkikkaat johtuen kerrosten pienipiirteisyydestä ja suurista rakeisuusvaihteluista.

Liuotinhavaintoja on Helsingissä tehty useita, mutta kuudessa kohteessa on suu- remmista pitoisuuksista johtuen tehty tarkempia tutkimuksia. Tässä työssä on käsi- teltä esimerkkitapauksina näitä kuutta kohdetta. Kolmen kohteen, Hermannin, Pitä- jänmäen ja Tapanilan osalta on pitäydytty yleisluontoiseen olosuhteiden kuvaukseen. Malmin, Talin ja Tankovainion osalta on esitetty johtopäätöksiä ja arvioita sekä liuo- tinten käyttäytymisestä alueella että kunnostusmahdollisuuksista.

ABSTRACT

Report presents physical and chemical properties of certain organic solvents, describes solvent behaviour in soil and ground water, introduces geological properties in Helsinki especially in solvent behaviour perspective and examines solvent discoveries in six example sites.

Typical areas, that have been contaminated with solvents is found particularly associated with laundries, metal workshops and graphic industry. In Finland solvents are used mainly in metal industries, chemical industries, paint industries and chemical laundries. Many solvents are suspected as mutagenic, teratogenic or carcinogenic.

Organic solvents are a heterogenic group of chemicals, witch are good degreasing agents and have high volatility. Their behaviour in environment varies according to their characteristics and soil properties, like temperature, moisture content, permeability, grain composition and porosity.

After released to soil, organic solvents may vaporize to air from soil surface layer. In air these chemicals break down or dissolve in rain and return to soil. Deeper in soil solvents may adsorb to organic substances, migrate dissolved or in gaseous or liquid phase or transform chemically or microbiologically depending on solvent and soil properties.

Restoration methods for soil and ground water contaminated with organic solvents can be used soil vapour extraction, thermal desorption, soil flushing, ground water pump and treat or in situ air sparging, in which all include treatment of separated gas or liquid phase. Typical treatment method for separated phase is activated carbon treatment. With microbiological methods contaminated area can often be restored without need for phase separation or further treatment.

Geological features in Helsinki vary from steep rock hills to wide clay plains. Soil properties vary greatly in both directions, vertical and horizontal, particularly in clay fringe areas. Ground water flow conditions can be very complex, because of variability of layers and great changes in grain composition.

Organic solvents have been observed in several sites in Helsinki. More detailed analysis has been made in six sites because of large concentrations. These six sites are examined in this study as example sites. Three of these sites, Hermannin, Pitäjänmäki and Tapanila have been only introduced generally. Other three, Malmi, Tali and Tankovainio have been studied more detailed and presented conclusions and estimates concerning migration of solvents and possibilities of restoration.

ALKUSANAT

Tiedote perustuu fil. yo Jenni Lemisen Pro gradu-työhön, jota ovat ohjanneet projektipäällikkö Pekka Raudasmaa geotekniseltä osastolta, ympäristötarkastaja Antti Salla Helsingin ympäristökeskuksesta sekä professori Matti Eronen Helsingin yliopistosta.

Selvitys liuottimien esiintymisestä ja käyttäytymisestä Helsingin alueella koettiin tarpeelliseksi ympäristöviranomaisten taholta. Vastaavanlaista selvitystä orgaanisista liuottimista ei Helsingin alueelta aiemmin ole tehty. Lisäksi koottiin ajantasaiset tiedot Helsingin alueen geologisista olosuhteista.

Tiedotteessa on esitelty orgaanisten liuotinten ominaisuuksia ja käyttäytymistä maaperässä ja pohjavesissä, kuvattu Helsingin geologisia olosuhteita erityisesti aineiden liikkumisen ja pidättymisen kannalta sekä tarkasteltu liuotinhavaintoja Helsingin alueella.

Helsingissä joulukuussa.2001

Ilkka Vähäaho
osastopäällikkö

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	5
ABSTRACT	6
ALKUSANAT	7
SISÄLLYSLUETTELO	8
1. JOHDANTO	11
1.1 Selvityksen tausta.....	11
1.2 Selvityksen tavoitteet.....	11
1.3 Selvityksen rajaukset.....	11
2. ORGAANISET LIUOTTIMET	11
2.1 Ominaisuudet	11
2.2 Käyttökohteet.....	15
2.3 Päästöt	16
2.4 Terveys- ja ympäristöhaitat.....	17
3. LIUOTTIMIEN KÄYTTÄYTYMINEN YMPÄRISTÖSSÄ	18
3.1 Yleistä.....	18
3.2 Käyttäytymiseen vaikuttavia liuottimien ominaisuuksia.....	18
3.3 Maaperän ominaisuuksia	20
3.3.1 Ympäristön muuttujat.....	20
3.3.2 Fysikaaliset ominaisuudet	21
3.3.3 Kemialliset ominaisuudet.....	22
3.3.4 Orgaanisen aineksen pitoisuus	22
3.3.5 Epäorgaanisen aineksen pitoisuus.....	22
3.4 Pidättyminen.....	23
3.4.1 Sorptio	23
3.4.2 Kapillaarivoimat	24
3.5 Kulkeutuminen maaperässä	24
3.5.1 Yleistä.....	24
3.5.2 Kulkeutuminen pohjavedessä.....	24
3.5.3 Kulkeutuminen huokoskaasussa	25
3.6 Hajoaminen	27
3.6.1 Fotolyysi	27
3.6.2 Kemiallinen hajoaminen	27
3.6.3 Biologinen hajoaminen	27
4. TUTKIMUS- JA KUNNOSTUSMENETELMÄT	30
4.1 Lainsäädäntö	30
4.2 Tutkimusmenetelmiä	30
4.2.1 Käyttöhistoria.....	30
4.2.2 Näytteenotto	30
4.2.3 Maaperänäytteet	31
4.2.4 Vesinäytteet.....	31
4.2.5 Huokoskaasunäytteet.....	31
4.2.6 Laboratorioanalyysit	32

4.3	Käsittelymenetelmiä	32
4.3.1	Yleistä	32
4.3.2	Huokoskaasukäsittely	33
4.3.3	Terminen desorptio	33
4.3.4	Maan huuhtelu	34
4.3.5	Mikrobiologiset menetelmät	34
4.3.6	Pohjaveden pumppaus	35
4.3.7	Pohjaveden ilmastus	35
4.3.8	Reaktiiviset seinämät	36
4.3.9	Kunnostamatta jättäminen	37
4.3.10	Kehitteillä olevia menetelmiä	37
5.	HELSINGIN GEOLOGIA JA LIUOTINHAVAINNOT	38
5.1	Helsingin geologiset yleispiirteet	38
5.1.1	Yleistä	38
5.1.2	Moreeni	38
5.1.3	Hiekka- ja soramudostumat	39
5.1.4	Savialtaiden sedimenttikerrostumat	39
5.1.5	Kallioperä	40
5.1.6	Täytemaat	41
5.1.7	Hydrogeologiset olosuhteet	42
5.2	Liuotinhavaintojen taustaa	43
5.3	Pitäjänmäki	44
5.3.1	Yleistä	44
5.3.2	Alueen geologia	44
5.3.3	Tutkimustulokset	45
5.3.4	Toimenpiteet	45
5.4	Hermanni	46
5.4.1	Yleistä	46
5.4.2	Alueen geologia	46
5.4.3	Tutkimustulokset	46
5.4.4	Toimenpiteet	47
5.5	Tapanila	47
5.5.1	Yleistä	47
5.5.2	Alueen geologia	47
5.5.3	Tutkimustulokset	48
5.5.4	Toimenpiteet ja johtopäätökset	48
5.6	Talin urheilupuisto	49
5.6.1	Yleistä	49
5.6.2	Alueen geologia	49
5.6.3	Tutkimustulokset	50
5.6.4	Johtopäätökset	51
5.7	Malmi	52
5.7.1	Yleistä	52
5.7.2	Alueen geologia	52
5.7.3	Tutkimustulokset	53
5.7.4	Johtopäätökset	54
5.8	Tankovainio	55
5.8.1	Yleistä	55
5.8.2	Alueen geologia	55
5.8.3	Tutkimustulokset	56

5.8.4	Johtopäätökset	56
6.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	60
	LÄHDELUETTELO	64
	LIITELUETTELO.....	69

1. JOHDANTO

1.1 Selvityksen tausta

Helsingissä on pulaa rakennusmaasta, joten vanhoja teollisuustontteja on kunnostettu asuin- ja virkistyskäyttöön. Kunnostustarve jatkuu myös tulevaisuudessa jopa lisääntyvässä määrin. Teollisuusalueiden maaperä on usein likaantunut erilaisten toimintojen seurauksena. Helsingin alueella suuria kunnostuskohteita on ollut Herttoniemenrannassa, Ruoholahdessa ja Arabianrannassa. Yleisimmin havaitut haitta-aineet ovat raskasmetallit ja öljyt. Orgaanisilla liuottimilla likaantuneita alueita on löydetty etenkin metalliverstaiden, korjaamojen, graafisen alan laitosten ja pesuloiden yhteydestä.

1.2 Selvityksen tavoitteet

Selvityksen tarkoituksena on esittää perustietoja orgaanisten liuottimien ominaisuuksista ja käyttäytymisestä ympäristössä, kuvata Helsingin kallio- ja maaperäolosuhteita erityisesti orgaanisten liuottimien pidättymisen ja kulkeutumisen kannalta sekä tarkastella Helsingin alueen liuotinhavaintoja esimerkkikohteissa.

1.3 Selvityksen rajaukset

Orgaaniset liuottimet ovat heterogeeninen ryhmä kemikaaleja. Tässä työssä käsitellään orgaanisista liuottimista Helsingin ympäristökeskuksen ympäristölaboratorion perustutkimuksiin kesällä 2001 kuuluneita haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (volatile organic compounds, VOC) kolmea ainetta lukuun ottamatta (MTBE, TAME ja alpha-pinene) sekä esimerkkikohteista löytyneitä liuottimia. Luettelo käsiteltävistä liuottimista on liitteessä 2. Näitä kutsutaan jäljempänä yleisesti (orgaanisiksi) liuottimiksi. Bensiinin ja öljyhiilivetyjen käsittely on rajattu tämän selvityksen ulkopuolelle. Liitteessä 1 on selitetty tekstissä käytettyä terminologiaa.

2. ORGAANISET LIUOTTIMET

2.1 Ominaisuudet

Orgaanisiin liuottimiin kuuluu joukko aineita, joiden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet vaihtelevat. Liuottimet ovat useimmiten värittömiä, helposti haihtuvia nesteitä, joilla on alhainen viskositeetti ja jotka siten ovat herkkäliikkeisiä maaperässä (Toivikko 1994). Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC) ovat aineita, joiden höyrönpaine on niin suuri, että ne esiintyvät kaasumaisina huoneenlämpötilassa. Vastaavanlainen määritelmä on höyrönpaineen suuruus, jonka on oltava yli 0,1 mm Hg lämpötilassa 25 °C (Hartonen 2001). Suurin osa liuottimista on VOC-yhdisteitä ja pääosa VOC-yhdisteistä on liuottimia.

Orgaanisten liuottimien erilaisista ominaisuuksista johtuen niiden käyttäytyminen ympäristössä vaihtelee. Käsittelyn selkeyttämiseksi yhdisteet on tässä yhteydessä jaettu neljään ryhmään tiheyden ja vesiliukoisuuden mukaan: vettä kevyemmät vesiliukoiset yhdisteet, vettä kevyemmät veteen (lähes) liukenemattomat yhdisteet, vettä raskaammat vesiliukoiset yhdisteet sekä vettä raskaammat veteen (lähes) liukenemattomat yhdisteet. Yhdistekohtainen jaottelu on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tässä selvityksessä käsiteltävien orgaanisten liuottimien jaottelu tiheyden ja vesiliukoisuuden mukaan.

Table 1. Classification of some organic solvents according to density and solubility.

Vettä kevyemmät yhdisteet	
Vesiliukoiset	Veteen (lähes) liukenemattomat
bentseeni etyylibentseeni nonaani styreeni	dekaani orto-ksyleeni para-ksyleeni heptaani oktaani tolueeni 1,3,5-trimetyylibentseeni vinyylikloridi
Vettä raskaammat yhdisteet	
Vesiliukoiset	Veteen (lähes) liukenemattomat
bromoformi 1,2-dikloorietaani 1,1-dikloorieteeni dikloorimetaani hiilitetrakloridi kloroformi tetrakloorieteeni trikloorieteeni	1,4-diklooribentseeni 1,2-dikloorieteeni cis / trans klooribentseeni 1,2,4-triklooribentseeni 1,1,1-trikloorietaani

Kaikki tässä käsiteltävät orgaaniset liuottimet ovat nopeasti haihtuvia, sillä niiden höyrynpaine on yli 100 Pa (0,1 kPa) (Kankaanranta 1998). Höyrynpaineen ja haihtuvuuden suhdetta on kuvattu taulukossa 2. Osa liuottimista on vettä raskaampia, osa vettä kevyempiä. Vesiliukoisuus vaihtelee hyvin liukenevasta liukenemattomaan (Kankaanranta 1998). Vesiliukoisuutta on kuvattu taulukossa 3. Käsiteltävien aineiden ominaisuuksia on esitetty liitteessä 2.

Taulukko 2. Höyrynpaineen suhde haihtuvuuteen (Kankaanranta 1998).

Table 2. Relationship between vapour pressure and volatility (Kankaanranta 1998).

Höyrynpaine Pa (20-25 oC)	Ryhmittely
<0,0001	haihtumaton
0,0001-0,01	hyvin hitaasti haihtuva
0,01-1	hitaasti haihtuva
1-100	haihtuva
100-100 000	nopeasti haihtuva
>100 000	erittäin haihtuva ~ kaasu

Taulukko 3. Vesiliukoisuus (Kankaanranta 1998).

Table 3. Water solubility (Kankaanranta 1998).

Vesiliukoisuus mg/l	Ryhmittely
>1000	hyvin liukeneva
10-1000	veteen liukeneva
0,1-10	vähän liukeneva
<0,1	hyvin niukasti liukeneva

BTEX-yhdisteiksi kutsutaan bentseeniä, tolueenia, etyylibentseeniä ja ksyleenejä. BTEX-yhdisteiden hyvä vesiliukoisuus edesauttaa niiden nopeaa ja tehokasta leviämistä pohjaveden mukana. Niiden adsorptio maaperän orgaaniseen ainekseen hidastaa kulkeutumista runsaasti humusta sisältävillä alueilla. (Komulainen & Karvonen 1996)

Veteen hyvin niukkaliukoiset NAPL-yhdisteet (non aqueous phase liquid) kulkeutuvat omana faasinaan. Yhdisteet liukenevat hyvin hitaasti pohjaveteen (Komulainen & Karvonen 1996). NAPL-yhdisteet voidaan jakaa tiheydensä mukaisesti vettä raskaampiin yhdisteisiin, DNAPL (dense-NAPL) ja vettä kevyempiin yhdisteisiin, LNAPL (light-NAPL). Halogenoidut liuottimet kuuluvat DNAPL-yhdisteisiin, BTEX-yhdisteet ovat LNAPL-yhdisteitä. DNAPL-yhdisteet ovat vaikeasti hajoavia ja voivat säilyä ympäristössä omana faasinaan hyvinkin kauan (Komulainen 1998).

Tässä selvityksessä käsiteltävien aineiden jaotteluja erilaisiin kemiallisiin ryhmiin on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Selvityksessä käsiteltävien liuottimien jaottelu (Puolanne et al. 1994, Komulainen 1998 ja Assmuth et al. 1990).

Table 4. Classifications of solvents from this investigation (Puolanne et al. 1994,

Klooratut alifaattiset yhdisteet	Suoraketjuiset hiilivedyt	Aromaattiset yhdisteet	BTEX-yhdisteet
dikloorimetaani kloroformi hiilitetrakloridi 1,2-dikloorietaani 1,1,1-trikloorietaani trikloorieteeni tetrakloorieteeni vinyylkloridi 1.1-dikloorieteeni 1,2-dikloorieteeni cis / trans	dekaani heptaani nonaani oktaani	bentseeni tolueeni ksyleenit styreeni etyylibentseeni	bentseeni tolueeni etyylibentseeni ksyleenit

Klooribentseenit	L-NAPL-yhdisteet	D-NAPL-yhdisteet
(mono)klooribentseeni 1,4-diklooribentseeni 1,2,4-triklooribentseeni	bentseeni tolueeni ksyleenit etyylibentseeni	dikloorimetaani kloroformi hiilitetrakloridi 1,2-dikloorietaani 1,1,1-trikloorietaani trikloorieteeni tetrakloorieteeni vinyylkloridi 1.1-dikloorieteeni

Komulainen 1998 and Assmuth et al. 1990).

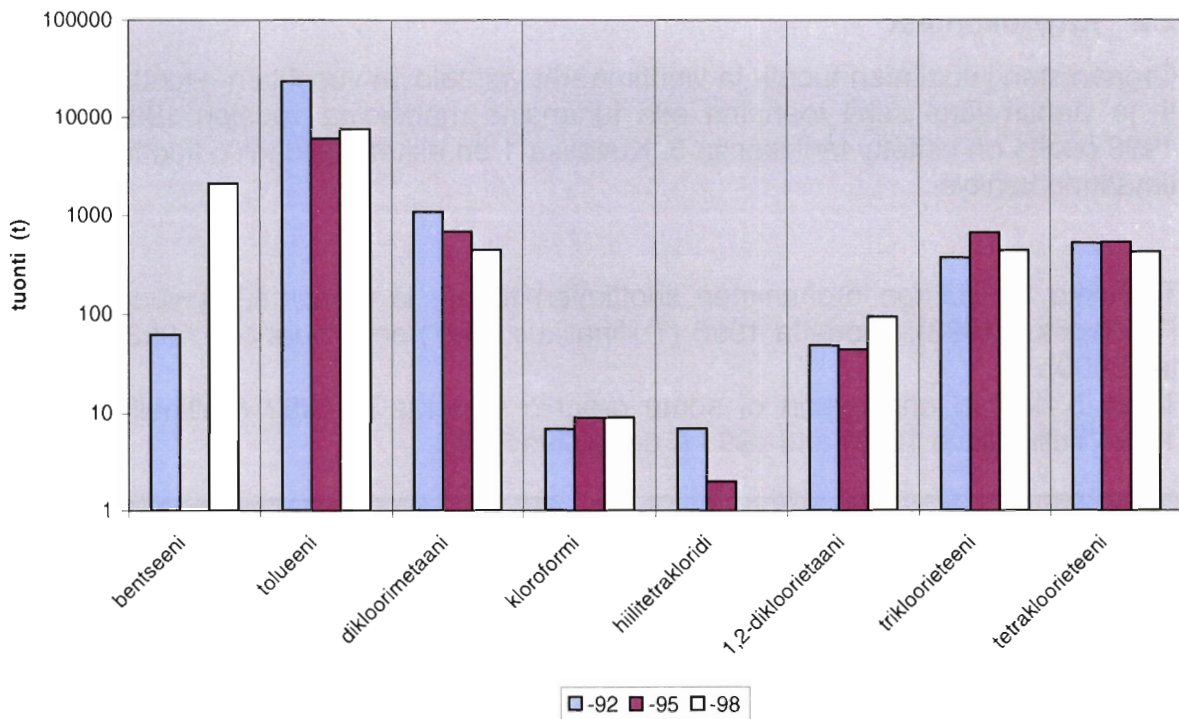
2.2 Käyttökohteet

Orgaanisten liuottimien tuonti- ja vientimäärät vaihtelevat vuosittain. Liuottimien tuonti- ja vientimääriä sekä tonneina että tuhansina markkoina vuosien 1992, 1995 ja 1998 osalta on esitetty taulukossa 5. Kuvassa 1 on esitetty joidenkin liuottimien tuontimäärien kehitys.

Taulukko 5. Eräiden orgaanisten liuottimien tuonti- ja vientimääriä vuodelta 1992 (Tullihallitus 1993), vuodelta 1995 (Tullihallitus 1997) sekä vuodelta 1998 (Tullihallitus 2000).

Table 5. Import and export of some organic solvents in 1992 (Tullihallitus 1993), 1995 (Tullihallitus 1997) and 1998 (Tullihallitus 2000).

	Tuonti 1992 t / 1000 mk	Vienti 1992 t / 1000 mk	Tuonti 1995 t / 1000 mk	Vienti 1995 t / 1000 mk	Tuonti 1998 t / 1000 mk	Vienti 1998 t / 1000 mk
bentseeni	62 / 91	? / 4 965	1 / 33	? / 24 765	2100 / 3 202	? / 1
tolueeni	23 557 / 23 110	2 021 / 2 251	6 143 / 6 901	149 / 256	7 564 / 10 320	97 / 138
o-ksyleeni	0 / 1	-	2 / 31	0 / 1	0 / 20	0 / 1
p-ksyleeni	0 / 2	-	0 / 3	4 / 15	0 / 4	0 / 1
ksyleeni-isomeerien seokset	92 / 198	90 / 108	3 982 / 5 931	193 / 328	2 523 / 4 123	95 / 205
styreeni	76 009 / 190 033	30 / 248	94 408 / 415 249	36 / 493	26 925 / 298 688	6 210 / 15 478
etylibentseeni	0 / 2	-	312 / 1 387	-	0 / 2	0 / 1
kloorimetaani ja kloorietaani	3 / 160	-	20 / 86	0 / 0	0 / 4	-
dikloorimetaani	1 077 / 2 840	3 / 42	679 / 2 871	17 / 136	443 / 1 998	32 / 169
kloroformi	7 / 170	-	9 / 198	0 / 20	9 / 223	0 / 9
hiilitetrakloridi	7 / 54	-	2 / 115	-	1 / 79	0 / 1
1,2-dikloorietaani	48 / 266	0 / 2	44 / 323	1 / 29	94 / 274	0
1,1,1-trikloorietaani			45 / 464	4 / 58	0 / 5	0 / 12
vinyylikloridi	? / 97 765	-	? / 214 468	-	? / 149 666	-
trikloorieteeni	372 / 1 220	-	661 / 2 426	41 / 182	441 / 2 128	0 / 2
tetrakloorieteeni	523 / 1 374	3 / 8	536 / 1 482	4 / 24	427 / 1 781	11 / 57
klooribentseeni, o-diklooribentseeni ja p- diklooribentseeni	11 / 107	-	12 / 131	-	340 / 1 177	-



Kuva 1. Tiettyjen orgaanisten liuottimien tuontimäärien kehitys vuosina 1992, 1995 ja 1998 (Tullihallitus 1993, 1997 ja 2000).

Figure 1. Development on import of some organic solvents in 1992, 1995 and 1998 (Tullihallitus 1993, 1997 and 2000).

Orgaanisia liuottimia käytetään Suomessa eniten maalien, pinnoitteiden, liimojen ja torjunta-aineiden valmistukseen, metalli- ja muoviteollisuudessa, kemian teollisuudessa, kemiallisissa pesuloissa sekä autojen huollossa (Mroueh 1993). Liuotinominaisuuksiensa vuoksi näitä aineita käytetään pääasiassa pesuaineina ja rasvanliuotukseen sekä monien nestemäisten tuotteiden ohenteina. Ainekohtaisia käyttökohteita on esitetty liitteessä 2.

2.3 Päästöt

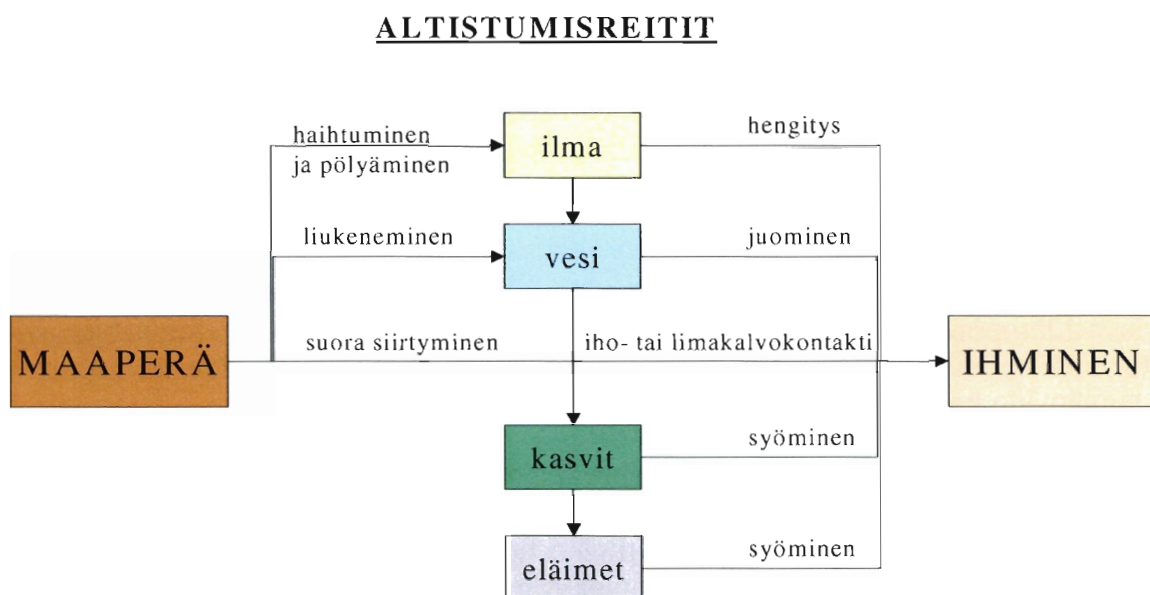
Noin 70 000 erilaista synteettistä kemikaalia (lähinnä orgaanista) on maailmanlaajuisesti päivittäin käytössä (Schwarzenbach et al. 1993). Arviolta 65-95% käytetystä liuotinmäärästä pääsee ympäristöön (Heiskanen 1994). Suomessa haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöt olivat vuonna 1999 yhteensä noin 170 000 tonnia (VYH 2001a). Kokonaispäästöistä suurin osa vapautuu ilmaan. VOC-päästöjen rajoittamiseksi allekirjoitettiin Genevessä 1991 pöytäkirja, joka tuli voimaan Suomessa vuonna 1997 (VYH 2001b). Tämän lisäksi vireillä on useita sopimuksia ja ohjelmia, kuten pohjoismainen ilmansuojelun toimintaohjelma, jossa on sovittu 50% vähennyksestä vuoteen 2005 mennessä (Yli-Kauppila 1994).

Päästöt ilmakehään aiheutuvat useimmiten juuri haihtuvien liuottimien käytöstä. Orgaanisten liuottimien suuresta höyrystypaineesta ja haihtuvuudesta johtuen suurin osa käytetystä liuotinmäärästä vapautuu ilmakehään. Päästöt maaperään ja sitä kautta pohjaveteen taas johtuvat useimmiten erilaisista vuodoista, vanhoista täytöistä tai jätteistä. Myös onnettomuuksien ja huolimattoman käsittelyn seurauksena voi liuottimia vuotaa maahan.

Aiemmin ongelmajätteet, kuten orgaaniset liuottimet, vietiin kaatopaikoille tai kaadettiin maahan tai viemäriin (Puntti 1992). Osa jätteistä poltettiin kotiloissa joko lämmityksen yhteydessä tai jätteen hävittämiseksi. Myöhemmin rakennettiin jätteenpolttolaitoksia mm. Turkuun ja Helsinkiin. Helsingissä jätteen poltto lopetettiin 1983, kun Kyläsaaren polttolaitos suljettiin. Turussa polttolaitos on edelleen käytössä (Antti Salla, suullinen tiedonanto). Sotien jälkeisestä ongelmajättekertymästä jopa puolet (noin 6 miljoonaa tonnia) on viety kaatopaikoille (Savelainen 1992). Aiemmin kaatopaikkoja ei valvottu lainkaan, joten ongelmajätteiden sijoittumisesta ei ole tietoja. Liuottimien ja muiden ongelmajätteiden oikeaoppinen käsittely alkoi vasta 1984, kun Riihimäellä aloitti toimintansa ensimmäinen ongelmajätelaitos. Tätä ennen ongelmajätteiden käsittely oli hyvin pienimuotoista ja paikallista (Antti Salla, suullinen tiedonanto).

2.4 Terveys- ja ympäristöhaitat

Liuottimet joutuvat elimistöön useimmiten hengitysilman tai juomaveden mukana (Kolari & Salkinoja-Salonen 1993). Pitkäaikainen altistus orgaanisille liuottimille voi aiheuttaa vaurioita keskushermostolle, maksalle, munuaisille tai sydämelle. Useimmilla liuottimilla on todettu myös akuutteja terveysvaikutuksia altistuttaessa suuremmille määrille yhdistettävä (Kansainväliset kemikaalikortit 2000). Monen orgaanisen liuottimen kohdalla on olemassa ainakin epäily karsinogeenisyydestä. Lisäksi useita orgaanisia liuottimia epäillään mutageenisiksi ja teratogeenisiksi. Ihmisten altistuminen maaperän haitta-aineille on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Altistuminen maaperän haitta-aineille, muokattu A. Sallan esimerkin mukaan.
Figure 2. Exposure to chemicals in soil, modified on example of A. Salla.

Kemikaalit voivat kertyä kasveihin, eliöihin ja edelleen eläimiin ja ihmisiin ravinnekettuja myöten (Jeltsch 1990). Ympäristöön päästessään liuottimet mm. aiheuttavat yläilmakehän otsonikerroksen tuhoutumista, lisäävät haitallisen alailmakehän otsonin muodostumista sekä ovat haitallisia tai myrkyllisiä kaloille ja vesieläimille.

Käsiteltävien liuottimien haitallisuuden luokittelu, haitallisiksi todetut pitoisuudet (HTP-arvot) sekä ympäristövaikutuksia on esitetty liitteessä 2.

3. LIUOTTIMIEN KÄYTTÄYTYMINEN YMPÄRISTÖSSÄ

3.1 Yleistä

Orgaanisten liuottimien käyttäytymiseen maaperässä vaikuttavat niiden omien ominaisuuksien lisäksi maaperän ominaisuudet sekä ympäristön muuttujat. Maaperän ominaisuuksista orgaanisten liuottimien käyttäytymiseen vaikuttavat etenkin vedenläpäisevyys, raekoostumus sekä hydrogeologiset olosuhteet. Ympäristön muuttujista erityisesti vaikuttavat lämpötila sekä sademäärä. Liuottimien ominaisuuksista tärkeimpiä ovat liukoisuus, haihtuvuus sekä tiheys. Kemikaalien lopullinen kohtalo määräytyy lähinnä sorption voimakkuuden, pohjaveden virtausnopeuden, sekoittumisen sekä hajoamisolojen perusteella (Komulainen & Karvonen 1996). Kemikaalin ympäristövaarallisuuteen vaikuttavat myrkyllisyys, kertyvyys ja hajoamisnopeus.

3.2 Käyttäytymiseen vaikuttavia liuottimien ominaisuuksia

Tässä selvityksessä käsiteltävien liuottimien ominaisuuksia on esitetty liitteessä 2. Taulukossa 1 on lisäksi jaoteltu liuottimet vesiliukoisuuden ja tiheyden perusteella neljään ryhmään.

Moolimassa vaikuttaa mm. aineen vesiliukoisuuteen, haihtuvuuteen ja hajoavuuteen. Suurikokoinen yhdiste, jolla on korkea moolimassa haihtuu ja liukenee heikosti, adsorboituu maaperään melko helposti ja on mikrobihajotuksen kannalta epäedullinen (Kultamaa 1993).

Höyrynpaine kuvaa aineen pyrkimystä siirtyä nestefaasista kaasufaasiin. Höyrynpaine kasvaa lämpötilan noustessa, mitä voidaan käyttää hyväksi esim. huokoskaasukäsittelyssä nopeuttamaan puhdistusta. Tässä selvityksessä käsiteltävistä orgaanisista liuottimista kaikki ovat nopeasti haihtuvia.

Vesiliukoisuus vaikuttaa kemikaalin kulkeutumiseen ja pidättymiseen. Hyvin veteen liukenevat aineet ovat useimmiten heikosti pidättyviä, kulkeutuvat helposti pohjaveteen, kertyvät vähän eliöihin ja hajoavat melko helposti biologisesti. Orgaanisten yhdisteiden vesiliukoisuuteen vaikuttavat molekyylin koko ja funktionaaliset (reagoivat) ryhmät. Moolimassan kasvaessa vesiliukoisuus pienenee ja kemikaalin K_{oc} (hiili-vesi-adsorptiokerroin) kasvaa (Kankaanranta 1998). K_{oc} :n kasvaessa sitoutuminen maaperään kasvaa. Hyvin veteen liukenevat yhdisteet kulkeutuvat yleensä hyvin maaperässä ja pääsevät helposti pohjaveteen asti.

Taulukko 6. Orgaaninen hiili / vesi –adsorptiokertoimen avulla arvioitu kulkeutuvuus maaperässä (Nikunen 1993).

Table 6. Migration in soil related to organic carbon / water –adsorption factor (Nikunen 1993).

Jakautumiskerroin K_{oc}	Kulkeutuvuus
>5000	ei kulkeudu
2000-5000	kulkeutuu heikosti
500-2000	kulkeutuu hieman
150-500	kulkeutuu kohtalaisesti
50-150	kulkeutuu helposti
<50	kulkeutuu erittäin helposti

Orgaanisten liuottimien tiheyttä verrataan useimmiten veden tiheyteen. Tällöin saadaan suhdeluku: yli 1 eli kevyempi kuin vesi tai alle 1 eli raskaampi kuin vesi. Kemikaalien kulkeutuminen riippuu hyvin paljon tiheydestä. Hyvin kevyet yhdisteet kulkeutuvat pohjaveden pintakerroksessa tai kapillaarivesikerroksessa joko omana faasinaan tai veteen liuenneena. Vettä raskaammat yhdisteet pyrkivät painumaan pohjalle vettä läpäisemättömään kerrokseen saakka, jolloin niiden vajoaminen pysähtyy. Vettä raskaampien liuottimien eteneminen pysähtyy usein vettä läpäisemättömän pinnan painanteisiin.

Orgaanisten liuottimien käyttäytymistä voidaan arvioida jakaantumis- ja adsorptiokertoimien avulla, jotka on määritetty tietyille kemikaali-maaperä –yhdistelmille (Kultamaa 1993). Liuottimen jakaantumista kiinteän orgaanisen faasin ja veden välillä kuvaa orgaaninen hiili-vesi -adsorptiokerroin K_{oc} , joka korreloi hyvin oktanoli-vesi – jakaantumiskertoimen K_{ow} :n kanssa (Kankaanranta 1998). Suuri K_{ow} -kerroin ennakoii sekä kemikaalin pidättymistä orgaaniseen ainekseen että kemikaalin kertymistä eliöihin. Jakaantumiskerrointen välinen riippuvuus voidaan esittää kaavalla

$$\log K_{oc} = c \log K_{ow} + d,$$

missä c ja d ovat tietyille aineryhmille ominaisia kirjallisuudesta löytyviä kertoimia. (Komulainen & Karvonen 1996).

Taulukko 7. Oktanoli-vesi –jakaantumiskerroin (Kultamaa 1993).

Table 7. Octanol-water partitioning factor (Kultamaa 1993).

$\log K_{ow} = -1$	aineen pitoisuus oktanolissa on 10* alhaisempi kuin vedessä
$\log K_{ow} = 0$	aineen pitoisuus oktanolissa on sama kuin vedessä
$\log K_{ow} = 3$	aineen pitoisuus oktanolissa on 1000* suurempi kuin vedessä

K_{ow} :n avulla voidaan arvioida aineen kertyvyyttä eliöihin eli biokonsentraatiokerrointa BCF. K_{ow} kuvaa aineen kertymistä eliöihin, sillä oktanolin poolisuusominaisuudet vastaavat eläinrasvan poolisuusominaisuuksia. K_{ow} :lla ja biokonsentraatiokertoimella on tietty riippuvuussuhde, joka ilmenee taulukosta 8 (Tolppanen 1989). Mitä suurem-

pi BCF on, sitä suurempi on eliöihin kertyvyyden todennäköisyys. Jos BCF-arvo on yli 100, aine on biokertyvä testieläimeen, kuten kaloihin (Kankaanranta 1998).

Taulukko 8. Biokonsentraatiokerroin ja oktanoli-vesi –jakaantumiskertoimen välinen suhde (Tolppanen 1989).

Table 8. Relationship between bioconcentration factor and octanol-water –partitioning factor (Tolppanen 1989).

Biokonsentraatiokerroin (BCF)	Log K_{ow}
>10 000	>5.53
1 000 - 10 000	4.35 - 5.53
200 - 1 000	3.5 - 4.35
100 - 200	3.18 - 3.5
10 - 100	2.0 - 3.18
<10	<2.0

3.3 Maaperän ominaisuuksia

3.3.1 Ympäristön muuttujat

Maaperän sidontakapasiteettiin vaikuttavat monenlaiset ympäristötekijät. Sidontakapasiteetti voi muuttua esimerkiksi hydrogeologisten olosuhteiden, lämpötilan tai sademäärän muuttuessa. Jos sidontakapasiteetti pienenee, haitta-aineita voi vapautua takaisin liukoiseen muotoon. Ilmaston muuttuminen kuivempaan ja lämpimämpään suuntaan nopeuttaa maaperän orgaanisen aineksen (humuksen) hajoamista (Heikkinen 2000).

Ilmanpaineen muutokset vaikuttavat helposti haihtuvien aineiden käyttäytymiseen etenkin maan pintaosan huokoskaasussa. Ilmanpaineen noustessa ilma maan pinnalta painaa maaperän huokoskaasun syvemmälle, jolloin myös huokoskaasussa olevat haitta-aineet joutuvat syvemmälle ja niiden haihtumisherkkyys ilmakehään pienenee. Ilmanpaineen laskiessa haihtuvien kemikaalien vapautuminen huokoskaasusta ilmakehään helpottuu.

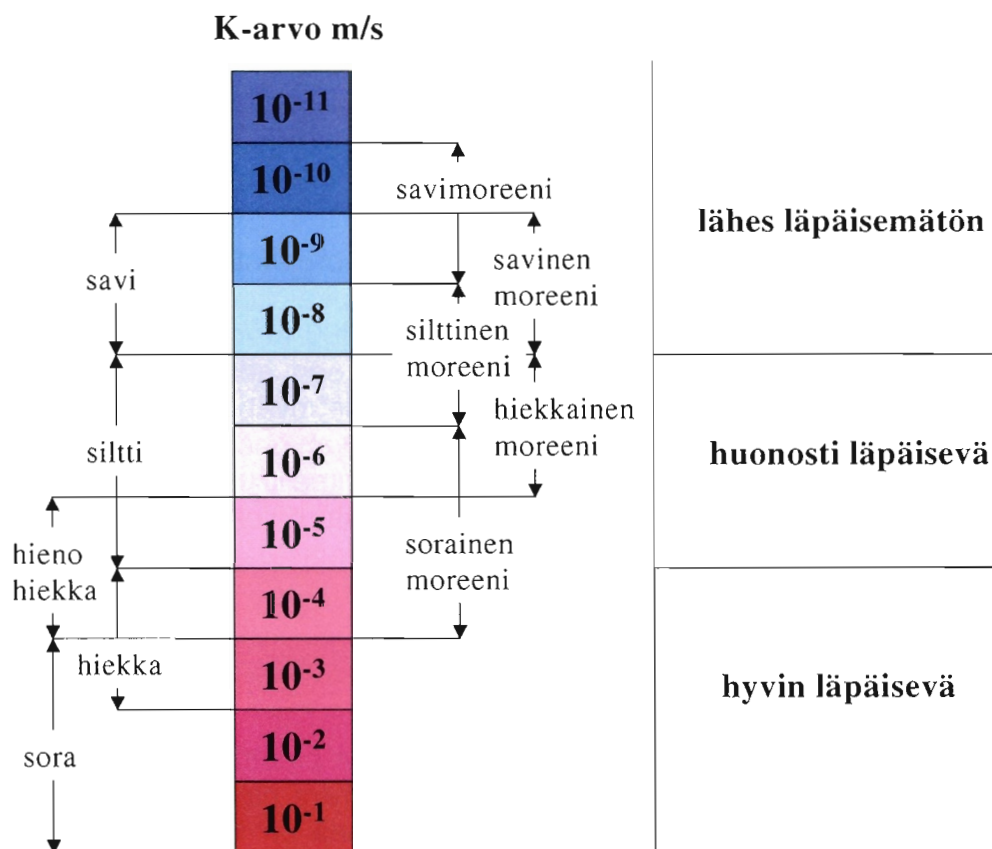
Sademäärä vaikuttaa aineiden pidättymiseen ja kulkeutumiseen maaperän läpi pohjaveteen. Sateella maaperän vedenpidätyskyky ylittyy, jolloin adsorptio vähenee ja jo pidättyneet aineet vapautua takaisin kulkeutuvampaan muotoon ja huuhtoutua suotoveden mukana pohjavesiin. Pidättyneet aineet voivat huuhtoutua pohjaveteen myös pohjaveden pinnan noustessa sateen seurauksena.

Lämpötilamuutokset maaperän vajovesikerroksessa noudattelevat ilman lämpötiloja. Pohjaveden lämpötila on suhteellisen vakio. Lämpötilan laskiessa kemikaalien muuttumisaika pienenee ja liukoisuus useimmiten vähenee (Setälä & Assmuth 1990). Talvella maan lämpötilan lasku aiheuttaa biologisten toimintojen pysähtymisen.

3.3.2 Fysikaaliset ominaisuudet

Maaperän kerrosrakenne ja koostumus vaihtelevat horisontaalisesti ja vertikaalisesti pienelläkin alueella, jolloin kemikaalien käyttäytymisen ennustaminen vaikeutuu (Setälä & Assmuth 1990). Maaperän raekoostumuksesta riippuvat monet muut kemikaalien käyttäytymisen kannalta merkittävät maaperän ominaisuudet, kuten vedenläpäisevyys ja huokoisuus. Raekoostumuksen muuttuessa karkeasta hienompaan savimineraalien ja kielten suhteellinen osuus mineraaleista kasvaa ja kvartsin ja maasälpien osuus vastaavasti vähenee (Paatonen 1995).

Maaperän huokoisuudella tarkoitetaan maarakeiden välisen tilan suhdetta kokonaistilavuuteen. Maarakeilla voi olla myös sisäistä huokoisuutta eli yksittäiset rakeet voivat olla rakoilleita tai huokoisia. Huokosten osuus kokonaistilavuudesta vaihtelee maaperän laadun mukaan. Hiekkamaissa huokosten osuus on 45-55% ja savimaissa 55-70% (Leppänen 1998). Aineiden kulkeutumisen kannalta merkittävää on kuitenkin huokosten koko ja huokostilan jatkuvuus. Pohjavedenpinnan yläpuolella huokosväleissä voi esiintyä sekä ilmaa että vettä, pohjavedenpinnan alapuolella maa on vedellä kyllästynyttä eli huokosvälit ovat täynnä vettä. Saasteet kulkeutuvat pääasiassa huokosväleissä omana neste- tai kaasufaasinaan tai veteen liuenneina. Maaperän vedenläpäisevyys riippuu huokosten määrästä ja koosta. Käytännössä vettä läpäisemättömiä ovat maalajit, joiden K-arvo on pienempi kuin 10^{-8} m/s (Hatva 1987). Kuvassa 3 on esitetty K-arvoja eri maalajeille.



Kuva 3. Eri maalajien vedenläpäisevyysarvoja Hatvan (1987) mukaan.

Figure 3. Hydraulic conductivities in different soils according to Hatva (1987).

Kemikaalien käyttäytymisen kannalta tärkeitä ovat myös alueen hydrogeologiset olosuhteet. Pohjavesiakviferin varastotilavuus vaikuttaa aineiden laimentumiseen. Pohjaveden korkeustaso ja sen muutokset vaikuttavat aineiden kulkeutumiseen, etenkin pohjaveteen asti päätyminen nopeuteen sekä kunnostusmenetelmän valintaan. Pohjaveden virtausnopeus on useimmiten ratkaiseva tekijä pohjaveteen asti päässeiden liuottimien kulkeutumisen ja leviämisen arvioinnissa. Virtaavan veden määrä ja nopeus vaihtelevat Suomessa huomattavasti etenkin vuodenaikojen mukaan. Liuottimien ominaisuuksista riippuen mahdolliset vettä läpäisemättömät kerrokset ja kalionpinnan topografia voivat aiheuttaa liuotinfasiin pysähtymisen ja mahdollisesti pitkäaikaisen päästölähteen muodostumisen.

3.3.3 Kemialliset ominaisuudet

Suomen maaperä on kallioperän ja ilmastollisten tekijöiden vaikutuksesta suurimaksi osaksi luontaisesti hapanta. Maaperän puskurointikyky happaman sadeveden suhteen on heikko, joten myös maavesi on hapanta (Heikkinen 2000). pH:n muuttuminen vaikuttaa yleensä lähinnä varauksellisten kemikaalien (kationit ja anionit) liukoisuuteen ja adsorptio-ominaisuuksiin, joten neutraalien orgaanisten liuottimien käyttäytymiseen pH:lla ei ole suurta merkitystä (Kankaanranta 1998).

Maaperän hapetus-pelkistys- eli redox-olosuhteet muuttuvat pelkistävään suuntaan syvemmälle mennessä (Setälä & Assmuth 1990). Hapen kulutus biologisessa toiminnassa vedellä kyllästyneessä maassa aiheuttaa pH:n nousua ja redox-potentiaalin laskua (Kankaanranta 1998). Orgaaniset yhdisteet ovat kuitenkin useimmiten inerttejä happamuuden muutosten lisäksi myös redox-potentiaalin muutoksille (Kultamaa 1993).

3.3.4 Orgaanisen aineksen pitoisuus

Orgaaniset liuottimet pidättyvät lähinnä maan kiinteään orgaaniseen ainekseen, humukseen, jota muodostuu orgaanisten eliöiden, lähinnä kasvien hajoamisen lopputuotteena. Humuksella on suuri ominaispinta-ala, noin $800 \text{ m}^2/\text{g}$, ja se sisältää runsaasti negatiivisesti varautuneita ryhmiä, jonka vuoksi sen adsorptiokyky on suuri (Setälä & Assmuth 1990, Jeltsch 1990). Adsorptiosidokset ovat heikkoja, joten myös desorptio tapahtuu kohtuullisen helposti (Komulainen & Karvonen 1996). Kiinteän orgaanisen aineksen määrä maaperässä vähenee syvemmälle mennessä (Setälä & Assmuth 1990). Maan olosuhteet voivat muuttua humusta hajottaviksi, jolloin haitta-aineet vapautuvat. Kuivemmassa ja lämpimämmässä ilmastossa humuksen hajoaminen tehostuu (Heikkinen 2000).

3.3.5 Epäorgaanisen aineksen pitoisuus

Epäorgaanisesta hienoaineksesta lähes ainoastaan savi pidättää orgaanisia liuottimia, vaikkakin heikommin kuin humus. Saven pidätyskyky riippuu sen hilaominaisuuksista ja ominaispinta-alasta. Savimineraalien rakenne on levymäinen ja niiden ominaispinta-ala on suuri. Saven ominaispinta-ala vaihtelee savimineraaleista riippuen kaoliniitin noin $10 \text{ m}^2/\text{g}$ ja montmorilloniitin noin $800 \text{ m}^2/\text{g}$ välillä (Leppänen 1998). Adsorptio-ominaisuuserot mineraalien välillä riippuvat maaperän suhteellisesta kos-

teudesta. Etenkin paisuvahilaisten savimineraalien adsorptiokyky pienenee rajusti kosteuden kasvaessa (Paatonen 1995).

3.4 Pidättyminen

3.4.1 Sorptio

Maaperän sidontakapasiteetti on rajallinen ja voi kasvaneen tai pitkäaikaisen kuorituksen vuoksi saavuttaa kyllästysrajan. Tämän jälkeen aineet eivät enää pysty sitoutumaan maaperään (Heikkinen 2000).

Adsorptio tarkoittaa molekyylien kiinnittymistä (adheesiota) hiukkasten pinnalle. Orgaanisten liuottimien adsorptio riippuu lähinnä maan raakoostumuksesta ja vesipitoisuudesta (Kolari & Salkinoja-Salonen 1993). Poolittomat orgaaniset yhdisteet adsorboituvat yleensä heikosti. Vesimolekyylit ovat voimakkaasti poolisia, joten ne sitoutuvat poolisten mineraalirakeiden pinnalle. Tällöin ne varaavat adsorptiopaikan, jolloin heikosti poolisten tai poolittomien liuottimien adsorptio vähenee (Paatonen 1995). Vesimolekyylit kiinnittyvät poolisten mineraalien pinnalle vahvoilla vetysidoksilla. Poolittomat orgaaniset kemikaalit kiinnittyvät heikoilla van der Waalsin sidoksilla. Adsorboituneiden vesimolekyylien korvautuminen orgaanisilla kemikaaleilla olisi energetisesti epäedullista (Schwarzenbach et al. 1993). Vesipitoisuuden kasvu näin ollen vähentää orgaanisten liuottimien adsorptiota ja lisää desorptiota. Vesimolekyylien peittäessä mineraalirakeet kokonaan adsorptioerot mineraalien välillä ovat olemattomat. Yleensä suhteellisen kosteuden kasvaessa yli 30 %:iin adsorptioominaisuuksissa esiintyvät erot mineraalien välillä käytännössä häviävät (Paatonen 1995).

Adsorptiota tapahtuu eniten hienorakeisessa maassa, koska rakeiden ominaispinta-ala on suuri. Raekoon pienetessä ominaispinta-ala kasvaa. Maalajien adsorptiokyvyn mukainen järjestys on Tolppasen (1989) mukaan suoraan verrannollinen maalajin hienoineksen ja orgaanisen aineksen määrään: sora < hiekka < hieta ja hiekkamooreni < siltti < hiesu ja silttimoreeni < savi ja saraturve < lieju, muta ja rahkaturve. Kuivat mineraalimaalajit voivat adsorboida melko tehokkaasti haihtuvia orgaanisia kemikaaleja kaasufaasista. Tällöin vesipitoisuuden kasvu vähentää adsorptiota voimakkaasti (Setälä & Assmuth 1990).

Sekä savi että orgaaninen aines, jotka pidättävät orgaanisia liuottimia tehokkaasti, esiintyvät myös linsseinä hyvin vettä johtavien kerrosten väleissä. Saven ja orgaanisen aineksen alhaisesta vedenjohtavuudesta johtuen vesi ja siihen liuenneet kemikaalit pyrkivät virtaamaan linssien ohitse, jolloin adsorptiota ei pääse tapahtumaan (Tolppanen 1989).

Absorptio on kolmiulotteista, jolloin haitta-ainemolekyylit kiinnittyvät hiukkasten rakenteeseen. Absorptiolla pidättyminen on pysyvämpää kuin adsorptiolla sidosten voimakkuudesta johtuen (Heikkinen 2000).

Desorptio on lähes käänteinen adsorptio tai absorptio eli molekyylien vapautuminen hiukkasten pinnalta tai sisältä. Kemikaalien desorptioon voivat johtaa erilaiset muutokset maaperän olosuhteissa, kuten kosteuden lisääntyminen, lämpötilan nousu sekä huokoskaasun konsentraation pieneneminen. Desorptio hidastuu ja vähenee olo-

suhdemuutosten jatkuessa, mutta voi kuitenkin jatkua hyvinkin pitkään, jopa kuukausia (Paatonen 1995).

3.4.2 Kapillaarivoimat

Kapillaarivoimat johtuvat veden pintajännityksestä ja ne pyrkivät pidättämään alas-päin suotautuvaa vettä maaperän vedellä kyllästymättömän vyöhykkeen huokosissa. Kapillaarivoima kasvaa huokoskoon pienetessä. Kapillaarivyöhyke esiintyy maaperässä pohjavedenpinnan yläpuolella. Kapillaariveden määrä lisääntyy lähestyttäessä pohjavedenpintaa (Paatonen 1995).

Veden lisäksi kapillaarivoimien vaikutuksesta pidätyvät myös veteen liuenneet ja omana faasinaan esiintyvät kemikaalit. Kapillaarisesti pidätyneet kemikaalit vapautuvat hitaasti pohjaveteen ja huokoskaasuun ja aiheuttavat pitkäaikaisen, vaikkakin useimmiten vähäisen päästölähteen (Paatonen 1995).

3.5 Kulkeutuminen maaperässä

3.5.1 Yleistä

Orgaaniset liuottimet kulkeutuvat yleensä helposti vedellä kyllästymättömän vyöhykkeen läpi pohjaveteen asti. Kulkeutuminen maaperässä tapahtuu joko omana kaasutai nestefaasinaan tai veteen liuenneena. Kemikaalin kulkeutuminen maakerrosten läpi voi pienentää sen lopullista pitoisuutta pohjavedessä sitoutumis- ja hajoamismekanismien kautta (Hänninen 1993).

3.5.2 Kulkeutuminen pohjavedessä

Kemikaalit pääsevät pohjaveteen lähinnä maanpinnalta imeytymällä. Veteen hyvin liukenevat aineet ovat usein hyvin liikkuvia maaperässä ja kulkeutuvat helposti pohjaveteen asti (Kankaanranta 1998). Pohjaveden pilaantuminen on usein todella pitkän aikavälin ongelma, sillä virtausnopeudet ovat pieniä ja hajoaminen hidasta.

Aineet kulkeutuvat vedellä kyllästyneessä kerroksessa pohjaveden virtausten mukana ja leviämällä veteen diffuusion ja dispersion avulla. Haitta-aineet voivat kulkeutua pohjavedessä joko liuenneena tai omana neste- tai kaasufaasinaan pohjaveden pintaosissa tai pohjaosissa. Kulkeutumismennopeus riippuu sekä aineen että maaperän ominaisuuksista. Vettä tiheimmät aineet pyrkivät painumaan pohjalle ja vettä kevyemmät aineet jäävät veden kyllästämän maan pintaosiin tai kapillaarivyöhykkeeseen. Pohjalle painuvien vettä raskaampien aineiden kulkeutuminen ja leviäminen pysähtyy useimmiten vettä läpäisemättömän kerroksen painanteisiin. Orgaaninen faasi toimii pitkäaikaisena saastelähteenä, kun yhdisteet liukenevat hitaasti pohjaveteen.

Karkearakeisissa, hyvin vettä johtavissa kerrostumissa kemikaalien kulkeutumismennopeuteen vaikuttaa advektio eli aineiden liikkuminen pohjaveden virtauksen mukana (Kankaanranta 1998). Kulkeutumismennopeus on usein hieman pienempi kuin veden virtausnopeus. Selvästi advektiota hitaampi kulkeutumismekanismi on diffuusio. Dif-

fuusio perustuu molekyylien liikkeeseen ja pyrkimykseen tasoittaa pitoisuuseroja väliaineessa. Diffuusioilla on merkitystä lähinnä pohjavesivyöhykkeen pienihuokoisissa, heikosti lajittuneissa tai hienorakeisissa maalajeissa, kuten savissa ja joissakin moreeneissa (Heikkinen 2000). Etenkin tiiviissä savikerroksissa sekä mineraalisissa eristerakenteissa diffuusionopeus voi kasvaa huomattavaksikin. Diffuusio on väliaineen liikkeestä riippumaton ja vaikuttaa siten myös seisovassa vedessä (Komulainen & Karvonen 1996). Diffuusio sekä pohjaveden virtausnopeuden vaihtelu aiheuttavat mekaanisen sekoittumisen eli dispersion. Dispersion nopeuteen vaikuttaa veden virtausnopeus. Diffuusiota ja siten myös dispersiota tapahtuu sekä virtaussuunnassa että virtaussuuntaa vastaan poikittaisessa suunnassa (Heikkinen 2000).

Pohjaveteen liuenneiden aineiden kulkeutumisnopeus on useimmiten lähellä pohjaveden virtausnopeutta. Pohjaveden virtausnopeuksia eri tyyppisissä maalajeissa on arvioitu taulukossa 9.

Taulukko 9. Pohjaveden kulkeutumisnopeuksia eri maalajeissa (Forsbacka 1996).
Table 9. Ground water flow velocities in different soil types (Forsbacka 1996).

Maalaji	Kulkeutumisnopeus m/vrk	Kulkeutumisnopeus m/s
syvällä olevat savikerrokset	10^{-7} - 0.01	8.5×10^{-2} - 8.5×10^2
pintasavimaalajit	0.01 - 0.2	8.5×10^2 - 1.5×10^4
hiesumaa	0.1 - 1	8.5×10^3 - 8.5×10^4
hieta	1 - 5	8.5×10^4 - 4.5×10^5
hiekkä	5 - 20	4.5×10^5 - 1.5×10^6
sora	100 - 1 000	8.5×10^6 - 8.5×10^7

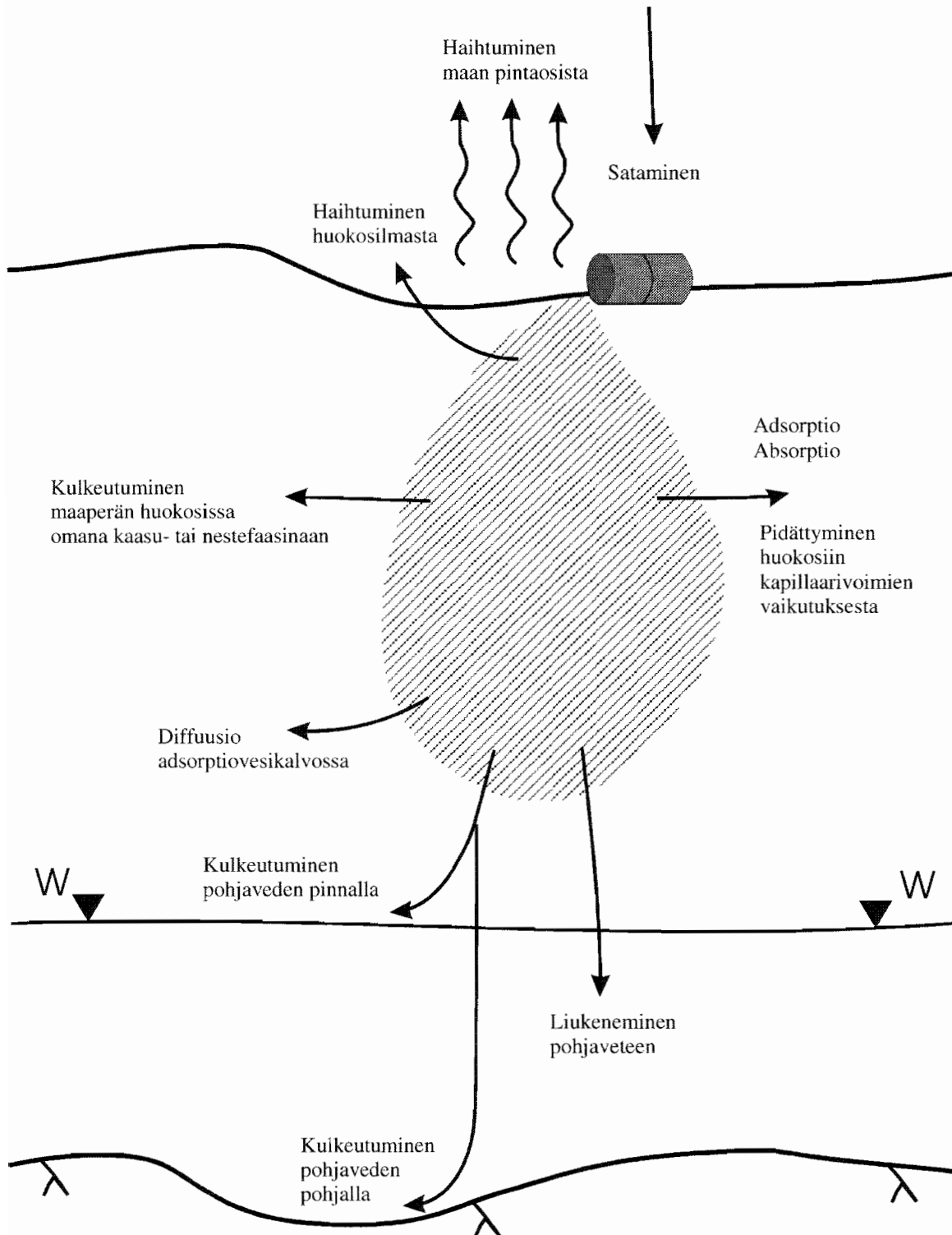
3.5.3 Kulkeutuminen huokoskaasussa

Helposti haihtuvat orgaaniset yhdisteet kulkeutuvat myös maaperän huokoskaasussa vedellä kyllästymättömässä vyöhykkeessä. Huokoskaasuun haihtuu yhdisteitä vapaana faasina esiintyvistä, sitoutuneista ja liuenneista kemikaaleista. Haihtumiseen vaikuttavat sekä yhdisteiden että maaperän ominaisuudet sekä konsentraatio huokoskaasussa (Paatonen 1995). Lämpötilan nousu edistää useimmiten haihtumista, samoin kosteuden lisääntyminen (Kankaanranta 1998). Haihtumista tapahtuu maan pintaosista ilmakehään sekä pohjaveden pintaosista maaperän huokoskaasuun.

Orgaanisten haihtuvien aineiden kulkeutuminen huokoskaasussa tapahtuu diffuusion ja advektion avulla. Diffuusio on yleensä merkittävin kulkeutumismuoto huokoskaasussa ja sen vaikutuksesta kemikaalit liikkuvat huokoskaasussa pienempään konsentraatioon päin eli poispäin saastelähteestä (Paatonen 1995). Advektiolla tarkoitetaan paine-, lämpötila- tai tiheyseroista johtuvaa huokoskaasun liikettä. Advektio on merkittävä huokoskaasussa kulkeutumisen muoto hyvin läpäisevässä maaperässä.

Huokoskaasun virtausnopeus maaperässä riippuu maaperän läpäisevyydestä sekä huokoskaasun koostumuksesta, etenkin viskositeetista. Useimmiten kaasu liikkuu maaperässä nopeammin kuin neste (Paatonen 1995).

Kuvassa 4 on esitetty kemikaalien eri käyttäytymismahdollisuuksia ympäristössä.



Kuva 4. Kemikaalien käyttäytyminen ympäristössä. Muokattu Mendozan ja Frindin (1990a ja 1990b) mukaan.

Figure 4. Behaviour of chemicals in the environment. Modified after Mendoza & Frind (1990a and 1990b).

3.6 Hajoaminen

3.6.1 Fotolyysi

Osa maaperään päässeestä liuottimesta haihtuu maan pintakerroksista ilmaan. Ilmakehässä orgaaniset liuottimet joko kulkeutuvat ylempiin ilmakerroksiin, hajoavat fotolyysissä, hapettuvat tai liukenevat sadeveteen päätyen takaisin maanpinnalle. Kloorattujen liuottimien eräänä hajoamistuotteena on kloori, joka toimii vapaana radikaalina ja hajottaa yläilmakehän otsonia. Alailmakehässä halogenoidut hiilivedyt lisäävät haitallista otsoninmuodostusta (VYH 2001b). Hiilivedyt osallistuvat yhdessä typen oksidien ja auringonvalon kanssa alailmakehän otsonin muodostukseen (VYH 2001c).

Ilmakehässä useimmat haihtuvat orgaaniset yhdisteet hajoavat fotolyytisesti, jolloin välivaiheiden kautta syntyy hiilidioksidia tai hiilimonoksidia ja vettä (Yli-Kauppila 1994). Suorassa fotolyysissä aine hajoaa, kun absorboitun säteilyn energia rikkoo kemikaalin sisäisiä sidoksia. Epäsuorassa fotolyysissä säteilyn synnyttämät reaktiiviset aineet, kuten otsoni tai radikaalit hajottavat aineen (Kultamaa 1993).

3.6.2 Kemiallinen hajoaminen

Orgaanisten liuottimien kemialliset hajoamisreaktiot ovat hydrolyysi ja hapettuminen. Orgaanisten halogeeniyhdisteiden hydrolyysissä halogeeni korvautuu hydroksidi-ionilla OH^- . Orgaaniset liuottimet eivät aina hajoa hapettumalla, vaan pelkistävä ympäristö on välttämätön mm. halogeenien poistamisessa klooratuista hiilivedyistä (Kankaanranta 1998).

3.6.3 Biologinen hajoaminen

Hiilivedyt hajoavat mikrobitoiminnan seurauksena alkuaineiksi ja yksinkertaisiksi yhdisteiksi sopivissa olosuhteissa. Suomen olosuhteet ovat yleensä epäedulliset mikrobiologiselle hajoamiselle. Hajoamista tapahtuu, mutta se on hyvin hidasta. Kylmä ilmasto, hapan maaperä ja ravinteiden puute hidastavat hajoamista (Kolari & Salakinoja-Salonen 1993). Kemikaalin suuri pitoisuus tai myrkyllisyys voi estää hajottajamikrobien toiminnan. Maaperän mikrobiston toiminta muuttuu syvemmälle mennessä aerobisesta anaerobiseksi ja mikrobiston biomassa pienenee (Setälä & Assmuth 1990). Syvällä maaperässä sekä pohjavedessä mikrobitoiminta on useimmiten vähäistä hapen ja ravinteiden puutteen vuoksi (Auranlinna & Strandberg 1994).

Biologinen aerobinen hajoaminen edellyttää hapen, veden ja ravinteiden saannin, sopivan pH:n ja oikean lämpötilan lisäksi useimmiten jotakin hiilen tai energian lähdettä. Hajotuksen alkuvaiheessa etenkin bakteerit ovat aktiivisia, mutta myöhemmin käynnistyvä sienten toiminta on pysyvämpää. Yksinkertaiset yhdisteet, kuten yksinkertaiset alifaattiset hiilivedyt ja yksinkertaiset aromaattiset yhdisteet hajoavat nopeasti. Hitaammin hajoavat vähän klooria sisältävät suoraketjuiset hiilivedyt. Sykloalkaanit, suurimolekyyliset orgaaniset halogeeniyhdisteet sekä tietyt alifaattiset halogenoidut hiilivedyt ovat vaikeasti hajoavia (Auranlinna & Strandberg 1994).

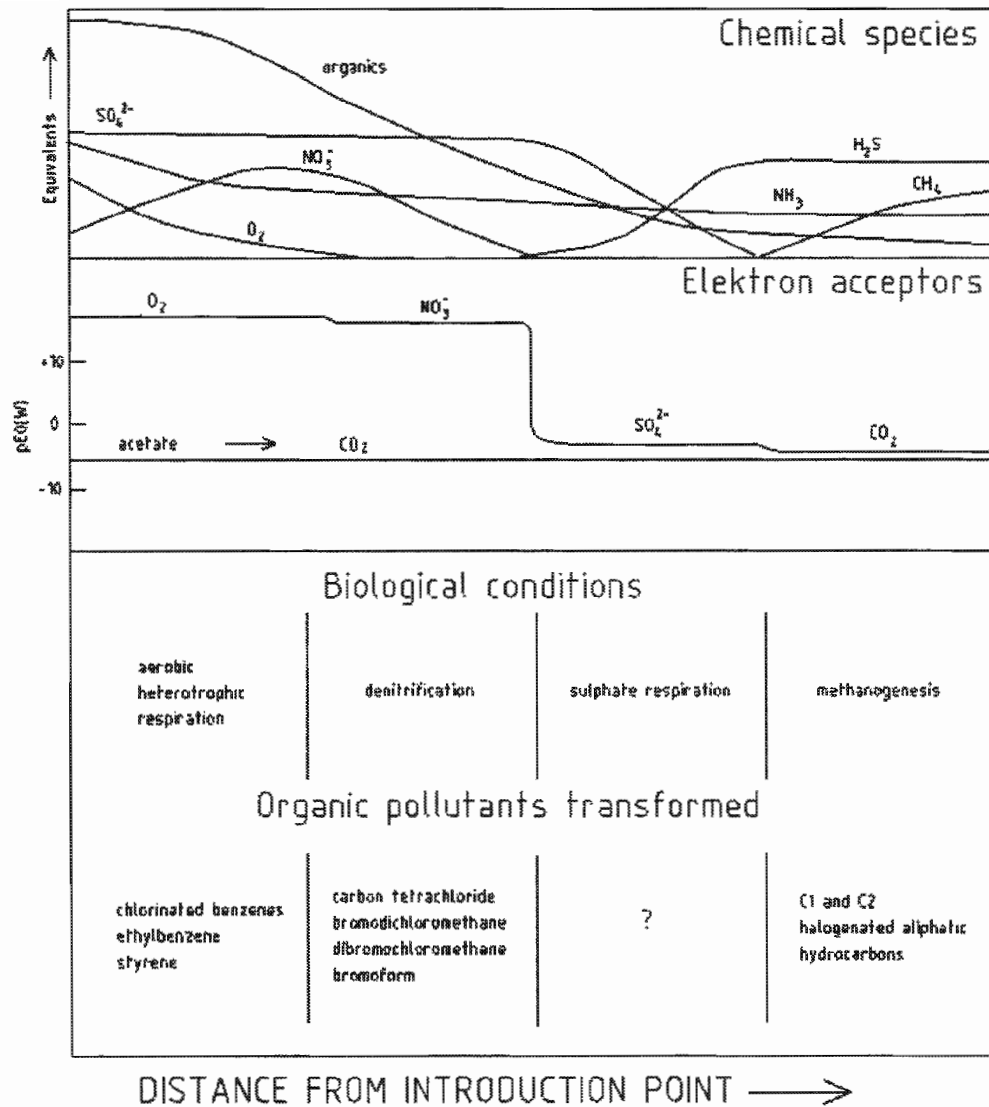
Pohjaveteen päässeet liuottimet hajoavat hitaasti ja hajoamistuotteet voivat toisinaan olla jopa myrkyllisempiä kuin alkuperäinen luontoon päässyt haitta-aine. Biotransformaation eli muuntumisen syynä voi olla hajoamistuotteiden myrkyllisyys, edelleen-hajottavien mikrobien puute tai ympäristön fysikaalis-kemiallisten olosuhteiden, kuten happipitoisuuden sopimattomuus. Tetra- ja trikloorieteenit hajoavat vähähappisessa maaperässä ja pohjavedessä epätäydellisesti muodostaen terveydelle haitallisempia cis-1,2-dikloorieteeniä ja vinyylikloridia. Vinyylikloridin hajoaminen edelleen eteeniksi, etaaniksi ja lopuksi hiilidioksidiksi sekä epäorgaaniseksi kloridiksi vaatii aerobiset olosuhteet (Kolari & Salkinoja-Salonen 1993). Suomen vähähappisissa oloissa dikloorieteeni ja vinyylikloridi kertyvät useimmiten pohjavesiin. Suurin osa sekä maaperästä että pohjavedestä tavattavasta vinyylikloridista on syntynyt hajoamistuotteena (Auranlinna & Strandberg 1994). Hajoamisketju on yksinkertaistettuna seuraavanlainen: [anaerobinen] tetrakloorieteeni → trikloorieteeni → dikloorieteeni → vinyylikloridi [aerobinen] → eteeni → etaani → hiilidioksidi ja epäorgaaninen kloridi (Kolari & Salkinoja-Salonen 1993, Setälä & Assmuth 1990).

Taulukko 10. Puoliintumisaika (Ylä-Mononen 1993).

Table 10. Half life (Ylä-Mononen 1993).

Puoliintumisaika t _{1/2}	Ryhmittely
<1 vko	nopeasti hajoava
1 vko - 1 kk	kohtalaisen nopeasti hajoava
1 - 3 kk	kohtalaisen hitaasti hajoava
3 - 8 kk	hitaasti hajoava
> 8 kk	erittäin hitaasti hajoava

Mikrobit muuttavat maaperän kemiallisia olosuhteita kuluttamalla tai tuottamalla happea, pelkistävät, happamat tai emäksiset olosuhteet, jolloin pH ja redox -olosuhteet voivat muuttua. Kuvassa 5 on esitetty kemiallisissa ja biologisissa olosuhteissa, redox-potentiaalissa sekä elektronin vastaanottajassa tapahtuvia muutoksia kulkeutumismatkan funktiona. Lisäksi kuvassa 5 on esitetty tiettyjen olosuhteiden suosivan tietyn kemikaalin hajoamista (Bouwer & McCarthy 1984).



Kuva 5. Kaavamainen esitys tiettyjen orgaanisten liuottimien mikrobiologisesta muuttunnasta ja hapetus-pelkistys -olosuhteiden vaihtelusta kulkeutumismatkan funktiona Bouwerin & McCarthy (1984) mukaan.

Figure 5. Schematised presentation on microbiological transformation of organic solvents and changes in redox conditions as a function of travel distance according to Bouwer & McCarthy (1984).

4. TUTKIMUS- JA KUNNOSTUSMENETELMÄT

4.1 Lainsäädäntö

Ympäristönsuojelulainsäädännön (Finlex 86/2000) mukaan kunnostuksesta on vastuussa likaantumisen aiheuttaja. Tutkimus- ja kunnostusvastuu siirtyy likaantumisen aiheuttajalta maanomistajalle ja edelleen kunnalle, jos edellisiä ei jostain syystä saada vastuuseen. Apua kunnostustöiden rahoittamiseen ja suorittamiseen voi saada myös erilaisilta rahastoilta. Kunnostuksessa on käytettävä parasta mahdollista tekniikkaa ja huolehdittava muiden ympäristövaikutusten ennaltaehkäisystä.

Ympäristönsuojelulainsäädännön (Finlex 86/2000) mukaan ympäristön pilaantumisen vaaraa aiheuttavaan toimintaan on haettava ympäristölupa alueelliselta ympäristöviranomaiselta. Lisäksi mm. toimintaan, josta saattaa aiheutua vesistön pilaantumista, jätevesien johtamiseen sekä likaantuneen alueen kunnostukselle on haettava ympäristölupa.

Helsingissä ympäristölupa haetaan Uudenmaan ympäristökeskukselta. Vaihtoehtoisesti on mahdollisuus tehdä kunnostamisesta ilmoitus Helsingin kaupungin ympäristökeskukselle, jos tietyt ehdot täyttyvät. Pilaantuneen alueen laajuus ja pilaantumisen aste on oltava selvillä, kunnostuksessa on käytettävä yleisesti käytössä olevaa puhdistusmenetelmää ja toiminnasta ei saa aiheutua muuta ympäristön pilaantumista. Käytännössä luvanvaraisuus tai ilmoituksella selviäminen päätetään tapauskohtaisesti. Ilmoitusmenettely on käytössä toistaiseksi vain Helsingissä ainoana Suomen kuntana. Lupa siihen on anottu Ympäristöministeriöltä (Antti Salla, suullinen tiedonanto).

Ympäristönsuojelulainsäädännön (Finlex 86/2000) mukaan ympäristöluvassa annetaan määräykset päästöistä, jätteistä, toimista häiriötilanteissa sekä toiminnan lopettamisen jälkeisistä toimenpiteistä. Lupa myönnetään toistaiseksi tai määräajaksi.

4.2 Tutkimusmenetelmiä

4.2.1 Käyttöhistoria

Likaantuneen alueen tutkiminen aloitetaan alueen historian selvittämällä. Tarkoituksena on selvittää alueen aikaisempi käyttö ja toiminta, tehdyt tutkimukset sekä selvittää alueen geologiset ja hydrogeologiset olosuhteet (Suomen geoteknillinen yhdistys Ry 2001). Usein käyttöhistorian selvittäminen auttaa määrittämään mahdollisen saastelähteen, jolloin näytteenoton suunnittelu helpottuu ja tarkentuu.

4.2.2 Näytteenotto

Näytteenoton tavoitteena on saada laboratorioon näyte, joka on riittävä, edustava ja muuttumaton. Edustava näyte kuvaa tutkittavien ominaisuuksien osalta hyvin sitä maaperän kerrosta tai osaa, mistä se on otettu. Muuttumaton näyte ei ole ottamisen tai säilytyksen aikana kontaminoitunut eli ”likaantunut” eikä määrällisesti pienentynyt esimerkiksi haihtumisen kautta.

Kaikissa näytteenottovaiheissa huolellinen dokumentointi on erittäin tärkeää. Näytteitä otettaessa on piirrettävä selkeä kartta alueesta sekä kirjattava alueen ja näyt-

teenoton tiedot (Suomen geoteknillinen yhdistys Ry 2001). Näytteenottoa on vältettävä voimakkaiden sääolosuhteiden muutosten jälkeen. Säätilan dokumentointi voi helpottaa tulosten tulkintaa (Paatonen 1995).

Näytteenottomenetelmiä on useita ja menetelmän valinta tehdään tutkittavien aineiden sekä alueen vaatimusten mukaisesti. Erityisen tärkeää etenkin VOC-aineiden kohdalla on välttää haihtumista, merkitä astiat huolellisesti sekä toimittaa näytteet mahdollisimman nopeasti laboratorioon analysoitaviksi. Myös kontaminaation mahdollisuus on otettava huomioon, vaikkakin liuotinten kohdalla riski on pieni.

4.2.3 Maaperänäytteet

Maaperänäytteet otetaan lapiolla maan pinnalta tai koekuopasta tai koneellisesti kairaamalla. Näyteastian valinnassa on otettava huomioon tutkittavan aineen lisäksi maarakeiden naarmuttava vaikutus, jolloin astian reunoista voi aiheutua kontaminaatiota. Etenkin helposti haihtuvia orgaanisia liuottimia tutkittaessa välineiden vaatimustaso on korkea. Näytemäärän olisi oltava noin 0,5 litraa, tarvittaessa suurempikin, koska suuret partikkelit (> 2mm) poistetaan seulomalla.

Maanäyte voidaan ottaa pistenäytteenä yhdestä kohdasta, jatkuvana näytteenä tietyltä syvyysväliltä tai kokoomänäytteenä keskimääräisen pitoisuuden selvittämiseksi suuremmalla alueella.

4.2.4 Vesinäytteet

Vesinäytteiden ottamiseksi on erilaisia noutimia, joilla näyte saadaan otetuksi tietyltä syvyydeltä. Pohjavesinäytteet otetaan useimmiten pohjavesiputkesta pumpun avulla. Pohjavesiputken halkaisijan on oltava tarpeeksi suuri ja putken materiaali ei saa aiheuttaa kontaminaatiota. Ennen näytteenottoa suoritetaan useimmiten esipumppaus veden pitkäaikaisesta seisomisesta aiheutuvien virheiden välttämiseksi (Suomen geoteknillinen yhdistys Ry 2001).

4.2.5 Huokoskaasunäytteet

Haihtuvat yhdisteet esiintyvät muiden komponenttien lisäksi myös maaperän huokoskaasussa, josta ne voidaan mitata suhteellisen nopeasti ja yksinkertaisesti (Jeltsch 1990). Useimmiten huokoskaasunäyte otetaan suoraan maaperästä vedellä kyllästymättömästä vyöhykkeestä pysyvän putken tai yhtä mittausta varten asennettavan sondin kautta.

Näytteenotto voi tapahtua aktiivisesti tai passiivisesti. Aktiivisessa näytteenotossa imetään huokoskaasua pumpulla näytteenkeräimeen. Passiivisessa näytteenotossa adsorptioainetta sisältävä näytteenkeräin sijoitetaan sopivaan paikkaan tietyksi ajaksi. Kenttämittauksiin käytetään useimmiten ainespesifisiä ilmaisinputkia, jotka osoittavat kaasujen läsnäolon putken värin muuttumisella tai vastaavalla muutoksella (Paatonen 1995). Suoraan osoittavia mittaamenetelmiä, kuten ilmaisinputkia käytetään alustaviin mittauksiin sekä äkillisten päästöjen tutkintaan. Adsorptioputkilla sekä

passiivisilla keräimillä saadaan pidempiaikaisia pitoisuuskeskiarvoja (Nikulainen & Kalevi 1997).

4.2.6 Laboratorioanalyysit

Analysointi voidaan tehdä joko kentällä tai laboratoriossa. Usein kentällä tehdään alustava analyysi kenttämittareilla, minkä perusteella tarkennetaan näytteenottopaikat ja syvyydet.

Analysointi on useimmiten tehtävä pian näytteenoton jälkeen virheiden minimoimiseksi. Jos näytteitä ei voida analysoida heti, on niitä yleensä käsiteltävä muutosten estämiseksi esimerkiksi jäädyttämällä (Hartonen 2001).

Lähes kaikki näytteet on esikäsiteltävä ennen analysointia. Usein on tarpeellista poistaa muut kuin tutkittavat aineet näytteestä tai vähentää niiden pitoisuuksia, jolloin häirintävaikutus vähenee. Esikäsitely suoritetaan useimmiten uuttamalla. Orgaanisten yhdisteiden analysointi suoritetaan yleensä kaasukromatografimassaspektrometri –menetelmällä (GC-MS). Yhdisteet höyrystetään ja erotellaan kaasukromatografilla ja tunnistetaan massa-varaus –suhteen mukaisesti massaspektrometrillä. Tulokseksi saadaan massaspekttri, josta yhdisteet ihannetapauksessa erottuvat omina piikkeinään (Hartonen 2001).

4.3 Käsittelymenetelmiä

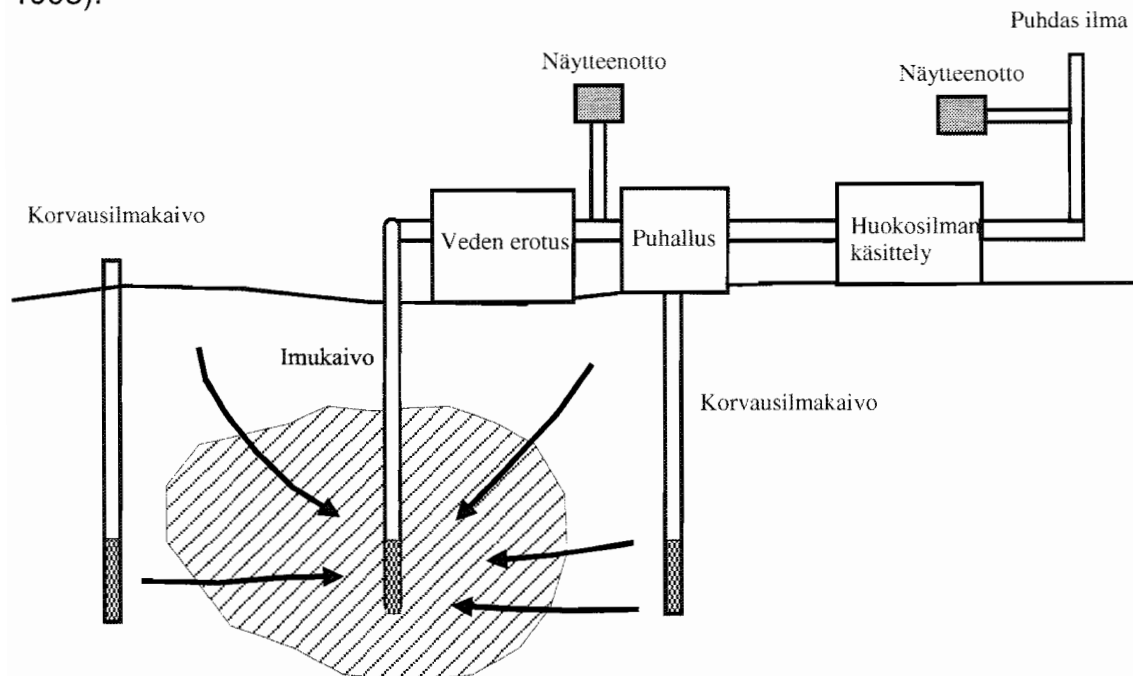
4.3.1 Yleistä

Likaantuneen alueen kunnostuksella pyritään poistamaan tai tuhoamaan maasta haitalliset aineet tai estämään niiden leviäminen ja siten estämään ympäristö- ja terveyshaitat. Kunnostuksen aikana on estettävä aineiden leviäminen ympäristöön esimerkiksi eristyksellä tai pumppauksella. Kunnostuksen aikaiset riskit on minimoitava, riski työntekijöille, ympäristölle, satunnaisille alueella liikkujille ym. Kunnostukselle asetetaan tietyt tavoitteet tulevan käyttötarkoituksen mukaisesti. Asunto- ja virkistyskäyttöön tuleville alueille asetetaan tiukemmat tavoiterajat kuin teollisuusalueille (Leminen & Forss 1994). Tällä hetkellä kunnostettavia kohteita Suomessa arvioidaan vuosittain olevan 150-200 (Penttinen 2001).

Kunnostusmenetelmän valinta riippuu kohteen olosuhteista, likaantumisen laajuudesta, tulevasta käytöstä, maaperän ominaisuuksista, haitallisten aineiden pitoisuuksista ja ominaisuuksista sekä taloudellisista tekijöistä (Leminen & Forss 1994). Usein eri menetelmiä yhdistetään parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi. Uusien ja entistä tehokkaampien kunnostustekniikoiden kehitystarve on suuri, sillä puhdistustavoitteiden saavuttaminen on nykyisillä menetelmillä usein kallista ja hidasta (Komulainen 1998). Menetelmät jaetaan useimmiten *in situ*-, *ex situ*-, *on site*- ja *off site*-käsittelyihin. *In situ* -käsittelyssä maa-ainesta ei kaiveta pois vaan maaperä puhdistetaan paikoillaan. *Ex situ* -käsittelyssä likaantunut maa-aines kaivetaan pois käsiteltäväksi. *On site* -käsittelyssä maa-aines kaivetaan pois ja käsitellään paikan päällä. *Off site* -käsittelyssä maa-aines kuljetetaan muualle käsiteltäväksi. Tässä selvityksessä on esitelty vain menetelmät, jotka sopivat orgaanisilla liuottimilla likaantuneiden alueiden käsittelyyn.

4.3.2 Huokoskaasukäsittely

Huokoskaasukäsittelyssä poistetaan haihtuvia yhdisteitä maan vedellä kyllästymättömästä vyöhykkeestä alipaineen avulla. Se soveltuu helposti haihtuvilla aineilla liikaantuneen maaperän käsittelyyn tietyin edellytyksin. Maaperän on läpäistävä ilmaa kohtuullisesti, läpäisykyvyn on oltava yli 10^{-8} m/s (Lintu 1995). Lisäksi kyllästymättömän kerroksen paksuuden on oltava yli 1,5 metriä (Penttinen 2001). Kunnostus suoritetaan useimmiten *in situ*. Maaperään asennetaan imuputkia joko pysty- tai vaakatasoon, joista pumpun avulla imetään ilmaa. Tällöin maahan muodostuu alipaine, joka saa aikaan ilmavirtauksen maaperän huokosista. Helposti haihtuvat aineet, kuten liuottimet poistuvat maaperästä huokoskaasun mukana. Maasta poistuva ilma puhdistetaan aktiivihilisuodatuksella, katalyyttisesti, biologisesti tai polttamalla (Lintu 1995).



Kuva 6. Huokoskaasukäsittelyn periaate. Muokattu Ettalan (1992) mukaan.
Figure 6. Principle of soil vapour extraction. Modified after Ettala (1992).

Huokoskaasukäsittelyn kesto on melko pitkä. Tyypillisesti käsittely kestää puolesta vuodesta vuoteen (Penttinen 2001). Huokoskaasupuhdistusta voidaan tehostaa alentamalla pohjavettä, jolloin käsittelykelpoisen kerroksen tilavuus suurenee (Ettala 1992). Lisäksi maaperän lämmitys tehostaa desorptioprosesseja ja siten nopeuttaa puhdistusta. Lämmitys voidaan suorittaa injektioimalla maahan kuumaa ilmaa tai höyryä tai lämmittämällä maata elektromagneettisesti, sähkövastuksilla tai radioaaltojen avulla (Penttinen 2001).

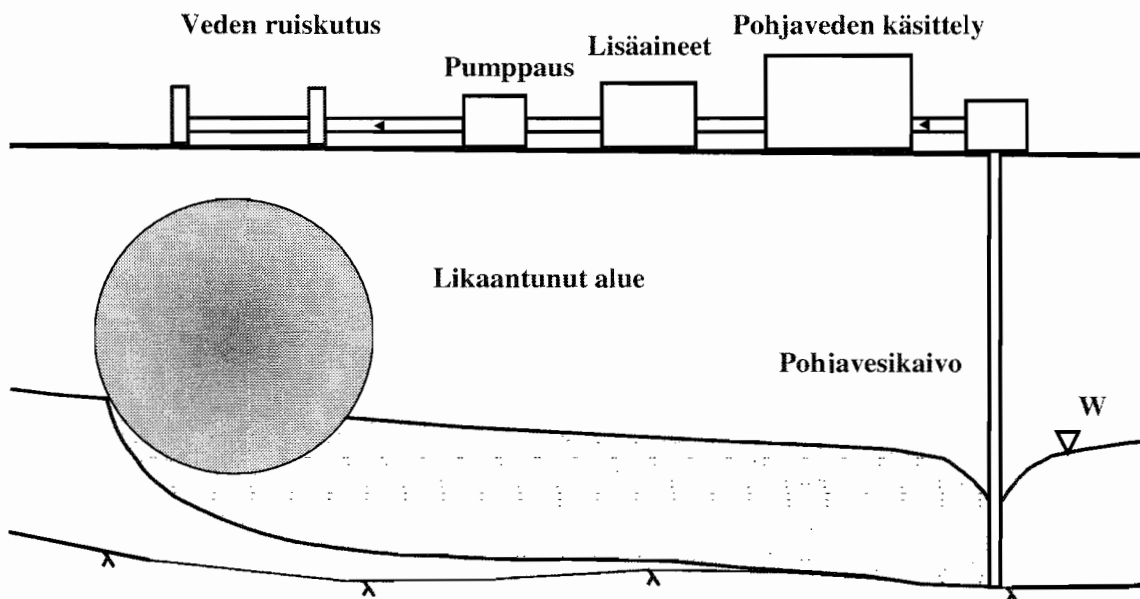
4.3.3 Terminen desorptio

Termisessä desorptiossa lika-aineet erotetaan lämmittämällä käsiteltävää massaa. Lika-aineita ei kuitenkaan hävitetä, vaan haihdutetaan ja johdetaan jatkokäsittelyyn. Käsittelylämpötila on helposti haihtuville yhdisteille 90-320 °C (matalalämpödesorptio) tai puolihaihtuville yhdisteille 320-560 °C (korkealämpödesorptio). Poistokaasut käsitellään aktiivihilisuodatuksella, kondensoimalla, jälkipolttamalla tai hapettamalla

katalyyttisesti. Käsittely suoritetaan *off site*. Menetelmä on nopea ja soveltuu haihtuvilla aineilla likaantuneiden maamassojen käsittelyyn (Penttinen 2001).

4.3.4 Maan huuhtelu

Pohjaveden pintaa nostetaan imeyttämällä vettä maaperään tai suoraan pohjaveeseen. Käsittely tapahtuu *in situ*. Pohjaveden pinnan nousu liuottaa haitta-aineita maaperästä pohjaveteen, joka pumpataan ja johdetaan käsiteltäväksi. Haitta-aineiden liukenemista voidaan tehostaa lisäämällä veteen liukoisuutta lisääviä aineita. Maan huuhtelu voi myös tehostaa luontaista biologista hajoamista. Menetelmä soveltuu tasalaatuisille karkearakeisille hyvin vettä läpäiseville maille. Suomessa maan huuhtelua ei ole toistaiseksi käytetty, sillä Suomen maaperäolosuhteissa muut menetelmät ovat useimmiten sekä tehokkuudeltaan että kustannuksiltaan edullisempia (Penttinen 2001).



Kuva 7. Maan huuhtelun periaate. Muokattu Penttisen (2001) mukaan.
Figure 7. Principles of soil flushing. Modified after Penttinen (2001).

4.3.5 Mikrobiologiset menetelmät

Bioteknikka sopii sekä maaperän että pohjaveden puhdistukseen. Usein maan ja veden puhdistus onnistuu samanaikaisesti. Biologisen käsittelyn etuina ovat edullisuus, maan säilyminen lähes luonnontilaisena, *in situ* -kunnostuksen mahdollisuus sekä korkeillakin pitoisuuksilla saavutettu hyvä lopputulos ja puhtaustaso. Kemikaalien hajotuksessa pyritään täydelliseen hajotukseen, joka aina ei kuitenkaan ole mahdollista. Parhaiten hajoavat runsasliukoiset kemikaalit. Hiilivetyjen täydellisen biologisen hajotuksen lopputuotteena syntyy hiilidioksidia ja vettä. Useimmiten käsittely tapahtuu hapellisissa (aerobisissa) olosuhteissa, jolloin hapen saatavuus rajoittaa hajotusnopeutta (Valo 1992).

Käsittely voi tapahtua *in situ* ilman massansiirtoa tai pilaantunut maa voidaan kaivaa pois ja viedä muualle käsiteltäväksi. Haihtuvilla aineilla pilaantuneen maan käsitte-

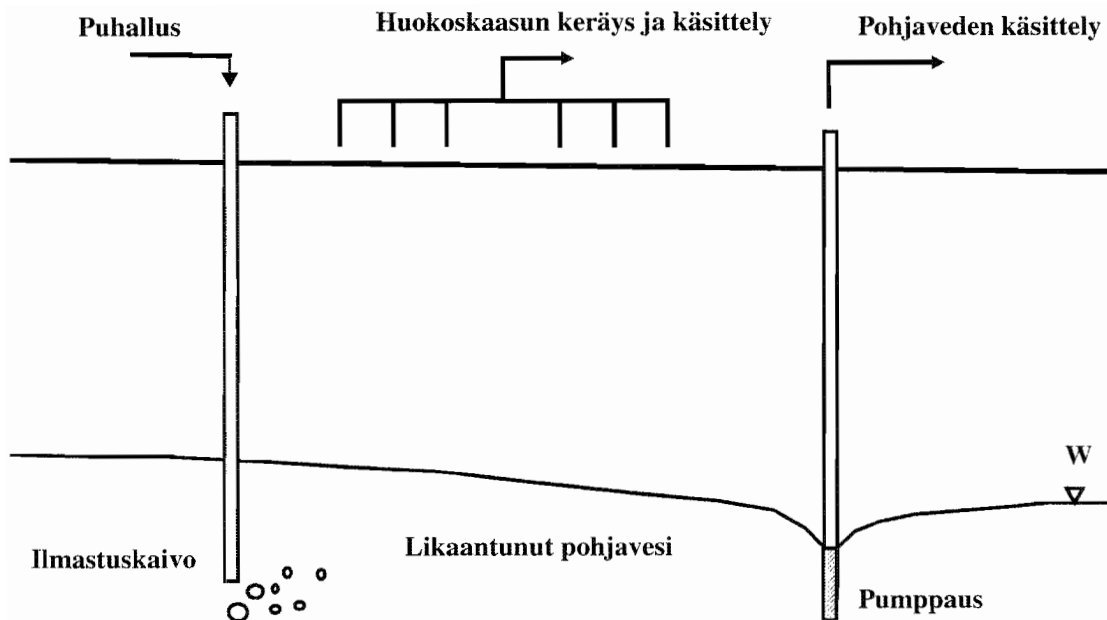
lyssä ilmapäästöjen ehkäisyyn on kiinnitettävä erityistä huomiota. Tämä rajoittaa *off site* -menetelmien käyttöä, kuten peltokäsittelyä tai aumakompostointia. Nämä eivät sovellu helposti haihtuvilla yhdisteillä pilaantuneiden maiden käsittelyyn ilman maa-massan esikäsittelyä (Penttinen 2001). *In situ* -käsittelyssä maan mikrobitoimintaa tehostetaan lisäämällä hajottajamikrobeja, ravinteita sekä happea. Edellytyksenä on maan kohtalainen vedenläpäisevyys, homogeenisyys sekä alhainen orgaanisen aineksen määrä (Valo 1992). Myös lämpötilan säätäminen sopivaksi edistää hajotustoimintaa. Biotekninen puhdistus voidaan yhdistää myös muihin käsittelymenetelmiin, kuten huokoskaasupuhdistukseen tai maa-aineksen pesuun.

4.3.6 Pohjaveden pumpppaus

Pohjaveden pumpppauksella eli pump and treat -käsittelyllä pyritään estämään liikaantuneen pohjaveden leviäminen laajemmalle sekä poistamaan lika-aineet pohjavedestä. Käsittelyssä likaantunut pohjavese pumpataan ja johdetaan maanpäälliseen laitteistoon kunnostettavaksi eli käsittely tehdään *on site*. Puhdistusmenetelmänä liuottimilla likaantuneille vesille voi olla aktiivihilisuodatus, biologinen käsittely, strippaus eli haihdutus, gravitaatioerotukset tai kemiallinen hapetus (Penttinen 2001). Tavoitetasoon puhdistettu vesi voidaan useimmiten imeyttää takaisin maaperään tai johtaa viemäriin. Pohjaveden pumpppauksen lisäksi on tärkeää poistaa likaantumisen lähde. Pump and treat -käsittely on pitkäaikainen eikä se sovellu alueille, missä pohjaveden virtausnopeus on alle 5-10 cm/s (Penttinen 2001).

4.3.7 Pohjaveden ilmastus

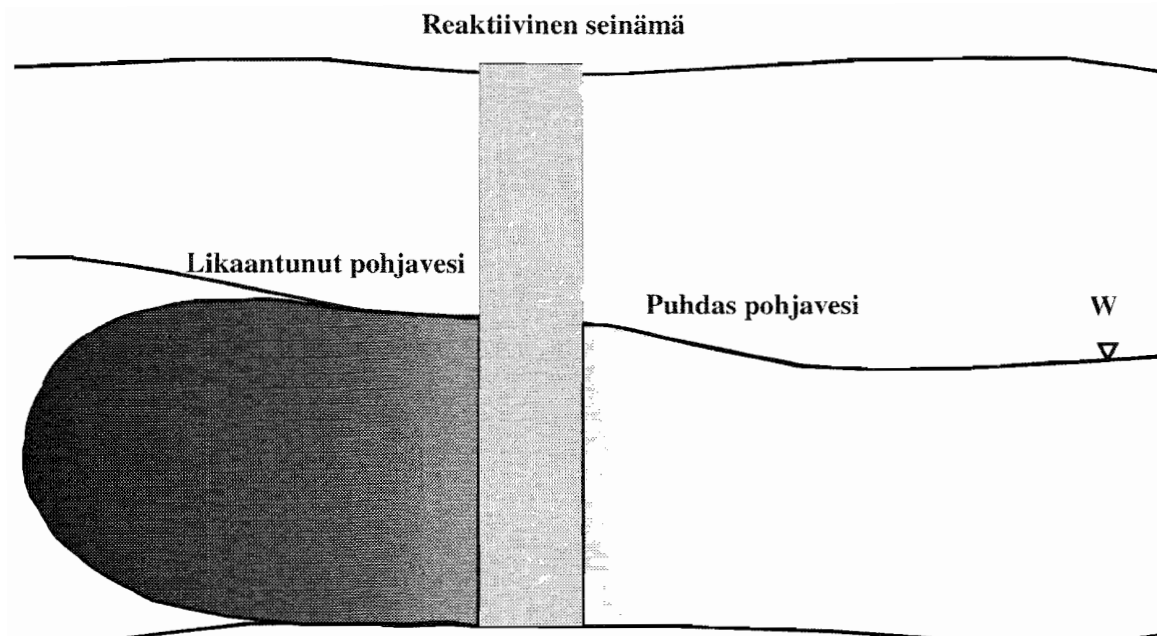
Pohjaveden ilmastuksessa eli strippauksessa paineistettua ilmaa injektoidaan liikaantuneeseen pohjaveteen eli käsittely tapahtuu *in situ*. Maassa ja pohjavedessä olevat lika-aineet irtoavat ja kulkeutuvat ilmapirran mukana maanpinnalle. Maan pintaosista huokoskaasu kerätään ja johdetaan käsiteltäväksi. Käsittely soveltuu haihtuvilla yhdisteillä pilaantuneen pohjaveden käsittelyyn. Ilmastuksen ohella käytetään usein huokoskaasutekniikkaa puhdistamaan maaperän vedellä kyllästymätön kerros. Ilmastus voi lisätä luontaista biologista hajoamista ja hajoamista tehostamaan pohjaveteen voidaan injektoida ilman lisäksi metaania ja ravinteita. Pohjaveden ilmastus on usein pitkäkestoinen puhdistusprosessi, mutta käyttökustannukset ovat melko alhaiset (Penttinen 2001).



Kuva 8. Pohjaveden ilmastuksen periaate. Muokattu Penttisen (2001) mukaan.
Figure 8. Principle of air stripping. Modified after Penttinen (2001).

4.3.8 Reaktiiviset seinämät

Reaktiiviset seinämät ovat uusia pohjaveden *in situ* -kunnostusmenetelmiä, joita ei toistaiseksi ole käytetty Suomessa. Seinämän tarkoituksena on estää haitta-aineiden kulkeutuminen sekä poistaa tai muuttaa aineita vähemmän haitalliseen muotoon. Reaktiiviset seinämät asennetaan maaperään kohtisuoraan pohjaveden virtausta vastaan, jolloin pohjavesi virtaa seinämän läpi. Seinämässä tapahtuu reaktioita, kuten adsorptiota, saostumista, hapettumista, pelkistymistä sekä kemiallista ja biologista hajoamista. Seinämä voi myös luovuttaa happea ja ravinteita tehostamaan luontaista biologista puhdistumista. Seinämän täyttöaine valitaan kohteen ja lika-aineen perusteella. Menetelmä soveltuu hyvin vettä johtavalle maaperälle ja sopii hyvin mm. klooratuilla liuottimilla pilaantuneen pohjaveden käsittelyyn. Kunnostusaika on pitkä, mutta käsittelykustannukset ovat alhaiset (Penttinen 2001).



Kuva 9. Reaktiivisen seinämän periaate. Muokattu Penttisen (2001) mukaan.
Figure 9. Principle of reactive barrier. Modified after Penttinen (2001).

4.3.9 Kunnostamatta jättäminen

Likaantunut alue voidaan jättää kunnostamatta, mikäli kemikaali ei pääse leviämään eikä aiheuta vaaraa ympäristölle tai jos aineen luontainen hajoaminen tapahtuu niin nopeasti, ettei kunnostamiseen kannata ryhtyä (Auranlinna & Strandberg 1994). Myös taloudellisista syistä voidaan kunnostus jättää suorittamatta tai siirtää, jos kustannukset nousevat kohtuuttomiksi (Leminen & Forss 1994). Kunnostamatta jättäminen vaatii ympäristöluvan, kuten muutkin kunnostusmenetelmät. Likaantunutta aluetta on tarkkailtava jatkuvasti kemikaalin leviämisen ja vaaratilanteiden ehkäisemiseksi.

4.3.10 Kehitteillä olevia menetelmiä

Suomessa on tehty alustavia tutkimuksia fyto-remediaation eli kasvien avulla tehtävän kunnostuksen käyttömahdollisuuksista. Menetelmä voisi sopia myös klooratuilla liuottimilla likaantuneen maan käsittelyyn, mutta se on vasta kehittelyvaiheessa (Penttinen 2001).

Bioventing eli biologinen ilmahuuhtelu on lupaava uusi menetelmä, jota on testattu myös Suomessa. Menetelmässä maaperän vedellä kyllästymättömään kerrokseen johdetaan ilmaa tai happea, jolloin happipitoisuuden noustessa luontainen biohajoaminen tehostuu. Maaperästä voidaan myös imeä ilmaa pois, jolloin happipitoisuus paranee luonnollisen korvautumisen kautta. Ilma johdetaan maahan alhaisella paineella, jolloin mikrobiaktiivisuus lisääntyy ja haihtuvat yhdisteet kulkeutuvat biologisesti aktiiviseen kerrokseen. Menetelmä soveltuu aerobisesti biohajoaville yhdisteille ja mahdollisesti myös klooratuille liuottimille (Penttinen 2001).

5. HELSINGIN GEOLOGIA JA LIUOTINHAVAINNOT

5.1 Helsingin geologiset yleispiirteet

5.1.1 Yleistä

Tässä yhteydessä Helsingin alueen geologiaa on käsitelty yleispiirteittäin lähinnä orgaanisten liuottimien kulkeutumisen ja pidättymisen kannalta. Erityistä huomiota on kiinnitetty vettä johtaviin maakerrostumiin ja kallioperän rakosysteemeihin, joihin myös liuotinaaineet voivat varastoitua ja joita pitkin ne voivat liikkua pitkiäkin matkoja.

Helsingin maaperässä on rannikkoalueelle tyypillisiä vaihteluita; sekä hienosedimenttien muodostamia tasankoja tai pitkänomaisia laaksoja että suureksi osaksi paljastuneita jyrkkäreunaisten kalliomäkien alueita. Laajimmat yhtenäiset savikot sijaitsevat kaupungin pohjoisosassa Malmi-Tapanila-Puistola-alueella. Kaupungin alueella on myös kilometrien pituisia savipeitteisiä laaksoja, joiden synty liittyy kallioperän rakenteisiin ja erityisesti ruhjevyöhykkeisiin. Kallioisia alueita on etenkin rannikolla ja kantakaupungissa. Laajimmat glasifluvialiset muodostumat sijaitsevat Vuosaaressa.

Maaperäolosuhteet vaihtelevat sekä pysty- että vaakasuunnassa pienipiirteisesti erityisesti lievealueilla eli savialtaiden ja kalliomäkien raja-alueilla. Savikerroksen päällä voi olla rantakerrostumina syntynyttä hiekkaa ja silttiä, yleensä ohuina kerroksina. Niiden alla on moreenia, joka jatkuu paljastuneena ja ohentuneena siirryttäessä kalliorinnettä ylemmäksi. Geoteknisen osaston maaperäkartassa GEO 10 M maaperä on jaettu kolmeentoista eri tyyppiin. Ote maaperäkartan lehdestä G3 on esitetty liitteessä 6. Erityisesti lievealueilla kerrosten pienipiirteisyydestä ja suurista rakeisuusvaihteluista johtuen veden virtausolosuhteet voivat olla hyvin monimutkaiset.

Suurimmat suot kaupungin alueella ovat olleet Pasilansuo ja Tattarisuo. Molempia on käytetty kaatopaikkana. Pasilansuo on kaatopaikkavaiheen jälkeen tasattu rautateiden varikkoalueeksi ja Tattarisuo puolestaan teollisuusalueeksi. Täytteiden alla on edelleen turvetta ja liejua.

Kaupunkirakentamiseen liittyvät erilaiset täytöt. Ne vaihtelevat laajuudeltaan, paksuudeltaan ja koostumukseltaan laajoissa rajoissa. Täyttöjä on vuosikymmenten kuluessa tehty käyttäen maa- ja merialueita ylimääräisten maamassojen ja erilaisten jätteiden sijoituspaikkana. Parin viime vuosikymmenen aikana on täyttöjä tehty myös suunnitelmallisesti. Kaupungin korkein kohta on nykyisin Malminkartanon täyttömäen huippu, joka on noin tasossa +83. Täytteiden merkitys veden virtauksessa on moninainen. Kaupungissa rakennetaan runsaasti johtoja maaperään, jolloin johtokaivannoilla voidaan louhia hydraulisia yhteyksiä vettä padottavien kalliokannasten lävitse. Tämän lisäksi kaivantojen hyvin vettä johtavat täyttömateriaalit saattavat toimia salaojina.

5.1.2 Moreeni

Pohjamaalajina kallion päällä on lähes kaikkialla kalliopaljastumia lukuun ottamatta silttimoreeni. Paikoin moreeni on pohjatutkimuksissa todettu tiiviiksi pohjamoreeniksi. Pohjamoreenin paksuudessa on todettu suuria vaihteluita. Yleensä paksuus on

muutamia metrejä, kuitenkin enintään kymmenen metrin suuruusluokkaa. Usein etenkin savikerrostumien alla on kaivantotöiden yhteydessä tavattu suhteellisen hyvin vettä johtavaa moreenia. On myös kokemuksia muutaman senttimetrin paksuisesta huuhtoutuneesta ja hyvin vettä johtavasta hiekkaisesta kerroksesta moreenin ja kallion saumakohdassa (P. Raudasmaa, suullinen tiedonanto).

Varsinaisena moreenimuodostumana tunnetaan Helsingissä ainoastaan Lauttasaa- ren länsiosan moreeniselänne, drumliini. Se on noin kilometrin pituinen, likimain luode-kaakkosuuntainen ja muodoltaan virtaviivainen. Aines on todettu kairauksis- sa ja maatulokaluotauksessa erittäin tiiviiksi kiviseksi ja lohkaraiseksi moreeniksi.

Kaasuvoimalaitoksen alueelta Vuosaaresta on löydetty moreenia jopa yli 40 m pak- suudelta. Moreenissa on todettu siltisiä välikerroksia, joista on päätelty niiden erot- tamien patjojen edustavan useita eri jäätiköitymisvaiheita (Hirvas et al. 1995).

5.1.3 Hiekka- ja soramuodostumat

Helsingin seudulla on paikoin paksuja hiekka- ja sorakerrostumia. Parhaiten säilynyt harjumuodostuma on Kallvikin harju. Harju jatkuu meressä siten, että niemen jatkona olevat saaret Santinen ja Iso-Leikosaari ovat samaa harjumuodostumaa. Kallvikin harju jatkuu myös luoteeseen Hakkilan harjulle asti (Svanström & Raudasmaa 1998). Myös Tattarisuon pitkänomainen harjumuodostuma kuuluu samaan harjujaksoon.

Kallvikin harjun pohjoispuolella sijaitsee Vuosaaren deltatasanne, joka on edelleen muokkautunut ja levinnyt jääkauden jälkeisten voimien vaikutuksesta. Myöskin Laa- jasalon ja Santahaminan harju- ja deltamuodostumat ovat kuluneet rantavoimien vai- kutuksesta tasaisiksi (Hyyppä 1960).

Sora- ja hiekkamaat tarjoavat kestävä ja edullisen pohjan rakentamiselle ja sora- kuopista saadaan tärkeää raaka-ainetta. Helsingin seudulla suurin osa hiekka- ja so- ramuodostumista on joko kaivettu pois tai rakennettu.

5.1.4 Savialtaiden sedimenttikerrostumat

Itämeren eri vaiheissa jääkauden aikana ja sen jälkeen mereen on kerrostunut run- saasti hienoainesta, erityisesti savea, liejusavea ja silttiä. Maankohoamisen jatkues- sa ja vedenpinnan perääntyessä hienoainekset ovat vähitellen ovat kohonneet ve- denpinnan yläpuolelle. Laajoja savikoita, joissa saven kerrospaksuus on jopa 20-30 metriä, esiintyy etenkin Malmi-Tapanila-Suutarila-Tuomarinkylä -alueella, Viikissä se- kä Konalassa (Haavisto & Kukkonen 1975).

Savikerroksissa on alimmaisena kerroksellinen lustosavi, jota syntyi Baltian jäärjärven ja Yoldia-meren aikana. Rakeisuusanalyysissä lustosavet luokitellaan tavallisesti silteiksi. Lustosavien päällä on Ancylos-vaiheen savikerros, joka on paksuin saviker- ros etenkin Pohjois-Helsingissä. Itämeren Litorina-vaiheessa kerrostui liejuista savea, kun meren eliöstö oli nykyistä runsaampi ja monimuotoisempi. Litorina-vaiheessa kerrostuneessa liejusavessa on orgaanista ainesta 10-15 % (Heikkinen 2000). Litori- na-transgressioon liittyvä karkearakaisempi siltti- tai hiekkakerros esiintyy Helsingissä monin paikoin Litorina-kerroksen alaosassa.

Alimpana sedimenttinä pohjamoreenin ja hienosedimenttien välissä esiintyy Helsingissä lähes säännönmukaisesti hiekkakerros. Sen paksuus vaihtelee allaskohtaisesti ja voi olla kymmenenkin metriä, mutta tavallisesti kerroksen paksuus on kahdesta viiteen metriin. Yleensä kerros on melko tasapaksuinen, mutta on kuitenkin paksuin sedimentaatioaltaan keskiosassa ja ohenee reunoille päin. Hiekkakerros esiintyy myös altaissa, joiden reunoilla ei ole glasifluviaalisia kerrostumia sekä laajojen savi-alueiden keskellä. Tästä syystä hiekkaisen aineksen ei voi olettaa olevan peräisin altaan reunoilta. Kerroksen säännöllisestä esiintymisestä alimpana sedimenttisarjassa voidaan päätellä hiekkakerroksen syntyneen mannerjään reunassa ensimmäisenä kerroksena sulavesivirojen tuomana hienomman aineksen kulkeutuessa veden mukana kauemmaksi. Sedimenttialkuperään viittaa myös hiekkakerroksen portaaton vaihtuminen yläosastaan siltiksi ja edelleen siltin vaihtuminen saveksi (P. Raudasmaa, suullinen tiedonanto).

Hiekkakerroksen geoteknisistä ominaisuuksista on Helsingissä runsaasti kokemuksia. Hiekkakerros on rakeisuudeltaan tasalaatuinen ja luonnontilassa heikosti tiivistynyt, mikä viittaa rauhalliseen kerrostumiseen syvässä vedessä. Kerroksen tiivistymistä tapahtuu esimerkiksi paalutustärinän johdosta, mistä seuraa maanpinnan painumista (P. Raudasmaa, suullinen tiedonanto). Hiekkakerros on hyvin vettä läpäisevä johtuen sekä tasalaatuisuudesta että löyhyydestä.

Savikerrosten alapuolisista hiekkakerroksista on tavallisesti vain heikko hydraulinen yhteys sedimenttialtaita ympäröivien kalliorinteiden moreenialueille. Hiekkakerroksessa oleva pohjavesi korvautuu heikosti ja pohjaveden painekorkeus alenee herkästi esimerkiksi rakennettaessa kalliotunneleita savialueilla. Paineen aleneminen leviää savikerroksen alapintaan, mistä aiheutuu savikerroksen kokoonpuristumista erityisesti kerroksen alaosassa. Savialtaiden alueella savenalaisilla hiekkakerroksilla on suuri merkitys pohjaveden ja siten myös liuottimien kulkeutumisen kannalta.

5.1.5 Kallioperä

Helsingin alueen kallioperälle ovat tyypillisiä seoskivet eli migmatiitit. Kallioperän ja suureksi osaksi myös maanpinnan topografia on määräytynyt eri kivilajien kulumisalttiuden ja ruhjevyyhykkeiden suuntauksen mukaan (Hyyppä 1960).

Kiteisessä kallioperässä pohjavesi liikkuu lähes ainoastaan murrosvyöhykkeissä ja raoissa. Rakoilun vedenjohtavuuteen vaikuttavat rakoilutyyppi, rakotiheys ja rakojen yhteydet toisiinsa. Vedenjohtavuus kasvaa rakojen avoimuuden lisääntyessä ja pienenee rakotäytteiden esiintymisen myötä. Rakoilun tiheyteen ja luonteeseen vaikuttavat kivilaji ja kiven raekoko (Heikkinen 2000). Helsingissä kallioperän päärakoilu on likimain pystyä ja sen suunta useimmiten sama kuin liuskeisuuden suunta eli koillisesta lounaaseen. Tyypillistä on myös liuskeisuuden suhteen kohtisuorassa suunnassa esiintyvä pystyrakoilu. Muissakin suunnissa rakoilua esiintyy, mutta pienimuotoisemmin. Graniitti- ja gneissialueilla rakoilu on rakennusgeologisen kallioluokitukseen mukaan tiheydeltään pääosin joko vähäistä tai runsasta. Vuosaaren metavulkaniittialueella rakoilu on sitä vastoin lähes pelkästään runsasta tai tiheää (P. Raudasmaa, suullinen tiedonanto).

Erityisen vettäjohtavaksi on todettu yleensä lähellä kallion pintaa esiintyvä vaakarakoilu tai loiva-asentoinen rakoilu, joka noudattelee pääasiassa kallion pintatopografiaa (Salmelainen 1983). Vaakarakoilu on usein avointa, minkä lisäksi siitä on pystyrakojen kautta yhteys maakerrosten pohjaveteen.

Kallion vedenjohtavuus vaihtelee erittäin laajoissa rajoissa. Erityisen suuria vaihtelut voivat olla kallion pintaosissa. Paikallisesti vedenjohtavuus on selvitettävissä vain kairauksilla ja vesimenekikokeilla.

Kallioperässä voi olla laajoja yhtenäisiä rakosysteemejä ja ruhjevyöhykkeitä, joita pitkin pohjavesi virtaa pitkiäkin matkoja. Geoteknisen osaston 1:10 000 -mittakaavaisessa kallioperäkartassa GEO 10K vuodelta 1978 on esitetty suurimmat ruhjevyöhykkeet Helsingin alueelta. Ote kallioperäkartan lehdestä G3 on esitetty liitteessä 7.

Kallioperän merkitystä veden virtaukseen arvioitaessa on huomioitava myös kallio-pinnan topografia. Maan päällä näkyvät kalliot ovat tavallisesti kallioperän ehjimpiä ja sileimpiä kohtia, mutta maapeitteiden alla ja etenkin ruhjelaaksoissa kallio-pinnoissa on usein jyrkkiä vaihteluita. Tämän lisäksi pienipiirteinen vaihtelu on runsasta. Kallio katkoo vettäjohtavia hiekka- ja moreenikerroksia ja muodostaa usein vettä padottavia kynnyksiä. Joskus savikerros voi reunaltaan rajautua suoraan kalliorinteeseen, jolloin välissä ei ole lainkaan vettäjohtavia kerrostumia.

5.1.6 Täytemaat

Täyttöjä on tehty aikojen kuluessa lähinnä maapohjan rakennettavuuden parantamiseksi, rakennuskelpoisen maapinta-alan lisäämiseksi ja ylijäämämaiden sijoittamiseksi. Täyteaineet vaihtelevat huomattavasti sekä ajallisesti että paikallisesti. Vanhoilla täyttöalueilla täyteaineina on käytetty melkein mitä tahansa, myös jätettä.

Täyttöjä on Helsingin alueella tehty koko kaupungin olemassaolon ajan. Varhaisemmassa historiassa täytöt tehtiin hevospelillä ja lapiotyövoimalla, jolloin täyttöjen syntyminen oli hidasta. Helsingin historian tunnetuin täyttökohde on ollut Kluuvin lahti. Työ suoritettiin pääosin 1800-luvun puolivälissä. Töölönlahden ranta satamarataan asti täytettiin viimeisenä Hakkilanharjusta tuodulla hiekalla ja soralla radan valmistuttua vuonna 1860. Liejuun uponneen täytemaakerroksen paksuus on paikoin huomattavasti yli kymmenen metriä. Kluuvin lahdella maanpintaa on nostettu painumisen takia vuosien kuluessa lukuisia kertoja, jolloin maan alta voi löytyä vanhoja asfaltti- ja kiveyskerroksia.

Kluuvin lahden täyttämisen eräänä lähtökohtana oli matalan kaatopaikkana käytetyn lahden hajuongelma ja terveydellinen vaara. Täyttöjä on myöhemminkin syntynyt kaatopaikkatoiminnan tuloksena eri puolille kaupunkia ja erityisesti mataliin merenlahtiin ja suoalueille. Massiivisia tätä kautta syntyneitä täyttöjä ovat Iso-Huopalahden ja Vuosaaren entiset kaatopaikat.

Laajoja ja massiivisia täyttöjä on syntynyt rantojen täytön kautta sekä rakennettaessa täyttömäkiä ylijäämämassoista. Nykyisin rantojen täytöt suoritetaan suunnitelmallisesti ja pääasiassa siten, että kovaan pohjaan asti rakennetaan louheesta vedenpinnan yläpuolelle ulottuvat penkereet, joiden altaat täytetään merihiekalla.

Rakennetulla alueella maanpinta on yleensä tasattu täytemaalla ainoastaan puistojen jäädessä maaperältään kutakuinkin luonnolliseen tilaan. Näin on menetelty myös vanhoilla teollisuusalueilla, joilla liuotinongelmia useimmiten esiintyy. Täyttöön käytetyt materiaalit ovat hyvin heterogeenisiä, mikä vaikeuttaa maaperätutkimuksia ja liuottimien jäljittämistä.

Nykyään täyttömateriaaleille on asetettu yksityiskohtaiset vaatimukset. Täytössä ei saa käyttää jätettä eikä likaantunutta maata. Lisäksi täyteaineksen geoteknisille ominaisuuksille voidaan asettaa käyttötarkoituksesta riippuen vaatimuksia esimerkiksi raekoostumuksen suhteen (Rantamäki et al. 1999). Täytöllä voidaan myös korvata osittain tai kokonaan pehmeäpohjaista maata, jolloin täyttömateriaalin kantavuudelle on asetettu tietyt vaatimukset.

5.1.7 Hydrogeologiset olosuhteet

Helsingin alueella tehtyjen lukuisten pohjavesihavaintojen perusteella voidaan todeta, että pohjavedenpinta on yleensä hyvin lähellä maanpintaa. Pohjavedenpinnalla tarkoitetaan sekä vapaata pohjavedenpintaa kitkamaa-alueilla että pohjaveden painetasoa savialueilla. Painetaso on taso, johon pohjavesi nousee havaintoputkessa, joka asennetaan savikerroksen lävitse siten, että sen alapää on savenalaisessa hiekassa tai moreenissa. Todellisuudessa pohjavesi voi siten olla savialueilla hyvinkin syvällä maanpinnasta.

Kaupunkialueella veden hydrologiseen kiertokulkuun vaikuttavat monet ihmisestä johtuvat toiminnot. Veden käyttö talousvetenä on Helsingissä vähäistä, mutta pientaloalueilla sekä rengas- että porakaivojen vettä käytetään mm. kasteluun ja pesuun. Suurempi merkitys hydrogeologisille olosuhteille on rakennusten kellareista suoritettavalla kuivatuspumppauksella.

Moreenialueilla vapaa pohjavedenpinta on yleensä vain parin metrin syvyydessä. Haitta-aineet joutuvat nopeasti pohjaveteen, mutta niiden liikkuminen on hidasta varsinkin moreenin ollessa tiivistä.

Vuosaareissa hiekka- ja sora-alueilla pohjavesi on paikoin yli kymmenen metrin syvyydessä. Yleensä hyvin vettä läpäisevillä hiekka-alueilla haitta-aineet kulkeutuvat helposti pohjaveteen. Pohjaveden määrä on hiekka- ja sora-alueilla yleensä suuri ja virtaus nopeaa, joten haitta-aineiden kulkeutuminen ja myös laimeneminen on tehokasta.

Savikerroksen alla hiekkakerroksissa ja moreenissa oleva pohjavesi on tavallisesti pelkistynyttä, vähähappista ja rautapitoista, mikä johtuu veden heikosta korvautuvuudesta ja hitaasta virtauksesta. Pohjaveden määrä on vähäinen ja se korvautuu heikosti sedimenttialtaan reunoilta. Savikerros estää haitta-aineiden kulkeutumisen suoraan yläpuolelta pohjaveteen. Jos haitta-ainetta on päässyt vuotamaan maaperään ja saven alle hiekkakerrokseen, se voi vähitellen liikkua pitkiäkin matkoja ja tulla esille savialtaan reunoilla hyvinkin kaukana päästökohteesta, jolloin alkuperän selvittäminen on vaikeaa. Jäljittäminen on vaikeaa myös siksi, että pohjaveden gradientti on savialueilla tavallisesti hyvin pieni ja voi lisäksi vaihdella sekä ajankohdan mukaan että pientenkin reuna-alueilla tapahtuvien vedenkulutusvaihtelujen seurauksena. Sa-

vikerroksen alla sekä vesimassa että haitta-aineet virtaavat ensin alaspäin kohti altaan syvintä kohtaa, josta veden jatkaessa ylöspäin vettä raskaammat haitta-aineet jäävät ja varastoituvat syvänteeseen.

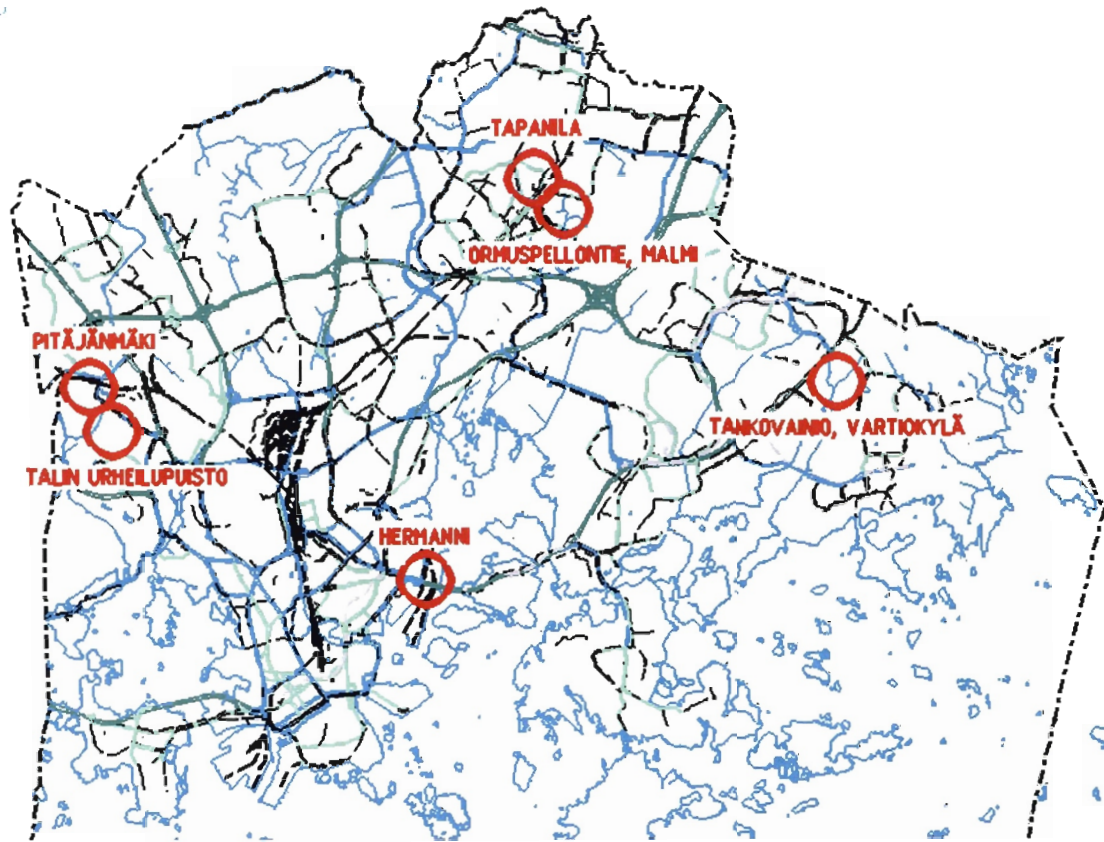
Kallioperän rakoilu ja ruhjeet monimutkaistavat virtausolosuhteita. Rakosysteemejä ja ruhjevyyhykkeitä pitkin pohjavesi ja myös haitta-aineet saattavat virrata pitkiäkin matkoja, mikä tekee päästölähteen selvittämisen vaikeaksi. Kalliopohjaveden määrä on useimmiten suhteellisen pieni, jolloin haitta-aineiden pitoisuudet voivat nousta korkeiksi (Hatva 1987).

Maanalaisessa hydraulisessa virtauskanavassa voivat olla mukana sekä erilaiset maakerrokset täytemaasta alkaen että kallioperä. Kallioperän ruhjeesta voi savikerroksen alla tapahtua virtausta hiekkakerrokseen ja takaisin ruhjeeseen. Erilaiset luonnontilaisten maakerrosten ja kallion kaivu- ja täyttötoimenpiteet tekevät virtauskuvasta paikoin hyvin monimutkaisen. Täyttöihin ja etenkin louheeseen voi varastoitua suuria määriä haitta-aineita, jotka vuosien kuluttua lähtevät liikkeelle. Huomioitavia ovat myös laaja-alaiset tai pitkänomaiset täyttökohteet kuten erilaisten putkien ympärystäytöt, joiden muodostamia kulkureittejä pitkin sekä vesi että mahdolliset haitta-aineet voivat levitä laajalle alueelle.

5.2 Liuotinhavaintojen taustaa

Orgaanisia liuottimia on Helsingissä havaittu useassa paikassa. Suurin osa havainnoista on koskenut hyvin pieniä määriä liuotinaineita, esimerkiksi vanhoilla huoltoasematonteilla. Suurempia liuotinmääriä on havaittu kuudessa kohteessa, joita käsitellään tässä selvityksessä. Esimerkkikohteiden sijainti on esitetty kuvassa 10. Kyseiset liuotinhavainnot on tehty kaivoveden oudon maun tai hajun, orgaanisten liuottimien käytön tai alueella suoritettun tutkimuksen perusteella. Kohteista on löytynyt useita eri liuottimia vaihtelevina pitoisuuksina. Yleisimmin löydetty liuottimet olivat 1,2-dikloorieteeni, trikloorieteeni sekä tetrakloorieteeni. Yhteenvedot tutkimustuloksista on esitetty liitteessä 4.

Kahdessa kohteessa, Pitäjänmäellä ja Hermannissa, ovat kunnostustoimenpiteet meneillään. Niiden osalta käsittely on tässä rajoitettu yleisluontoiseen olosuhteiden esittelyyn saatavissa olleiden tietojen pohjalta. Yhdessä kohteesta, Tapanilassa, tietoa on ollut saatavilla melko rajoitetusti, joten myös tämän kohteen käsittelyssä on pitäydytty olosuhteiden yleisluontoisessa käsittelyssä. Muissa kolmessa kohteessa, Talissa, Malmilla sekä Tankovainiolla, on esitetty tutkimustulosten ja olosuhteiden perusteella johtopäätöksiä liuottimien kulkeutumisesta ja osittain myös esitetty arvioita puhdistusmahdollisuudesta.



Kuva 10. Tutkimuskohteiden sijainti.
Figure 10. Location of research sites.

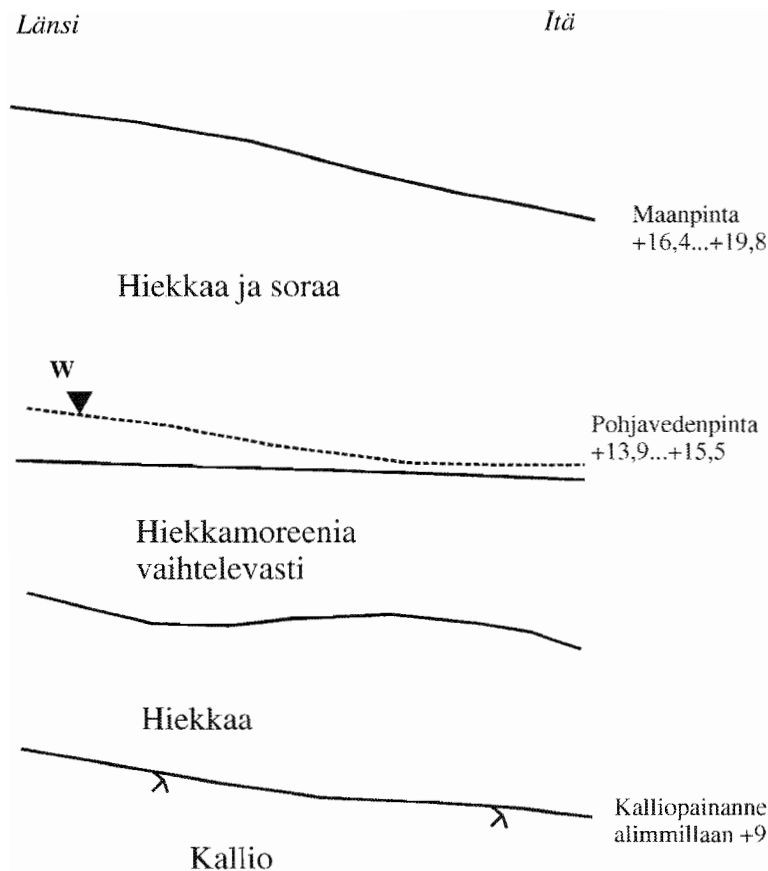
5.3 Pitäjänmäki

5.3.1 Yleistä

Pitäjänmäen teollisuusalueella sijaitseva maalitehdas valmistaa liuotepohjaisia maa-
leja, lakkoja, ohenteita ja pinnoitteita. Vuonna 1995 tehtaalla alueella tehtiin maape-
räselvitys, jossa todettiin kohonneita liuotinainepitoisuuksia sekä maaperässä että
pohjavedessä. Kohonneita pitoisuuksia todettiin myös tehdasalueen ulkopuolella
(Uudenmaan Ympäristökeskus 1998).

5.3.2 Alueen geologia

Maanpinta viettää alueella luoteesta kaakkoon pudoten tasolta +22 tasolle +18. Län-
nessä ja lounaassa tutkimusalue rajoittuu kallioiseen rinteeseen. Alue sijaitsee kallio-
painanteessa, joka viettää kaakkoon päin. Kallionpinta on syvimmillään painanteessa
tasossa +9. Alueen maaperä koostuu lähinnä hyvin vettä läpäisevistä hiekasta ja so-
rasta. Hiekkakerrosten välissä esiintyy paikoin hiekkamoreenia. Pohjaveden pinta
alueella vaihtelee keskimäärin tasovälillä +16...+14. Pohjavesi virtaa kaakkoon kal-
liopainannetta pitkin. Pohjaveden hydraulinen gradientti on pieni ja virtaus hidasta
(Uudenmaan Ympäristökeskus 1998). Kuvassa 11 on esitetty yksinkertaistettuna
alueen maaperäolosuhteet itä-länsi-suunnassa.



Kuva 11. Maaperäolosuhteet Pitäjänmäen alueella Uudenmaan ympäristökeskuksen (1998) mukaan.

Figure 11. Soil properties in Pitäjänmäki area according to Uudenmaan ympäristökeskus (1998).

5.3.3 Tutkimustulokset

Alue oli likaantunut ksyleenillä sekä pienillä määrillä bentseeniä ja tolueenia. Yhteen-veto tutkimustuloksista vuosilta 1995 ja 1996 on esitetty liitteessä 4. Maaperään oli sitoutunut vain vähäisessä määrin liuottimia, joten suurin osa aineista oli kulkeutunut pohjaveteen. Kyseiset aineet, ksyleeni, bentseeni ja tolueeni, kulkeutuvat vettä kevy-empinä pohjaveden pinnan läheisyydessä. Todennäköinen saastelähde on sijainnut alueella, missä maaperä on likaantunut lähes pinnasta lähtien. Likaantuneen alueen laajuudeksi on arvioitu 400 m² (Uudenmaan Ympäristökeskus 1998).

5.3.4 Toimenpiteet

Alueen kunnostus suoritettiin huokoskaasukäsittelyllä ja pohjaveden pumppauksella. Pohjavettä alennettiin pumppaamalla ja vedellä kyllästymättömästä kerroksesta imettiin likaantunut huokoskaasu käsiteltäväksi. Likaantuneen pohjaveden käsittely suoritettiin aktiivihiihtisuodatuksella. Likaantunut huokoskaasu käsiteltiin polttamalla tehtaan omassa polttolaitoksessa. Kunnostus on kestänyt jo pari vuotta ja edelleen käynnissä.

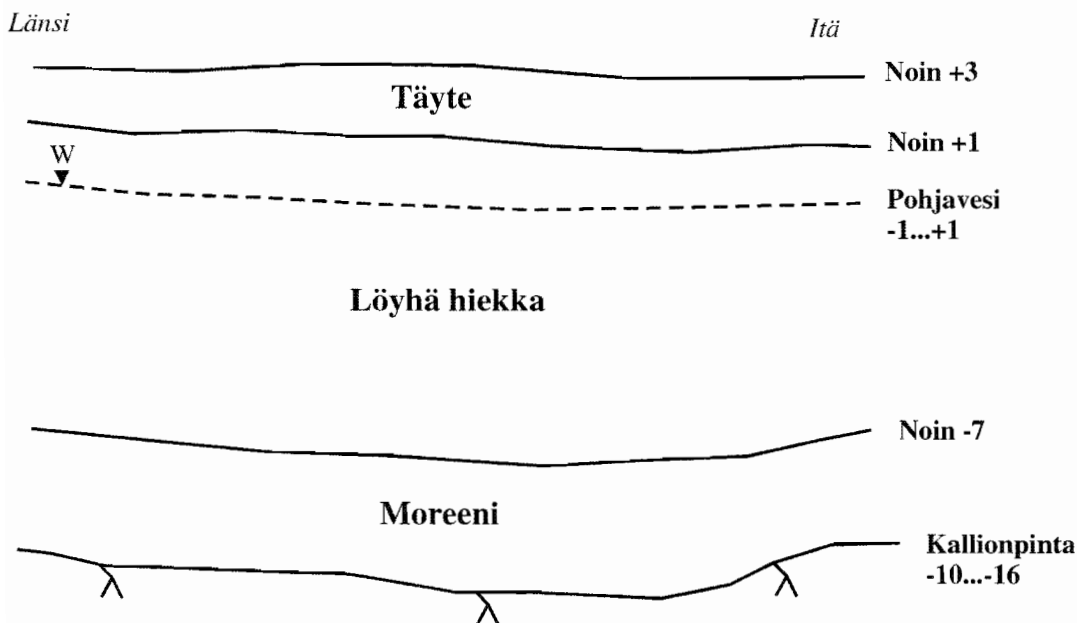
5.4 Hermannin

5.4.1 Yleistä

Hermannin alueella suunnitellun toimistokorttelin rakennettavuusselvityksen yhteydessä löydettiin maaperästä ja pohjavedestä orgaanisia liuottimia. Liuottimia havaittiin aluksi vain muutamassa pisteessä maaperässä ja lisäksi pohjaveden pitoisuudet todettiin paikoin korkeiksi. Myöhemmin likaantuneita maamassoja löydettiin pistemäisesti ympäri tonttia. Epäilty päästölähde on alueen aiempi toiminta, johon viittasivat muun muassa maaperän korkeat pitoisuudet pinnasta alkaen. Viitteitä läheisen pesulan osallisuudesta likaantumiseen ei löytynyt.

5.4.2 Alueen geologia

Maanpinta alueella on melko tasainen vaihdellen tason +3 molemmin puolin. Pintakerroksena on täytemaata noin 2 metrin paksuudelta, jonka alla on löyhää, hyvin vettä johtavaa hiekkaa paksuimmillaan jopa 10 metriä. Hiekan alla on vaihtelevan paksuinen moreenikerros. Kallion pinta alueella vaihtelee tasovälillä -10...-16. Alueen maaperäolosuhteet on esitetty yksinkertaistettuna kuvassa 12.



Kuva 12. Maaperäolosuhteet Hermannin alueella.
Figure 12. Soil properties in Hermannin.

5.4.3 Tutkimustulokset

Liuottimia havaittiin maaperässä useassa paikassa pistemäisesti. Havaintoja tehtiin sekä alueella, jota osattiin aiemman käytön perusteella epäillä likaantuneeksi että yllättäen rakentamisen edistyessä. Likaantuneet alueet sijaitsivat hajallaan ympäri tonttia, joten likaantumisen aiheuttajasta ei ollut täyttä varmuutta.

Näytteitä otettiin maaperästä ja pohjavedestä useasta pisteestä sekä ennen kunnostusta että kunnostuksen aloittamisen jälkeen. Yhteenveto tutkimustuloksista on esitetty liitteessä 4.

5.4.4 Toimenpiteet

Tontin rakentaminen aloitettiin hieman kunnostuksen alkamisen jälkeen, joten rakentaminen ja likaantuneiden alueiden kunnostus suoritettiin suurimmaksi osaksi samanaikaisesti. Likaantuneet maamassat kaivettiin pois ja vietiin käsiteltäviksi. Tontin ympärille rakennettiin ponttiseinät rajoittamaan pohjaveden virtausta ulkopuolelta ja helpottamaan rakennustyötä toisessa osassa tonttia. Pohjaveden puhdistus suoritettiin pumppauksella ja aktiivihillisuodatuksella. Pohjaveden puhdistuksen rajoittaminen vain tietyn tontin alueelle ei ponttiseinistä huolimatta onnistunut, vaan pohjavettä tulvi ponttiseinien alta. Puhdistustoimenpiteet ovat viivästyttäneet rakentamista ja nostaneet kustannuksia. Liitteessä 5 on kuvia liuotinpuhdistuslaitteistosta Hermannin alueelta.

5.5 Tapanila

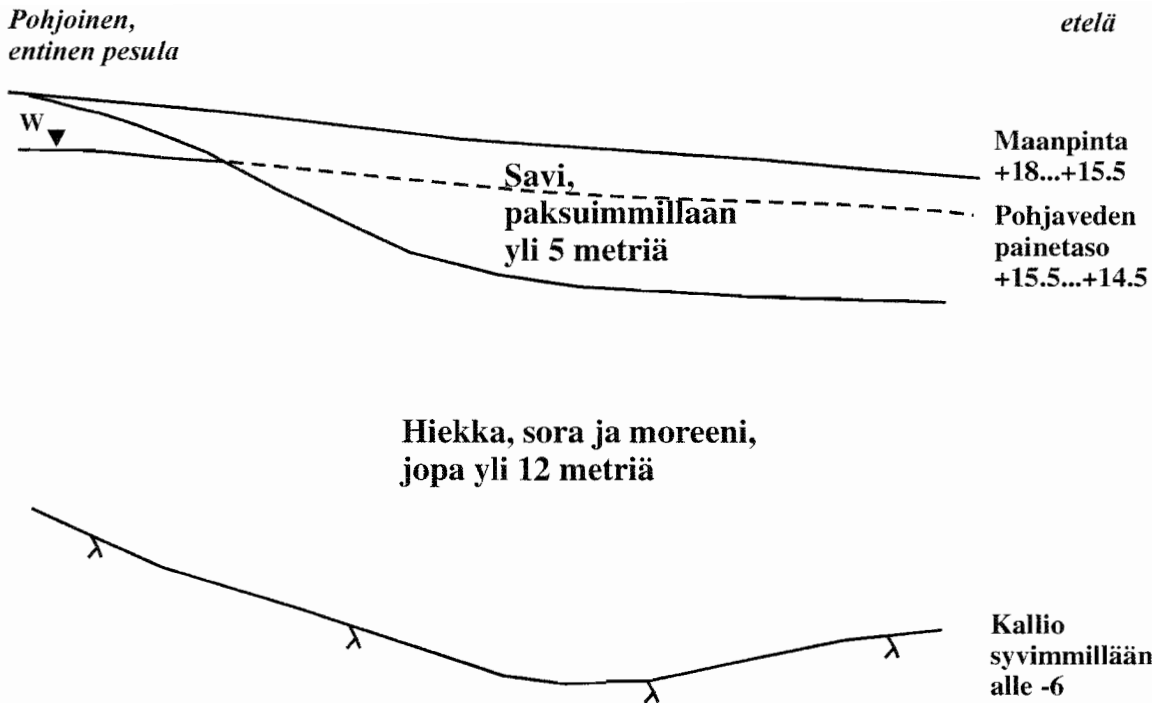
5.5.1 Yleistä

Pieniä määriä orgaanisia liuottimia löydettiin erään tontin likaantumisselvityksen yhteydessä. Liuotinten lisäksi todettiin kohonneita elohopean, sinkin ja PCB:n pitoisuuksia. Tutkitun tontin pohjoisosassa on sijainnut yritys joka pesi kaihtimia trikloorieteenillä. Tontin pohjoispuolella on sijainnut pesula, jossa on todennäköisesti käytetty liuottimia (Uudenmaan Ympäristökeskus 1999).

5.5.2 Alueen geologia

Maanpinta alueella viettää pohjoisesta etelään laskien tasolta +18 tasolle +15,5. Alueen halki kulkee luode-kaakko –suuntainen ruhjelaakso, jossa kallion pinta on syvimmillään tason –6 alla.

Tutkitun tontin alueella maanpintaa peittää jopa yli 5 metriä paksu savikerros. Savikerros ohenee pohjoiseen mennessä ja entisen pesulan alueella todennäköisesti puuttuu jo kokonaan. Saven alla on paksuimmillaan yli 12 metriä hyvin vettä johtavaa hiekkaa. Kaavamainen esitys alueen maaperäolosuhteista pohjois-etelä -suuntaisesti on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Maaperäolosuhteet Tapanilan alueella.
Figure 13. Soil properties in Tapanila.

5.5.3 Tutkimustulokset

Maaperässä on aiemmissa tutkimuksissa todettu yhdessä kairauspisteessä kohonneita 1,1-dikloorieteenin, trikloorieteenin ja tetrakloorieteenin pitoisuuksia. Pesulatonin maaperästä löydettiin muiden haitta-aineiden lisäksi 1,1-dikloorieteeniä. Pohjavedestä otettiin näytteitä sekä tontin etelä- että pohjoisosasta. Pohjoisosan näytteistä todettiin talousveden laatuvaatimukset ylittäviä pitoisuuksia vinyylidikloridia, 1,1-dikloorieteeniä, 1,2-dikloorieteeniä, trikloorieteeniä sekä tetrakloorieteeniä. Pohjaveden pumppauksen jälkeen pitoisuudet kasvoivat huomattavasti. Eteläosan näytteistä havaittiin ainoastaan trikloorieteeniä ja tetrakloorieteeniä, joiden pitoisuudet eivät ylittäneet talousveden laatuvaatimuksia (Uudenmaan Ympäristökeskus 1999). Orsivedestä ei löytynyt liuottimia. Yhteenvedo tutkimustuloksista on esitetty liitteessä 4.

5.5.4 Toimenpiteet ja johtopäätökset

Pesulassa on käytetty liuottimia, mahdollisesti tetrakloorieteeniä, jonka hajoamistuotteita löytyi pohjavedestä. Pesulan alueella ei maaperässä ole suojaavaa savikerrosta, jolloin liuottimet ovat päässeet valumaan saven alle ja kulkeutuneet pohjaveden virtauksen mukana etelään. Orsivedessä ei havaittu liuotinpitoisuuksia.

Likaantunut maa-aines kaivettiin pois ja vietiin käsiteltäväksi ongelmajätteen käsittelylaitokseen. Pohjaveden puhdistustoimenpiteisiin liuotinten osalta ei ole ryhdytty, sillä liuottimet sijaitsevat saven alapuolisessa pohjavedessä. Paksun savikerroksen suojaamaan pohjaveden päässeet liuotinaineet eivät aiheuta ongelmaa kunnostettavan tontin osalta, mutta kunnostuksen yhteydessä myös liuotinten päästölähde ja

kulkeutuminen on ympäristölupapäätöksen mukaan selvitettävä (Uudenmaan Ympäristökeskus 1999).

5.6 Talin urheilupuisto

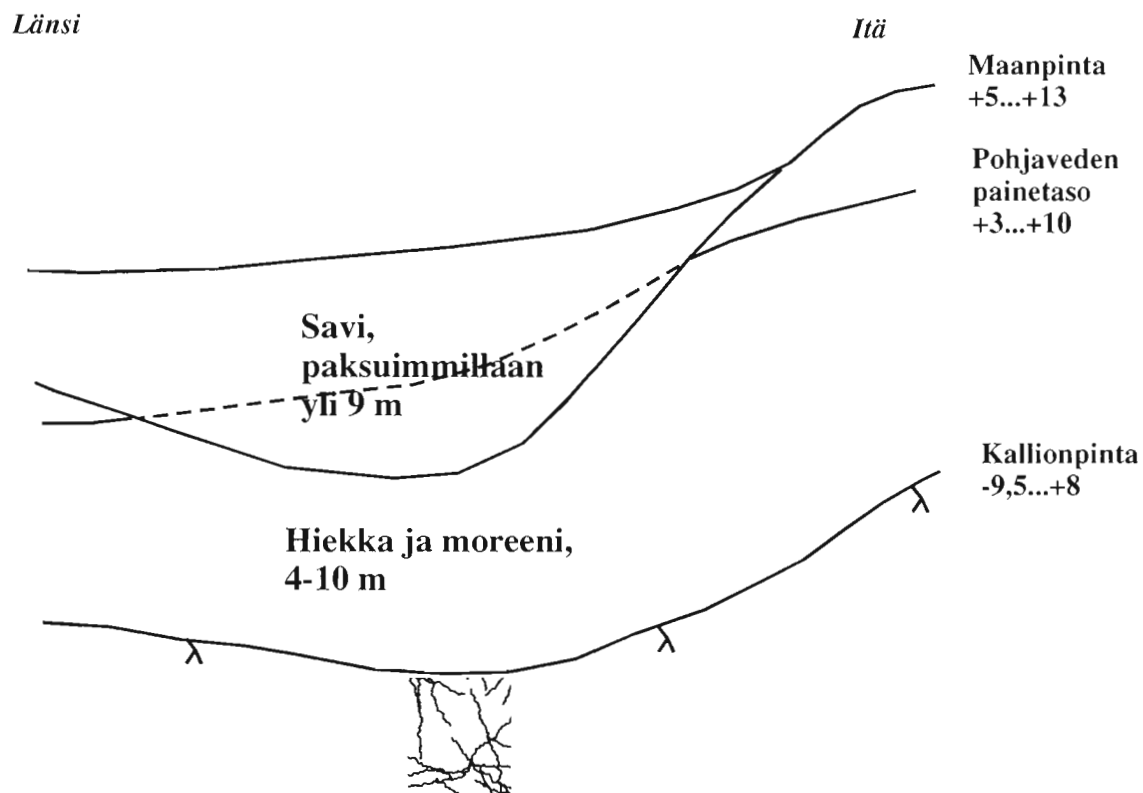
5.6.1 Yleistä

Talin urheilupuiston läheisyydestä löydettiin ojista ja sadevesiviemäreistä liuottimia. Päästöt ovat ilmeisesti olleet lyhytaikaisia (GEO 1999a). Päästölähteen sijainti oli epävarma, mutta mahdollisia päästölähteitä oli kaksi.

5.6.2 Alueen geologia

Maanpinta vaihtelee alueella tasovälillä +5...+13 laskien idästä länteen. Alueen halki kulkee ruhjelaakso luode-kaakko –suunnassa. Ruhjelaakson sijainti on esitetty kuvassa 15. Ruhjelaakson kohdalla on yli 9 metriä paksu savikerros, jonka alla on useita metrejä, noin 4-10 metriä hiekkaa ja moreenia. Savialueen reunoilla koillisessa ja lounaassa on hyvin vettä läpäiseviä hiekkaisia alueita. Maaperäolosuhteet itä-länsi –suunnassa on esitetty yksinkertaistettuna kuvassa 14.

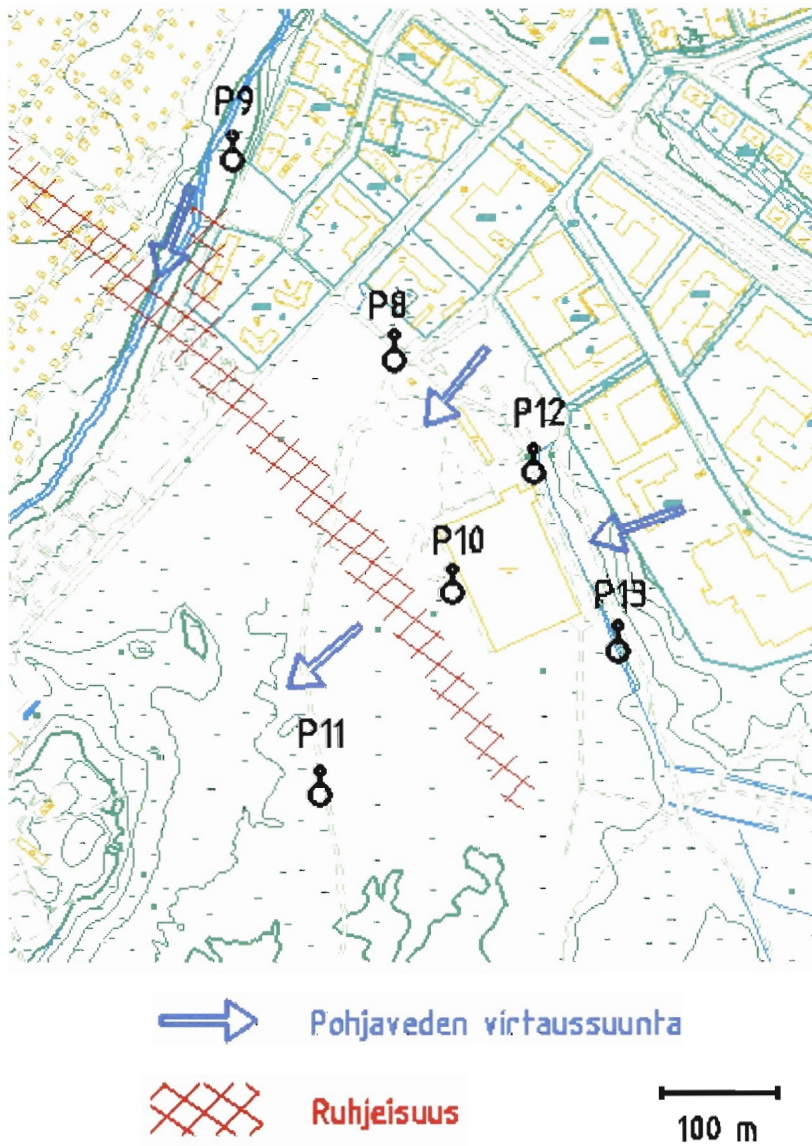
Pohjavesi virtaa saven alla havaintojen mukaan lounaaseen. Savialueelta pohjaveden virtaus suuntautuu todennäköisesti Mätäjoen painannetta pitkin edelleen lounaaseen (GEO 2000). Pohjaveden virtaussuunnat on esitetty kuvassa 15.



Kuva 14. Maaperäolosuhteet Talin alueella.
Figure 14. Soil properties in Tali.

5.6.3 Tutkimustulokset

Alueelta otettiin pohjavesinäytteitä 4 pisteestä vuosina 1999 ja 2000. Vuonna 2000 näytteitä otettiin lisäksi kahdesta uudesta pisteestä, P12 ja P13. Tutkimuspisteiden sijainti on esitetty kuvassa 15. Tutkimuksissa löydettiin useita liuotinlaatuja (GEO 1999a ja GEO 2000). Yhteenveto tutkimustuloksista vuosilta 1999 ja 2000 on esitetty liitteessä 4.



Kuva 15. Tutkimuspisteiden sijainti, ruhjeisuus sekä pohjaveden virtaussuunta Talin urheilupuiston alueella.

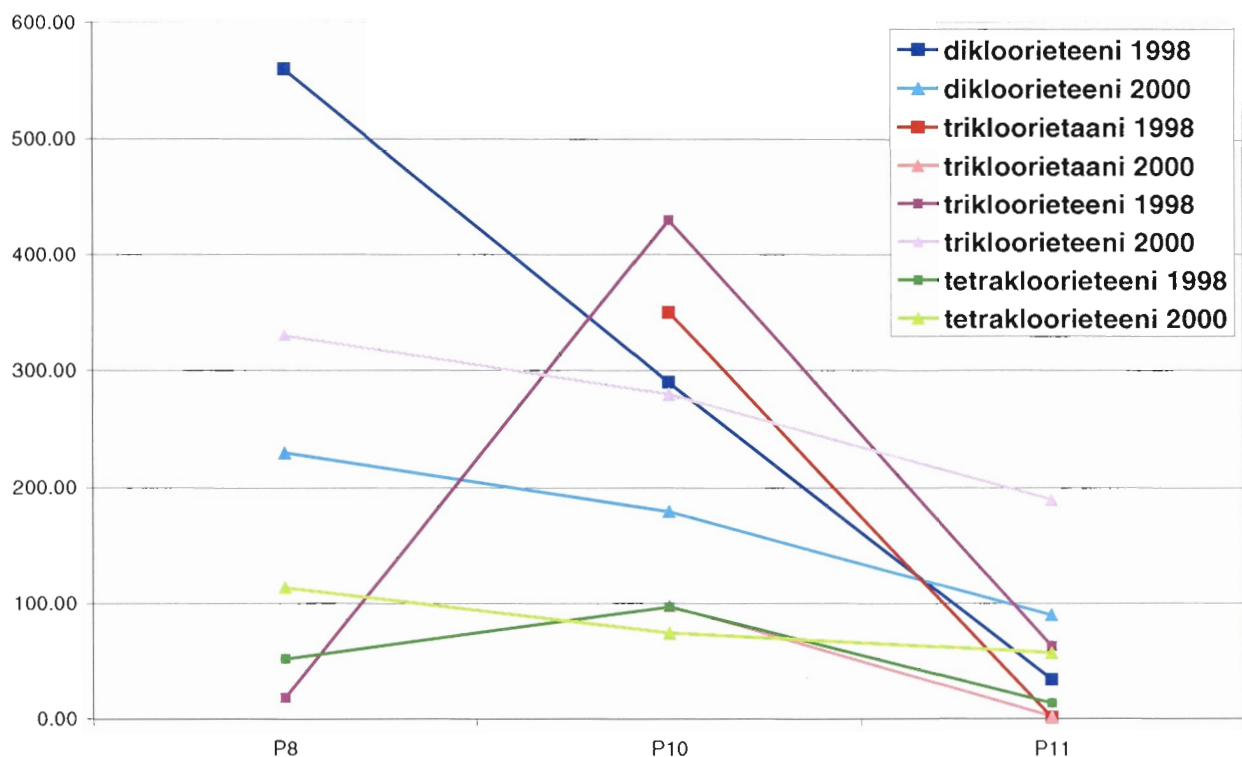
Figure 15. Location of investigation points, shear zone and ground water flow direction in Tali.

5.6.4 Johtopäätökset

Hiekka-alueiden kohdalla liuottimien imeytyminen maaperään on mahdollista. Liuottimet ovat todennäköisesti kulkeutuneet saven alaisissa hiekkakerroksissa pohjaveden virtauksen mukana.

Alustavien tutkimusten mukaan mahdollisia päästölähteitä oli kaksi. Yksityiskohtaisemmat tutkimukset kuitenkin osoittivat, ettei lisävuotoja kummankaan epäillyn päästölähteen suunnalta tullut (GEO 2000). Lyhytaikainen päästö on näiden tutkimusten perusteella erittäin todennäköinen, joten päästölähteen löytäminen myöhemmin on vaikeaa, jopa mahdotonta.

Pitoisuuksien kehitys pisteittäin pohjaveden virtauskuvan mukaisesti on esitetty kuvassa 16. Lähes kaikkien tutkittujen aineiden pitoisuudet laskivat virtauskuvan mukaisesti. Kuvan 16 liuottimet ovat kaikki vettä raskaampia. Tetrakloorieteeni ja trikloorieteeni ovat vesiliukoisia, 1,2-dikloorieteeni ja trikloorietaani ovat veteen liukenevottomia. Tämä ero liukoisuudessa voi selittää trikloorieteenin ja tetrakloorieteenin vuoden 1998 pitoisuuksien nousun pisteen P10 kohdalla.



Kuva 16. Eräiden liuottimien pitoisuuksien kehitys virtauskuvan mukaisesti.

Figure 16. Development in concentrations for some solvents arranged after ground water flow.

Liuottimien pitoisuuksien kehitystä olisi seurattava uusilla pohjavesinäytteillä. Tutkimustulosten perusteella mahdollinen kunnostustarve voitaisiin määrittää tarkemmin, samoin kuin likaantuneen alueen tämänhetkinen laajuus ja luontaisen hajoamisen tilanne.

5.7 Malmi

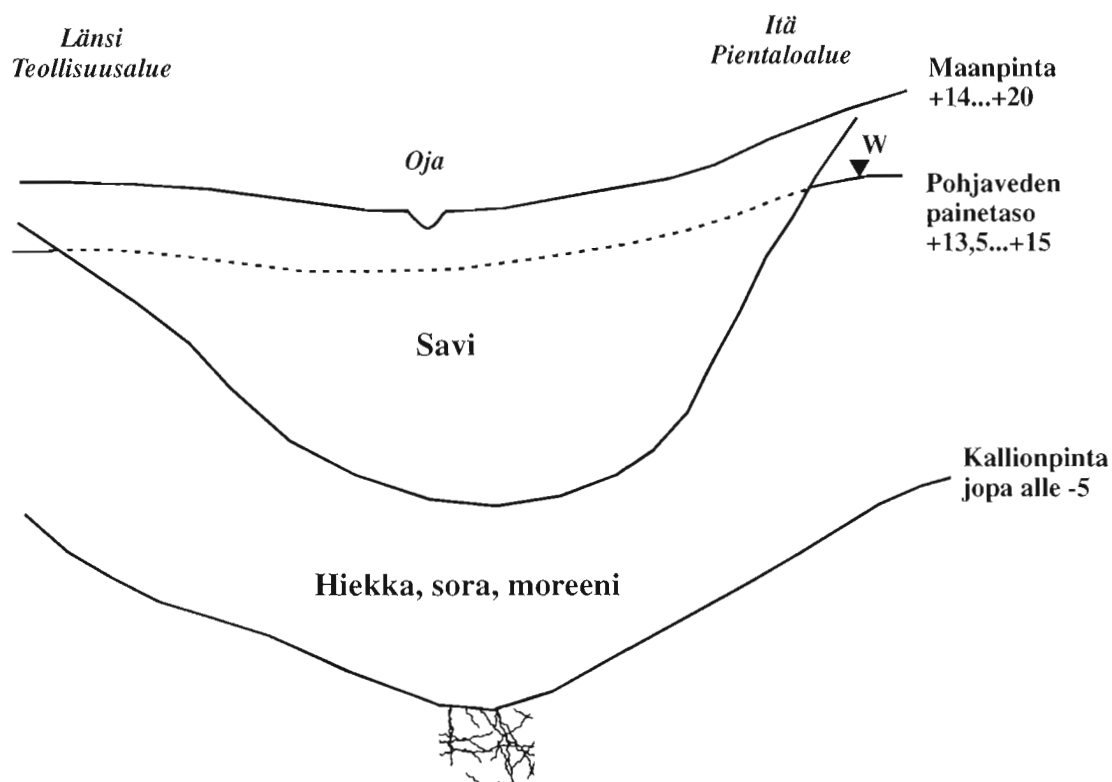
5.7.1 Yleistä

Vasaratien pientaloalueen kaivoista tehtiin liuotinhavaintoja vuonna 1998 ja kaivot asetettiin käyttökieltoon. Pientaloalueen länsipuolella sijaitsee Ormuspellontien teollisuusalue, jossa päästölähteen epäillään sijainneen. Teollisuusalueella on aikaisemmin toiminut pesula, jossa on käytetty liuottimia (GEO 1999b).

5.7.2 Alueen geologia

Pientaloalueen ja teollisuusalueen välissä sijaitsee savikkoinen alue, joka sijaitsee todennäköisesti kallioperän ruhjelaaksossa. Ruhjeisuus alueella on esitetty kuvassa 18. Kairaustietojen perusteella kallion pinta laskee jopa tason -5 alle. Maanpinta vaihtelee tasovälillä $+14...+20$ laskien pientaloalueelta savialueelle ja edelleen teollisuusalueelle päin. Savikerros on paksuimmillaan jopa 12 metriä. Savialueen keskellä virtaa oja. Saven alla on silttiä, hiekkaa ja moreenia jopa yli 10 metrin paksuudelta. Savikerros ulottuu ohuempana teollisuusalueelle, mutta se saattaa osittain puuttua tai savi voi olla puhkaistu kaivannoilla. Alueen maaperäolosuhteet itä-länsi-suuntaisena on esitetty kaavamaisesti kuvassa 17.

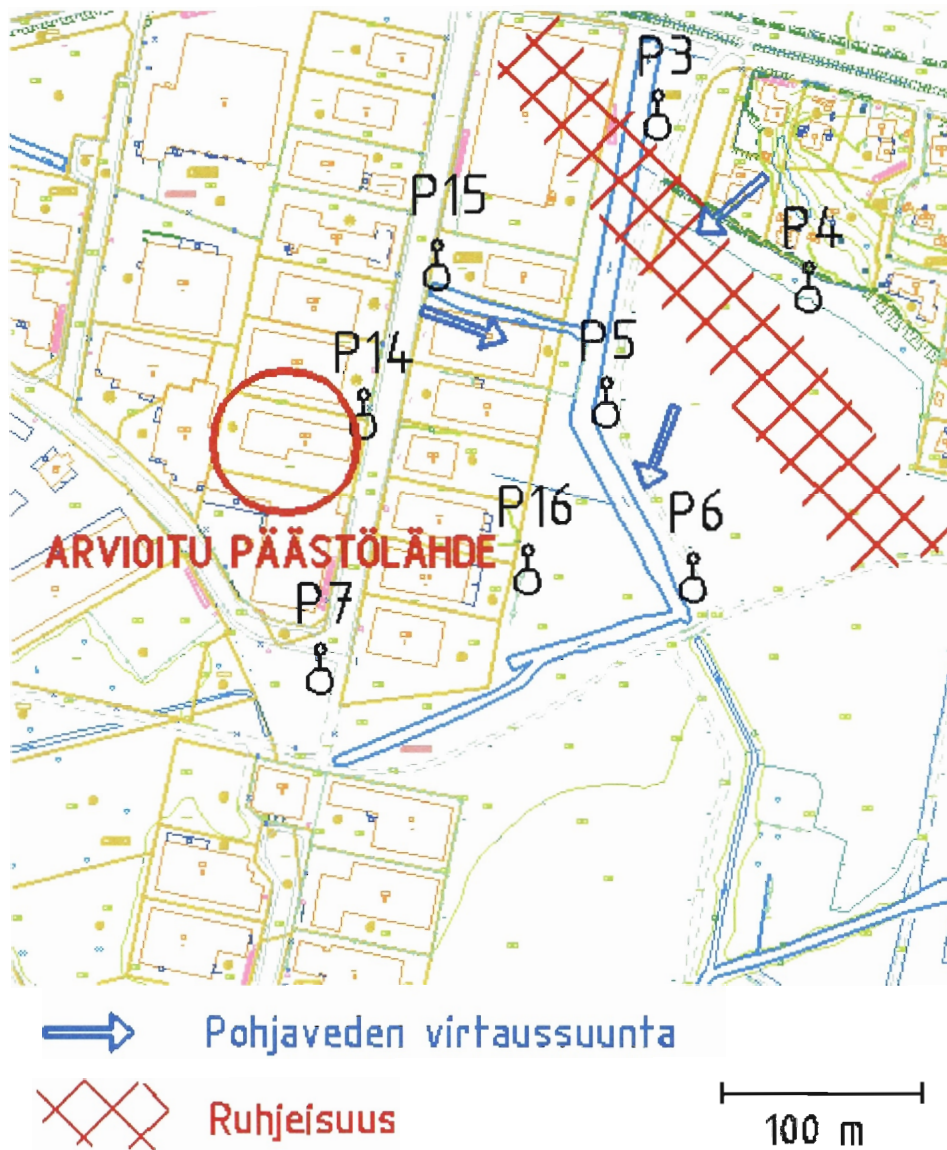
Pohjavesi virtaa pääasiassa pohjoisesta etelään ojan suuntaisesti. Savialueen reunoilta pohjaveden virtaus suuntautuu kohti keskustaa. Pientaloalueen kaivojen käyttö on voinut aiheuttaa pohjaveden virtaussuuntien muutoksia savialueelta pientaloalueelle päin (GEO 1999b). Pohjaveden virtaussuunta on esitetty kuvassa 18.



Kuva 17. Maaperäolosuhteet Malmin alueella.
Figure 17. Soil properties in Malmi.

5.7.3 Tutkimustulokset

Alueelta otettiin pohjavesinäytteitä viidestä pisteestä vuosina 1998 ja 2000. Vuonna 2000 näytteitä otettiin lisäksi kolmesta uudesta pisteestä, P14, P15 ja P16. Tutkimuksissa vesinäytteistä löydettiin useita liuotinlaatuja (GEO 1999b ja GEO 2000). Yhteenvedo tutkimustuloksista vuosilta 1998 ja 2000 on esitetty liitteessä 4. Tutkimuspisteiden sijainti on esitetty kuvassa 18. Havaituissa liuottimissa oli sekä vettä kevyempiä että raskaampia yhdisteitä ja sekä veteen liukenevia että liukenemattomia yhdisteitä.



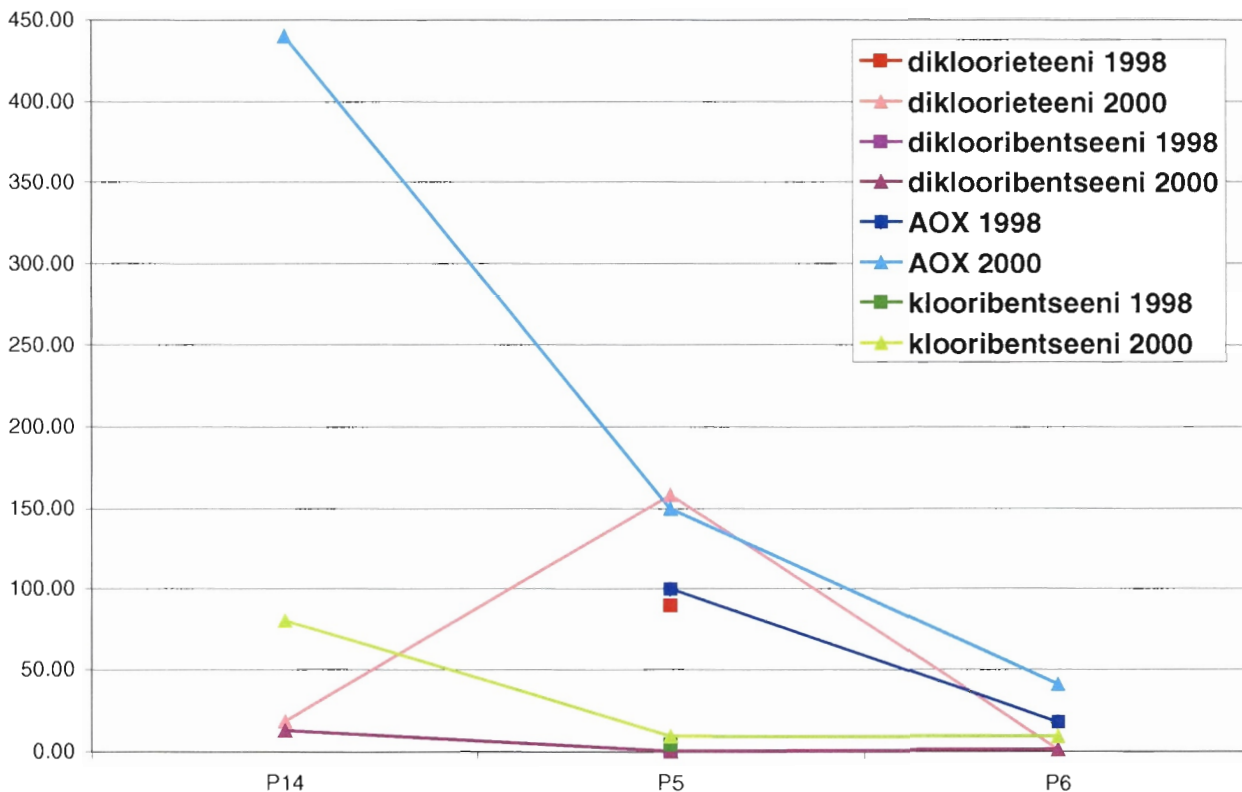
Kuva 18. Tutkimuspisteiden sijainti, ruhjeisuus ja pohjaveden virtaussuunta Malmin alueella.

Figure 18. Location of investigation points, shear zone and ground water flow direction in Malmi.

5.7.4 Johtopäätökset

Liuottimet ovat levinneet ajan kuluessa laajalle vettä johtavissa kerroksissa saven alla. Veden otto kaivoista aiheuttaa pohjaveden virtauksen saven alta pientaloalueelle, jolloin myös liuottimet ovat kulkeutuneet kaivoihin. Päästölähteen todennäköisesti jo poistuttua ongelman muodostavat edelleen saven alapuoliseen pohjaveteen päässeet aineet. Luontainen hajoaminen on kyseisissä olosuhteissa todennäköisesti hyvin hidasta.

Kuvassa 19 on esitetty eräiden havaittujen liuottimien pitoisuuksien kehitys pisteittäin virtauskuvan mukaisessa järjestyksessä. Dikloorieteeniä lukuun ottamatta pitoisuudet laskevat virtauskuvan mukaisesti. Kaikki kuvassa 19 esitetyt liuottimet ovat vettä ras-
kaampia veteen liukenemattomia aineita.



Kuva 19. Eräiden liuottimien pitoisuuksien kehitys virtauskuvan mukaisesti.

Figure 19. Concentration development for some solvents arranged after ground water flow.

Saven alle valuneet liuottimet eivät aiheuta välitöntä haittaa kaivojen ollessa käyttökiellossa. Tarpeen vaatiessa puhdistus olisi suoritettava pumpaamalla vettä kaivoista ja puhdistamalla pumpattu vesi tarpeen mukaan esim. aktiivihiilisuodatuksella. Jos orgaaninen faasi on pieni ja paikallinen, voisi runsas pumpaus kaivoista saada aikaan riittävän virtauksen liuotinongelman poistamiseksi kokonaan. Ennen puhdistustoimenpiteiden aloittamista olisi otettava kattava näytesarja pohjavedestä liuotinten levinneisyyden ja hajoamisen tämänhetkisen tilanteen selvittämiseksi.

5.8 Tankovainio

5.8.1 Yleistä

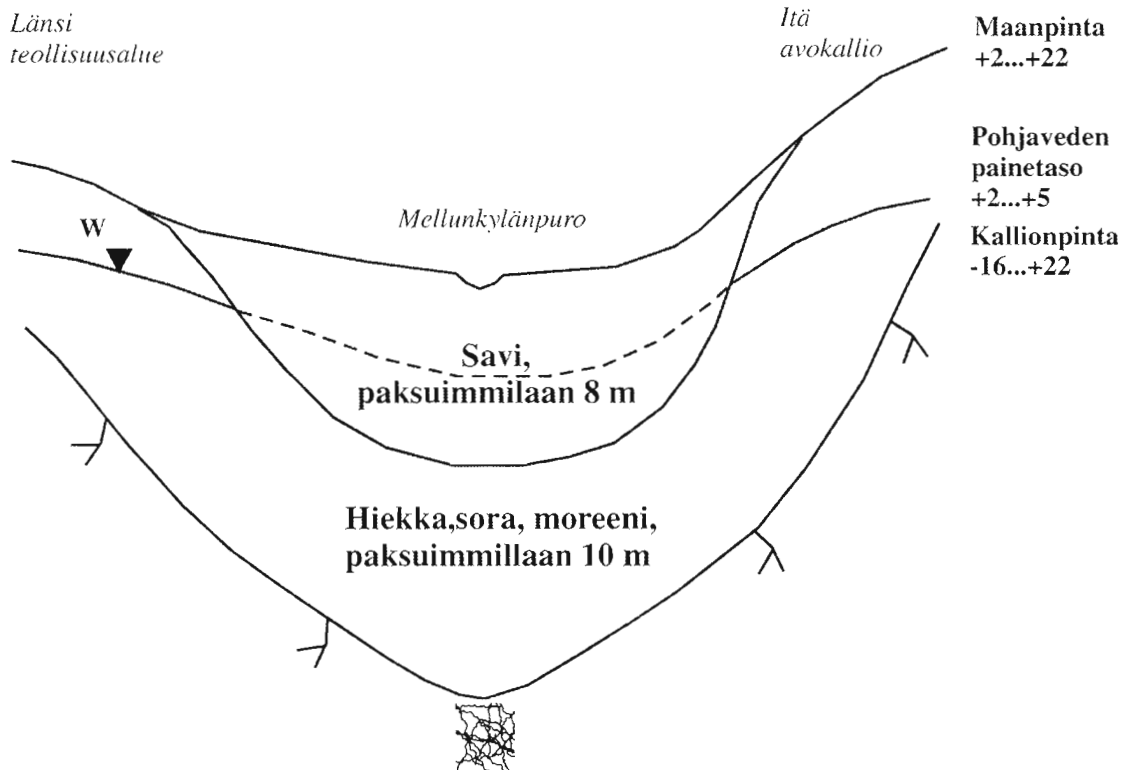
Tankovainion alueella raportoitiin kaivoveden oudosta mausta helmikuussa 1990. Alueelta otetuista pohjavesinäytteistä löydettiin liuottimia. Epäiltyjä päästölähteitä oli aluksi kaksi. Alueen länsireunalla Itäväylän varrella sijaitsee teollisuusalue, jossa on toiminut mm. pesula ja autoalan yrityksiä, joissa on käytetty liuottimia. Lisäksi alueen länsireunalla sijaitsevalta mäeltä löydettiin spraypulloja ilman etikettiä. Tutkimuksissa spraypulloista ei kuitenkaan löytynyt samoja aineita kuin pohjavesinäytteistä.

5.8.2 Alueen geologia

Maanpinta alueella vaihtelee huomattavasti. Teollisuusalueella maanpinta on noin tasossa +10 pudoten Mellunkylänpuron kohdalla alle tason +2 ja kohoten jälleen itäpuolella avokallioalueella jopa yli tason +22. Itäväylältä kaakkoon lähtee kalliopainaus, jossa kallion pinta laskee tasolta syvimmillään jopa tason -16 alle. Painausmaun länsipuolella kallionpinta nousee yli tason +5 ja itäpuolella kallionpinta kohoaa jopa tasoon +22. Kallionpinnan tasokäyrästä on esitetty kuvassa 21.

Maaperä on teollisuusalueella lähinnä hiekkaa, soraa ja moreenia noin 8 metrin paksuudelta. Itään päin siirryttäessä kitkamaan päälle tulee savikerros, joka on paksuimmillaan Mellunkylänpuron kohdalla. Puron kohdalla savea on jopa 8 metriä, jonka alla on hiekkaa, soraa ja moreenia jopa yli 10 metrin paksuudelta. Itään päin jatkettaessa savikerros ohenee ja loppuu. Alueen maaperäolosuhteet itä-länsi-suuntaisesti on esitetty yksinkertaistettuna kuvassa 20.

Likaantunut alue sijaitsee Vartiokylän pohjavesialueella, joka on luokiteltu 1. luokan pohjavesialueeksi. Pohjaveden pinta on teollisuusalueella noin tasossa +4 laskien länteen Mellunkylänpuron kohdalle tasoon +2. Itään päin avokallioalueelle kohoavan maaston mukaisesti myös pohjavedenpinta kohoaa tasoon +5. Pohjavesi virtaa teollisuusalueelta länteen ja avokallioalueelta itään kohti Mellunkylänpuroa, jonka kohdalla virtaus kääntyy kohden etelää. Hydraulinen gradientti alueella on pieni, joten veden virtaus on hidasta. Pohjaveden virtaussuunta on esitetty kuvassa 21.



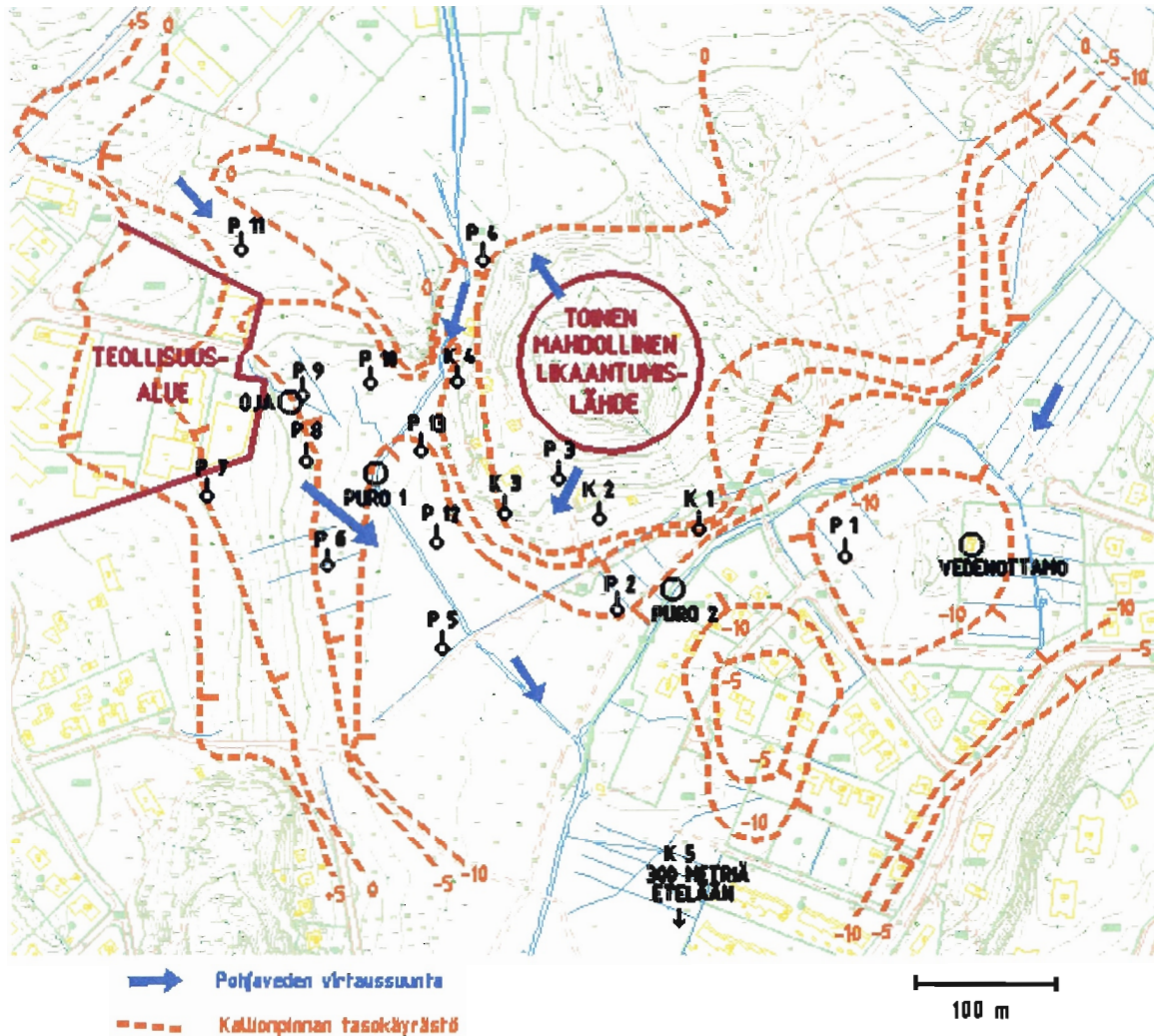
Kuva 20. Maaperäolosuhteet Tankovainion alueella.
Figure 20. Soil properties in Tankovainio.

5.8.3 Tutkimustulokset

Vesinäytteitä otettiin 20 pisteestä. Tutkimuspisteiden sijainti on esitetty kuvassa 21. Pisteet P3 ja P7 olivat kuivia, joten niistä ei näytteitä saatu otettua. Näytteenotto suoritettiin hajanaisesti helmikuusta 1990 helmikuulle 1994. Vain tetrakloorieteenin pitoisuudet ylittivät talousveden raja-arvon. Yhteenvedo tutkimustuloksista on esitetty liitteessä 4. Kaikki löydetty liuottimet ovat vettä raskaampia. Suurin osa havaituista liuottimista liukenee veteen, vain yksi on veteen liukenematon.

5.8.4 Johtopäätökset

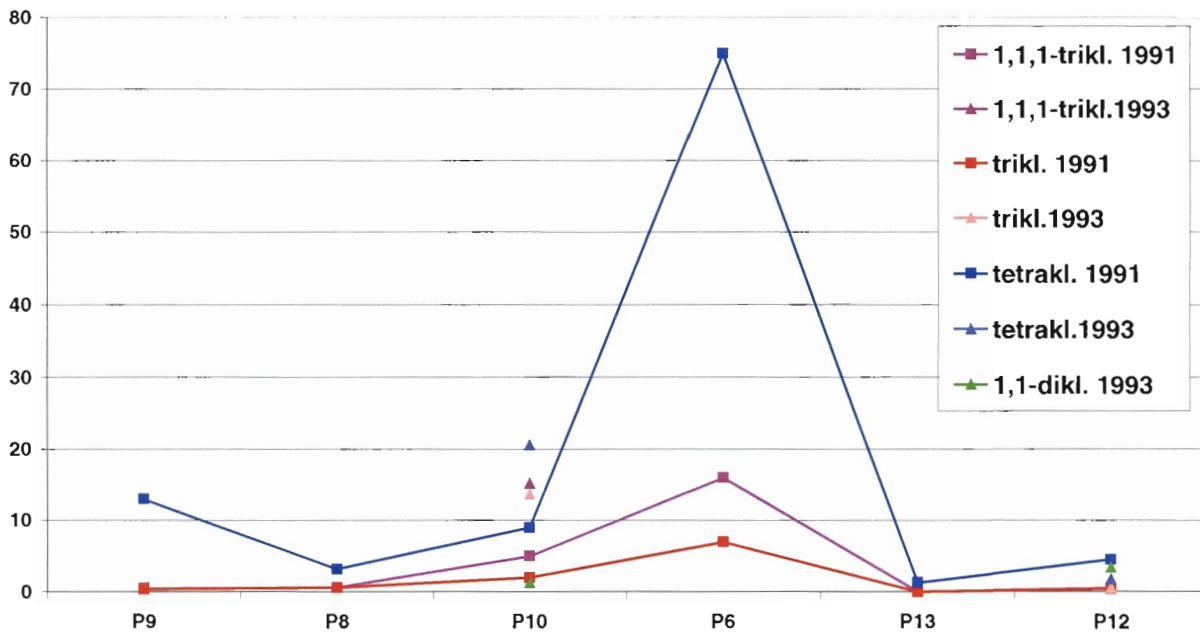
Puhdistustoimenpiteitä ei ole toistaiseksi tehty. Päästön paikallisuutta tutkittiin pumpaamalla likaantuneista kaivoista vettä kuutiottain, jolloin kasvava pohjaveden virtaus olisi voinut saada pienen ja paikallisen orgaanisen faasin liikkeelle ja poistumaan. Tämä ei kuitenkaan toiminut, vaan uusista näytteistä löytyi edelleen liuotinainepitoisuuksia. Päästölähteen tarkkaa sijaintia ei tutkimustulosten perusteella kyetty määrittämään. Todennäköisin päästölähde on teollisuusalue, jossa liuottimia on käytetty ja josta ne ovat voineet kulkeutua ympäristöön pitkänkin ajan kuluessa. Kaivojen käyttö on voinut aiheuttaa pohjaveden virtaussuunnissa tilapäisiä muutoksia, jolloin vesi on virrannut normaalitilanteen vastaisesti. Epäiltyjen päästölähteiden sijainti, kauraustietojen perusteella arvioitu kallionpinnan tasokäyrästä, pohjaveden virtauskuva ja tutkimuspisteiden sijainti on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Tutkimuspisteiden sijainti, epäiltyjen päästölähteiden sijainti, kallionpinnan tasokäyrästä sekä pohjaveden virtauskuva Tankovainion alueella.

Figure 21. Location of investigation points, suspected contamination sources, rock surface levels and ground water flow directions in Tankovainio.

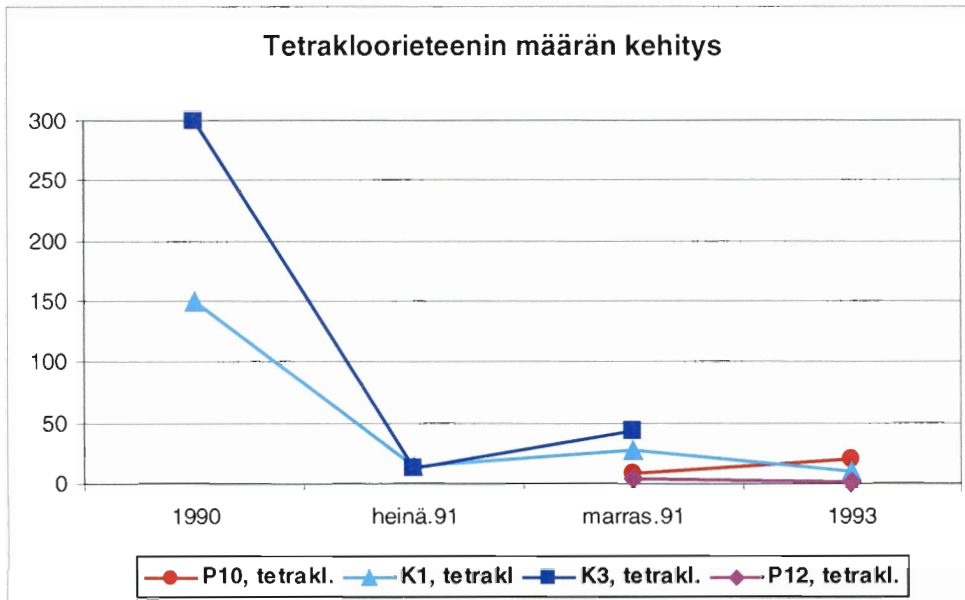
Kuvassa 22 on esitetty useimpien havaittujen liuottimien pitoisuudet pisteittäin pohjaveden virtauskuvan mukaisesti järjestettynä. Kaikkien liuotinaineiden pitoisuuksien kehitys on samankaltainen. Liuotinmäärän keskittyminen pisteen P6 kohdalle viittaa päästön tapahtuneen jo aiemmin. Tuore tai jatkuva päästö näkyisi pitoisuuden tasaisena laskuna virtauskuvan mukaisesti.



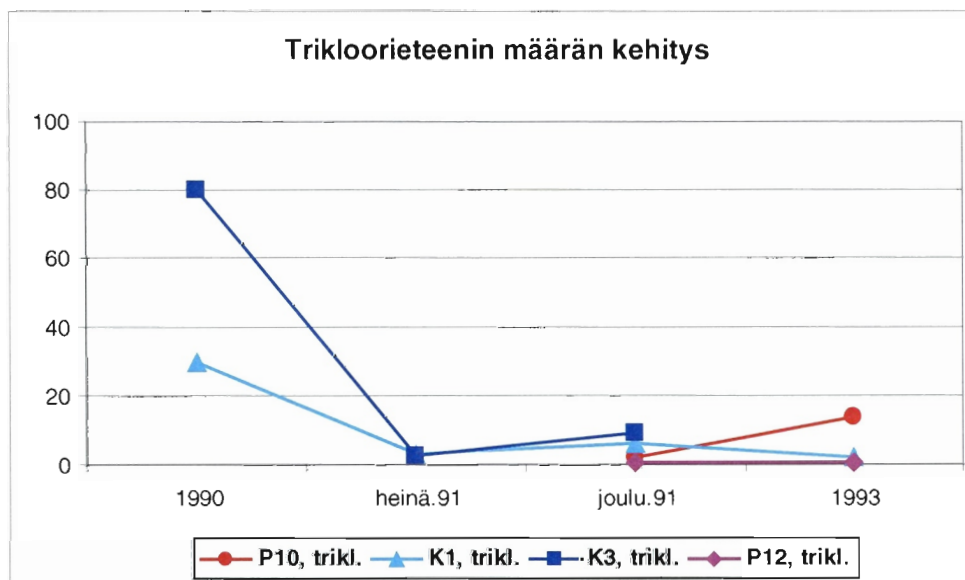
Kuva 22. Pitoisuuksien kehitys pisteittäin virtauskuvan mukaisesti.

Figure 22. Development of concentrations in certain points after ground water flow.

Ainoastaan tetrakloorieteenin pitoisuudet ylittivät talousveden raja-arvon. Tetrakloorieteeni on vettä raskaampi kohtalaisesti veteen liukeneva liuotin. Se painuu vähitellen pohjavesiesiintymän pohjalle. Tetrakloorieteeni vaikuttaa valuneen ruhjevyyöhykkeen pohjalle, Mellunkylänpuron ja Broändan puron kohdille, josta se on kulkeutunut todennäköisesti pohjaveteen liuenneena etelään. Satoja metrejä etelämpänä kaivosta otetuista näytteistä löytyi pieni määrä tetrakloorieteeniä. Tetrakloorieteenin pitoisuus pienenee ajan funktiona, mikä viittaa luontaiseen hajoamiseen tai laimenemiseen. Tetrakloorieteenin hajoamistuotteista ainoastaan trikloorieteenin pitoisuuksista on kohtuullisen kattava analyysisarja, jonka perusteella myös trikloorieteenin pitoisuudet pienenevät ajan funktiona. Tetrakloorieteenin pitoisuuden kehitys neljässä pisteessä ajan funktiona on esitetty kuvassa 23. Trikloorieteenin pitoisuuden kehitys samoissa neljässä pisteessä on esitetty kuvassa 24.



Kuva 23. Tetrakloorieteenin pitoisuuden kehitys ajan funktiona.
Figure 23. Development of tetrachloroethene concentration during time.



Kuva 24. Trikloorieteenin pitoisuuden kehitys ajan funktiona.
Figure 24. Development of trichloroethene concentration during time.

Puhdistusta kokeiltiin runsaalla pumppauksella, mutta pohjavedestä löytyi edelleen korkeita pitoisuuksia. Pitoisuuksien kehitys viittaa luontaiseen hajoamiseen, mikä tapahtuu kuitenkin hitaasti. Kaivojen ollessa käyttökiellossa liuottimista ei ole välitöntä haittaa, mutta läheinen Broändan vedenottamo on vaaravyöhykkeellä. Vedenottamo ei ole jatkuvassa käytössä, vaan sitä on varauduttu käyttämään kriisitilanteessa. Vedenottamon vettä tarkkaillaan vain perustutkimusten, esimerkiksi pH-arvon, sähkönjohtavuuden, hajun, maun ja eräiden alkuaineiden osalta normaalisti kerran vuodes-

sa otettavilla näytteillä. Liuotinpitoisuuksia vedenottamolta tutkitaan vain tarpeen vaatiessa, ei rutiininomaisesti.

Pohjaveden puhdistustarpeen määrittämistä varten olisi otettava näytteitä sekä pohjavesipisteistä että kaivoista likaantumisen tämänhetkisen tilanteen selvittämiseksi. Näytteistä olisi tutkittava sekä aiemmin havaitut liuotinaineet että niiden mahdolliset hajoamistuotteet, kuten vinyylikloridi. Tulosten perusteella voitaisiin päätellä likaantumisen laajuus ja luontaisen hajoamisen mahdollisuus, jonka jälkeen olisi mahdollista harkita puhdistustoimenpiteitä.

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Orgaanisilla liuottimilla likaantuneita alueita on löydetty etenkin metalliverstaiden, korjaamoiden, kemiallisten pesuloiden ja graafisen alan laitosten yhteydestä. Tyypillisissä liuotinten aiheuttamissa likaantumistapauksissa päästö on tapahtunut jo aiemmin ja tulee ilmi aineiden kulkeuduttua vedenottamolle tai kaivoihin.

Maaperään liuottimia joutuu useimmiten vuotojen, onnettomuuksien tai vanhojen täyttöjen tai jätteiden yhteydessä. Ennen ongelmajätteiden oikeaoppista käsittelyä liuottimet, kuten muutkin ongelmajätteet kaadettiin maahan tai vietiin kaatopaikoille. Orgaanisista liuottimista osa on jo todettu karsinogeeniseksi, mutageenisiksi tai teratogeeniseksi ja useimpien liuotinten kohdalla on olemassa ainakin epäily vakavista terveyshaitoista.

Orgaanisten liuottimien fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet vaihtelevat, mutta yhteistä niille on hyvä rasvanliuotuskyky ja voimakas taipumus haihtua huoneenlämpötilassa. Liuotinten merkittävimpiin ominaisuuksiin niiden ympäristössä käyttäytymisen kannalta kuuluvat haihtuvuus, vesiliukoisuus, tiheys sekä pidäytyminen maaperään ja kertyvyys eliöihin. Liuotinten ympäristökäyttäytymiseen vaikuttavat etenkin maaperän hydrogeologiset olosuhteet, lämpötila sekä maan kerrosrakenne, koostumus, huokoisuus ja vedenläpäisevyys.

Orgaanisten liuottimien erilaisista ominaisuuksista johtuen niiden käyttäytyminen ympäristössä vaihtelee. Maaperässä ja pohjavedessä liuottimet yleensä pidätyvät maan orgaaniseen ainekseen, kulkeutuvat eteenpäin tai hajoavat kemiallisesti tai biologisesti.

Orgaaniset liuottimet ovat poolittomia, joten ne adsorboituvat yleensä heikosti ja vesipitoisuuden kasvu vähentää adsorptiota voimakkaasti ja lisää desorptiota. Tätä voidaan käyttää apuna myös puhdistuksessa, esimerkkinä maan huuhtelu. Adsorptiota tapahtuu eniten orgaanista ainesta sisältävässä hienorakeisessa maassa. Myös kapillaarivoimat pidättävät veden lisäksi liuottimia. Kapillaarinen pidätyminen on vähäistä, mutta voi muodostaa pitkäaikaisen päästölähteen aineiden vapautuessa hitaasti pohjaveteen.

Maaperässä orgaaniset liuottimet kulkeutuvat omana neste- tai kaasufaasinaan tai veteen liuenneena. Maaperän vedellä kyllästymättömässä vyöhykkeessä helposti haihtuvat liuottimet kulkeutuvat usein huokoskaasussa. Lämpötilan nousu edistää haihtumista, samoin vesipitoisuuden nousu. Kaasu liikkuu maaperässä useimmiten nopeammin kuin neste. Orgaaniset liuottimet päätyvät useimmiten nopeasti pohjaveteen heikon pidätyksen vuoksi. Pohjavedessä kulkeutuminen tapahtuu advekti-

on, dispersion tai diffuusion avulla. Karkearakeisessa maassa merkittävin kulkeutumismuoto on advektio, kun taas hienorakeisessa maassa diffuusion merkitys kulkeutumisnopeudelle kasvaa huomattavasti.

Osa maaperään päässeistä liuottimista haihtuu maan pintakerroksista ilmaan ja hajoaa fotolyttisesti joko suoraan tai epäsuorasti, kulkeutuvat ylempiin ilmakerrokseen tai liukenevat sadeveteen. Maaperässä syvemmälle joutuneet liutainaineet voivat hajota kemiallisesti tai mikrobiologisesti. Kloorin poistuminen halogenoiduista hiilivedyistä vaatii usein pelkistävät olosuhteet, mutta lopullinen hajoaminen tapahtuu useimmiten vain hapettumalla. Mikrobitoiminnan seurauksena hiilivedyt hajoavat sopivissa olosuhteissa alkuaineiksi ja yksinkertaisiksi yhdisteiksi. Suomessa kylmä ilmasto, hapan maaperä ja ravinteiden puute hidastavat hajoamista. Syvällä maaperässä ja pohjavedessä happi ja ravinteet vähenevät, jolloin hajoaminen vähenee. Hajoamistuotteet voivat olla jopa myrkyllisempiä kuin alkuperäinen aine, kuten tetra-kloorieteenin hajoamisessa välivaiheiden kautta vinyylikloridiksi, joka on karsinogeeninen aine.

Likaantuneen alueen kunnostuksesta vastaavat likaantumisen aiheuttaja, maanomistaja ja kunta, tässä järjestyksessä. Likaantumisvaaraa aiheuttavalle toiminnalle on haettava ympäristölupa, samoin likaantuneen alueen kunnostukselle. Ympäristölupa haetaan alueelliselta ympäristökeskukselta. Helsingissä tietyissä tapauksissa riittää ilmoitus Helsingin ympäristökeskukselle. Likaantuneen alueen kunnostus aloitetaan esiselvityksellä, jossa selvitetään alueen käyttöhistoria sekä geologiset ja hydrogeologiset olosuhteet. Tämän jälkeen suunnitellaan näytteenotto tarpeen mukaan, maaperästä, pohja- tai pintavedestä sekä huokoskaasusta.

Orgaanisilla liuottimilla likaantuneen alueen kunnostusvaihtoehtoja on useita. Kunnostuksella pyritään poistamaan haitalliset aineet tai estämään niiden leviäminen. Huokoskaasukäsittelyssä poistetaan haihtuvia yhdisteitä alipaineen avulla maaperän vedellä kyllästymättömästä vyöhykkeestä. Termisessä desorptiossa käsiteltävää maamassaa lämmitetään, jolloin lika-aineet haihtuvat. Poistokaasut käsitellään molemmissa käsittelymenetelmissä erikseen. Maan huuhtelussa pohjaveden pintaa nostetaan imeyttämällä vettä, jolloin haitta-aineet liukenevat pohjaveteen. Likaantunut pohjavesi pumpataan ja johdetaan käsiteltäväksi. Tätä menetelmää ei Suomessa vielä ole käytetty. Mikrobiologisin menetelmin likaantuneen alueen maaperä ja pohjaveden kunnostus onnistuu useimmiten samanaikaisesti. Käsittely voi tapahtua *in situ* tai *off site*. Pohjaveden pumppauksella pyritään estämään likaantuneen pohjaveden leviäminen ja poistamaan haitta-aineet. Likaantunut pohjavesi pumpataan käsiteltäväksi maanpäälliseen laitteistoon, jonka jälkeen tavoitetasoon puhdistettu vesi voidaan useimmiten imeyttää takaisin maaperään tai johtaa viemäriin. Pohjaveden ilmastuksessa paineilmaa injektoidaan likaantuneeseen pohjaveteen, jolloin helposti haihtuvat aineet kulkeutuvat ilmapirran mukana maanpinnalle. Huokoskaasu kerätään maan pintaosista ja johdetaan puhdistettavaksi. Reaktiivisia seinämiä ei toistaiseksi ole käytetty Suomessa. Seinämä asennetaan kohtisuoraan pohjaveden virtausta vastaan, jolloin läpi virtaava pohjavesi puhdistuu seinämässä tapahtuvien reaktioiden myötä. Myös kunnostamatta jättäminen on joissain tapauksissa mahdollista, mutta myös se vaatii ympäristöluvan.

Helsingin geologisesti merkittävimmät piirteet orgaanisten liuotinten käyttäytymisen kannalta ovat vettä johtavat maakerrokset ja kallioperän rakosysteemit. Maaperäolo-

suhteet Helsingissä vaihtelevat hyvinkin pienipiirteisesti sekä pysty- että vaakasuuntaisesti, mikä monimutkaistaa veden virtausolosuhteita. Pohjaveden painetaso on useimmiten Helsingin seudulla lähellä maanpintaa. Myös varsinainen vapaa pohjaveden pinta on tavallisesti lähellä maanpintaa, jolloin haitta-aineiden kulkeutuminen maakerrosten läpi pohjaveteen on kohtuullisen nopeaa. Savikerrosten alla hiekkakerroksissa paineellisen pohjaveden liike on hidasta ja veden määrä vähäinen. Savikerros estää haitta-aineiden kulkeutumisen suoraan yläpuolelta pohjaveteen. Jos haitta-ainetta pääsee vuotamaan saven alle hiekkakerroksiin, se voi liikkua pitkiäkin matkoja hitaasti ja tulla esiin kaukana päästölähteestä pitkän ajan kuluttua. Tällöin päästölähteen selvittäminen on vaikeaa. Ruhjeisuus kallioperässä edistää haitta-aineiden leviämistä ja vaikeuttaa edelleen päästölähteen paikallistamista. Rakennetuilla alueilla erilaiset kaivu- ja täyttötöimenpiteet monimutkaistavat virtausolosuhteita ja muodostavat hyvin vettä johtavia virtauskanavia, joita pitkin veden lisäksi myös haitta-aineet voivat kulkeutua pitkiäkin matkoja.

Orgaanisia liuottimia on Helsingissä tutkittu tarkemmin kuudessa kohteessa. Nämä havainnot on tehty kaivoveden oudon maun, orgaanisten liuotinten käytön tai alueella suoritettujen tutkimusten perusteella. Kohteista on löytynyt useita eri liuottimia vaihtelevia pitoisuuksia. Kahta kohdetta kunnostetaan parhaillaan. Muissa kohteissa kunnostukseen ei ole ryhdytty haitta-aineiden vähäisyyden, kohteen sijainnin ja käyttötavan tai puutteellisten tietojen vuoksi.

Pitäjänmäellä löydettiin maalitehtaan ympäristön haitta-ainetutkimusten yhteydessä liuottimia sekä maaperästä että pohjavedestä. Kunnostusmenetelmänä on käytetty huokoskaasukäsittelyä sekä pohjaveden pumppausta. Sekä huokoskaasu että pohjavesi puhdistetaan aktiivihilisuodatuksella. Kunnostus on edelleen käynnissä, ja käsittely on kestänyt jo vuosia, joten käsittelyaika on todella pitkä. Käsittely ei kuitenkaan häiritse alueen käyttöä, sillä huokoskaasuputket on asennettu maaperään ja maanpäälliset puhdistuslaitteistot on sijoitettu sopiviin paikkoihin.

Hermannin alueella liuotinhavainto tehtiin tontin rakennettavuusselvityksen yhteydessä. Kunnostusmenetelmänä käytetään pohjaveden pumppausta ja aktiivihilisuodatusta. Likaantuneet maamassat kaivettiin pois ja vietiin puhdistettaviksi. Kunnostus on suoritettu samanaikaisesti rakentamisen kanssa. Uusien likaantuneiden alueiden löytyminen ympäri tonttia sekä pohjaveden hidas puhdistuminen ovat jo viivästyttäneet rakentamista ja nostaneet kustannuksia huomattavasti.

Tapanilassa liuottimia löydettiin muiden haitta-aineiden lisäksi tontin rakennettavuusselvityksen yhteydessä. Liuottimia löytyi saven alta pohjavedestä, kun muut haitta-aineet olivat maaperässä lähellä maan pintaa. Liuottimien osalta päästölähde sijaitsi varsinaisen kunnostettavan tontin pohjoispuolella, missä oli sijainnut pesula ja suojaava savikerros puuttui maan pinnalta. Kunnostukseen ryhdyttiin vain muiden haitta-aineiden osalta, sillä saven alapuolisessa pohjavedessä sijaitsevista liuottimista ei ole haittaa alueen käytölle.

Talin urheilupuiston alueelta löydettiin useita liuotinlaatuja sadevesiviemärin kunnostustöiden yhteydessä. Tarkemmissakaan tutkimuksissa päästölähteen sijaintia ei kyetty paikallistamaan. Todennäköisesti päästö on tapahtunut jo aiemmin ja liuottimet ovat ajan kuluessa liikkuneet saven alapuolisessa hiekkakerroksessa pohjaveden mukana kauemmas päästölähteestä. Luontainen hajoaminen ja laimeneminen on ky-

seisissä olosuhteissa hidasta. Liuottimet eivät tällä hetkellä aiheuta akuuttia haittaa. Tämän hetkisten pitoisuuksien ja puhdistustarpeen määrittämiseksi olisi tehtävä lisätutkimuksia ja otettava uusia näytteitä.

Malmilla löydettiin pientaloalueen kaivoista liuottimia, jotka olivat todennäköisesti päässeet maaperään läheisellä teollisuusalueella sijainneesta pesulasta. Ajan kuluessa liuottimet ovat kulkeutuneet ruhjeiseen painaumaan savikerroksen alle pohjaveden virtauksen mukana. Kaivojen käyttö on aiheuttanut pohjaveden virtaussuunnan muutoksia, jolloin liuottimet ovat kulkeutuneet kaivoihin. Kaivojen ollessa käyttökiellossa liuottimista ei ole akuuttia haittaa. Puhdistustarpeen määrittäminen vaatii lisätutkimuksia ja uutta näytteenottokierrosta.

Tankovainion alueella liuotinhavainto tehtiin kaivoveden oudon hajun perusteella. Kaivot asetettiin käyttökieltoon, mitä ei kuitenkaan kaikilta osin noudatettu. Näytteenotossa havaittiin useita liuottimia saven alapuolisissa hiekkakerroksissa. Todennäköinen päästölähde sijaitsi Itäväylä varrella teollisuusalueella, missä oli toiminut mm. pesula ja autokorjaamo. Teollisuusalueelta liuottimet olivat päässeet imeytymään maaperään ja valuneet pohjaveden virtauksen mukana saven alle. Ajan kuluessa liuottimet levisivät laajalle alueelle ja kaivojen käytön aiheuttama muutos pohjaveden virtaussuunnassa sai myös liuottimet kulkeutumaan kaivoihin. Luontaista hajoamista tapahtuu kyseisissä olosuhteissa hitaasti ja pohjaveden vähäisestä määrästä ja virtauksen hitaudesta johtuen myös laimeneminen on hidasta. Tämänhetkisen tilanteen toteamiseksi olisi otettava uudet näytteet kaikista pisteistä sekä mahdollisesti joistain uusista pisteistä. Vasta tämän jälkeen olisi mahdollista todeta kunnostustarve.

LÄHDELUETTELO

Assmuth T., Poutanen H., Strandberg T., Melanen M., Penttilä S. & Kalevi K. 1990: Kaatopaikkojen ongelmajätteiden ympäristövaikutukset. Riskikaatopaikkatutkimuksen pääraportti. Vesi- ja Ympäristöhallituksen julkaisuja, sarja A, nro 67. Vesi- ja Ympäristöhallitus, Helsinki.

Auranlinna J. & Strandberg T. 1994: Liuottimien saastuttaman maan ja pohjaveden käsittelymenetelmät. Vesi- ja Ympäristöhallituksen monistesarja, nro 521. Vesi- ja Ympäristöhallitus, Helsinki.

Bouwer E. J. & McCarthy P. L. 1984: Modeling of trace organics biotransformation in the subsurface. Ground Water, vol 22, 4:433-440.

Ettala M. 1992: Haihtuvien yhdisteiden poisto maaperästä huokosilmatekniikalla. Ympäristö ja terveys 2-3:160-164.

Fetter C. W. 1999: Contaminant hydrogeology. 2. edition. Prentice Hall, New Jersey.

Finlex. Valtion säädöstietopankki, www.finlex.fi.

Finlex 86/2000. Valtion säädöstietopankki, ympäristönsuojelulaki 86/2000. www.finlex.fi.

Finlex 461/2000. Valtion säädöstietopankki, sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista 461/2000. www.finlex.fi.

Forsbacka A. 1996: Öljy-yhdisteiden biologinen hajoaminen ja saastuneen maan biosaneeraus. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 2/96.

GEO 1999a: Talin urheilupuisto. Liutainaineiden leviämistutkimus. Geoteknisen osaston tutkimusraportti, GEO 5621 / 3 / 21.5.1999. Julkaisematon.

GEO 1999b: Malmi, Ormuspellontie. Liutainaineiden leviämistutkimus. Geoteknisen osaston tutkimusraportti, GEO 5621 / 1 / 27.4.1999. Julkaisematon.

GEO 2000: Talin urheilupuisto ja Ormuspellontie. Liutainten jatkotutkimus. Geoteknisen osaston tutkimusraportti, GEO 5671 / 15.3.2000. Julkaisematon.

Haavisto M. & Kukkonen E. 1975: Suomen geologinen kartta, 1:100 000. Maaperäkartan selitykset. 2034 Helsinki. Helsingin merialueen ja rannikon maaperä. Geologinen tutkimuslaitos, Espoo.

Hartonen K. 2001: Saastuneen ympäristön analyysi- ja puhdistusmenetelmistä. Luentomoniste Helsingin Yliopiston kemian laitoksen luentosarjasta. Julkaisematon.

Hatva T. 1987: Maaperän epäpuhtauksien kulkeutuminen pohjaveteen. Ympäristö ja terveys 1:16-20.

Heikkinen P. 2000: Haitta-aineiden sitoutuminen ja kulkeutuminen maaperässä. Geologian Tutkimuskeskus, tutkimusraportti nro 150. Geologian tutkimuskeskus, Espoo.

Heiskanen J. 1994: Dikloorimetaanin ja tri- ja tetrakloorieteenin käyttö ja ympäristövaikutukset. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja, nro 585. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsinki.

Hirvas H., Lintinen P., Lunkka J-P., Eriksson B. & Grönlund T. 1995: Sedimentation and lithostratigraphy of the Vuosaari multiple till sequence in Helsinki, southern Finland. Bulletin of the geological society of Finland, nro 67, part 2, ss.51-64.

Hyypä E. 1960: Helsingin seudun geologiaa. Eripainos Helsingin kaupungin julkaisusta nro 9, Helsingin yleiskaavaehdotus. Geologinen tutkimuslaitos, Helsinki.

Hänninen M.-L. 1993: Orgaanisten yhdisteiden joutuminen pohjaveteen. Eräiden lyhytkestäisten kloorattujen hiilivetyjen toksisuus. Ympäristö ja terveys 1:16-19.

Jeltsch U. 1990: Saastuneiden maa-alueiden kunnostus. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja. Sarja A, nro 44. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsinki.

Kankaanranta T. 1998: Kemikaalien ympäristö- ja kaatopaikkakäyttämisen perusteita. Uudenmaan ympäristökeskuksen monisteita, nro 36. Uudenmaan ympäristökeskus, Helsinki.

Kansainväliset kemikaalikortit 2000: Työterveyslaitoksen www-sivut <http://www.occuphealth.fi/tt/kemkort/ipcsnfin/finnish.htm>, päivitetty 12.5.2000.

Kolari M. & Salkinoja-Salonen M. 1993: Klooratut eteenit pohjavesien pilaajina. Vesitalous 2:8-13.

Komulainen H. 1998: Pohjaveden *in situ* -kunnostuksen uusia menetelmiä. Vesitalous 1:16-21.

Komulainen H. & Karvonen T. 1996: Haitallisten polttoaineyhdistelmien käyttäytyminen ja kulkeutuminen maassa ja pohjavedessä. Osa 1. Diffuusion ja sorption vaikutukset. Vesitalous 6:9-15.

Kultamaa A. 1993: Arvioinnissa tarvittavat tiedot. In Malm J. 1993 (ed): Kemikaalien ympäristövaikutusten arviointi. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja, nro 471. Ss. 12-19. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsinki.

Leminen K. & Forss P. 1994: Saastuneiden maa-alueiden kunnostusmenetelmät Helsingissä. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 7/94. Helsinki.

Leppänen M. (ed.) 1998: Kaatopaikan tiivistysrakenteet. Suomen Ympäristökeskus, ympäristöopas 36. Helsinki.

Lintu Y. 1995: Huokosilmatekniikka – saastuneen maan kunnostusmenetelmä. In Savelainen K. (ed) 1995: Saastuneet maa-alueet. Uudenmaan ympäristökeskuksen koulutuspäivät Helsingissä 17.-18.10.1995. Ss. 42-45. Uudenmaan ympäristökeskuksen monisteita nro 1. Helsinki.

Mendoza C. A. & Frind E. O. 1990a: Advective-dispersive transport of dense organic vapors in the unsaturated zone. 1. Model development. Water resources research, vol 26, 3:379-387.

Mendoza C. A. & Frind E. O. 1990b: Advective-dispersive transport of dense organic vapors in the unsaturated zone. 2. Sensitivity analysis. Water resources research, vol 26, 3:388-398.

Mroueh U. 1993: Orgaanisten liuotteiden käyttö Suomessa. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja. Sarja A, nro 156. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsinki.

Nikulainen V. & Kalevi K. (ed.) 1997: Saastuneen maa-alueen tutkimuksen ja kunnostuksen työsuojeluopas. Suomen ympäristökeskus, ympäristöopas 17. Helsinki.

Nikunen E. 1993: Kemikaalien ympäristövaikutusten huomioon ottaminen päätöksenteossa. In Malm J. 1993 (ed): Kemikaalien ympäristövaikutusten arviointi. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja, nro 471. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsinki.

Paatonen E. 1995: Huokoskaasu maaperän ja pohjaveden saastuneisuuden kuvaajana. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 2/95. Helsingin kaupungin ympäristökeskus, Helsinki.

Penttinen R. 2001: Maaperän ja pohjaveden kunnostus. Yleisimpien menetelmien esittely. Suomen ympäristökeskus, nro 227. Julkaistu vain sähköisessä muodossa, [www-dokumentti](http://www.vyh.fi/palvelut/julkaisu/elektro/symon227/symon227.htm) saatavilla osoitteessa <http://www.vyh.fi/palvelut/julkaisu/elektro/symon227/symon227.htm>. 14.9.2001.

Puntti E. 1992: Helsingin maaperän epäpuhtauksista. Ympäristö ja terveys 2-3:178-182.

Puolanne J., Pyy O. & Jeltsch U. (ed.) 1994: Saastuneet maa-alueet ja niiden käsittely Suomessa. Saastuneiden maa-alueiden selvitys- ja kunnostusprojekti; loppuraportti. Ympäristöministeriö, muistio 5/94.

Rantamäki M., Jääskeläinen R. & Tammirinne M. 1999: Geotekniikka. Oy Yliopistokustannus / Otatieto, Helsinki.

Salmelainen J. 1983: Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta. Geoteknisen osaston tiedote 34. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, geotekninen osasto.

Savelainen K. 1992: Saastuneiden maa-alueiden kartoitus Helsingin vesi- ja ympäristöpiirissä. Samase-projekti. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja, nro 363. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsingin vesi- ja ympäristöpiiri, Helsinki.

Schwarzenbach R. P., Gschwend P. M. & Imboden D. M. 1993: Environmental organic chemistry. A Wiley-Interscience Publication, New York.

Setälä A. & Assmuth T. 1990: Kemikaalien käyttäytymiseen maaperässä vaikuttavat fysikaalis-kemialliset ja mikrobiologiset tekijät. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja, nro 273. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsinki.

Sosiaali- ja terveysministeriö 2000. Työterveyslaitoksen www-sivut, <http://www.occuphealth.fi/ttl/projekti/http/>, 23.10.2001.

Suomen geoteknillinen yhdistys Ry 2001: Ympäristögeotekninen näytteenotto-opas. Maa-huokoskaasu- ja pohjavesinäytteet. Luonnos.

Svanström T. & Raudasmaa P. 1998: Pohjavesi Helsingin kaupunkiympäristössä: esiintyminen, käyttö, suojelu ja vaikutus rakentamiseen. Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisen osaston tiedote 78.

Toivikko S. 1994: Teollisuuskemikaalien riskikartoitus Hangon keskustan pohjavesialueella. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja, nro 613. Helsingin vesi- ja ympäristöpiiri, Helsinki.

Tolppanen J. 1989: Saastuneiden maa-alueiden aiheuttaman pohjavesien likaantumisen riskin arviointi. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja, nro 197. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsinki.

Tullihallitus 1993: Ulkomaankauppa 1992. Osa 1. Helsinki.

Tullihallitus 1997: Ulkomaankauppa 1995. Osa 1. Helsinki.

Tullihallitus 2000: Ulkomaankauppa 1998. Osa 1. Helsinki.

Uudenmaan Ympäristökeskus 1998: Ympäristölupapäätös. Päätös nro YS 451, 3.7.1998.

Uudenmaan Ympäristökeskus 1999: Päätös jätehuoltoilmoituksen johdosta. Päätös nro YS 808, 3.12.1999.

Valo R. 1992: Saastuneiden maa-alueiden kunnostus biotekniikalla. Ympäristö ja terveys 2-3:139-143.

Verschueren K. 1983: Handbook of environmental data on organic chemicals. Van Nostrand Reinhold Company, New York.

VYH. Valtion ympäristöhallinnon www-sivut, www.vyh.fi.

VYH 2001a: Haihtuvien orgaanisten liuottimien päästöjä rajoitetaan. Ympäristöhallinnon www-sivut, <http://www.vyh.fi/ajankoht/tiedote/ym/tied2001/ym0171.htm>. Päivitetty 23.5.2001.

VYH 2001b: Happamoituminen ja ilman laatu. Ympäristöhallinnon www-sivut, <http://www.vyh.fi/ympsuo/ilma/happa/kvsop.htm>. Päivitetty 16.1.2001.

VYH 2001c: Suomen kestävä kehityksen indikaattorit. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöt. Ympäristöhallinnon www-sivut, <http://www.vyh.fi/poltavo/keke/indikaat/voc.htm>. Päivitetty 21.5.2001.

WHO 1998: Ohjeavot talousvedelle. WHO:n www-sivut, http://www.who.int/water_sanitation_health/GDWQ/Summary_tables/Tab2b.htm, 21.6.2001.

Yli-Kauppila H. 1994: Puusepäteollisuuden päästöt. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja, nro 503. Vesi- ja ympäristöhallitus, Vaasan vesi- ja ympäristöpiiri, Helsinki.

Ylä-Mononen L. 1993: Kemikaalien ominaisuustietojen tulkinta. Teoksessa Malm J. 1993 (ed): Kemikaalien ympäristövaikutusten arviointi. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja, nro 471. Ss. 32-39. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsinki.

LIITELUETTELO

LIITE 1	Terminologiaa
LIITE 2	Selvityksessä käsiteltyjen liuottimien ominaisuuksia
LIITE 3	Selvityksessä käsiteltyjen liuottimien kemialliset kaavat
LIITE 4	Yhteenveto tutkimustuloksista
LIITE 5	Kuvia Hermannin alueen liuotinpuhdistuksesta
LIITE 6	Ote geoteknisen osaston laatimasta maaperäkartasta GEO 10M, mitta- kaava 1:10 000
LIITE 7	Ote geoteknisen osaston laatimasta kallioperäkartasta GEO 10K, mitta- kaava 1:10 000

LIITE 1 1(3)**TERMINOLOGIAA**

Absorptio	Pidättyminen partikkelin sisään, kolmiulotteista
Adsorptio	Kiinnittyminen maa-aineksen pinnalle, kaksiulotteista
Advectio	Liikkuminen neste- tai kaasufaasin virtauksen mukana liuenneena tai suspensiossa
Aerobinen	Hapen läsnä ollessa tapahtuva
Anaerobinen	Hapettomissa olosuhteissa tapahtuva
Desorptio	Vapautuminen maa-aineksesta, käänteinen adsorptiolle ja absorptiolle
Diffuusio	Spontaani sekoittuminen, aiheutuu pitoisuuseroista
Dispersio	Aiheuttajana mekaaninen sekoittuminen ja molekyylien diffuusio, pyrkii jakamaan kemikaalin tasaisesti. Tapahtuu sekä virtaussuunnassa että virtaussuuntaa vastaan poikittaisessa suunnassa.
Fotolyysi	Hajoaminen valon vaikutuksesta
Hydrolyysi	Reaktio, jossa vesimolekyyli (H ₂ O) tai useimmiten hydroksidi-ioni (OH ⁻) korvaa atomin tai atomiryhmän orgaanisessa molekyylissä.

LIITE 1 2(3)**Höyrinpaine**

Paine, jossa höyry ja puhdas aine (neste tai kiinteä) ovat tasapainotilassa. Kuvaa aineen taipumusta haihtua. Puhdastaan kaasun höyrinpaine maanpinnalla on 1 atm = 1013,25 kPa.

Karsinogeeninen

Syöpää aiheuttava

 K_d

Adsorptiokerroin, adsorboituneen ja liuoksessa olevan faasin konsentraatioiden suhde, $K_d = C_{\text{solid}} / C_{\text{water}}$, kuvaa aineen jakautumista kiinteään aineen ja liuoksen välillä.

 K_{oc}

Orgaaninen hiili-vesi –adsorptiokerroin. Kuvaa kemikaalin jakaantumista kiinteään faasin ja veden välillä eli adsorptiota. Voidaan arvioida K_{ow} :n avulla: korkea K_{ow} ennakoii korkeaa K_{oc} -arvoa. Likimain sama kuin K_d ; $K_{oc} = K_d / f_{oc}$ (f_{oc} on orgaanisen hiilen pitoisuus maassa g / g maata).

 K_{ow}

n-oktanoli-vesi –jakautumiskerroin eli orgaanisessa faasissa ja vesifaasissa olevien yhdisteen konsentraatioiden suhde. Jakautumiskertoimen avulla voidaan arvioida kemikaalin kulkeutumista maaperässä ja kertymistä eliöihin. Ilmaistaan usein logaritmisena, $\log K_{ow}$. $K_{ow} = C_s / C_w$ ($C_{\text{organic phase}} / C_{\text{water phase}}$).

Mineralisoituminen

Orgaanisen yhdisteen täydellinen hajoaminen stabiileiksi epäorgaanisiksi muodoiksi eli hiilidioksidiksi, vedeksi ja suoloiksi.

LIITE 1 3(3)

Mutageeninen	Perimän muutoksia aiheuttava
NAPL	Veteen liukenemattomat yhdisteet (nonaqueous phase liquid) LNAPL Vettä kevyemmät veteen liukenemattomat yhdisteet (light nonaqueous phase liquid) DNAPL Vettä raskaammat veteen liukenemattomat yhdisteet (dense nonaqueous phase liquid)
pH	Vetyionikonsentraatio (oksoniumionikonsentraatio) liuoksessa logaritmisella asteikolla. pH-arvot ovat yleensä välillä 1-14, pH 7 on neutraali. $\text{pH} = -\lg [\text{H}_3\text{O}^+]$
Poolinen molekyyli	Molekyyli, jossa on sisäinen varausepätasapaino eli osa molekyylistä vetää jaettuja sidoselektroneja voimakkaammin puoleensa
Pooliton molekyyli	Molekyyli, joka on sisäisesti varaustasapainossa. Varaukset ovat tasapainossa myös, jos varausjakauma kumoutuu symmetriasyistä.
Puoliintumisaika $t_{1/2}$	Aika, jonka kuluessa aineen määrä on vähentynyt puoleen alkuperäisestä määrästä
Teratogeeninen	Sikiövaurioita aiheuttava

LIITE 2 1(7)

TIETTYJEN ORGAANISTEN LIUOTTIMIEN OMINAISUUDET

Lähteet:

1. Kansainväliset kemikaalikortit 2000; Verschueren et al. 1983
2. WHO 1998; Finlex 461/2000
3. Puolanne et al. 1994
4. Mroueh 1993; Puolanne et al. 1994; Fetter 1999
5. Howard et al. (ed.) 1991: Handbook of environmental biodegradation. Lewis publishers. Viite teoksessa Hänninen 1993.
6. Finlex
7. Sosiaali- ja terveysministeriö 2000
8. Kansainväliset kemikaalikortit 2000
9. Finlex; VYH

LIITE 2 2(7)

Aine	Englanniksi	Kemiallinen kaava (l)	Molekyyli- paino (l) g/mol	Suhteellinen tiheys (l) (vesi=1)	Sulamis- piste (l) °C	Kiehumis- piste (l) °C	Höyrynpaine (l) kPa, 20 °C	Liukoisuus veteen (l) mg/l	oktanoli/vesi jakautumiskerroin (l) log K _{ow}
bentseeni	benzene	C ₆ H ₆	78,1	0,9	6	80	10	1800	2,13
bromoformi eli tribromimetaani	bromoform	CHBr ₃	252,7	2,9	8,3	149-152	0,7	1000	2,38
bromidiklorimetaani	bromodichloromethane	CHBrCl ₂							
dekaani	decane	CH ₃ (CH ₂) ₈ CH ₃	142,3	0,7	-29,7	174,2	0,17	ei liukene	5,98
dibromidiklorimetaani	dibromodichloromethane	CHBr ₂ Cl							
1,4-diklooribentseeni eli BDCB	1,4-dichlorobenzene	C ₆ H ₄ Cl ₂	147	1,2	53	174	1,33 (55°C)	ei liukene	3,37
1,2-dikloorieteeni	1,2-dichloroethane	ClCH ₂ CH ₂ Cl	99	1,25	-35,7	83,5	8,7	8700	1,47
1,1-dikloorieteeni	1,1-dichloroethene (-ethylene)	H ₂ C=CCl ₂	97	1,2	-122	32	66,5	2500	1,32
1,2-dikloorieteeni cis / trans	1,2-dichloroethene (-ethylene)	ClCH=CHCl	96,95	1,28 / 1,26	-81,5 / -49,4	60,3 / 48-48,5	24 / 35,3	huono	
dikloorimetaani eli metyleenikloridi	dichloromethane	CH ₂ Cl ₂	84,9	1,3	-95,1	40	47,4	13000	1,24
etyylbentseeni	ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	106,2	0,867	-95	136,2	0,9	150	3,2
heptaani	heptane	CH ₃ (CH ₂) ₅ CH ₃	100,21	0,68	-90	98	4,8	ei liukene	4,66
hiilitetrakloridi eli tetrakloorimetaani	carbon tetrachloride	CCl ₄	153,8	1,59	-23	76,5	12,2	1000	2,64
klooribentseeni	chlorobenzene	C ₆ H ₅ Cl	112,6	1,1	-45	132	1,17	ei sekoitu	2,92
kloroformi eli trikloorimetaani	chloroform	CHCl ₃	119,4	1,48	-64	62	21,2	8000	1,97

LIITE 2 3(7)

Aine	Raja-arvo talousvedelle (2) µg/l	Ohjearvot raja-arvo maaperälle (samase) (3) mg/kg	Käytökohdat (4)	Hajoamisen ½ aika (5) maaperässä pohjavetessä	Varoitukset (6)
bentseeni	10	0,5 / 25	luotin, puhdistusaineissa, bensiinin ainesosa, kivihiiltuvan sivutuote	16 vk	Helposti syttyvä (F), myrkyllinen (T)
bromoformi eli tribrominetaani	100 mg/l	-	luotin		Myrkyllinen (T), ympäristölle vaarallinen (N)
bromidikloorinetaani	-	-	luotin, palosammuttimissa, mineraalien ja suolojen erottuksessa		
dekaani	-	-			
dibromidikloorinetaani	100 mg/l	-	kemanteollisuudessa		
1,4-diklooribentseeni eli BDCB	300	5 / 50	luotin, varjyksessa, hyönteisnarkyyissa, rasvapoisto, kyllösaaneissa, teolliseen hajupöistoon		Arsyttävä (X _n), ympäristölle vaarallinen (N)
1,2-dikloorinetaani	30 (25.12.2003 3 µg/l)	2 / 25	bensiinin lisäaine, luotin, rasvapoisto, sappua- ja hankautustuotteissa, kemanteollisuus, bensiinin lisäaine, maaleollisuus		
1,1-dikloorieteeni	30	2 / 50	synteettisissä kudussa, linoissa		Eniten helposti syttyvä (F+), haitallinen (X _n)
1,2-dikloorieteeni cis / trans	50	-	luotin, hajusteissa, maaleollisuus, muoviteollisuus, kemanteollisuus, lääketollisuus		Helposti syttyvä (F), haitallinen (X _n)
dikloorinetaani eli metyleenikloridi	20	2 / 20	lääketollisuus, muoviteollisuus, asfaltiasemat, maaleollisuus, kemanteollisuus		Haitallinen (X _n)
etyylibentseeni	300	5 / 50	luotin, bensiinin ainesosa, kivihiiltuvan sivutuote		Helposti syttyvä (F), haitallinen (X _n)
heptaani	-	2 / 10	linojen tuotanto, kumiteollisuus		Helposti syttyvä (F), haitallinen (X _n), ympäristölle vaarallinen (N)
hiilitetrakloridi eli tetrakloorinetaani	2	0,2 / 1	kemanteollisuus, rasvapoisto, jäädytysaine, pornekaasu	1 v	Myrkyllinen (T), ympäristölle vaarallinen (N)
klooribentseeni	300	2 / 30	luotin, kasvinsuojeluaimeissa, kemanteollisuus		Haitallinen (X _n), ympäristölle vaarallinen (N)
kloroformi eli trikloorinetaani	200 mg/l	1 / 10	muoviteollisuus, lääketollisuus, hyönteisnarkyyissa, jäädytysaine, pornekaasu	6 kk	Haitallinen (X _n)

LIITE 2 4(7)

Aine	Terveysvaikutuksia (6)	HTP-arvot (7)	Ympäristövaikutukset (8)	Muuta huomioitavaa (9)
heptaseeni	Syöpäsairauden vaaraa aiheuttava (karsinogeeninen, ryhmä 1)	putkaikanen alhustus 16 mg/l lyhytaikainen alhustus 48 mg/l		
bronoforni eli tribronimetani		8 h 0,5 ppm tai 5,2 mg/m ³ , 15 min 1,5 ppm tai 16 mg/m ³	hataallista vesielölle	
bromidikloorimetani				
dekaani				
dibromidikloorimetani				
1,4-diklooribentseeni eli EDCB		8 h 20 ppm tai 120 mg/m ³ , 15 min 50 ppm tai 300 mg/m ³	myrkyllistä vesielölle	
1,2-dikloorietaani		8 h 10 ppm tai 41 mg/m ³ , 15 min 20 ppm tai 82 mg/m ³	voi aiheuttaa vaaraa ympäristölle, erityshuomio veteen	
1,1-dikloorieteeni			voi aiheuttaa vaaraa ympäristölle, erityshuomio vesielöihin; kertyy ihmisen ravintoketjussa, erityisesti kasveihin	Käyttö kielletty Suomessa vuodesta 1997 myytäväksi tarkoitettussa tuotteissa lukuunottamatta teollisuusprosesseja
1,2-dikloorieteeni cis / trans		8 h 200 ppm tai 800 mg/m ³ , 15 min 250 ppm tai 1000 mg/m ³		
dikloorimetani eli metyleenikloridi	Epäillään aiheuttavan syöpäsairauden vaaraa (karsinogeeninen, ryhmä 3)	8 h 100 ppm tai 350 mg/m ³ , 15 min 250 ppm tai 880 mg/m ³	voi aiheuttaa vaaraa ympäristölle, erityshuomio vesielöihin	
etylibentseeni		8 h 50 ppm tai 220 mg/m ³		
heptaani		8 h 300 ppm tai 1200 mg/m ³ , 15 min 500 ppm tai 2100 mg/m ³	voi aiheuttaa vaaraa ympäristölle, erityshuomio veteen ja ilmaan, kertyy ihmisen ravintoketjussa, erityisesti kaloihin	
hiilitetrakloridi eli tetrakloorimetani	Epäillään aiheuttavan syöpäsairauden vaaraa (karsinogeeninen, ryhmä 3)	8 h 5 ppm tai 32 mg/m ³ , 15 min 10 ppm tai 64 mg/m ³	voi aiheuttaa vaaraa ympäristölle, erityshuomio veteen	Käyttö kielletty Suomessa vuodesta 1995 lukuunottamatta analyysi- ja tuokkimustarkoituksia
klooribentseeni		8 h 10 ppm tai 47 mg/m ³ , 15 min 20 ppm tai 93 mg/m ³	ei saa päästää ympäristöön, pysyvä	
kloreformi eli trikloorimetani	Epäillään aiheuttavan syöpäsairauden vaaraa (karsinogeeninen, ryhmä 3)	8 h 10 ppm tai 50 mg/m ³ , 15 min 20 ppm tai 100 mg/m ³	voi aiheuttaa vaaraa ympäristölle, erityshuomio veteen	Käyttö kielletty Suomessa vuodesta 1997 myytäväksi tarkoitettussa tuotteissa lukuunottamatta teollisuusprosesseja

LIITE 2 5(7)

Aine	Englanniksi	Kemiallinen kaava (l)	Molekyyli- paino (l) g/mol	Sukteen tiheys (l) (vesi=1)	Sulamis- piste (l) °C	Kiehumis- piste (l) °C	Höyrynpaine (l) kPa, 20 °C	Liukoisuus veten (l) mg/l	oktaani/vesi -jakautumiskerroin (l) $\log K_{ow}$
orto-ksyleni eli 1,2- dimetyylibentseeni	o-xylene	$C_6H_4(CH_3)_2$	106,2	0,88	-25	144	0,7	ei liukene	3,12
para-ksyleni eli 1,4- dimetyylibentseeni	p-xylene	$C_6H_4(CH_3)_2$	106,2	0,86	13	138	0,9	ei liukene	3,15
nonaani	nonane	$CH_3(CH_2)_7CH_3$	128,2	0,7	-51	150,8	0,42	7000	5,65
oktaani	octane	$CH_3(CH_2)_6CH_3$	114,22	0,7	-56,8	126	1,33	ei liukene	5,18
styreeni	styrene	$C_6H_5CH=CH_2$	104,1	0,9	-30,6	145	0,7	300	3,2
tetrakloorieteeni eli perikloorieteeni	tetrachloroethene (-ethylene)	$Cl_2C=CCl_2$	165,8	1,6	-22	121	1,9	150	2,6
tolueeni eli metyylibentseeni	toluene	$C_6H_5CH_3$	92,1	0,87	-95	111	2,9	ei liukene	2,69
1,2,4-triklooribentseeni	1,2,4-trichlorobenzene	$C_6H_3Cl_3$	181,5	1,5	17	213	40 (25°C)	ei liukene	4,02
1,1,1-trikloorieteeni eli metyylikloroformi	1,1,1-trichloroethane	CH_3CCl_3	133,4	1,3	-30	74	13,3	ei liukene	2,49
trikloorieteeni	trichloroethene (-ethylene)	$ClCH=CCl_2$	131,4	1,5	-73	87	7,8	1000	2,42
1,3,5-trimetyylibentseeni	1,3,5-trimethylbenzene	$C_6H_3(CH_3)_3$	120,2	0,86	-45	165	0,25	ei liukene	3,42
vinyylikloridi eli kloorieteeni	vinyl chloride	$H_2C=CHCl$	62,5	0,9	-154	-13		ei liukene	0,6

LIITE 2 6(7)

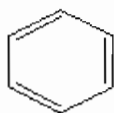
Aine	Raja-arvo vedelle (WHO) (2) µg/l	Ohjeellinen raja-arvo maaperälle (samase) (3) mg/kg	Käyttökohteita (4)	Hajautumisen ½ aika (5) maaperässä pohjavedessä	Varoitukset (6)
orto-kylteeni eli 1,2-dimetyylibentseeni	500	0,5 / 25	laaketeollisuus, kemianteollisuus, maaliteollisuus, metalliteollisuus, tekstiiliteollisuus, suojapinnotteet, lentobensiinissä, luotin, bensinän ainesosa, kivihiiltärvan sivutuote		Haitallinen (X _H)
para-kylteeni eli 1,4-dimetyylibentseeni	500	0,5 / 25	laaketeollisuus, kemianteollisuus, maaliteollisuus, metalliteollisuus, tekstiiliteollisuus, suojapinnotteet, lentobensiinissä, luotin, bensinän ainesosa, kivihiiltärvan sivutuote		Haitallinen (X _H)
nonaani	-	-			
oktaani	-	2 / 10			Helposti syttyvä (F), haitallinen (X _H), ympäristölle vaarallinen (N)
styreeni	20	5 / 100	kemianteollisuus, metalliteollisuus, muoviteollisuus, suojapinnotteet, bensinän ainesosa		Haitallinen (X _H)
tetra-kloorieteeni eli perikloorieteeni	40 (tetra- ja trikloorieteeni yhteensä 10 mg/l 25 12 2003)	0,5 / 4	kemialliset pesulut, metalliteollisuus, rasvanpoisto, luotin, kuivausaine, kemianteollisuus, lämmönsiirtoaine, laaketeollisuus	1 v	Haitallinen (X _H), ympäristölle vaarallinen (N)
tolueni eli metyylibentseeni	700	2 / 120	laaketeollisuus, kemianteollisuus, lämpöjen tuotanto, panolaitokset, maaliteollisuus, polttoaineiden valmistus, torjunta-ainesten valmistus, puuteollisuus, metalliteollisuus, tekstiiliteollisuus, muoviteollisuus, luotin, ohertassa, räjähteissä, puhdistusaineissa, kivihiiltärvan sivutuote	22 vik	Helposti syttyvä (F), haitallinen (X _H)
1,2,4-triklooribentseeni	20	2 / 20	luotin, väriaine, hyönteisimyrkyissä, liukaste, lämmönsiirtoaine		Haitallinen (X _H), ympäristölle vaarallinen (N)
1,1,1-trikloorieteeni eli metyylikloroformi	2000	2 / 25	metalliteollisuus, lämpöjen tuotanto, laaketeollisuus, kasvien suojeleminen, rasvanpoisto, luotin	39 vik	Haitallinen (X _H), ympäristölle vaarallinen (N)
trikloorieteeni	70 (tetra- ja trikloorieteeni yhteensä 10 mg/l 25 12 2003)	2 / 60	metalliteollisuus, rasvanpoisto, maaliteollisuus, kuivapesu, väriaine, kankassa, luotin, jäähdytysaine, lämmönsiirto	1 v	Myrkyllinen (T)
1,3,5-trimetyylibentseeni	-	-			
vinyylikloridi eli kloorieteeni	5 (25 12 2003 0,5 µg/l)	0,1 / 0,1	kemianteollisuus, polymeerit, lämpöjen tuotanto	6 kk	Erittäin helposti syttyvä (F+), myrkyllinen (T)

LIITE 2 7(7)

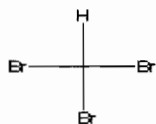
Aine	Terveysvaikutuksia (6)	HIP-arvot (7)	Ympäristövaikutukset (8)	Muuta huomioitavaa (9)
orto-ksyleeni eli 1,2-dimetyylibentseeni		8 h: 100 ppm tai 440 mg/m ³ , 15 min: 150 ppm tai 660 mg/m ³	voi aiheuttaa vaaraa ympäristölle, erityishuomio kaloihin ja äyriäisiin	
para-ksyleeni eli 1,4-dimetyylibentseeni		8 h: 100 ppm tai 440 mg/m ³ , 15 min: 150 ppm tai 660 mg/m ³	voi aiheuttaa vaaraa ympäristölle, erityishuomio kaloihin ja äyriäisiin	
nonaani		8 h: 200 ppm tai 1100 mg/m ³ , 15 min: 250 ppm tai 1300 mg/m ³		
oktaani		8 h: 300 ppm tai 1400 mg/m ³ , 15 min: 380 ppm tai 1800 mg/m ³		
styreeni		8 h: 20 ppm tai 86 mg/m ³ , 15 min: 100 ppm tai 430 mg/m ³		
tetra-kloorieteeni eli perkloorietyleeni	Epäillään aiheuttavan syöpäsairauden vaaraa (karsinogeeninen, ryhmä 3)	8 h: 10 ppm tai 70 mg/m ³	voi aiheuttaa vaaraa ympäristölle, erityishuomio sisäilmaan ja veteen	
tolueeni eli metyylibentseeni		8 h: 50 ppm tai 190 mg/m ³ , 15 min: 100 ppm tai 380 mg/m ³		
1,2,4-triklooribentseeni		8 h: 2 ppm tai 15 mg/m ³ , 15 min: 5 ppm tai 38 mg/m ³	myrkyllistä vesielölle, voi aiheuttaa vaaraa ympäristölle, erityishuomio veteen ja kaloihin	Käyttö kielletty Suomessa vuodesta 1996 hukunottamatta analyysi- ja tutkimustarkoituksia
1,1,1-trikloorieteeni eli metyylikloroformi		8 h: 100 ppm tai 550 mg/m ³ , 15 min: 250 ppm tai 1400 mg/m ³	voi aiheuttaa vaaraa ympäristölle, erityishuomio polijaveteen	
trikloorieteeni	Aiheuttaa syöpäsairauden vaaraa (karsinogeeninen, ryhmä 2), pysyvien vaurioiden vaara (mutageeninen, ryhmä 3)	8 h: 30 ppm tai 160 mg/m ³ , 15 min: 45 ppm tai 250 mg/m ³	voi aiheuttaa vaaraa ympäristölle, erityishuomio vesielöihin	
1,3,5-trimetyylibentseeni		8 h: 20 ppm tai 100 mg/m ³	haitallista vesielölle	
vinyylikloridi eli kloorieteeni	Syöpäsairauden vaaraa aiheuttava (karsinogeeninen, ryhmä 1)	pitkäaikainen altistus 5 ppm, lyhytaikainen altistus 20 ppm		

LIITE 3

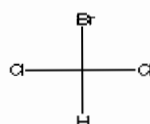
bentseeni



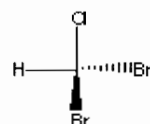
bromoformi



bromidikloorimetaani



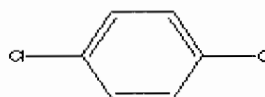
dibromidikloorimetaani



dekaani



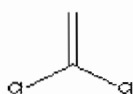
1,4-diklooribentseeni



1,2-dikloorietaani



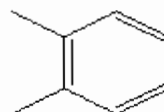
1,1-dikloorieteeni



1,2-dikloorieteeni



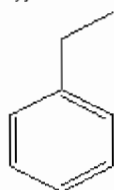
orto-ksyleeni



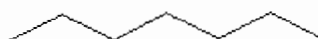
para-ksyleeni



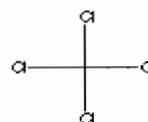
etyylibentseeni



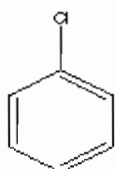
heptaani



hiilitetrakloridi



klooribentseeni



kloroformi



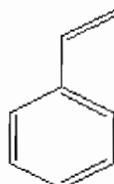
nonaani



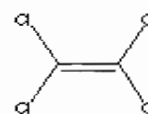
oktaani



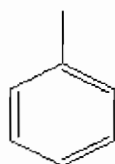
styreeni



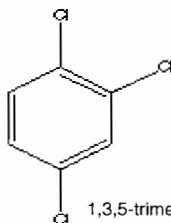
tetrakloorieteeni



tolueeni



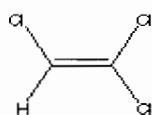
1,2,4-triklooribentseeni



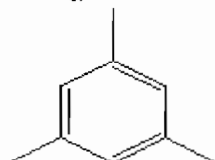
1,1,1-trikloorietaani



trikloorieteeni



1,3,5-trimetyylibentseeni



vinyylikloridi



LIITE 4 1(6)**PITÄJÄNMÄKI, YHTEENVETO TUTKIMUSTULOKSISTA****Maaperänäytteet**

Piste	Hiilivedyt mg/kg	Liuottimet mg/kg
2		5700
3,6,7		1800-8100
10B	1420	
24	2580	
7		8100

Pohjavesinäytteet

Piste	Hiilivedyt mg/l
1	790
17	36
28	1.6

Huokoskaasunäytteet

Piste	
12,13,15	kohonneita pitoisuuksia

TVOC (maaperä + pohjavesi) 11 500 kg

LIITE 4 2(6)

HERMANNI, YHTEENVETO TUTKIMUSTULOKSISTA**Maaperänäytteet**

Piste	TVOC mg/kg
P202	<0.01
P204	0.051...0.23
P205	<0.01...0.17
P212	1...2
P214	merkkejä liuottimista
KK 8	157
KK 13	41
KK 15	340
P209	250 (vapaata liuotinta pisaroina ja voimakas haju)

Pohjavesinäytteet

Piste	Ennen kunnostusta TVOC mg/l	Kunnostuksen aikana TVOC mg/l
P 101	0.9-1.73	
P 102	17.6...30	1.95
P 103	3.2...24.20	12.0 --> 0.7
P 104	0.09...0.2	0.61
P105		0.087
P201		0.15
P202		0.078 --> 0.052
P203		0.006
P207		0.5
P208		0.035
P209		18.2
P210		0.036
P214		0.046 --> 0.042
P215		<0.003
K1	19.2...27.9	0.51
K2		0.35...11.8
K3		1.12

LIITE 4 3(6)

TAPANILA, YHTEENVETO TUTKIMUSTULOKSISTA**Maaperänäytteet**

	1,1-dikloorieteeni mg/kg	trikloorieteeni	tetrakloorieteeni
Pohjoispuolen pesulatontti	2.1		
Kairauspiste tontilla, aiempi tutkimus	kohonneita pit.	kohonneita pit.	kohonneita pit.

Pohjavesinäytteet

	vinyylikloridi yg/l	1,1-dikloorieteeni	1,2-dikloorieteeni
pohjoinen			
ennen pumppausta	7	yli talousv.	yli talousv.
pumppauksen jälkeen	369	yli talousv., kohonnut	yli talousv., kohonnut
etelä			

	trikloorieteeni	tetrakloorieteeni yg/l
pohjoinen		
ennen pumppausta	yli talousv.	311
pumppauksen jälkeen	yli talousv., kohonnut	2038
etelä	alle talousv.	alle talousv.

LIITE 4 4(6)**TALIN URHEILUPUISTO, YHTEENVETO TUTKIMUSTULOKSISTA**

Joulukuu 1998 / tammi-helmikuu 2000

Pisteet 14, 15 ja 16 rakennettu vasta vuonna 1999

Tyhjä ruutu = pitoisuus alle määrittäysrajan

- = ei määritetty

Piste	AOX µg/l	dikloorimetaani µg/l	1,2-dikloorieteeni µg/l	trikloorietaani µg/l	1,2-dikloorietaani µg/l
8	930 / 500		560 / 230		0.53 / 0.39
9	25 / 10	48 / -			
10	1200 / 460		290 / 180	350 / 98	8.18
11	120 / 270	151 / -	34 / 89.90	1.15 / 2.16	/ 1.24
12	17				
13	20		2.82		
talous- veden raja-arvo	40	20	50	2000	30

Piste	bentseeni µg/l	trikloorieteeni µg/l	tetrakloorieteeni µg/l	klooribentseeni µg/l	ksyleenit µg/l
8	0.51 / 0.35	18.70 / 330	52.30 / 114	0.14 / 0.12	
9		0.64	0.55		
10	0.23	430 / 280	97 / 74.70		
11		63 / 190	13.60 / 57.31		/ 0.21
12		0.72			1.15
13		10.07	0.51	0.65	
talous- veden raja-arvo	10	70	40	300	500

LIITE 4 5(6)**ORMUSPELLONTIE, YHTEENVETO TUTKIMUSTULOKSISTA**

Joulukuu 1998 / tammi-helmikuu 2000

Pisteet 14, 15 ja 16 rakennettu vasta vuonna 1999

Tyhjä ruutu = pitoisuus alle määrittäysrajan

- = ei määritetty

Piste	AOX µg/l	dikloorimetaani µg/l	1,2-dikloorieteeni µg/l	1,2-dikloorietaani µg/l
3	33 / 10			
4	25 / 13			
5	100 / 150		89.75 / 158.44	0.31 / 0.48
6	18 / 41	148.00 / -	/ 1.19	
7	110 / 93		10.46 / 2.90	1.22 /
14	440		18.67	2.23
15	31		400.00	0.90
16			0.47	
Talous- veden raja-arvo	40	20	50	30

Piste	trikloorieteeni µg/l	klooribentseeni µg/l	1,4-diklooribentseeni µg/l
3			
4			
5		4.70 / 9.65	0.15 / 0.52
6		/ 9.59	/ 1.52
7	1.10 /	48.50 / 1.20	7.31 / 0.19
14	0.84	80.50	13.26
15	0.31	42.48	5.23
16		0.23	0.13
Talous- veden raja-arvo	70	300	300

Piste	bentseeni µg/l	1,4-ksyleeni µg/l	tolueeni µg/l
3		0.26 / 0.66	
4		/ 0.21	
5	0.50 / 1.09	/ 0.27	
6	/ 0.51	/ 0.60	
7	3.07 /	0.44 / 1.04	0.36 /
14	4.13	0.46	
15	2.16	0.59	
16		0.73	
Talous- veden raja-arvo	10	500	700

LIITE 4 6(6)

TANKOVAINIO, YHTEENVETO TUTKIMUSTULOKSISTA (µg/l)

Piste	1,2-dikloorietaani lokakuu 1993	hiilitetrakloridi lokakuu 1993	tetrakloorieteeni helmikuu 1990 - helmikuu 1994	kloroformi lokakuu 1993
1		0,2	0,1 - 0,4	0,1
2	1,7	0,3	7 - 34,1	0,2
4		0,2	0,2 - 1,6	0,1
5		0,3	22 - 22,4	0,2
6			75	
8			3,2	
9			13	
10		0,3	9 - 20,6	0,1
11		0,5	0,2 - 0,7	0,1
12	0,1	0,2	1,8 - 4,5	0,1
13			1,3	
oja	0,1	0,3	<0,1 - 2,9	0,1
kaivo 1	0,2	0,3	9 - 150	0,3
kaivo 2			16,2 - 110	
kaivo 3			13 - 300	
kaivo 4		0,2	<0,1 - 135	0,1
kaivo 5			0,4	
puro 1			1 - <20	
puro 2			<0,1	
vedenottamo			<0,1 - <20	

Piste	1,1-dikloorieteeni helmikuu 1990 - lokakuu 1993	trikloorieteeni helmikuu - joulukuu 1990	1,1,1-trikloorietaani helmikuu 1990 - helmikuu 1994
1	0	0,4 - 1	0,1 - 0,9
2	20,4	1,2 - 15,5	0,1 - 1,5
4	0,2	0,1 - 1,6	<0,1 - 0,8
5	16,6	2 - 2,1	3,6 - 11,5
6		7	16
8		0,6	0,6
9		0,4	0,5
10	1,3	2 - 13,7	5 - 15,2
11	0,1	1,2 - 3,5	0,2 - 1,1
12	3,4	0,4 - 0,6	0,5 - 0,8
13		<0,1	<0,1
oja	0,2	<0,1 - 0,6	<0,1 - 3,3
kaivo 1	0,2 - <20	2 - 30	12 - 160
kaivo 2	2 - <20	4,1 - 80	11,7 - 80
kaivo 3	5 - <20	2,4 - 80	9,5 - 400
kaivo 4	0 - <20	<0,1 - 24	<0,1 - 102
kaivo 5	1 - <20	<1 - <20	
puro 1		0,1	1 - <20
puro 2	<20	0,5 - <20	<0,1
vedenottamo			0,1 - <20

LIITE 5

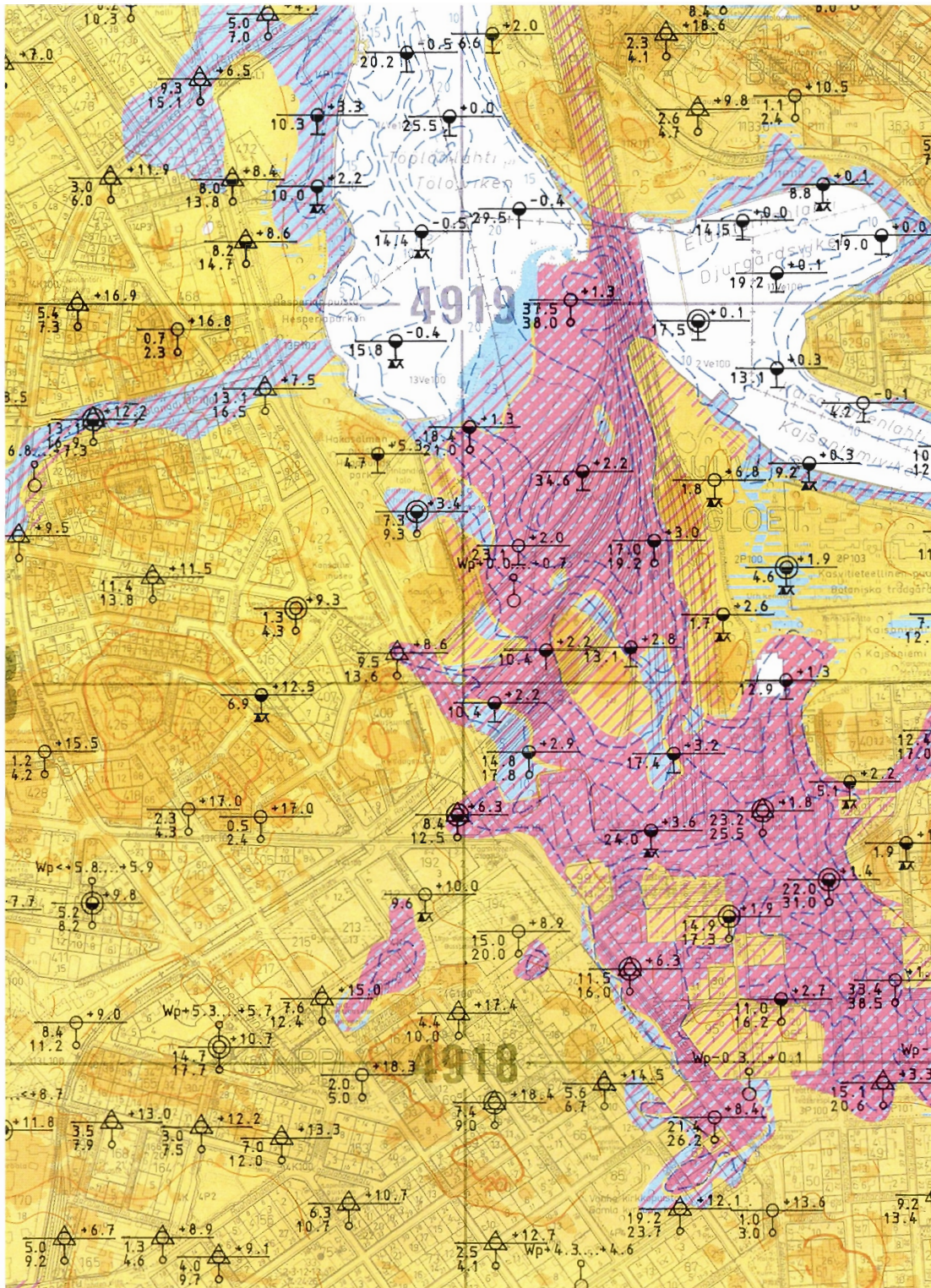


Hermannin liuotinpuhdistus, pumppausputkisto.



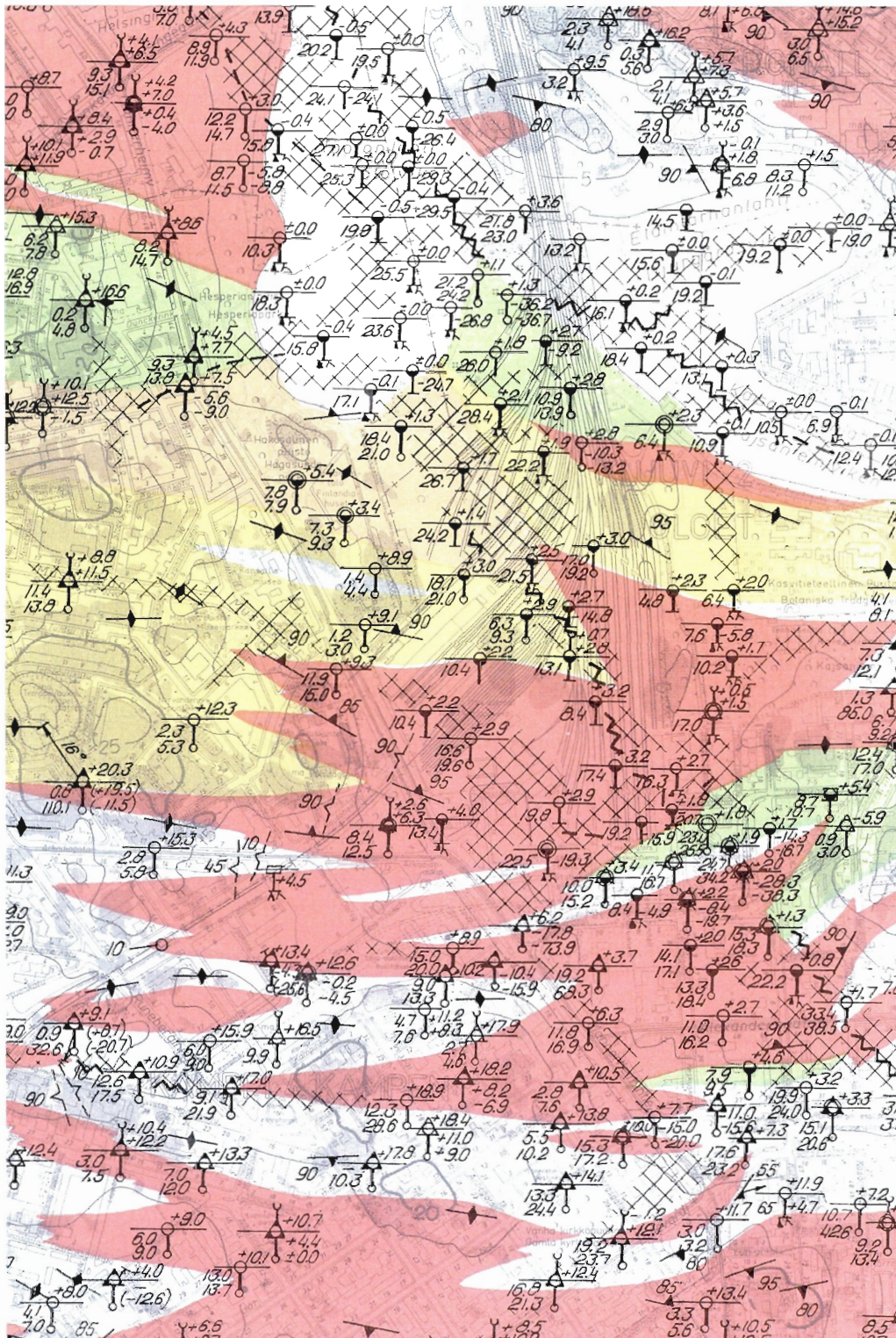
Hermannin liuotinpuhdistus, aktiivihiilisuodatuslaitteisto.

LIITE 6



Ote Helsingin maaperäkartan GEO 10M lehdestä G3

LIITE 7



Ote Helsingin kallioperäkartan GEO 10K lehdestä G3

Julkaisija HELSINGIN KAUPUNKI KIIINTEISTÖVIRASTO GEOTEKNINEN OSASTO PL 2202 00099 HELSINGIN KAUPUNKI PUHELIN (09) 1691, FAX (09) 169 4555 http://www.hel.fi/kv/geo	Julkaisusarja, numero ja julkaisu-aika Geoteknisen osaston julkaisu 84/2001 Joulukuu 2001	
Tekijä(t) Jenni Leminen Pekka Raudasmaa Antti Salla	Projektinumero(t) 6648	Julkaisija HELSINGIN KAUPUNKI KIIINTEISTÖVIRASTO GEOTEKNINEN OSASTO
Nimike ORGAANISET LIUOTTIMET HELSINGIN MAAPERÄSSÄ		
Tiivistelmä Selvityksessä on esitelty orgaanisten liuotinten ominaisuuksia ja käyttäytymistä maaperässä ja pohjavesissä, kuvattu Helsingin geologisia olosuhteita erityisesti aineiden liikkumisen ja pidättymisen kannalta sekä tarkasteltu liuotinhavaintoja Helsingin alueella. Orgaanisilla liuottimilla likaantuneita alueita on löydetty mm. pesuloiden, metalliverstaiden ja graafisen alan laitosten yhteydestä. Liuottimia käytetään Suomessa lähinnä metalliteollisuudessa, kemianteollisuudessa, maali-teollisuudessa sekä kemiallisissa pesuloissa. Useita liuottimia epäillään mutageenisiksi, teratogeenisiksi sekä karsinogeenisiksi. Orgaaniset liuottimet ovat ominaisuuksiltaan heterogeeninen ryhmä aineita, joille on yhteistä hyvä rasvanliuotuskyky sekä voimakas haihtuvuus. Niiden käyttäytyminen ympäristössä vaihtelee ominaisuuksiensa mukaisesti. Lisäksi käyttäytymiseen vaikuttavat maaperän ominaisuudet, kuten lämpötila, vesipitoisuus, läpäisevyys, raekoostumus sekä huokoisuus. Maaperään päästyään liuottimet voivat haihtua maan pintakerroksista ilmakehään, jossa ne ha-joavat tai kulkeutuvat sadeveden mukana takaisin maahan. Maaperässä liuottimet ominaisuuksistaan ja olosuhteista riippuen voivat pidäytyä maaperään, kulkeutua veteen liuenneena tai oma- na neste- tai kaasufaasinaan tai hajota kemiallisesti tai mikrobiologisesti. Kunnostusmenetelminä liuottimilla likaantuneissa kohteissa voidaan käyttää huokoskaasukäsittelyä, termistä desorptiota, maan huuhtelua, pohjaveden pumppausta tai ilmastusta, joissa joudu- taan myös jatkokäsittelyyn kaas- tai nestefaasi. Usein jatkokäsittely suoritetaan aktiivihii- lisuodatuksella. Mikrobiologisilla menetelmillä voidaan likaantunut alue puhdistaa useimmiten il- man jatkokäsittelytarvetta. Helsingin geologiset piirteet vaihtelevat jyrkkäreunaisista kalliomäistä laajoihin savitasankoihin. Maaperäolosuhteet vaihtelevat suuresti sekä pysty- että vaakasuunnassa, etenkin lievealueilla. Pohjaveden virtausolosuhteet voivat olla hyvin mutkikkaat johtuen kerrosten pienipiirteisyydestä ja suurista rakeisuusvaihteluista. Liuotinhavaintoja on Helsingissä tehty useita, mutta kuudessa kohteessa on suuremmista pitoi- suuksista johtuen tehty tarkempia tutkimuksia. Tässä työssä on käsitelty esimerkkitapauksina näitä kuutta kohdetta. Kolmen kohteen, Hermannin, Pitäjänmäen ja Tapanilan osalta on pidädyt- ty yleisluontoiseen olosuhteiden kuvaukseen. Malmin, Talin ja Tankovainion osalta on esitetty johto- päätöksiä ja arvioita sekä liuotinten käyttäytymisestä alueella että kunnostusmahdollisuuksista.		
Avainsanat Orgaaniset liuottimet, Helsinki, maaperägeologia, kunnostusmenetelmät, aineiden kulkeutuminen		
ISSN 1458-2198	ISBN 951-718-838-2	Luokitus (UDK) 628.5
Kieli suomi, engl. tiivistelmä	Sivuja 69 s. +liitteet	

Published by HELSINKI CITY REAL ESTATE DEPARTMENT GEOTECHNICAL DIVISION P.O Box 2202 00099 THE CITY OF HELSINKI FINLAND PHONE +358-9-1691, FAX +358-9-169 4555 http://www.hel.fi/kv/geo		Series title, number and date Geoteknisen osaston julkaisut 84/2001 December 2001	
Author(s) Jenni Leminen Pekka Raudasmaa Antti Salla		Project number(s) 6648	
Commissioned by HELSINKI CITY REAL ESTATE DEPARTMENT GEOTECHNICAL DIVISION			
Title ORGANIC SOLVENTS IN SOIL IN HELSINKI			
Abstract			
Report presents physical and chemical properties of certain organic solvents, describes solvent behaviour in soil and ground water, introduces geological properties in Helsinki especially in solvent behaviour perspective and examines solvent discoveries in six example sites. Typical areas, that have been contaminated with solvents is found particularly associated with laundries, metal workshops and graphic industry. In Finland solvents are used mainly in metal industries, chemical industries, paint industries and chemical laundries. Many solvents are suspected as mutagenic, teratogenic or carcinogenic. Organic solvents are a heterogenic group of chemicals, witch are good degreasing agents and have high volatility. Their behaviour in environment varies according to their characteristics and soil properties, like temperature, moisture content, permeability, grain composition and porosity. After released to soil, organic solvents may vaporize to air from soil surface layer. In air these chemicals break down or dissolve in rain and return to soil. Deeper in soil solvents may adsorb to organic substances, migrate dissolved or in gaseous or liquid phase or transform chemically or microbiologically depending on solvent and soil properties. Restoration methods for soil and ground water contaminated with organic solvents can be used soil vapour extraction, thermal desorption, soil flushing, ground water pump and treat or in situ air sparging, in which all include treatment of separated gas or liquid phase. Typical treatment method for separated phase is activated carbon treatment. With microbiological methods contaminated area can often be restored without need for phase separation or further treatment. Geological features in Helsinki vary from steep rock hills to wide clay plains. Soil properties vary greatly in both directions, vertical and horizontal, particularly in clay fringe areas. Ground water flow conditions can be very complex, because of variability of layers and great changes in grain composition. Organic solvents have been observed in several sites in Helsinki. More detailed analysis has been made in six sites because of large concentrations. These six sites are examined in this study as example sites. Three of these sites, Hermannin, Pitäjänmäki and Tapanila have been only introduced generally. Other three, Malmi, Tali and Tankovainio have been studied more detailed and presented conclusions and estimates concerning migration of solvents and possibilities of restoration.			
Keywords Organic solvents, Helsinki, soil geology, restoration methods, chemical migration			
ISSN 1458-2198		ISBN 951-718-838-2	Class (UDC) 628.5
Language Finnish, English abstract		Pages 69 p. +app.	

GEOTEKNISEN OSASTON JULKAISUT 1(2)

1	Anttikoski, Usko	Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen	1973	•
2	Anttikoski, Usko	Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	1973	•
3	Anttikoski, Usko	Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	1974	•
4	Mäkinen, Reino	Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella	1974	•
5	Saarelmä, Matti	Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys	1974	•
6	Hartikainen, Jorma	Kitka- ja paalujen kantavuus	1976	
7	Pelajä, Jouko	Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen	1977	
8	Raudasmaa, Pekka	Metro- ja tunnelien injektointi	1977	•
9	Anttikoski, Usko	Kalliotunnelien käyttö varastointiin	1977	•
10	Tikkanen, Heikki	Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa	1978	
11	Arkima, Olli	Kluuvien ruuhkeen jäädytys	1978	•
12	Raudasmaa, Pekka	Puiset perustusrakenteet	1979	
13	Havukainen, Jorma	Voimalalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa	1979	
14	Vähäaho, Ilkka	Pehmeiköille perustettavan pientalon painumien laskeminen	1979	•
15	Raudasmaa, Pekka	Pohjavesitarkkailu -80	1980	•
16	Anttikoski, Usko	Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunnelikonferenssin kokemusten perusteella	1979	•
17	Roinisto, Jarmo	Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneliin	1981	
18	Havukainen, Jorma	Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa	1981	•
19	Roinisto, Jarmo	Yhteiskäyttötunnelien teknis-taloudellinen selvitys	1981	
20	Vuola, Pekka	Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta	1981	
21	Havukainen, Jorma & Korhonen, Osmo	Tonttialueiden maarakenteet	1981	
22	Havukainen, Jorma	Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä	1981	
23	Havukainen, Jorma	Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäytöselvitys kunnallistekniikassa	1982	
24	Latvala, Ahti	Rakennusjätteen alustava hyötykäytöselvitys	1982	
25	Havukainen, Jorma & Hämäläinen, Alpo & Sulamäki, Antti	Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttömahdollisuuksista maarakentamisessa	1982	
26	Halkola, Hannu	Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparimäessä	1982	•
27	Paavola, Pertti	Kunnallistekniikan tunnelien louhintakustannus selvitys	1982	
28	Vähäaho, Ilkka	Maarakennusta koskeva mallityöselvitys	1982	•
29	Gulin, Kai	Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa	1982	
30	Halkola, Hannu	Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät	1982	
31	Havukainen, Jorma	Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet	1983	
32	Havukainen, Jorma	Användning av stenkolsaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar	1983	
33	Havukainen, Jorma	The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines	1983	
34	Salmelainen, Juha	Helsingin kallio- ja kivilähtien geologiasta ja kivilähtien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta	1983	
35	Havukainen, Jorma	Matkakertomus kivihiilituhkan ympäristövaikutuskonferenssista	1983	
36	Hytti, Pekka	Esi-injektointin suoritus ja sen huomiointi urakka-asiakirjoissa	1984	
37	Leinonen, Jukka	Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syvävarastossa	1984	
38	Pinnen, Jussi	Kelluvan rantapenkereen rakentaminen	1984	•
39	Latvala, Ahti	Geotekninen kustannustiedosto, Geo-kuti	1984	•
40	Korpela, Jaakko & Schüller, Mikael	Jäykkien liitosojtojen pohjarakennus selvitys (Jäli-selvitys)	1984	
41	Lahtinen, Eeva-Riitta	Maanalaisten tilat ja yhdyskuntarakentaminen (MARASU-tutkimus, väliraportti)	1985	
42	Korpi, Juha	In Situ -kuormituskoe painumien määrittämiseksi	1985	
43	Havukainen, Jorma	Esirakentamisen kehittäminen	1985	
44	Vähäaho, Ilkka	Jäädytysmenetelmän käyttö	1987	
45	Havukainen, Jorma & Hämäläinen, Alpo & Latvala, Ahti	Kivihiilituhkan käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa	1987	•
46	Julkunen, Arto	Geofysiikan tutkimusmenetelmät kalliorakentamisessa	1987	
47	Hutri, Kaisa-Leena	Vuosaaren kivilähtien soveltuvuus asfalttipäällystysiin	1988	
48	Melander, Kari	Punstin-heijarikairaus kairausmenetelmänä	1989	
49	Leppänen, Mikko	Vahvisinkankaiden käyttö Vanhankaupunginlahden ranta-alueen rakentamisessa	1989	
50	Vähäaho, Ilkka & Ryhänen, Hannu	Sulamiskonsolidaation vaikutukset savessa	1989	
51	Vähäaho, Ilkka	Effects of Thaw Consolidation on Geotechnical Properties of Clay	1989	
52	Koskela, Pekka	Routastabiloinnin vaikutus ruoppausmassaan	1989	
53	Saari, Mauri & Korhonen, Osmo	Paalujen dynaaminen koestus PDA-laitteistolla	1990	
54	Saari, Mauri & Volanen, Niilo	Ruoholahden koepaalutus	1990	
55	Yrjänä, Jouni & Korhonen, Osmo	Pystyöjitus Pikku-Huopalahdessa	1991	
56	Niinimäki, Risto & Raudasmaa, Pekka	Viikimäen keskuspuhdistamon rakennusgeologiset kalliotutkimukset	1992	
57	Nieminen, Jarmo & Johansson, Erik & Holopainen, Pekka	Viikimäen keskuspuhdistamon louhinnan aikainen kalliomekaaninen seuranta	1992	
58	Ahola, Jukka & Viitala, Raimo	Lujitus- ja tiivistysmäärät Helsingin pientunnelissa	1992	
59	Ravea, Timmo & Korhonen, Osmo	Helsingin tulvapaidon rakentamisen edellytykset	1992	
60	Taipale, Hannu & Korhonen, Osmo	Paalutustarinan arviointi kirjallisuuden ja mittausten perusteella	1992	
61	Karlstedt, Paul & Halkola, Hannu	Ylijäämäsavien massastabilointi	1993	

GEOTEKNISEN OSASTON JULKAISUT 2(2)

62	<i>Leiskallio, Antti & Lehtonen, Jouko</i>	Maankäytön geotekninen suunnittelu	1993
63	<i>Anttikoski, Usko & Kumar, Seppo & Saarelainen, Seppo</i>	Kalliokaivanto jätehuollossa (esiraportti)	1993
64	<i>Rekonen, Rita & Halkola, Hannu</i>	Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla	1994
65	<i>Ulmala, Ola & Halkola, Hannu</i>	Puristin-porakonekairaus	1994
66	<i>Havukainen, Jorma</i>	Katsaus ympäristötekniikkaan kansainvälisen kongressin valossa (matkakertomus)	1995
67	<i>Korkeakoski, Pasi & Lehtonen, Jouko</i>	Asuinrakennusten tontti- ja pohjarakennuskustannukset	1996
68	<i>Puumalainen Niina & Havukainen Jorma</i>	Vakuumikonsoidointikoe Helsingin Torpparinmäessä	1996
69	<i>Mehtälä, Jani & Korhonen, Osmo</i>	Puotilan metroaseman pohjavesivaikutusten arviointi numeerisilla menetelmillä	1998
70	<i>Nieminen, Jarmo & Anttikoski, Usko</i>	EU:n rahoitustuki Helsingin kaupungin tutkimustoiminnassa	1996
71	<i>Junnila, Antti & Lehtonen, Jouko</i>	Geotekninen kustannustiedosto, Geokuti 96	1996
72	<i>Wegelius, Arto & Viitala, Raimo</i>	Kallioluokitusmenetelmien käyttö tunnelien lujituksessa	1996
73	<i>Vähäaho, Ilkka</i>	Savien stabilointi eri sideaineilla, kentäkokeiden tulokset	1996
74	<i>Rantala, Kalle & Halkola, Hannu</i>	Paalun kantavuuden arviointi puristin-heijarikairalla	1997
75	<i>Wegelius, Arto & Holopainen, Pekka</i>	Paisuvat kalliosavet	1997
76	<i>Leivo, Pekka & Halkola, Hannu</i>	Maa- ja kallioperätietojen tulkinta porakonekairauksen rekisteröintituloksista	1998
77	<i>Nauska, Jani & Havukainen, Jorma</i>	Esirakentaminen 1998	1998
78	<i>Svanström, Terhi & Raudasmaa, Pekka</i>	Pohjavesi Helsingin kaupunkiympäristössä: esiintyminen, käyttö, suojele ja vaikutus rakentamiseen	1998
79	<i>Pitkänen, Juha & Vähäaho, Ilkka & Raudasmaa, Pekka</i>	Puupaalujen rakenteellisen kantokyvyn tarkastaminen	1999
80	<i>Mikkola, Jannis & Viitala, Raimo</i>	Pitkien vesitunnelien sortumat ja lujitus	1999
81	<i>Mäkelä, Harri & Höynälä Harri & Halkola Hannu & Kettunen An</i>	Viikin savikatu	2000
82	<i>Mäkelä, Harri & Höynälä Harri & Halkola Hannu & Kettunen An</i>	Massastabiloitujen ylijäämasavien käyttö maarakentamisessa, suunnitteluohjeet, työselitykset ja laatuvaatimukset	2000
83	<i>Savolainen Markku & Hannu Halkola</i>	Painuma-, sivusiirtymä- ja huokospainemittausten tarkkuus	2001
84	<i>Leminen Jenni & Raudasmaa Pekka & Antti Salla</i>	Orgaaniset liuottimet Helsingin maaperässä	2001

GEO 10 K	Kallioperäkarta - Berggrundskarta 1:10.000, Helsinki - Helsingfors	1978
GEO 10 M	Maaperäkarta - Jordmånskarta - Geotechnical Atlas of Soil Deposits 1:10 000, Helsinki - Helsin	1989

*) painos loppuunmyyty

Helsingin kaupunki
Kiinteistövirasto
geotekninen osasto
PL 2202
00099 HELSINGIN KAUPUNKI

Käyntiosoite Malmin asematie 3 A, Helsinki 70
Vaihe (09) 1691, asiakaspalvelu (09) 169 4559, fax (09) 169 4555
Email geo@hel.fi
http://www.hel.fi/kv/geo