



Meija Korpela

# Kloorattujen liuottimien kulkeutuminen maaperästä sisäilmaan

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

30.5.2023

# Tiivistelmä

Tekijä:	Meija Korpela
Otsikko:	Kloorattujen liuottimien kulkeutuminen maaperästä sisäilmaan
Sivumäärä:	63 sivua + 4 liitettä
Aika:	30.5.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine:	Ympäristötekniikka
Ohjaajat:	Johtava asiantuntija Jukka Tengvall Lehtori Miika Kuivikko

---

Tässä työssä tutkittiin, kuinka valitut haihtuvat klooratut liuottimet kulkeutuvat pilaantuneesta maaperästä rakennusten sisäilmaan koeolosuhteissa. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet ovat yleisiä pilaantuneen maaperän haitta-aineita, joihin myös klooratut liuottimet kuuluvat.

Tutkimusta varten on rakennettu testikontti vanhasta merikontista, ja se on muutettu vastaamaan ryömintätilaisen rakennuksen alapohjaratkaisuja. Testikontti on sijoitettu alueelle, jossa on aiemmissa kartoituksissa havaittu suuria pitoisuuksia kloorattuja liuottimia. Tutkimukset suoritettiin huokosilmamittauksilla aktiivipumppausmenetelmällä.

Tutkimuksen aikana ei saatu merkittäviä määriä kloorattuja eteenejä kertymään koekontin alle rakennettuun ryömintätilaan, vaikka maaperästä pitoisuuksia saatiin mitattua. Tämän vuoksi myös sisätilaan kulkeutuneet pitoisuudet jäivät hyvin pieniksi. Maaperästä ryömintätilaan suhteellinen kloorattujen liuottimien kulkeutumisosuus oli noin prosentti, ja vastaavasti ryömintätilasta sisätiloihin myös kaksi prosenttia. Maaperästä sisätilaan kulkeutumisen suhteellinen osuus oli vain noin promille.

Tutkimusta voidaan jatkaa muuttamalla koeolosuhteita ja tutkia, miten muuttuvat olosuhteet vaikuttavat pitoisuuksiin. Tutkimuksen lopullisena tarkoituksena on laatia päivitetty laskentakaava sisäilmakulkeutumiseen liittyviin kaavoihin. Työn toimeksiantajana toimi Ramboll Finland Oy.

Avainsanat: pilaantunut maaperä, haitta-aineiden kulkeutuminen, klooratut eteenit, VOC-yhdisteet, PCE, TCE, DCE, VC

## Abstract

Author:	Meija Korpela
Title:	Vapor Intrusion of Chlorinated Solvents from Soil to Indoor Air
Number of Pages:	63 pages + 4 appendices
Date:	30 May 2023
Degree:	Bachelor of Engineering
Degree Programme:	Energy and Environmental Engineering
Professional Major:	Environmental Engineering
Supervisors:	Jukka Tengvall, Leading Consultant Miika Kuivikko, Senior Lecturer

---

The aim of this thesis was to study how designated volatile chlorinated solvents pass from contaminated soil to indoor air under test conditions. Volatile organic compounds, including chlorinated solvents, appear as common contaminants on sites with contaminated soil.

For practical study of the subject a regular shipping container has been modified to simulate an ordinary building with crawl space as base floor. This test container is located on site which has been earlier identified contaminated with chlorinated solvents in high concentrations. Examination was conducted as active pore air sampling.

During the study only minor concentrations of chlorinated ethenes were accumulated in the crawl space although concentrations in soil samples were adequate. Therefore, the concentrations measured in the indoor air were negligible. Relative intrusion concentration of contaminants from soil to crawl space was around one percent, while the value was circa two percent from crawl space to indoor air. Relative intrusion from soil to indoor air was calculated to be around one per mille.

The study can be continued by altering test conditions and recording the changes of the measured concentrations. The final scope of the study is to determine an updated formula for calculations considering vapor intrusion. The subject of the thesis was assigned by Ramboll Finland Oy.

Keywords:	contaminated soil, vapor intrusion, chlorinated ethylenes, volatile organic compounds, PCE, TCE, DCE, VC
-----------	--

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Teoria	2
2.1	Lainsäädäntö	3
2.1.1	Jätelaki, 646/2011	3
2.1.2	Ympäristönsuojelulaki, 527/2014	4
2.1.3	Pilaantuneita maa-alueita koskeva asetus (PIMA-asetus), VNa 214/2007	5
2.1.4	VOC-direktiivi, 2004/42/EY	5
2.1.5	Rakennusmateriaalien päästöluokitus M1	6
2.1.6	Asumisterveysasetus, STM 545/2015	6
2.1.7	Asumisterveysohje, STM 2003	7
2.1.8	REACH-asetus, EC 1907/2006	7
2.1.9	Haitallisiksi tunnetut pitoisuusarvot eli HTP-arvot 2020	8
2.2	Klooratut liuottimet	8
2.2.1	Tetrakloorieteeni	10
2.2.2	Trikloorieteeni	13
2.2.3	Dikloorieteenit	16
2.2.4	Vinyylikloridi	18
2.3	Yhdisteiden metabolia, ohjearvot ja fysikaaliset ominaisuudet	20
2.3.1	Yhdisteiden kynnys- ja ohjearvot maaperässä	21
2.3.2	Fysikaaliset ominaisuudet	22
2.4	Haitta-aineiden kulkeutuminen maaperästä sisäilmaan	24
2.4.1	Pidähtyminen, liukeneminen ja haihtuminen	25
2.4.2	Advektio, dispersio ja diffuusio	26
2.4.3	Luontainen biohajoaminen	27
2.4.4	Kulkeutuminen huokoskaasussa ja sisäilmaan	27
2.5	Rakennusten alapohjat	30
2.5.1	Maanvastainen alapohja	30
2.5.2	Ryömintätilallinen alapohja	32
3	Hanasaaren alue	33
3.1	Alueen nykytila ja aiemmin suoritettut tutkimukset	34

3.2	Mahdolliset päästölähteet	35
4	Testikontti	38
4.1	Kontin rakennetekninen tarkastelu	39
4.2	Sisätilat	40
4.3	Alapohja	42
4.4	LVI-tekniikka	43
4.5	Reaaliaikaiset mittausanturit	43
5	Testiolosuhteet	44
6	Näytteenotto	45
7	Tulokset	47
7.1	Huokosilmapitoisuudet maaperässä	47
7.2	Pitoisuudet ryömintätilassa	49
8	Tulosten käsittely	50
9	Johtopäätökset	54
	Lähteet	56
	Liitteet	
	Liite 1: Laskukaavat	
	Liite 2: Mahdolliset päästölähteet	
	Liite 3: Kontin tekniset piirrustukset	
	Liite 4: Mittaustulokset	

## Lyhenteet

DCE:	Dikloorieteeni tai dikloorietyleeni. Alifaattinen kloorattu hiilivety, jossa kaksi klooriatomia.
DNAPL:	<i>Dense non-aqueous phase liquid</i> . Vettä tiheämpi, veteen hyvin heikosti liukeneva nestemäinen yhdiste.
ELY:	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristö(keskus).
HI:	Huokosilma. Maaperän huokosiin kertynyt ilma.
LOAEL:	<i>Lowest observed adverse effect level</i> . Yhdisteen alin havaittu pitoisuus, joka aiheuttaa haittavaikutuksia eliössä.
OV:	Orsivesi. Pohjavesiesiintymän yläpuolella oleva pohjavesikerros, jonka erottaa tiivis erottava maakerros, kuten savi.
PCE:	Perkloorieteeni eli tetrakloorieteeni tai -etyleeni. Alifaattinen kloorattu hiilivety, jossa neljä klooriatomia.
PIMA:	Pilaantuneet maa-alueet, maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arviointi ja niihin liittyvät toimenpiteet.
TCA:	<i>Tolerable Concentration in Air</i> . Aineelle määritetty ylin pitoisuusarvo, joka hengitysilmassa saa olla, jotta se voidaan todeta terveys-turvalliseksi.
TCE:	Trikloorieteeni tai trikloorietyleeni. Alifaattinen kloorattu hiilivety, jossa kolme klooriatomia.
TDI:	<i>Tolerable Daily Intake</i> . Ilmassa, ruoassa tai juomavedessä arvioitu aineen määrä, jolla ei uskota olevan terveysvaikutuksia elinikäisellä altistumisajalla.

- TVOC: *Total Volatile Organic Compound*, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus.
- VC: Vinyylikloridi eli monokloorieteeni. Alifaattinen kloorattu hiilivety, jossa yksi klooriatomi.
- VOC: *Volatile Organic Compound*, haihtuva orgaaninen yhdiste. Kaasumainen hiilivety. Yhdisteitä on useita, ja ne ovat merkittäviä sisäilmaongelmien aiheuttajia.

## 1 Johdanto

Helsingin Hanasaaren voimalaitostoiminta loppui 1.4.2023. Tämän jälkeen aluetta on kaavailtu asuin- ja liiketilakäyttöön. Pitkän teollisuushistorian vuoksi maaperä alueella on monipilaantunutta, ja maaperän puhdistus on alueen luonteesta vuoksi hankalaa.

Kloorattuja liuottimia on käytetty pitkän aikaa teollisuuskäytössä, ja niiden pysyvyyden vuoksi ne voivat kulkeutua pitkiäkin matkoja pohja- ja orsiveden mukana muille alueille. Maaperästä ne voivat kulkeutua rakenteiden läpi huoneilmaan. Osan näistä yhdisteistä on todettu haitallisiksi, jopa karsinogeeniksi eli syöpää aiheuttaviksi.

Työssä tutkitaan varta vasten tätä tarkoitusta varten rakennetun koekontin avulla, kuinka klooratut eteenit siirtyvät sisäilmaan maaperästä, kun alapohjarakenteena on tuulettuva ryömintätilallinen alapohja. Työhön on rajattu tutkittaviksi yhdisteiksi klooratut eteenit eli tetrakloori-, trikloori- ja dikloorieteenit sekä vinyylikloridi, sillä näitä yhdisteitä on todettu alueella aikaisemmin tehdyissä vesi- ja huokosilmatutkimuksissa merkittäviä pitoisuuksia. Nämä ovat myös yleisiä haitta-aineita useissa vastaavissa pilaantuneissa kohteissa, joten tutkiminen on hyödyllistä pitkällä tähtäimellä.

Hankkeessa kokonaisuudessaan tutkitaan laajasti haihtuvia orgaanisia yhdisteitä eli VOC-yhdisteitä (*volatile organic compounds*). Tavoitteena on päivittää vanhat haitta-aineiden kulkeutumiseen liittyvät laskentakaavat nykypäivän rakennuskannalle sopivaksi. Vanhat laskentamallit perustuvat aiemmin yleisesti käytettyyn maanvaraiseen alapohjaan, ja muutenkin nykypäivän rakennukset poikkeavat vanhoista niin rakenteellisesti kuin teknisiltä järjestelmiltään. Työ on tehty Ramboll Finland Oy:lle.



## 2 Teoria

VOC-yhdisteet ovat huoneilmassa haihtuvia hiilivetyjä. Yhdisteitä on useita erilaisia, ja jo yksittäinen VOC-yhdiste voi aiheuttaa ongelmia terveydelle, kun pitoisuus on riittävän korkea. Useamman yhdisteen yhteisvaikutusten epäillään olevan yksittäistä yhdistettä haitallisempia. [1.] Esimerkiksi bensiini, kuivapesuaineet sekä rasvanpoistoon käytetyt liuottimet ovat tällaisia yhdisteitä sisältäviä tuotteita. VOC-yhdisteitä esiintyy sekä maaperässä että pohjavedessä muun muassa kemikaalivuotojen ja -päästöjen seurauksena. Ympäristössä vapaana reagoivat VOC-yhdisteet voivat kulkeutua sisäilmaan erilaisten vuotokohtien, kuten perustuksissa ja alapohjissa olevien halkeamien ja rakojen kautta. VOC-yhdisteillä pilaantuneista alueista sisäilmaan haitta-aineiden haihtumiseen vaikuttavia tekijöitä on useita. Muun muassa haitta-aineidenpitoisuudet, maaperälaji, pohjaveden korkeus, rakennuksen rakenne sekä perustusten ja alapohjan kunto sekä muut maanalaiset rakennelmat voivat vaikuttaa yhdisteiden haihtumiseen maaperästä sisäilmaan. [2.]

VOC-yhdisteitä voi haihtua sisäilmaan rakennus- ja sisustusmateriaaleista, kosmetiikka- ja pesuaineista sekä pakokaasuista. Huoneilman VOC-pitoisuudet riippuvatkin paljon rakennuksen iästä, yhdisteitä sisältävistä materiaaleista, ympärivästä liikenteestä ja teollisuudesta, ilmanvaihdon tehokkuudesta, huoneen lämpötila- ja kosteusolosuhteista sekä tilassa käytetyistä kemikaaleista. Materiaalien primääriemissiot ovat korkeimmillaan uusissa taloissa, kun materiaalit ovat vielä tuoreita, mutta tyypillisesti puolesta vuodessa pitoisuudet ovat laskeutuneet normaalitasolle. Toisaalta vanhojen materiaalien emissiot voivat kasvaa lämmön vaikutuksesta tai kosteusvaurioiden myötä. Varsinkin uudisrakentamisessa muovimaton huolimatonta asentaminen voi olla merkittävä VOC-päästöjen lähde. Juurivaletun betonin kosteus ja materiaalille ominainen emäksisyys yhdessä voivat aiheuttaa muovimaton ja sen liiman kemikaalien hajoamisen haihtuviksi haitta-aineiksi. Tehokas tuuletus ja ilmanvaihto laskevat sisäilman VOC-pitoisuuksia merkittävästi uusissa materiaaleissa. Vanhojen materiaalien aiheuttamaan pitoisuuksien nousuun auttaa pääasiassa vain vaurioituneiden materiaalien vaihtaminen ja poistaminen. [1.] Jo lyhytaikainen altistuminen VOC-

yhdisteille voi aiheuttaa ärsytystä silmiin ja hengityselimiin, aiheuttaen päänsärkyä ja väsymystä. Pitkäaikainen altistuminen pienillekin pitoisuuksille voi pahimmassa tapauksessa johtaa syöpään tai muihin sairauksiin. [2.]

Hyvälle sisäilmanlaadulle on annettu VOC-yhdisteiden viitearvoja eri tahoilta. Työterveyslaitos TTL:n asettama suositeltu VOC-yhdisteiden kokonaispitoisuus, eli TVOC-arvo, koneellisesti ilmastoidussa toimistoympäristön sisäilmassa on  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , tyypillisesti pitoisuudet ovat  $50\text{--}250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . STM:n asumisterveysoppaassa, jonka ohjeistus on tarkoitettu muille kuin teollisuuskiinteistöille, viitteelliseksi ohjearvoksi on annettu  $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja tavanomaiseksi pitoisuudeksi kerrotaan  $200\text{--}300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Myös hengitysilman sallituille enimmäispitoisuuksille on annettu raja-arvoja, joilla voidaan paremmin päästä kiinni yhdisteiden aiheuttamiin terveyshaittoihin. Näitä arvoja voidaan kuvata TDI- (tolerable daily intake) ja TCA (tolerable concentration in air) -arvoilla, joista ensimmäinen esittää hyväksyttävää kokonaispäiväannosta pitkäaikaisaltistuksessa ja jälkimmäinen hyväksyttävää hengitysilman pitoisuutta pitkäaikaisaltistuksessa. Molempia raja-arvotyyppisiä on tärkeää tarkastella sisäilmaongelmien tutkimuksessa. [3, s. 95.]

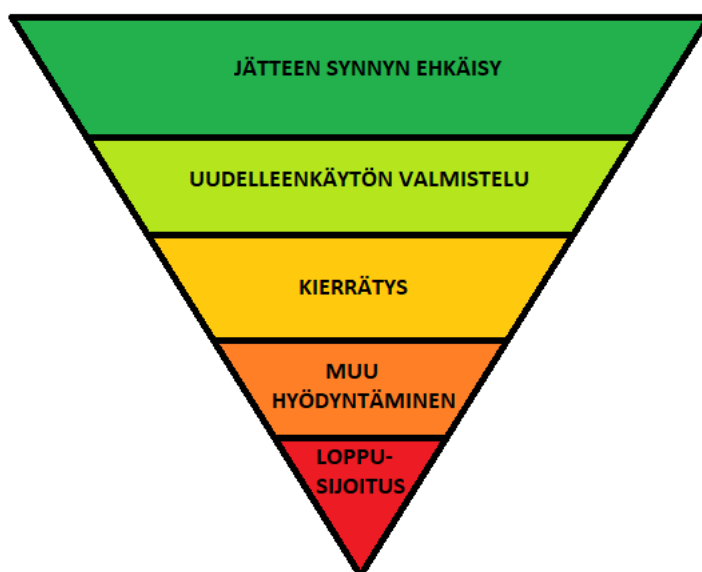
## 2.1 Lainsäädäntö

Eri kemikaaleja on käytetty vuosikymmeniä erinäisiin tarkoituksiin. Kun tutkimusta niiden haitallisuudesta on tehty ja tietoa kertynyt, niiden käyttöön on voitu puuttua ja tutkia korvaavia vaihtoehtoja. Haitta-aineiden käytön seuraukset näkyvät maaperässä useita vuosia, jolloin niiden haitalliset vaikutukset jatkossa on tarpeellista kartoittaa ja minimoida lain nojalla. Haitallisten yhdisteiden käyttöä rajoitetaan laajasti myös esimerkiksi lainsäädännöllä ja EU-direktiiveillä.

### 2.1.1 Jätelaki, 646/2011

Jätelain mukaan kaikessa toiminnassa tulee noudattaa etusijajärjestystä, joka tarkoittaa syntyvän jätteen haitallisuuden ja määrän minimoimiseen pyrkimistä. Syntynyt jäte tulee pyrkiä joko uudelleenkäyttämään tai muuten kierrättämään, tai hyödyntämään muulla tavalla, mikäli ensin mainitut eivät ole mahdollisia.

Viimeinen vaihtoehto on jätteen loppukäsittely. [4.] Kuvassa 1 tämä jätehierarkia on kuvattu kolmiona.



Kuva 1. Jätteen etusijajärjestys kuvattu kolmiona.

Jätelain pykälässä 9 veloitetaan tuotteen valmistaja huolehtimaan, että valmistusprosessissa vältetään haitallisten raaka-aineiden käyttöä sekä niiden korvaamista vähemmän haitallisilla aineilla. Valmistuksessa tulee käyttää myös mahdollisimman vähän raaka-aineita, ja syntyvien jätteiden tulee olla mahdollisimman vähän haitallista ympäristölle tai terveydelle. Näiden toimien laiminlyönti voi johtaa tuotteen valmistuksen, viennin ja käytön kieltämiseen tai rajoituksiin. [4.]

Jätelain pykälä 13 kieltää jätteen hylkäämisen ja hallitsemattoman käsittelyn. Itse jätteestä eikä jätehuollosta tai siihen liittyvistä toimista ei saa aiheutua terveydellistä haittaa tai pilaantumista aiheuttavia päästöjä ympäristöön. [4.]

### 2.1.2 Ympäristönsuojelulaki, 527/2014

Vuonna 2014 voimaanastuneen ympäristönsuojelulain tarkoitus on ehkäistä ja estää ympäristön pilaantumista sekä vähentää päästöjä ja jätteitä. Tähän

tähtäävien toimien myötä voidaan turvata terveellinen, kestävä ja monimuotoinen ympäristö sekä luonnonvarojen riittävyys. Laki velvoittaa toiminnanharjoittajaa olemaan selvillä oman toimintansa riskeistä sekä vaikutuksista ympäristöön ja niiden minimoinnista. Toiminta tulee järjestää niin, että ympäristön pilaantuminen sekä aiheutuvat päästöt voidaan ennaltaehkäistä tai vähintäänkin minimoida. [5.]

### 2.1.3 Pilaantuneita maa-alueita koskeva asetus (PIMA-asetus), VNa 214/2007

Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista eli niin sanottu PIMA-asetus 214/2007 määrittelee pilaantuneeksi epäillyn maaperän tilan arvioinnin sisältävän selvitykset alueella vaikuttavista haitallisten aineiden ominaisuuksista, pitoisuuksista ja sijainnista, selvityksen alueen maaperä- ja pohjavesiolosuhteista sekä nykyisistä ja suunnitelluista käyttötarkoituksista. Myös mahdollisuudet altistua haitta-aineille sekä sen terveys- sekä ympäristövaikutukset tulee arvioida. Asetukseen on liitetty yleisille maaperän haitta-aineille säädetyt kynnysarvot, ja yhdenkin kynnysarvon ylittyessä maaperässä arviointi tulee tehdä. Liitteessä on myös esitetty ohjearvot, joiden perusteella maaperää voidaan pitää pilaantuneena. Pilaantuneisuuden arviointi tulee tehdä edustavilla näytteenotoilla kyseisestä matriisista ja näiden tutkimusten tulee perustua luotettaviin menetelmiin. [6.]

### 2.1.4 VOC-direktiivi, 2004/42/EY

VOC-direktiivin eli niin sanotun "maalidirektiivin" tarkoitus on rajoittaa haihtuvien orgaanisten yhdisteiden käyttöä tietyissä maaleissa ja lakoissa sekä ajoneuvojen korjausmaalaustuotteista aiheutuvia haitallisia päästöjä. Direktiivi täydentää kemiallisten aineiden ja valmisteiden merkitsemistä koskevaa asetusta (EY) No 1272:2008. Direktiivin nojalla EU:n jäsenvaltioilla on velvollisuus varmistaa niiden markkinoilla olevien tuotteiden VOC-pitoisuuksien alittavan direktiivissä mainitut raja-arvot. [7.]

### 2.1.5 Rakennusmateriaalien päästöluokitus M1

Rakennusmateriaalien M1-luokitus on vuodelta 1996 oleva päästöluokitus, jonka tavoitteena on edistää vähäpäästöisempien rakennusmateriaalien käyttöä terveen sisäilman puolesta. Se on osa Sisäilmayhdistys ry:n kehittämää luokituskokonaisuutta. Sillä vaikutetaan yleisten työ- ja asuintiloissa käytettävien materiaalien ja kalusteiden VOC-yhdisteiden, formaldehydin sekä ammoniakin emissiopitoisuuksiin asettamalla niille raja-arvot. Luokiteltaviin tuotteisiin kuuluvat rakennusmateriaalit, kiintokalusteet, huonekalut sekä päällystetyt toimistotuolit. [8; 9.]

Luokitus on yrityksille vapaaehtoinen, mutta muun muassa Suomen Rakennustajaliitto RAKLI sekä Suomen Arkkitehtiliitto SAFA suosittelevat luokitusta jäsenilleen. Tuotteiden valmistajat tai maahantuojaat voivat hakea päästöluokitusta Suomen Rakennustietosäätiön luokitustyöryhmältä. Luokitukset tehdään erikseen kaikille yrityksille sekä tuotteille, ja luokitellut tuotteet ovat löydettävissä yrityskohtaisesti erillisestä hakupalvelusta. [8]

### 2.1.6 Asumisterveysasetus, STM 545/2015

Sosiaali- ja terveysministeriön (STM) asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista vaatii, että asunnon erilaisista terveyshaitoista tehtävissä arvioinneissa tulee huomioida kokonaisuus, eli altistumisen todennäköisyys, toistuvuus ja kesto, vallitsevat olosuhteet sekä mahdollisuudet välttää tai poistaa altistumisriski ja tämän aiheuttamat seuraukset. Asetuksen mukaan ilmankosteus huoneessa ei saa aiheuttaa rakenteisiin tai laitteisiin mikrobikasvustoa ja asunnon huoneiden lämpötilojen tulee vastata asetuksessa mainittuja toimenpiderajoja. Ilmanvaihdon tulee olla riittävän hyvää ja tehokasta rakennuksen käyttöön nähden, eikä hiilidioksidipitoisuus saa olla liian korkea. Ulkoilmavirran tulee virrata vähintään  $0,35 \text{ dm}^3/\text{s}$  käytön aikana kaikissa asuinhuoneissa, ja koulua vastaavissa oleskelutiloissa vähintään  $6 \text{ dm}^3/\text{s}$  jokaista tilassa olevaa henkilöä kohden. Tolueenivasteella lasketuksi TVOC-pitoisuuden (*total volatile organic compounds*,

VOC-yhdisteiden kokonaispitoisuus) toimenpiderajaksi on asetuksessa ilmoitettu  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja vastaavasti yksittäisen VOC-yhdisteen rajaksi  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tolu-eenivasteella tarkoitetaan yhdisteen pitoisuutta, joka on laskettu vertaamalla tutkittavan yhdisteen detektorivastetta toluenin detektorivasteeseen. [10.]

### 2.1.7 Asumisterveysohje, STM 2003

Asumisterveysohje on vuonna 2003 laadittu sosiaali- ja terveysministeriössä korvaamaan Sisäilmaohjeen (2/97) vuodelta 1997, ja se nojautuu terveydensuojelulakiin. Ohje käsittelee rakennusten hyvinvointiin ja huoneilman laatuun vaikuttavia tekijöitä, ohjearvoja sekä näiden arvojen luotettavaa mittaamista. Asunontarkastuksista ja muista rakennusten kuntoon liittyvistä seikoista vastuussa olevat viranomaiset voivat hyödyntää tätä ohjetta työssään. [11, s. 11–12.]

Fysikaaliset olosuhteet kattavat esimerkiksi huoneen lämpötilan ja kosteuden, ilmanvaihdon sekä melun, säteilyn ja valaistuksen, joista kolmella ensimmäisellä on merkittävä vaikutus kemiallisten epäpuhtauksien esiintymistodennäköisyyteen ja -pitoisuuksiin [11, s. 13]. Kemialliset epäpuhtaudet määritellään hiukasmaisiksi tai kaasumaisiksi, joko orgaanisiksi tai epäorgaanisiksi yhdisteiksi, jotka todennäköisesti aiheuttavat sisäilmassa terveys- ja hajuhaittoja. Näiden pitoisuudet voivat vaihdella niin ympäristöolosuhteiden, kuten vallitsevan sään tai ilmanvaihdon vaikutuksesta tai asunnon ympäristössä tapahtuvien toimintojen myötä. Sisäilmassa esiintyvien VOC-yhdisteiden kokonaispitoisuus ilmoitetaan TVOC-arvona. Arvoa ei sinänsä voida käyttää terveyshaitan arvioinnissa, mutta pitoisuus, joka on yli  $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$  indikoi sisäilmahaittaa, jolloin yhdistekohtaiset tutkimukset ovat tarpeen. [11, s. 60.] Ohje kertoo myös sisäilman mikrobiologisille haitoille altistavista tekijöistä, haitan toteamisesta sekä näiden ehkäisymenetelmistä [11, s. 75].

### 2.1.8 REACH-asetus, EC 1907/2006

Euroopan unionin REACH-asetus tuli voimaan kesäkuussa 2007. REACH on lyhenne kemikaalien rekisteröintiä, arviointia, lupamenettelyä sekä rajoituksia

tarkoittavista sanoista. Asetuksen yhtenä tavoitteena on vähentää kemikaalien aiheuttamia riskejä ympäristölle sekä terveydelle. Se siirtää kemikaaleja valmistaville ja markkinoiville yrityksille vastuun todistaa kemikaalien turvallisuus sekä ohjeistaa käyttäjiä riskeistä ja niiden hallinnasta. Mikäli riskit eivät ole hallittavissa, viranomaisten päätöksellä aineiden käyttöä voidaan rajoittaa ja haitallinen kemikaali voidaan vaatia korvattavan vähemmän haitallisella. [12.]

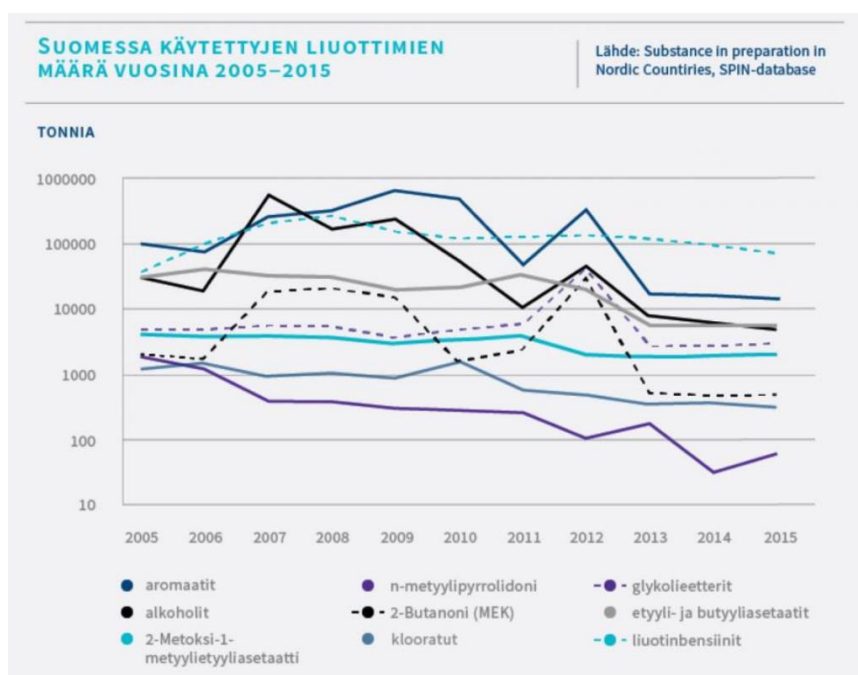
### 2.1.9 Haitallisiksi tunnetut pitoisuusarvot eli HTP-arvot 2020

Sosiaali- ja terveysministeriö on vuoden 2020 julkaisussaan (STM 2020:24) ilmoittanut haitallisiksi tunnetut pitoisuudet eri haitta-aineille (HTP). HTP-arvot on asetettu koskien työpaikan ilman epäpuhtauksia terveellisen ja turvallisen työympäristön puolesta. HTP-arvot voidaan määrittää eri pituisille aikajaksoille. Yleisesti ne on annettu 8 tunnin aikapainotettuina keskiarvoina. Aineille, jotka voivat vaikuttaa lyhyemmässä ajassa on annettu HTP-arvo 15 minuutin aikajaksolle. Aineilla, joiden haitallinen vaikutus on hyvin nopea, on myös asetettu hetkellisen pitoisuuden HTP-arvo. Julkaisussa on myös esitetty työturvallisuuslakiin pohjautuvat sitovat raja-arvot, joissa määritetty suurimmat sallitut pitoisuudet sekä toimenpiderajat tietyille haitta-aineille, joihin kloorattujen eteenien osalta kuuluvat vinyylidikloridi ja trikloorietyleeni. [13, s. 10–12.]

## 2.2 Klooratut liuottimet

Klooratut liuottimet ovat hiilivetymolekyylejä, joissa funktionaalisena ryhmänä on ainakin yksi klooriatomi. Kloorattuja liuottimia on käytetty laajasti eri teollisuudenaloilla niin rasvanpoistoon kuin hyönteismyrkkyinä [14]. Nämä ovat yleisiä ja ongelmallisia haitta-aineita, sillä osa niistä on helposti haihtuvia ja liikkuvia, erittäin pysyviä, myrkyllisiä ja niillä on suuri tiheys [15, s. 191]. Osittain tästä syystä klooratut liuottimet ovat tyypillisiä maaperän ja pohjaveden haitta-aineita niin vanhoilla käytöstä poistuneilla kuin edelleen toiminnassa olevilla teollisuusalueilla. Koska nämä ovat vettä raskaampia, mutta siihen vain niukasti liukenevia nestemäisiä yhdisteitä (DNAPL, *dense non-aqueous phase liquid*), näiden yhdisteiden jakautumista ja kulkeutumista ympäristössä ohjaavat pääosin

maaston muodot. [16.] Ne voivat helposti kulkeutua maaperässä jopa pohjaveden alapuolelle kallioon ja sen rakoihin [3, s. 49]. Kloorattujen hiilivetyjen käyttö on vähentynyt merkittävästi 1990-luvulta alkaen ja niitä on korvattu haitattomammilla yhdisteillä, mutta niiden pysyvyyden vuoksi ne aiheuttavat haittaa vielä pitkään ympäristössä [17]. Kuvassa 2 on esitetty Suomessa käytetyt liuotinmäärät tonneina vuosina 2005–2015. Kuvaajassa kloorattuihin liuottimiin on laskettu dikloorimetaani, trikloorietyleeni sekä tetrakloorietyleeni. Niiden käyttö on tarkastelujakson aikana puolittunut.



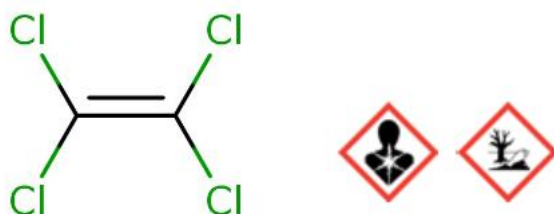
Kuva 2. Suomessa käytettyjen liuottimien määrä vuosina 2005–2015. [17]

Seuraavissa luvuissa käsitellään neljää kloorattua eteeniä: tetra-, tri-, dikloorieteeneitä sekä vinyylidikloridia. Nämä yhdisteet ovat tyypillisiä pilaantuneiden maiden löytöjä. Lisäksi ne ovat niin kutsuttuja äiti- ja tytär yhdisteitä, eli enemmän klooriatomeita sisältävät yhdisteet luovuttavat klooriatominsa maaperässä tapahtuvissa hajoamisreaktioissa, jolloin niiden ominaisuudet muuttuvat.



### 2.2.1 Tetrakloorieteeni

Tetrakloorieteeni eli perkloorietyleeni (kuva 3) tai tetrakloorietyleeni (PCE) on eteeni, jossa on neljä klooriatomia. Se on huoneenlämmössä väritön, eetterimäisen tuoksuinen neste. Se liukenee huonosti veteen, mutta liukenee hyvin esimerkiksi bentseeniin, dietyylieetteriin ja etanoliin. PCE:tä käytetään yleisesti kemiallisissa pesuloissa, mutta myös puhdistusaineena muoviteollisuudessa sekä rasvanpoistoaineena metalliteollisuudessa ja lääketeollisuuden liuottimena. [18, s. 1–2.]



Kuva 3. Tetrakloorieteenin rakennekaava sekä yhdisteen varoitusmerkit. [19]

Tyypillisimmin PCE-altistusta tapahtuu nimenomaan tekstiilien kemiallisessa pesussa, ja pesuloiden lähellä asuminen tai oleskelu saattaakin lisätä riskiä altistumiselle. Myös kemiallisesti pestyjen vaatteiden liuotinjäämien vuoksi vaatteet voivat olla lyhytaikaisia altistumlähteitä. Lisäksi korkeampaa altistumisriskiä PCE:lle on havaittu metalliteollisuudessa sekä ongelmajätteiden käsittelyssä. PCE:n käyttö on vähentynyt 1970-luvulta lähtien muiden korvaavien liuottimien yleistyttyä. Vuonna 2015 Turvallisuus- ja kemikaaliviraston TUKESin kemikaali-tuoterekisterissä oli PCE:tä sisältäviä tuotteita 22 kappaletta. [18, s. 2.]

#### Tyypilliset pitoisuusalueet

PCE:tä löytyy ympäristöstä pieniä määriä. WHO:n julkaisussa *Air quality guidelines for Europe* ulkoilman PCE-pitoisuuksiksi Euroopassa yleisesti on

urbaaneilla alueilla ilmoitettu vähemmän kuin  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja maaseudulla vähemmän kuin  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sisäilmapitoisuudet taas ovat yleisesti pienempiä kuin  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Alueella, jonka läheisyydessä on kuivapesulatoimintaa, pitoisuudet saattavat olla hieman korkeampia. [20, s. 109.]

Uudenmaan elinkeino- liikenne- ja ympäristökeskuksessa (ELY-keskus) annettussa päätöksessä UUELY/7409/2019 käsitellään klooratuilla liuottimilla pilaantunutta kohdetta. Hyvinkäällä sijainneen entisen pesula-alueen puhdistamiseen liittyvissä pilaantuneisuustutkimuksissa, joita oli tehty 1995–2019, todettiin PCE:tä. Korkein maaperässä todettu PCE-pitoisuus oli  $1\,200 \text{ mg}/\text{kg}$ . [21, s. 4–5.] Orsivesiputkesta mitattu korkein PCE-pitoisuus oli  $57\,000 \mu\text{g}/\text{l}$ . Alueen pohjavedestä mitattu korkein PCE-pitoisuus oli  $2\,000 \mu\text{g}/\text{l}$ , mutta enimmäkseen mitatut pitoisuudet osuivat välille  $10\text{--}300 \mu\text{g}/\text{l}$ . [21, s. 5.]

Kaakkois-Suomen ELY-keskuksen päätöksessä KASELY/787/2017 käsiteltiin klooratuilla liuottimilla pilaantunutta teollisuusaluetta. Lappeenrannassa Joutsenonkankaan pohjavesialueella sijaitsevalla Muukon teollisuusalueella tehdyissä maaperätutkimuksissa ei todettu määräysrajan ylittäviä liuotinpitoisuuksia, mutta 2015–2016 otetuissa huokosilmanäytteissä todettiin PCE:tä. Suurin mitattu pitoisuus oli yli  $790 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , muissa näytteissä pitoisuudet jäivät välille  $200\text{--}690 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Myös alueen pohjavesinäytteissä oli todettu PCE:tä, ja suurin pitoisuus oli ollut  $1\,500 \mu\text{g}/\text{l}$ . [22, s. 1–3.]

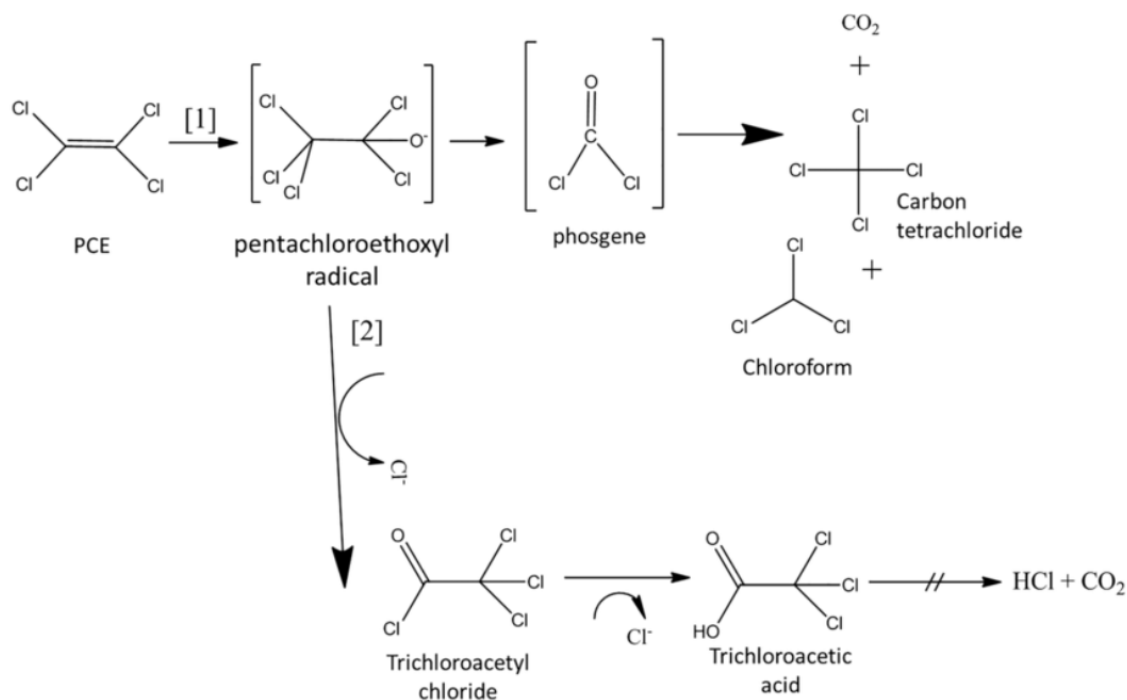
REACH-rekisteristä löytyy johdettu vaikutukseton pitoisuustaso eli DNEL-arvo, joka on teollisuuden määrittelemä altistumistaso, jota pidetään ihmiselle turvallisena. DNEL-arvo on hyödyllinen esimerkiksi tapauksissa, joissa altisteelle ei ole määritetty muita lakisääteisiä raja-arvoja. [23.] PCE:lle on määritelty DNEL-arvo pitkäaikaiselle altistumiselle  $138 \text{ mg}/\text{m}^3$  ja akuutille altistumiselle hengitysteitse  $275 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Työterveyslaitoksen vuosina 2004–2015 teettämissä työhygieenisissä PCE-ilmanpitoisuusmittauksissa keskiarvopitoisuudet vaihtelivat  $0,017\text{--}17 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Vuosina 2008–2015 tehdyissä muissa ilmapitoisuusnäytteissä, jotka olivat muun muassa toimistotiloista, keskiarvopitoisuus oli  $45,6 \text{ mg}/\text{m}^3$ . [18, s. 2–3.] Työterveyslaitoksen esittämän biologisen altistumisindikaattorin

toimenpideraja-arvo PCE:lle on 1,2 µmol litrassa verta, altistumattomien henkilöiden viiterajan ollessa 0,1 µmol/l [24, s. 1].

### Kulkeutuminen ympäristössä

Ilmassa hydroksyyli- ja nitraattiradikaalit hajottavat PCE-molekyylit muun muassa fosgeeniksi ja hiilitetrakloridiksi. PCE voi myös reagoida ilmassa ja muodostaa trikloorietikkahappoa. Myös sateen mukana maahan kulkeutuminen on mahdollista.

[25.] Kuvassa 4 on esitetty reaktioyhtälö PCE:n hajoamisesta ilmassa.



Kuva 4. Tetrakloorietyleenin hajoaminen ilmassa. [26]

Maahan joutuessaan PCE haihtuu pintamaasta varsin nopeasti. Maaperässä se voi kulkeutua joko helposti tai kohtalaisesti, riippuen maaperän laadusta. Pinta-vedestä PCE haihtuu nopeasti, mutta se liukenee myös jonkun verran veteen. Liukenematon osa painuu pohjaan, sillä se on vettä raskaampaa (liukoisuus-arvo taulukossa 2). [25.]

PCE:n on todettu hajoavan hitaasti hapellisissa oloissa, mutta hapettomissa oloissa hajoamista tapahtuu, ja hajoamistuotteina syntyy trikloorietyleeniä,

dikloorietyleeniä, vinyylikloridia, eteeniä ja etaania. PCE:n puoliintumisaika maaperässä on noin puoli vuotta, ilmassa kolmisen kuukautta ja vedessä yhdestä vuorokaudesta yhteen kuukauteen. PCE on myrkyllistä vesieliöille, mutta se ei ole bioakkumuloituvaa. [25.]

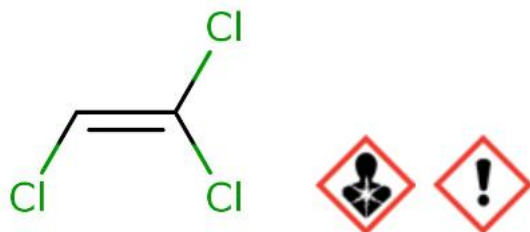
### Terveysvaikutukset

Höyrystyneelle PCE:lle altistuminen aiheuttaa akuutissa tapauksessa ärsytystä silmissä, nenän ja kurkunseudulla sekä iholla. Pidempiaikaisessa altistumisessa voi esiintyä keskushermostollisia oireita, esimerkiksi väsymystä ja hui- mausta, suuremmilla pitoisuuksilla myös tajuttomuus ja pahimmillaan hengitys- ja sydänongelmista aiheutuva kuolema ovat mahdollisia. [25.]

Pitkäaikaisesta PCE-altistumisesta voi aiheutua keskushermostoon vaikuttavia oireita, muun muassa väsymystä ja muistin heikkenemistä sekä masennusta. Vaikutuksia voi esiintyä myös maksassa ja munuaisissa. PCE on eläinkokeiden ja epidemiologisten tutkimusten perusteella arvioitu ryhmän 2A karsinogeeniksi. [25.]

#### 2.2.2 Trikloorieteeni

Trikloorieteeni eli trikloorietyleeni (TCE, kuva 5) on eteeni, jossa on kolme klooriatomia. Se on helposti haihtuva, väritön ja kloroformimaisen hajuinen neste, joka on niukkaliukoinen veteen. Sitä käytetään yleisesti teollisuudessa puhdistus- ja rasvanpoistoaineena sekä paljolti kylmäaineiden valmistuksessa raaka- aineena. Suomessa TCE:tä käytetään pääosin metalliteollisuudessa puhdistus- ja rasvanpoisto-ominaisuuksiensa vuoksi, mutta myös esimerkiksi kemian- ja paperiteollisuudessa pesuliuottimena. [27, s. 1.] Myös yksittäisissä kuluttajatuot- teissa, kuten liimoissa ja tahrannoistojen poistajissa voi olla TCE:tä [28, s. 2.]



Kuva 5. Trikloorietyleenin rakennekaava sekä aineen varoitusmerkit. [29]

REACH-asetuksen myötä muun muassa TCE:n käytölle on vaadittu Euroopassa lupa vuodesta 2016. Yleisin korvaaja TCE:lle varsinkin metalliteollisuudessa on PCE, sillä se on suhteellisen edullinen vaihtoehto, vaikkei sekään ole ongelmaton. [30.]

#### Tyypilliset pitoisuusalueet

WHO:n julkaisun mukaan Euroopassa ulkoilman TCE-pitoisuus on urbaaneilla alueilla tyypillisesti enimmillään  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja maaseudulla vähemmän kuin  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sisäilmapitoisuudet ovat samaa luokkaa, paitsi teollisuusalueiden lähitöllä voidaan havaita maltillisesti korkeampia pitoisuuksia. [20, s. 115.]

Sisäilman TCE-pitoisuudet ovat korkeimmillaan, kun sillä pestyjen metalliosien pintaan jääneet liuotinjäämät haihtuvat ilmaan. Pitoisuuksiin voidaan vaikuttaa kuivausajan minimoimisella ja jäähdytyksen tehostamisella. Työterveyslaitoksen aikavälillä 1994–2003 tekemissä mittauksissa TCE-pitoisuudet vaihtelivat alle  $16 \text{ mg}/\text{m}^3$ :stä yli  $160 \text{ mg}/\text{m}^3$ :iin, kuitenkin yli puolessa tapauksista pitoisuudet ylittivät  $16 \text{ mg}/\text{m}^3$ , ja 12 prosentissa  $160 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Vastaavasti vuosina 2001–2005 tehdyissä biomonitorointimittauksissa TCE-altistumistaso oli keskimäärin alle puolet toimenpiderajasta ( $360 \mu\text{mol}$  trikloorietikkahappoa litrassa virtsaa). [27, s. 2.]

#### Kulkeutuminen ympäristössä

Ilmassa TCE hajoaa muun muassa fosgeeniksi ja kloroformiksi, tai se voi muuntua dikloorietikkahapoksi. TCE ja hajoamistuotteet voivat päätyä maahan saateen mukana. Maan pinnasta se haihtuu nopeasti, mutta on maaperässä joko helposti tai kohtalaisesti kulkeutuvaa, ja se voi päätyä pohjaveteen saakka. [31.]

Maaperässä TCE:n biologinen hajoaminen on heikkoa sekä hapellisissa että hapettomissa oloissa. Hapettomassa tilassa TCE voi hajota dikloorieteeneiksi tai vinyylikloridiksi, jotka voivat myös päätyä pohjaveteen. Pintavedestä TCE haihtuu nopeasti, mutta se liukenee osittain veteen (taulukko 2). Liukenematon osa painuu vedenpohjaan. Vedessä TCE:n hajoaminen hapellisissa olosuhteissa on todettu hitaaksi, mutta hajoamisnopeus kasvaa, kun hajottajamikrobit sopeutuvat yhdisteeseen. Hajoamista nopeuttaa myös muiden mikrobeille ravinnoksi kelpaavien yhdisteiden esiintyminen vedessä. [31.]

TCE on vesieliöille haitallista, mutta ei bioakkumuloidu ruokaketjussa. Ilmassa TCE:n puoliintumisaika on noin viikko, maaperässä noin 6–12 kk ja vesistössä, riippuen syvyydestä, kolmesta tunnista viiteen vuorokauteen. [31.]

#### Terveysvaikutukset

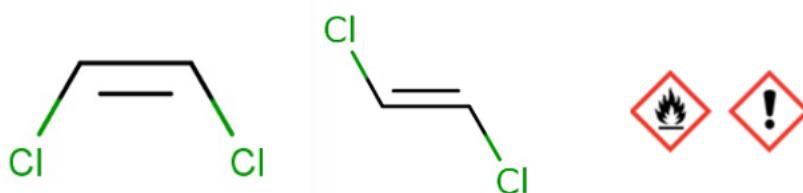
Akuuteissa altistumistapauksissa  $5,4 \times 10^5$ – $5,4 \times 10^6$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ :n (100–1000 ppm) pitoisuuksilla höyrystynyt TCE aiheuttaa ärsytystä nenässä, kurkussa sekä lieviä keskushermostollisia oireita, kuten uneliaisuutta ja pahoinvointia. Suuremmilla pitoisuuksilla,  $5,4 \times 10^6$ – $1,1 \times 10^7$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (1000–2000 ppm), tajunnan menetys on mahdollista, ja näitä korkeammat pitoisuudet voivat johtaa kuolemaan hengitys- ja sydänongelmien vuoksi. [31.]

Pitkäaikainen altistuminen aiheuttaa keskushermosto-oireita, kuten uni- ja muistiongelmia. Myös maksa- ja munuaisoireet ovat mahdollisia. Iholla pitkäaikaisaltistus voi aiheuttaa ärsytystä ja kuivuutta. TCE on arvioitu eläinkokeiden perusteella todennäköisesti ihmiselle karsinogeeniseksi sekä perimää vaurioittavaksi ja mutaatioita aiheuttavaksi. [31.]

### 2.2.3 Dikloorieteenit

Dikloorieteeni tai dikloorietyleeni (DCE) on eteeni, jossa on kaksi klooriatomia. DCE:llä esiintyy rakenneisomeriaa sekä cis-trans-isomeriaa. Klooriatomit voivat olla joko yhdessä hiilessä tai jakautuneet molemmin puolin molekyyliä.

1,2-dikloorieteeni (1,2-DCE, kuva 6) on väritön neste, jolla on eetterimäinen haju. Se ei liukene veteen, mutta liukenee hyvin orgaanisiin liuottimiin kuten alkoholiin ja asetoniin. 1,2-DCE:llä esiintyy cis-trans-isomeriaa, ja isomeerit poikkeavat toisistaan jonkin verran fysikaalisilta ominaisuuksiltaan. Transisomeeri on cisisomeeriä yleisemmin teollisuuden käytössä, mutta usein 1,2-DCE on seosmuotoisena, sisältäen molempia isomeerejä. [32.] 1,2-DCE:tä käytetään liuottimena, orgaanisissa synteeseissä sekä kemiallisissa pesuloissa [33, s. 1].



Kuva 6. cis-1,2-dikloorieteenin ja trans-1,2-dikloorieteenin rakennekaavat sekä varoitusmerkit. [34, 35]

1,1-dikloorieteeni tai vinylideenikloridi (1,1-DCE, kuva 7) on synteettinen, väritön neste, jolla on kloroformimainen makeahko haju. Sitä käytetään esimerkiksi

muovi- ja kumituotteiden valmistuksessa. [36; 37.]



Kuva 7. 1,1-dikloorieteenin rakennekaava sekä varoitusmerkit. [36]

1,1-dikloorietyleenin myynti yleiseen kulutukseen on Suomessa ollut kiellettyä vuodesta 1997 lähtien. [38.]

#### Kulkeutuminen ympäristössä

1,2-DCE on nopeasti haihtuva ja haihtuu tehokkaasti joutuessaan maahan tai veteen. Haihtumaton osa voi imeytyä maaperään ja päätyä pohjaveteen saakka ja liueta veteen (taulukko 2). 1,2-DCE voi hajota vinyylikloridiksi. Ilmassa 1,2-DCE:n puoliintumisaika on 5–12 vrk ja vedessä 13–48 viikkoa. Sen epäillään olevan haitallista vesieliöille ja pysyvyytensä takia vaikuttavan pitkäaikaisesti. [39, s. 2.]

Ilmaan päässyt 1,1-DCE hajoaa muutamassa päivässä. Veteen joutuessaan suurin osa haihtuu ilmaan, jäljelle jäävä osuus hajoaa hitaasti. Maaperässä osa haihtuu ilmaan, osa voi imeytyä maaperään ja aina pohjaveteen asti. [40, s. 1]

#### Terveysvaikutukset

Lyhytaikaisessa altistuksessa 1,2-DCE aiheuttaa silmien ja hengitysteiden ärsytystä. Pitoisuuden noustessa myös keskushermostolliset oireet ovat mahdollisia. Toistuvassa altistuksessa ihon kuivuminen ja halkeileminen on tyypillistä, mutta myös vaikutuksia maksaan voi esiintyä. [41.]



Suurten 1,1-DCE-pitoisuuksien hengittäminen vaikuttaa pääasiassa keskushermostoon aiheuttaen huimausta. Eläinkokeissa 1,1-DCE:n on havaittu aiheuttavan vahinkoa maksassa, munuaisissa ja keuhkoissa, kun ainetta on hengitetty tai nautittu suun kautta suuria määriä. [40, s. 1.]

#### 2.2.4 Vinyylikloridi

Vinyylikloridi eli kloorietyleeni tai monokloorieteeni (VC, kuva 8) on eteeni, jossa on yksi klooriatomi. Se on huoneenlämmössä väritön, makeantuoksuinen kaasu. Nestemäisenä se esiintyy korkeassa paineessa tai alle -14°C:n lämpötiloissa. VC liukenee huonosti veteen, mutta orgaanisiin liuottimiin se liukenee hyvin. [42, s. 1.]



Kuva 8. Vinyylikloridin rakennekaava ja varoitusmerkit. [43]

Nykyään VC:n yleisin käyttökohde on polyvinyylikloridi- eli PVC-muovin valmistus, ennen sitä on käytetty myös muun muassa kylmä- ja ponneaineena sekä lääke- ja kosmetiikkatuotteissa. Vuonna 2016 Suomessa ei valmistettu eikä maahantuotu yhtään VC:tä, ja ainetta sisältäviä tuotteita oli TUKESin kemikaali-tuoterekisterin mukaan vain yksi. EU:n REACH-asetuksessa vinyylikloridin käyttö ponneaineena aerosoleissa ja tällaisten tuotteiden markkinointi on kielletty. [42, s. 2.]

Tyypilliset pitoisuusalueet

WHO:n julkaisussa todetaan, että dispersiomallituksen perusteella Euroopan alueella VC:n taustapitoisuudet ovat tyypillisesti alle  $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Toisaalta VC- tai PVC-teollisuuden käyttämissä rakennuksissa 24 tunnin altistuspitoisuudet voivat ylittää  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mutta jo kilometrin päässä pitoisuudet laskevat  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ :iin. [20, s. 118.]

Syöpäsairauden vaaraa aiheuttaville aineille ja menetelmille ammatissaan altistuvien rekisterissä eli ASA-rekisterissä oli Suomessa vuonna 2014 ilmoitettu 50 VC:lle altistunutta työntekijää, jotka työskentelivät höyrykoneiden ja lämmityskattiloiden parissa sekä maa- ja vesirakentamisen asiantuntijoina. Työterveyslaitokselle toimitettujen työpaikoilta kerättyjen näytteiden VC-pitoisuudet ovat olleet kuitenkin alle käytetyn analyysimenetelmän määritysrajan ( $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$  tai  $0,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). REACH-rekisteröinnissä työntekijöiden pitkäaikaiseen altistumiseen liittyvän, johdetun pienimmän vaikutuksen pitoisuustaso eli DMEL-arvoksi on annettu  $7,7 \text{ mg}/\text{m}^3$ . [27, s. 2.]

#### Kulkeutuminen ympäristössä

VC hajoaa ilmassa hydroksyyli-radikaalien kanssa reagoidessaan. Se voi myös päätyä maahan sateen mukana. Pintamaasta VC haihtuu helposti takaisin ilmaan, mutta haihtumaton osa voi kulkeutua maaperässä pohjaveteen saakka. Maaperään päätyneen VC:n hajoaminen on hidasta. Veden pintaan päästessään se haihtuu helposti, ja ympäristönäkökulmasta se liukenee veteen hyvin (taulukko 2), mutta hajoaa hyvin hitaasti. [44.]

Ilmassa VC-pitoisuus puolittuu muutamassa vuorokaudessa. Pintamaassa puoliintuminen kestää 5–12 h ja matalassa vesistössä alle tunnin. Biologisen hajoamisen puoliintumisaika sekä maaperässä että vedessä hapellisissa oloissa on noin 1–6 kk. Vedessä hapettomissa oloissa puoliintumisaika voi olla muutamasta kuukaudesta useaan vuoteen. VC on lievästi myrkyllistä vesieliöille, mutta ei kerry ravintoketjussa, eikä sitä luokitella ympäristölle vaaralliseksi. [44.]

## Terveysvaikutukset

VC:n aiheuttamat heikot keskushermostolliset oireet, kuten huimaus, ilmenevät vasta  $2,0 \times 10^7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ :n (8000 ppm) pitoisuuksilla. Kaksinkertaiset pitoisuudet aiheuttavat pahoinvointia ja tasapaino-ongelmia. Hyvin suuret pitoisuudet voivat aiheuttaa tajuttomuutta ja jopa kuoleman. Toistuvassa altistuksessa maksan, immuunijärjestelmän sekä hermoston ja keuhkojen vauriot ovat mahdollisia. Bakteri- ja eläinkokeiden perusteella VC on arvioitu syöpää aiheuttavaksi ja mahdollisesti myös mutageeniseksi. [44.]

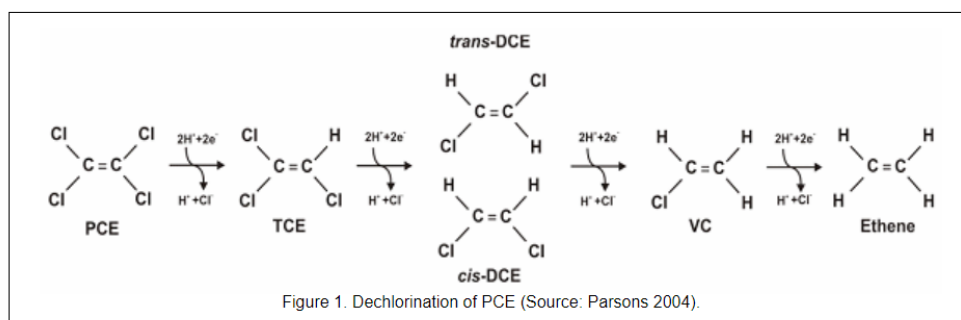
### 2.3 Yhdisteiden metabolia, ohjearvot ja fysikaaliset ominaisuudet

Klooratut eteenit hajoavat anaerobisissa prosesseissa tai kometabolisesti sekä hapettomissa että hapellisissa oloissa vaihtelevalla nopeudella. Hajoamista tapahtuu biologisesti, pääosin anaerobisissa oloissa mikro-organismien vaikutuksesta. Mitä enemmän yhdisteessä on klooriatomeja, eli mitä hapettuneempi se on, sitä helpompi se on deklorinoida eli poistaa klooria. Tällöin kuitenkin hajoamisprosessi pysähtyy usein cis-1,2-DCE:hen. Mutta aerobisissa oloissa myös 1,2-DCE voidaan hajottaa, mikäli merkittäviä määriä PCE:tä tai TCE:tä ei ole läsnä kohteessa. [3, s. 10; 45; 46.]

PCE:n biohajoaminen voi tapahtua useammalla tavalla, ja hajottajina voi toimia joko *Dehalococcoiden mccartyi* -bakteeri tai useat eri bakteerit yhdessä, jolloin jokainen tekee oman osuutensa prosessissa. *D. mccartyi* on ainoa bakteeri, jonka tiedetään kykenevän hajottamaan PCE:n eteeniksi. [47.]

Tyypillisesti klooratut liuottimet (PCE, TCE) tai niiden hajoamistuotteet (DCE, VC) toimivat elektronin vastaanottajina ja elektronin luovuttajana toimii vety. Anaerobisen biohajoamisen aikana kloridi-ionien järjestyksellinen irtaantuminen ja PCE:n hajoaminen eteeniksi tapahtuu yleensä kuvassa 9 demonstroidulla

tavalla. [48.]



Kuva 9. PCE:n deklorinaatio eteeniksi. [48]

Varsinkin pilaantuneiden alueiden kunnostuksessa voidaan hyödyntää bakteerien hajottavia ominaisuuksia. Tällöin on tärkeää varmistaa jo puhdistusta suunniteltaessa, että bakteerilajeja, jotka pystyvät pelkistämään PCE:n tai TCE:n eteeniksi on läsnä ja riittävän suurina määrinä, jottei pelkistymisprosessi pysähdy DCE:hen tai VC:hen. [48.]

### 2.3.1 Yhdisteiden kynnys- ja ohjearvot maaperässä

Valtioneuvoston laatimassa PIMA-asetuksessa (214/2007) on määritetty yleisille maaperässä esiintyville haitta-aineille, mukaan lukien klooratuille alifaattisille hiilivedyille, sekä kynnysarvot että alemmat ja ylemmät ohjearvot. Kynnysarvo kuvaa pitoisuustasoa, joka maaperästä todettaessa on tarpeen arvioida maaperän pilaantuneisuus ja puhdistustarve. Alemman ohjearvon ylittäviä pitoisuuksia pidetään merkinä maaperän pilaantumisesta herkemällä käytöllä olevilla, kuten asumiskäyttöön tarkoitetuilla alueilla. Ylempää ohjearvoa sovelletaan vastaavasti teollisuus-, varasto- tai muulla vastaavalla alueella. [6.] Kloorattujen alifaattisten hiilivetyjen kynnysarvot sekä alemmat ja ylemmät ohjearvot ovat nähtävissä taulukossa 1.

Taulukko 1. Kloorattujen alifaattisten hiilivetyjen kynnys- sekä ohjearvot. (49, s. 745)

Aine	Kynnysarvo (mg/kg)	Alempi ohjearvo (mg/kg)	Ylempi ohjearvo (mg/kg)
PCE (p)	0,01	0,5 (t)	2 (t)
TCE (p)	0,01	1 (e,t)	5 (e)
DCE:t (p)	0,01	0,05 (t)	0,2 (t)
VC (p)	0,01	0,01 (t)	0,01 (t)

Taulukossa suluissa esitetyt kirjaimet indikoivat seuraavaa: e-kirjaimella merkityt arvot ovat ekologisten riskien perusteella ja t terveydellisten riskien perusteella määritettyä ohjearvoa. Tunnus P aineen perässä tarkoittaa, että pohjaveden pilaantumisen riski on merkittävä jo alemmaa ohjearvoa matalammilla pitoisuuksilla. DCE:n kohdalla on laskettu kaikkien rakenneisomeerien summapitoisuus. (49, s. 743)

### 2.3.2 Fysikaaliset ominaisuudet

Yhdisteiden fysikaaliset arvot on koottu alla olevaan taulukkoon 2. Kohdassa sym-1,2-DCE esitetyt arvot sisältävät sekä cis- että trans-isomeerejä. Taulukossa tähdellä merkityt arvot on mitattu paineessa 101,3 kPa.

Taulukko 2. Fysikaalisia arvoja klooratuille eteeneille. [18, s. 1; 27, s. 1; 33, s. 1; 37, s. 1; 50; 51; 52; 53; 54; 55; 56; 57; 58; 59; 60a, s. 255; 61a, s. 297; 62a, s. 86; 63a, s. 75; 64a, s. 129]

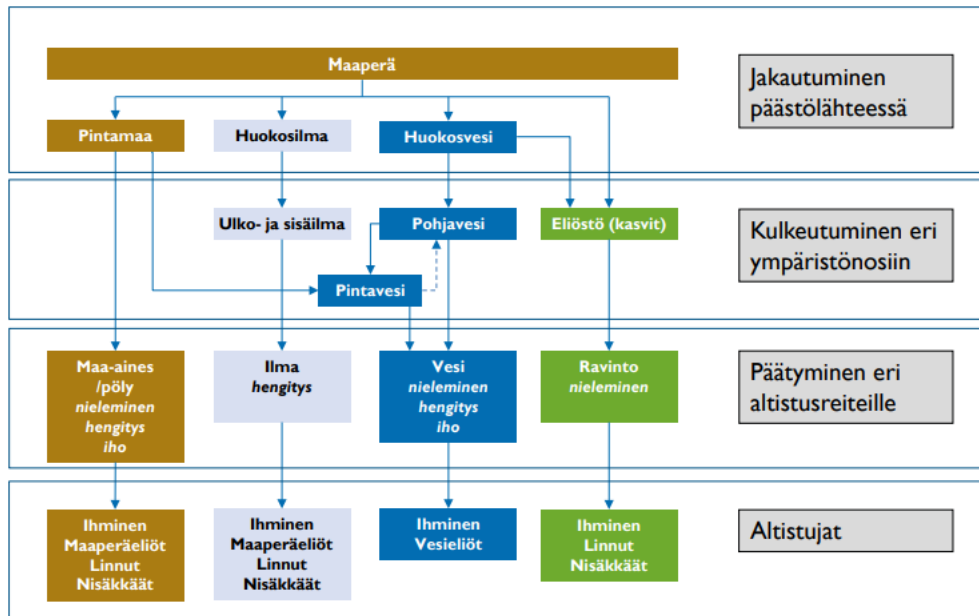
	PCE	TCE	1,2-DCE			1,1-DCE	VC
			cis-	sym-	trans-		
<b>CAS-numero</b>	127-18-4	79-01-6	156-59-2	540-59-0	156-60-5	75-35-4	75-01-4
<b>Molekyyli-paino</b>	165,8 g/mol	131,4 g/mol	-	96,9 g/mol	-	97,0 g/mol	62,5 g/mol

<b>Sula- mis- piste</b>	-22°C *	-85°C	-81°C	-	-49,4°C	-122°C	-154°C
<b>Kiehu- mis- piste</b>	121°C *	87°C	60°C	55°C	48°C	32°C	-13°C
<b>Tiheys</b>	1,62 g/cm <sup>3</sup> (20°C)  1,6 g/cm <sup>3</sup> (25°C) *	1,465 g/cm <sup>3</sup> (20°C)	1,283 g/cm <sup>3</sup> (20°C)	-	1,257 g/cm <sup>3</sup> (20°C)	1,213 g/cm <sup>3</sup>	0,008 g/cm <sup>3</sup> (höyryä, 15°C)
<b>Suh- teelli- nen höyryn tiheys, ilma = 1</b>	5,7	4,5	-	3,34	-	3,3	2,2
<b>Höy- ryn- paine</b>	1,9 kPa (20°C)	8,6 kPa(20° C)	24 kPa (20°C)	-	35,3 kPa (20°c)	66,5 kPa (20°C)	334 kPa (20°C)
<b>Haju- kynnys</b>	1,0 ppm (6,78 mg/m <sup>3</sup> )	20–30 ppm (110– 160 mg/m <sup>3</sup> )	-	17 ppm (67,4 9 mg/m <sup>3</sup> )	-	-	3000 ppm (7800 mg/m <sup>3</sup> )
<b>Henryn vakio kH</b>	2,87×10 <sup>-2</sup> atm×m <sup>3</sup> / mol	1×10 <sup>-2</sup> atm×m <sup>3</sup> / mol	arvio 0,337×1 0 <sup>-2</sup> atm×m <sup>3</sup> /mol	0,408 ×10 <sup>-2</sup> atm× m <sup>3</sup> /m ol	arvio 0,672×1 0 <sup>-2</sup> atm×m <sup>3</sup> /mol	2,61×1 0 <sup>-2</sup> atm× m <sup>3</sup> /mol	1,2 atm× m <sup>3</sup> /mol 0°C:ssa
<b>Orgaa- nisen hiilen jakau- tumis- kerroin Log K<sub>oc</sub></b>	2,2–2,54	49–460	1,69	-	1,56	1,81	2,38– 2,95

<b>Okta-noli-ve-sija-kautu-misker-roin</b> <b>Log K<sub>ow</sub></b>	3,40	2,61	1,86	-	2,09	2,13	1,38
<b>Liukoi-suus veteen</b>	niukka-liukoi-nen, 150 mg/l, 20°C	niukka-liukoi-nen, 1000 mg/l, 20°C	niukka-liukoi-nen, 3,5×10 <sup>3</sup> - 6,41×10 <sup>3</sup> mg/l (25°C)	-	niukka-liukoi-nen, 4,52×10 <sup>3</sup> mg/l (25°C)	2,420 mg/l (25°C)	niukka-liukoi-nen, 1,1 g/l, 25°C

## 2.4 Haitta-aineiden kulkeutuminen maaperästä sisäilmaan

Haitta-aineen kulkeutumisen riskiä pilaantuneella alueella tai sen lähiympäristössä arvioidaan, jotta sen aiheuttamat vaikutukset ympäristön laatuun voidaan määrittää ja niiden terveydelliset ja ekologiset vaikutukset huomioida. Arviointia tehdään mittaamalla haitta-aineen pitoisuuksia sekä kokonaismääräisesti että seuraamalla ajallista vaihtelua. Mittauksia tulee suorittaa kaikista merkittävistä ympäristöosista, sillä haitta-aine voi jakautua eri matriiseihin, jolloin niille voidaan altistua useampaa eri reittiä. Kuvassa 10 on esitetty kaaviomaisesti jakautuminen eri päästölähteiden kesken, jolloin ne päätyvät tietyille altistusreiteille ja niiden myötä eri altistujille. [3, s. 97.]



Kuva 10. Kaaviokuva maaperässä olevien haitta-aineiden jakautumiselle päästölähteittäin. [3, s. 98]

Maaperässä olevat tai siihen päätyvät haitta-aineet jakautuvat maa-aineksen, huokosveden ja huokosilman kesken, ja pitoisuusosuuksien suhteet näissä pysyvät suhteellisen muuttumattomina. Aineiden kulkeutumiseen ja jakautumiseen maaperässä vaikuttaa useampi tekijä. Merkittävimpiä näistä ovat liukeneminen eli sorptio, pidättyminen eli desorptio, haihtuminen, advektio, dispersio, diffuusio sekä biohajoaminen. [3, s. 98.]

#### 2.4.1 Pidättyminen, liukeneminen ja haihtuminen

Haitta-aineen pidättymisen ja liukenemisen arviointiin käytetään usein maa- maavesi-jakautumiskerrointa  $K_d$ . Arvo ilmaisee pitoisuussuhteet maahan pidättyvän ja veteen liukenevan haitta-aineen osuuksien välillä tasapainotilassa. Sekä haitta-aineen että maaperän ominaisuudet vaikuttavat  $K_d$ -arvoon. Sorptio yleensä myös heikentyy, mitä syvemmälle maakerroksissa mennään, jolloin  $K_d$ -arvo pienenee. Kirjallisuudessa on esitetty  $K_d$ -arvoja etenkin epäorgaanisille yhdisteille, mutta arvojen vaihteluvälit saattavat olla hyvinkin suuret, jolloin arvo voidaan määrittää luotettavammin näytekohtaisesti laboratoriossa. Orgaanisille



aineille arvot saadaan, kun maan orgaanisen hiilen pitoisuus kerrotaan haitta-ainekohtaisella  $K_{oc}$ -arvolla. Näitä orgaanisen hiilen ja veden välistä jakautumiskerrointa kuvaavia arvoja on esitetty kirjallisuudessa. Orgaanisten ja joidenkin epäorgaanisten yhdisteiden haihtumista huokoskaasuun voidaan arvioida kahden arvon, höyrynpaineen sekä Henryn lain vakion avulla. Jälkimmäinen vakio kuvaa aineen haihtuvuutta vesiliuoksesta. [3, s. 99.]

Aineen liukoisuus ja haihtuvuus sekä maaperän pidätyskyky vaikuttavat kaikki aineen jakautumiseen faasien välillä. Näiden aiheuttamia rajoitteita voidaan kuvata kyllästymispitoisuudella. Kyllästymispitoisuudessa haitta-aineen tasapainotilan pitoisuus huokosvedessä vastaa aineen enimmäisvesiliukoisuutta. Enimmäisvesiliukoisuus määrittelee myös huokosilmalle ja maaperän hiileen sitoutuneelle pitoisuusosuudelle enimmäispitoisuuden, mutta tämä ei koske kapillaarivoimien vaikutuksesta maaperän huokostilassa pysyvää jäännösfaasia. Mikäli pitoisuudet ylittävät kyllästymispitoisuuden, päästöt huokosilmassa ja siten sisältä ulkoilmassa eivät periaatteessa voi lisääntyä, olivat maaperässä pitoisuudet kuinka korkeita tahansa. Kyllästymispitoisuuden huomioiminen on tärkeää varsinkin niukkaliukoisilla ja heikosti haihtuvilla orgaanisilla yhdisteillä. [3, s. 99–100.]

#### 2.4.2 Advektio, dispersio ja diffuusio

Advektio kuvaa prosessia, jossa veteen liuennut tai ilmaan haihtunut aine leviää virtauksien mukana. Advektio on riippuvainen ilman tai veden virtauksen keskimääräisestä nopeudesta. Pohjaveden pinnan yläpuolella advektiokulkeutumiseen vaikuttaa vajoveden tilavuusvirta, kun kyllästyneessä vyöhykkeessä määrävä tekijä on pohjaveden tilavuusvirta. Huokosilmassa advektio syntyy paineerojen aiheuttamasta kaasujen virtauksesta. Paine-eron kasvaessa advektioon perustuva ilmavirta voimistuu. [3, s. 100.]

Dispersiota aiheuttaa vedenjohtavuuden vaihtelut. Ilmiö saa veteen liuenneen aineen leviämään, jolloin paikalliset enimmäispitoisuudet pienenevät. Dispersio on kolmiulotteinen prosessi, jota voidaan kuvata dispersiokertoimilla. Kertoimet

voidaan määrittää kohdetutkimuksilla tai kirjallisuustietoihin nojautuen. Dispersiokertoimet ovat suurempia virtauksen suuntaisesti verrattuna leveys-, poikittais- tai syvyys-suuntiin. [3, s. 100.]

Diffuusio kuvaa prosessia, jossa aine kulkeutuu suuremmasta pitoisuusalueesta pienempään pitoisuusalueeseen tasoittaen koko systeemin pitoisuutta. Diffuusiota esiintyy merkittävästi maaperän huokosilmassa, mutta myös vedessä sellaisissa maakerroksissa, jotka johtavat heikosti vettä. Diffuusiosta johtuvaa virtausta voidaan riskinarvioinnissa arvioida erilaisten kirjallisuusarvojen pohjalta. [3, s. 100.]

#### 2.4.3 Luontainen biohajoaminen

Maaperän mikrobit pystyvät luontaisesti hajottamaan useita orgaanisia haitta-aineita, kun olosuhteet ovat suotuisat. Biohajoaminen onkin hyvin merkittävää varsinkin öljyhiilivedyillä niin maaperässä, huokosilmassa kuin pohjavedessä. Kulkeutumisriskin arvioinnissa tämä prosessi voidaan huomioda, mikäli hajoamisen tiedetään olevan mahdollista ja todennäköistä tutkittavassa kohteessa. Biohajoaminen voi olla myös epätäydellistä, jolloin haitta-aineet voivat muuntua jopa ominaisuuksiltaan haitallisemmiksi hajoamistuotteiksi. [3, s. 101.]

#### 2.4.4 Kulkeutuminen huokoskaasussa ja sisäilmaan

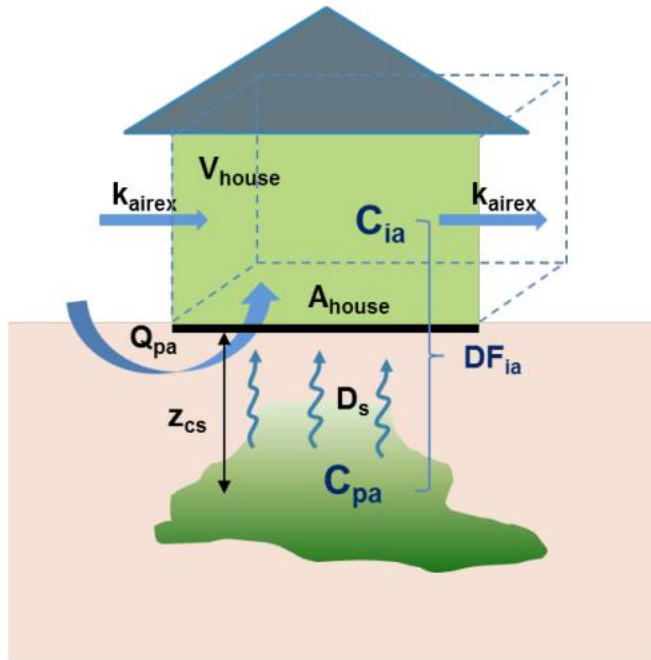
Pitoisuus- ja paine-erot ohjailevat maaperän huokosiin haihtuneita haitta-aineita huokoskaasuna. Tällöin kaasumaiset yhdisteet voivat kulkeutua ulkoilmaan tai rakennusten sisäilmaan. Huokosilman haitta-ainepitoisuuksia voidaan arvioida huokosilmanäytteenotolla. Huokoskaasumittauksiin liittyy kuitenkin epävarmuutta, jolloin arviointia voidaan täydentää laskelmilla. [3, s. 105.]

Huokoskaasussa olevan aineen pitoisuuden voidaan yleisesti olettaa olevan tasapainossa maa-ainekseen adsorboituineen sekä huokosveteen liuenneen pitoisuuden kanssa, jolloin huokoskaasun pitoisuus voidaan arvioida kertomalla huokosveden mitattu tai arvioitu pitoisuus kyseisen aineen Henryn lain vakiolla.

Riskejä yliarvioivaa, niin kutsuttua konservatiivista arviota tehtäessä huokoskaasun haitta-ainepitoisuus voidaan olettaa muuttumattomaksi. Todellisuudessa se yleensä pienenee maaperässä tapahtuvien prosessien vuoksi, mutta epätäydellisen hajoamisen aiheuttaman metaboliittien muodostumisen myötä pitoisuus voi myös kasvaa. Myös huokoskaasun kulkeutumisen myötä alkuperäisen päästölähteen pitoisuudet pienenevät. [3, s. 105.]

Sisäilmassa haihtuvien yhdisteiden pitoisuuksia voidaan määrittää sisäilmatutkimuksilla. Arviointia on kuitenkin hyvä täydentää laskennallisesti. Uudisrakennuskohteissa sisäilmapitoisuuksia tulee aina tarkastella laskennallisesti, mikäli alueella tiedetään haitta-aineiden esiintymisen olevan mahdollista. Yksinkertaisimmillaan sisäilman haihtuvien haitta-aineiden pitoisuudet voidaan arvioida mitatuista arvoista tai laskennallisesti huokoskaasun pitoisuudesta hyödyntämällä yhdisteen laimenemiskerrointa. Tyypillisesti huokoskaasupitoisuudet ovat useita kertaluokkia suurempia verrattuna sisäilman pitoisuuksiin. [3, s. 105.]

Laskennallisessa arvioinnissa yleensä oletetaan, että rakennusten alla haihtuvien yhdisteiden pitoisuudet asettuvat sellaiselle tasolle, että massavirrat maasta sisäilmaan ja maaperästä rakennuksen alle ovat yhtä suuret. Suomessa on radontutkimuksiin perustuen kehitetty haihtuvien yhdisteiden sisäilmakulkeutumisen arviointiin käytettävä laskentamalli. Mallissa hyödynnetään ympäristöministeriön oppaassa esiteltyjä kaavoja, jotka löytyvät liitteestä 1. Laskennallisessa arviossa tarvitaan muun muassa tietoja alapohjan läpi sisään tulevasta vuotoilmavirrasta, rakennuksen ilmanvaihtokerroin, tilavuus ja pohjan pinta-ala sekä diffuusiokerroin, laimenemiskerroin ja mitatut pitoisuudet sisäilmassa sekä päästölähteessä. Kuvassa 11 havainnollistettu esimerkki sisäilman pitoisuuden laskennallisesta arvioinnista hyödyntämällä oppaassa esitettyjä kaavoja. [3, s. 105.]



Kuva 11. Esimerkki sisäilman pitoisuuden laskennallisesta arvioinnista. [3, s. 106]

Kaupallisissa riskinarviointimalleissa sisäilmakulkeutumisen arviointiin käytetään Johnsonin ja Ettingerin esittämää mallia, jossa alapohjan kautta kulkeutumiseen hyödynnetään diffuusiota ja paine-eroihin perustuvaa virtausta. Tämän sekä laimenemiskertoimeen perustuvan laskentatavan on todettu antavan yhtäläisiä tuloksia. [3, s. 107.]

VOC-yhdisteiden sisäilmakulkeutumisen laskentamallit perustuvat kuitenkin olemassa olevalle vanhalle pientalolle, jonka ongelmana on radonkaasu. Todennäköisesti mallit eivät täysin sovellu nykypäivän rakennuksille, varsinkaan kerrostaloille. Rakenteet sekä LVI-tekniikka ovat muuttuneet nykyrakentamisessa, mikä johtaa riskilaskennassa tehtäviin turhiin laskentoihin. Näistä voidaan tehdä vääriä tulkintoja, joiden perusteella tehdään epärealistisia ja tarpeettomia puhdistustavoitteita.

## 2.5 Rakennusten alapohjat

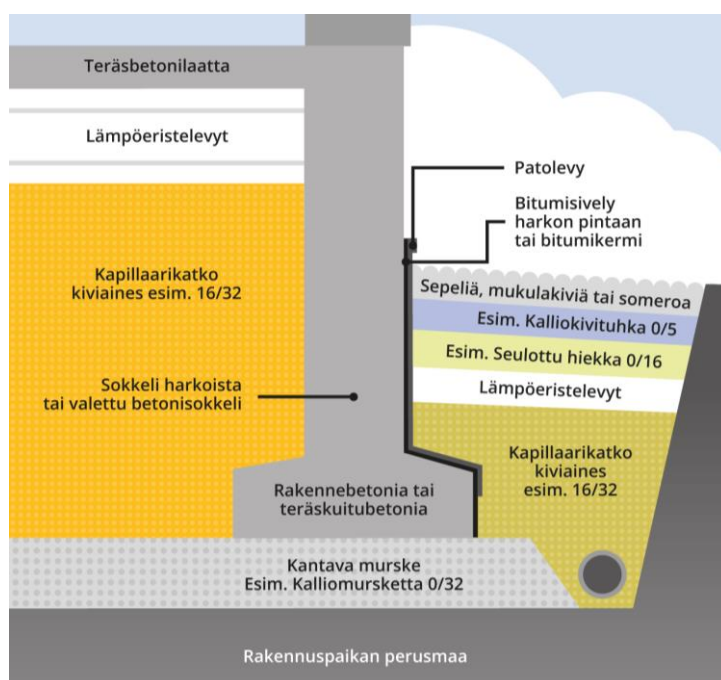
Alapohjalla yleensä tarkoitetaan asunnon pohjarakenteita pintalattiasta perustuksiin. Rakennusten alapohjaratkaisut voidaan pääperiaatteittain jakaa maanvastaiseen ja ryömintätilaiseen. Vaihtoehtoina voidaan pitää myös kellarillista perustusta sekä pilariperustusta, mutta tässä keskitytään vain kahteen ensin mainittuun. Alapohjatyypin valintaan vaikuttavat maaston muodot ja maaperän ominaisuudet; jos rakennustontilla on paljon korkeuseroja, maanvastaisen alapohjan perustamiseen vaaditaan paljon täyttömursketta, jolloin ryömintätilallinen on halvempi vaihtoehto. Perustukset voidaan tehdä joko matala- tai syväperustuksena, riippuen maaperän routimisesta. [65, s. 7–8.]

### 2.5.1 Maanvastainen alapohja

Maanvastainen alapohja (myös täytönvarainen tai maanvarainen perustus) on nimensä mukaisesti maata vasten rakennettu alapohjarakenne. Maanvastainen alapohja on yleinen ratkaisu pientaloissa ja silloin, kun rakennustontin maa-pohja on riittävän kantava. [66.]

Maanvastaisessa alapohjassa perustuksena voi olla joko perusmuuri tai reunavahvistettu laatta. Anturan päälle valetun perusmuurin eli sokkelin sisäpuoli täytetään murskeella. Täytetty sokkeli peitetään eristelevyillä, joiden päälle valetaan betonilaatta. [67.] Sokkelirakenteella rakennuksen kuormitus siirtyy perustuksiin. Riittävän kantavalla maalla painon edelleen laajemmalle alueelle siirtävä antura ei ole tarpeellinen. [67.] Toinen vaihtoehto on suoraan maa-aineksen päälle valettu, reunoilta vahvistettu kantava betonilaatta. Kun ulkoreunat tehdään paksummiksi, erillinen antura tai sokkeli ei ole tarpeen. [68.] Hienojakoisen maa-aineksen päälle tarvitaan rakenteiden kosteusvaurioiden ehkäisemiseksi kapillaarisen vedennousun estävä kapillaarikatko, joka voidaan tehdä karkealla, riittävän suuren raekoon kiviaineksella, kuten sepelillä tai singelillä. [66.] Kapillaarikatkokerrokseen voidaan lisätä myös esimerkiksi salaojaputkista tehty tuuletuskanavisto, jolla voidaan ohjata radonia ja muita kaasumaisia

yhdisteitä rakennuksen alta pois. [69, s. 4.] Kuvassa 12 on havainnollistettu maanvastaisen alapohjan rakenne l pileikkauskuvana.



Kuva 12. Maanvastaisen alapohjan rakenne. [68]

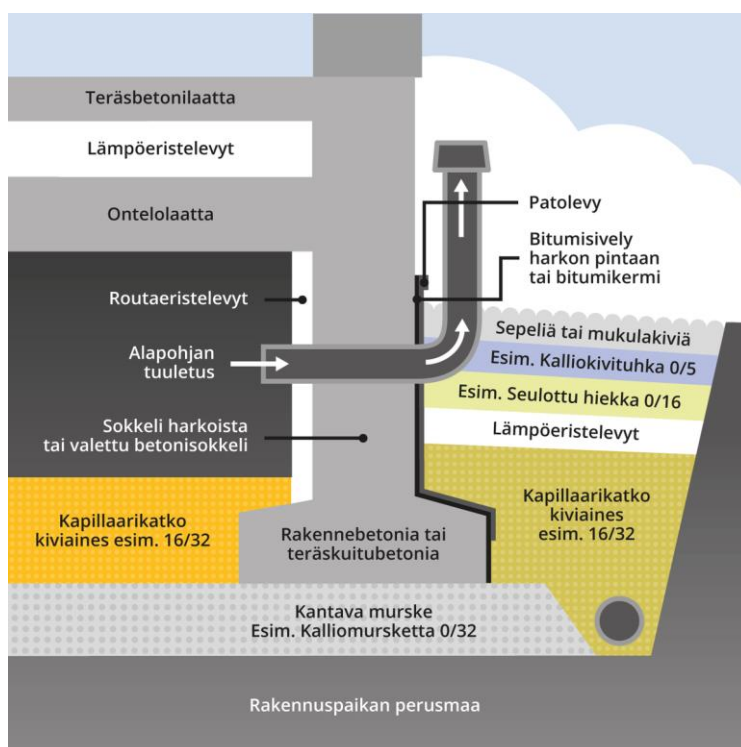
Maanvastaisessa alapohjassa voidaan k ytt    myös kaksoislaattarakennetta, jolloin sokkelin päällä on erikseen pohja- ja pintalaatta, ja vain näiden välissä on l    neriste. T    on kosteuden kannalta riskialtis rakenne puisten v lisein rakenteiden n    kulmasta, mikäli pohjalaatan alla ei ole erillistä eristystä, sillä laatan reunalla alhainen l  p  tila mahdollistaa veden kondensoitumisen puurakenteeseen sisäilman kosteuden ollessa korkea. [66.]

Myös vuotoilman pääsy kaikkine ep puhtauksineen rakenteiden välistä on haitallista sisäilman laadulle. Varsinkin ennen 1980-lukua rakennetuissa maanvastaaisessa betonilaatassa ongelmia voivat aiheuttaa perustusten ja laatan liittymäkohtaan syntyvät ilmaraot, jotka muodostuvat tiivist   tt      liitoskohtaan betonin kuivuessa ja kutistuessa. Myös perustuksen sisäpinnan eriste voi olla ilmatiiveyden puutteesta vuotol hde. [67.]

### 2.5.2 Ryömintätilallinen alapohja

Ryömintätilallisessa alapohjassa maan ja lattian väliin jätetään rakenteellisesti vähintään 800 mm korkea tila. Ryömintätilallinen perustus voidaan tehdä joko betoni- tai puurakenteisena. Joissain lähteissä ryömintätilaisesta alapohjasta puhutaan synonyymilla rossipohja, toisissa sillä viitataan nimenomaan puurakenteiseen perustukseen. [65, s. 70; 68.]

Ryömintätilallinen kantava alapohja voidaan tehdä perusmuurin päälle rakennettavalla laattaelementillä, joista tyypillisin on betoninen ontelolaatta. Yleensä lämmöneriste on laatan alapuolella, mutta myös laatan yläpuolinen eriste ja pintalaatta voivat olla vaihtoehto. Laatta voi olla myös liittolaatta, jossa yhdistyy kaksi eri materiaalia, jolloin betoniin voidaan liittää teräs, puu tai kuorielementti. Yhdistelmä rakenteilla saadaan aikaan esimerkiksi keveyttä ja lujuutta rakenneratkaisuihin. Nykyään ryömintätila kaivetaan osittain maanpinnan alapuolelle, jolloin on mahdollista, että vesiä päätyy pohjalle. Tämän vuoksi myös ryömintätilassa kapillaarisen veden nousun estävä kiviaines on suositeltavaa. [73; 74; 65, s. 80–81.] Kuvassa 13 on esitetty ryömintätilaisen alapohjan läpileikkaus.



Kuva 13. Ryömintätalallisen alapohjan rakenne. [68]

Ryömintätilaa on tärkeää tuulettaa. Tuuletus voidaan järjestää tekemällä tuuletusaukkoja perusmuuriin, ja sitä on mahdollista tehostaa koneellisesti tai tuuletusputkillla asentamalla katolle johtava hormi. Tuuletus tulee mitoittaa sopivaksi, ottaen huomioon lämpötilojen vaihtelut vuodenaikojen mukaan, jottei tilan suhteellinen kosteus nouse liian korkeaksi. [70; 74.]

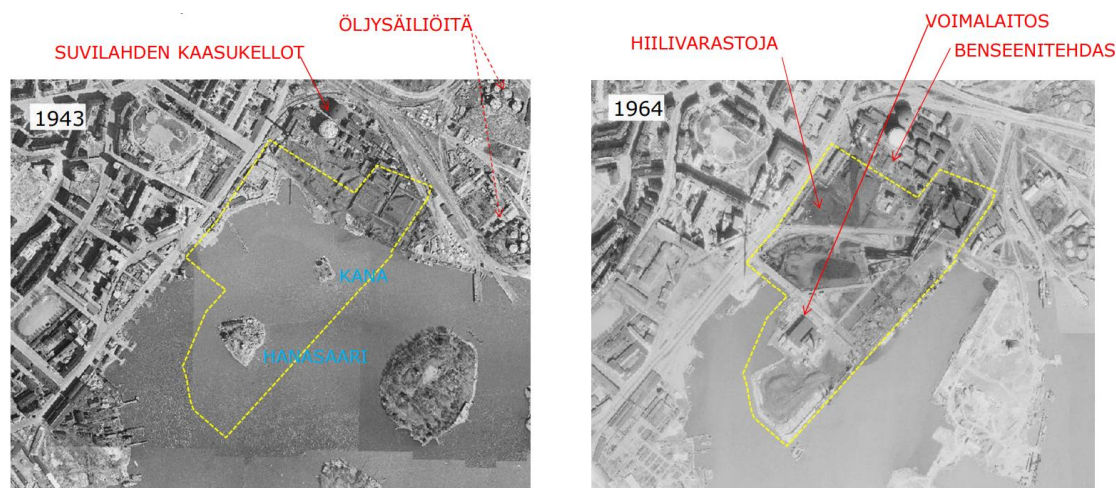
Maanvastaiseen ratkaisuun verrattuna ryömintätalallisen alapohjan etuina on muun muassa helpompi kosteusvaurioiden ehkäisy ja kaasumaisten epäpuhauksien pääsyn estäminen sisäilmaan on tehokasta tuuletuksen avulla. Kuitenkin ryömintätalassa on erittäin tärkeää huolehtia, että tilan tuulettavuus on riittävä [65, s. 70.]

### 3 Hanasaaren alue

Hanasaari sijaitsee keskisen Helsingin edustalla merenrannalla Suvilahden eteläpuolella. Naapurikaupunginosia ovat Sörnäinen, Kalasatama sekä Merihaka.



1900-luvun alussa Hanasaari on vielä nimensä mukaisesti ollut saari, ja sen lähialueella Suvilahdessa on ollut teollista toimintaa, kuten sähkö- ja kaasuvoimalaitos. [75, s. 8.] Vuosisadan puolivälissä Suvilahden alue kaavailtiin täysin voimalaitosalueeksi kasvavan kaupungin energiatarpeisiin ja aluetta täytettiin merelle päin yhdistäen Kanan ja Hanasaaren mantereeseen (kuva 14).



Kuva 14. Hanasaaren alue ennen täyttöä ja täytön jälkeen. [76, s. 3]

Hanasaari A -voimala otettiin käyttöön vuonna 1960 ja Hanasaari B -voimala vuonna 1974. Voimalat ehtivät olla samanaikaisesti toiminnassa lähes 50 vuotta, kunnes vuonna 2006 A-voimala päätettiin lakkauttaa ja se purettiin vuonna 2009. Hanasaari B -voimalan toiminta loppui maaliskuussa 2023, jonka jälkeen alueen luonne muuttuu täysin. Alue on Helsingin yleiskaavassa osoitettu keskusta-alueeksi, pitäen sisällään asuinrakennuksia liiketiloineen ja julkisine palveluineen, viheralueita sekä virkistys- ja liikuntamahdollisuuksia. Aluetta kehitetään lähtökohtaisesti kestävien kulkumuotojen ehdoilla, erityisesti kävelyyn ja pyöräilyyn keskittyen. [75, s. 7.]

### 3.1 Alueen nykytila ja aiemmin suoritettut tutkimukset

Voimalaitosalueella on tehty vuodesta 2016 alkaen PIMA-tutkimuksia. Näiden perusteella maaperän on todettu olevan voimakkaasti sekapilaantunutta.

Alueella tehdyissä huokosilmatutkimuksissa on todettu paljon useita haihtuvia yhdisteitä, ja klooratuista liuottimista on todettu erityisesti suuria PCE- ja TCE-pitoisuuksia alueen läntisessä osassa. Tutkimuksia varten vuonna 2017 alueelle asennettiin 21 orsiveden ja/tai huokosilman havaintoputkea, joista näytteitä on sittemmin otettu kahdesti vuodessa. Näytteitä otettiin aluksi passiivisesti Tenax-näytekeräimeen. Myöhemmin näytteenotto on muutettu aktiivipumppaukseksi. Vertailumielessä näytteitä on toisinaan otettu Carbopack-näytekeräimeen. Poikkeuksena vinyylidikloridi, joka on analysoitu aktiivipumppauksella hiiliputkeen keräystä näytteestä koko tarkkailujakson ajan. [75, s. 15–16.] Vuosina 2016–2017 alueella suoritetuissa huokosilmatutkimuksissa on todettu suurimmillaan seuraavanlaisia kloorattujen liuottimien haitta-ainepitoisuuksia: PCE 0,9–400 µg/m<sup>3</sup>; TCE 0,3–600 µg/m<sup>3</sup>; DCE 0,35–3,0 µg/m<sup>3</sup>; VC 0,35–5 µg/m<sup>3</sup> [77].

Alueella toiminut voimalaitos sekä muut maanalaiset rakenteet ja tekniikat, kuten kaukolämpö- ja viemäriinjat, ovat rajoittaneet tutkimusten sijoittelua. Kuitenkin alueen täyttöaineksesta johtuva hyvin heterogeeninen maaperä sekä pitkä teollinen historia aiheuttavat merkittäviä haitta-aineiden pitoisuusvaihteluja alueella. Tutkimusalueen ympäristöolosuhteiden lisäksi haihtuvien haitta-aineiden näytteenottoon, näytteiden käsittelyyn ja analyysiin liittyy tekijöitä, jotka lisäävät epävarmuutta analyysituloksiin. Tutkimuksissa myös haitta-aineiden pitoisuusvaihtelut samoissa havaintoputkissa ovat vaihdelleet eri mittauskerroilla. Haihtuvien yhdisteiden osalta tarvitaankin pitkäkestoista tarkkailua, jotta pitoisuuksien ajalliset vaihtelut voidaan erottaa yksittäisen mittauskerran vaihtelusta. Pitoisuuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa vallitseva ilmanpaine ja lämpötila, orsiveden pinnankorkeuden muutokset ja vaikutukset haihtumiseen sekä haitta-aineiden hajoaminen, liukeneminen, haihtuminen ja kulkeutuminen veden mukana. [75, s. 28]

### 3.2 Mahdolliset päästölähteet

Vuonna 2019 Hermanninmäen alueella tehdystä selvityksestä voidaan päätellä, mistä Hanasaaren alueella esiintyvät klooratut liuottimet voisivat olla peräisin. Hermanninmäellä on ollut toiminnassa 1900-luvun alusta alkaen useampia

teollisuustoimijoita, joista päästöt ovat mahdollisesti saaneet alkunsa. Selvityksessä kartoitettu teollisuusalue on rajattu punaisella kuvassa 15.

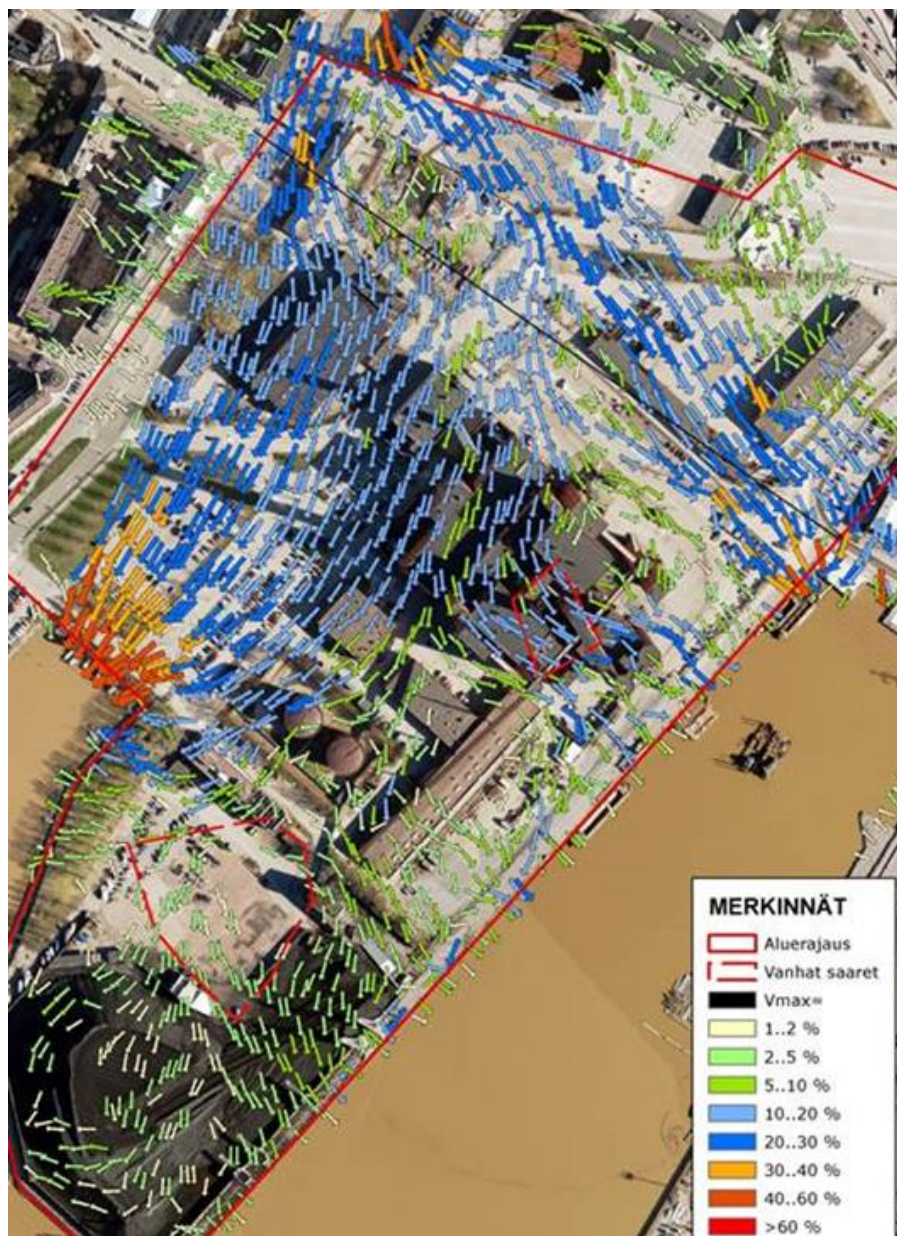


Kuva 15. Hermanninmäen teollisuuskeskittymän selvitysalue. [78]

Hermanninmäelle rakennettiin 1930-luvun alussa Lindströmin Talo, jossa aloitettiin pian pesula- ja värjäämötoiminta. Toimitiloja laajennettiin vielä 1990-luvulla, mutta vuonna 2002 pesulatoiminta siirrettiin pois kantakaupungista ja rakennus tyhjäksi. Nykyinen kulttuuri- ja ravintolakeskittymä Teurastamo aloitti toimintansa nimensä mukaisesti teurastamona vuonna 1933. Lihanjalostustoiminta jatkui alueella aina vuoteen 1992 asti, minkä jälkeen tilat jäivät lähinnä erinäisiksi varastotiloiksi ennen Tukkutorin alueen uudistushanketta. [79.] Valtion Margariinitehdas siirtyi Turusta Hermanninmäen itäreunalle vuonna 1924. Pienivolyyminen margariinin valmistus jatkui vajaan 70 vuoden ajan, kunnes tuotanto lopetettiin vuonna 1992. [80.] Näiden lisäksi alueella on 1900-luvun puolella toiminut muuta lihanjalostustoimijoita, metalli- ja tekno kemian tehtaot, pintakäsittelylaitos, kirjapainoja sekä autoliikkeitä. Toiminnot ovat loppuneet pääosin 1980–1990-lukujen aikana. Tarkemmat erittelyt näiden laitosten sijainneista löytyy liitteestä 2. Alueen vanhasta teollisuusrakennuskannasta useita on saneerattu asuin- ja toimistotiloiksi.

Hanasaaren alueella on vuonna 2017 laadittu pohjavesimalli sekä haitallisten yhdisteiden kulkeutumis- ja käyttäytymismalli, jonka mukaan pohjavedellä on

kaksi päävirtaussuuntaa: etelä sekä kaakko. Mallinnus on havainnollistettu kuvassa 16. Nuolien väri ja pituus kuvaavat virtausten suhteellista nopeutta maksimiarvoon, joka on noin 30 m/a. Valkoiset nuolet kuvaavat pohjaveden päävirtaussuuntia. [75, s. 15.]



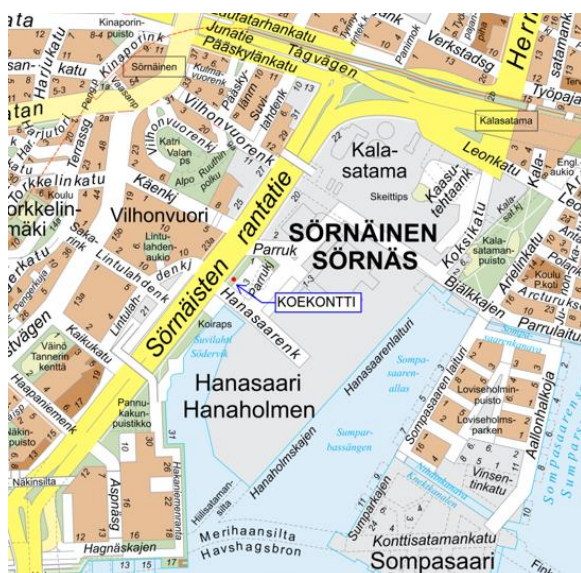
Kuva 16. Mallinnetut lasketut virtaussuunnat. [75, s. 13]



Pohjavesien päävirtaussuunta alueella on Suvilahdesta Hanasaaren kautta mereen. Paikoitellen pohjavesi on paineellista ja savikerroksen päällä on orsivesikerros. Alueen kallioperän pinnanvaihtelut ohjaavat virtaussuuntia. [75, s. 12.]

## 4 Testikontti

Kokeellista testausta varten Hanasaaren voimalaitosalueelle on hankittu toimistokontti, joka on muutettu koejärjestelyyn sopivaksi. Kontti on sijoitettu viheralueelle voimalaitoksen parkkipaikalle Sörnäisten rantatien tuntumaan, joka on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Testikontin sijoituspaikka [76]

Sijoituspaikaksi on valikoitunut kyseinen alue, sillä siellä on aikaisempien tutkimusten perusteella todettu suhteellisen korkeita kloorattujen liuottimien sekä muiden VOC-yhdisteiden pitoisuuksia. Tässä sijainnissa se myös häiritsee muuta alueen käyttöä mahdollisimman vähän.

#### 4.1 Kontin rakennetekninen tarkastelu

Testikonttina toimii toimistokontti (kuva 18), joka on muutettu koejärjestelyihin sopivaksi. Kontti on suunniteltu siten, että koejärjestelyillä voidaan tutkia alapohjan tiiveyden ja alipaineistuksen vaikutusta haitta-aineiden kulkeutumiseen. Rakenneteknisesti kontti on muokattu vastaamaan oikeaa rakennusta. Olosuhteiden muokkaaminen testaustarkoituksessa on mahdollista esimerkiksi ilmanvaihdon suhteen. Testikontissa on tarkoitus tutkia useiden yleisien maaperästä kulkeutuvien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden, erityisesti kloorattujen liuottimien, kulkeutumista sisäilmaan.

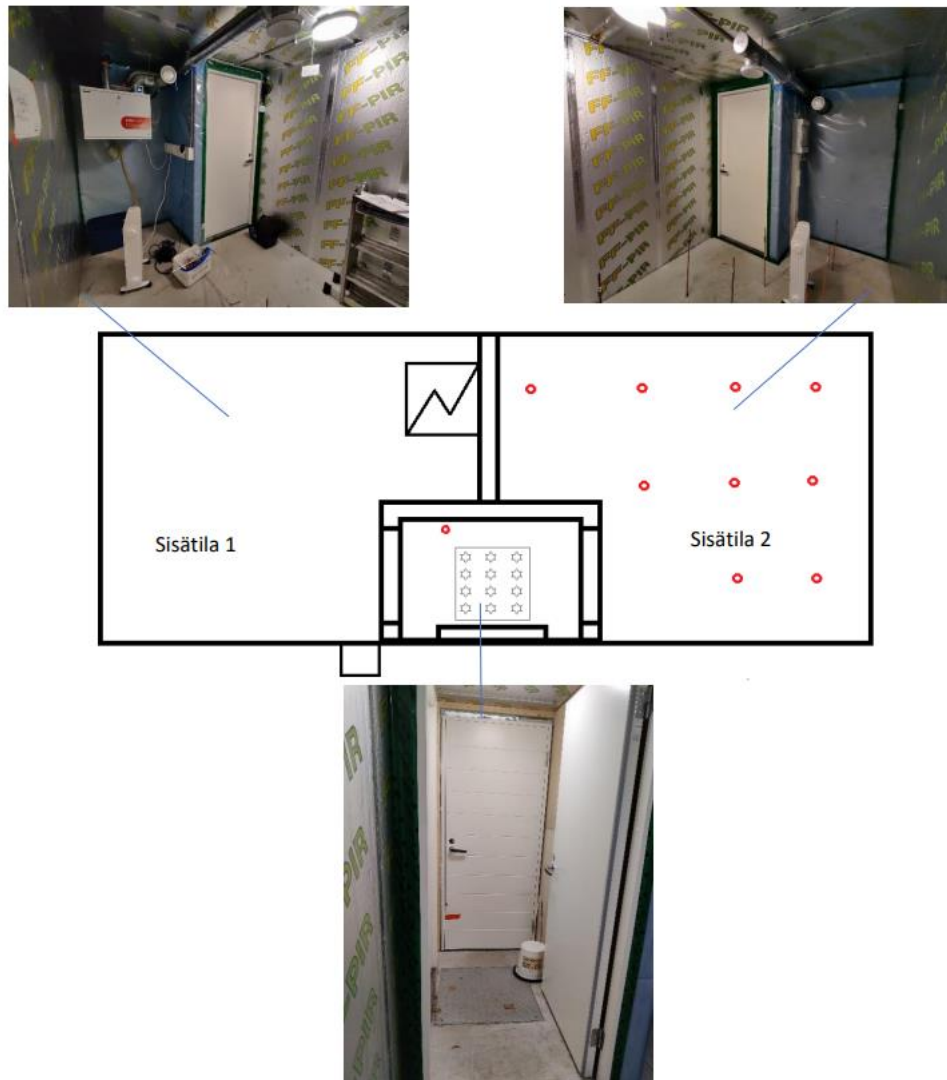


Kuva 18. Testikontti kuvattuna neljältä eri suunnalta.

Kontin alkuperäisiin poimulevyisiin ulkoseinämiin on sisäpuolelle liimattu pontatut alumiinikalvolla pinnoitetut XPS-eristelevyt. Yläpohjassa teräs- ja puuorsien välillä on käytetty samaa alumiinipohjaista uretaanilevyä. Mahdolliset raot ja saumat on peitetty alumiiniteipillä. Alumiinipinta estää haihtuvia hiilivetyjä haihtumasta eristelevyistä sisäilmaan. [81.]

## 4.2 Sisätilat

Kontin sisätilaan on rakennettu kaksi erillistä, pinta-alaltaan 12 m<sup>2</sup>:n huonetta, joita erottaa toisistaan tuulikaappi. Huoneiden välille on rakennettu puurunkoiset vaneriset väliseinät. Levyt on päällystetty höyrynsulkukalvolla, jolla estetään ilman vuotaminen huoneiden välillä. Huoneissa on erilliset tiivisteellä varustetut parvekeovet, jotka voidaan sulkea, jotta ilman sekoittuminen huoneiden kesken on mahdollisimman vähäistä. Tuulikaapista on kaasutiiviillä luukulla peitetty kulkuyhteys ryömintätilaan. [81; 82.] Tilaa on havainnollistettu kuvassa 19. Tarkeempia teknisiä piirroksia kontista löytyy liitteestä 3.



Kuva 19. Kontin havainnollistava pohjapiirros sekä valokuva kustakin huoneesta. Punaiset pisteet ovat putkiläpivientejä ryömintätilaan, harmaa neliö huoltoluukku ryömintätilaan.

Toisen huoneen (sisätila 2) lattiaan on asennettu yhdeksän kappaletta ryömintätilaan vieviä vesijohtoputkia (halkaisija n. 10 mm) kuulasulkuventtiileillä. Putket on läpiviennin jälkeen tiivistetty hyvin. Säädeltyvien putkien avulla voidaan mallintaa epätiivistä alapohjaa ja mahdollisesti muuttaa tiiveyden astetta. Toisessa huoneessa (sisätila 1) lattia on koskematon. Tuulikaappiin on myös lisätty lattian läpi kulkeva venttiilillä säädeltyvä vesijohtoputki, joka mahdollistaa helpon huokosilmanäytteenoton ryömintätilasta. [81; 82.]



### 4.3 Alapohja

Kontin alkuperäinen vaneripohja on purettu teräsrunkoon asti. Tilalle on rakennettu tuulettuva betonialapohja. Kontin teräspalkkien päälle on asennettu lämmöneristeeksi 100 mm:n paksuista uretaanilevyä. Päälle on valettu 80 mm:n betonilaatta. [81; 82.]

Alapohjan ryömintätila ulottuu noin 600 mm maan alle. Kontin perustuksena on murskeen päälle kestopuusta ja filmivanerista tehty sokkeli, joka on eristetty sisäpuolelta uretaanilevyillä ja tiivistetty uretaanivaahdolla. Ulkopuolelle on asennettu maanvastaiset routaeristelevyt. [81; 82.] Ryömintätila on esitetty kuvassa 20 kuvattuna huoltoluukusta.



Kuva 20. Ryömintätila. Vasemmalla puolella sisätilan 1 alapuolelta, oikealla sisätilan 2 alapuolelta.

Ryömintätila on koneellisesti tuuletettu. Ryömintätilan tuuletusta voidaan ohjata kontin sisäpuolelta löytyvällä säätimellä. Korvausilmaventtiili kulkee sokkelin läpi kuljettaen ulkoilmaa ryömintätilaan. Poistoputki kulkee katolle, jossa huippuimuri imee ilman pois. Imurin ohjaukseen on määritetty arvo siten, että imun ollessa päällä tuuletus vastaa norminmukaista ryömintätilan tuuletusta (0,5 krt/h). [81; 82.]

#### 4.4 LVI-tekniikka

Konttiin on vedetty sähköyhteys maakaapelilla. Huoneisiin on asennettu kattovalaisimet sekä useampia pistokepaikkoja. Lämmittiminä molemmissa huoneissa käytetään öljytäytteisiä sähköpattereita. [81; 82.]

Sisätilaan 1 on asennettu pieni Swegon W3 Smart xs -ilmanvaihtokone lämmön talteenotolla. Molempiin sisätiloihin on vedetty erilliset tulo- ja poistoputket, joita voidaan säätää huonekohtaisesti. Ilmanvaihto on säädetty siten, että ilma vaihtuu koko kontissa kerran kahdessa tunnissa. Putkien läpivientien saumat on tiivistetty uretaanilla. [81; 82.]

#### 4.5 Reaaliaikaiset mittausanturit

Huoneissa ja ryömintätilassa on erilliset Decentlabin DL-IAM-sisäilmamittarit (kuva 21). Ne mittaavat reaaliajassa ilman lämpötilaa, suhteellista ilmankosteutta, ilmanpainetta, hiilidioksidipitoisuutta sekä TVOC-pitoisuutta. Ulos kontin katolle on sijoitettu Decentlabin ulkoilmaan soveltuva DL-LP8P-ilmanlaatumittari, joka mittaa muita edellä mainittuja parametreja paitsi TVOC-pitoisuutta.



Kuva 21. Decentlabin DL-IAM ja DL-LP8P-ilmanlaatumittarit ja niiden sijoittelu kontissa. [83, s. 1; 84, s. 1]

Mittarit on ajastettu lukemaan anturien mittaustiedot tietyn näytteenottovälin aikana  $n$  kertaa (esimerkiksi 30 sekunnin aikana 20 kertaa). Näistä tiedoista laite laskee keskiarvon, jonka se lähettää LoRaWAN-radiotekniikkaa hyödyntäen suoraan pilveen (verkko-osoite [is.ramboll.fi/hanasaari/](http://is.ramboll.fi/hanasaari/)). Pilvipalvelussa datasta koostetaan automaattisesti päivittyvä kuvaaja. Mittaustulos on säädetty lähetettäväksi noin kolmen tunnin välein. [83, s. 9.]

## 5 Testiolosuhteet

Työn aikana tutkimusta edistettiin yhdellä koejärjestelyllä. Koejärjestelyssä oli tarkoitus selvittää, millaisia haitta-ainepitoisuuksia ryömintätilaan muodostui luonnollisesti, tavoitteena saada mahdollisimman suuret pitoisuudet. Koejärjestelyiden aikana ryömintätilasta suljettiin tuuletus ja kontin sisälle muodostettiin pieni alipaine ryömintätilaan nähden. Kokeen aikana ilmanvaihtokone oli kontissa päällä, virtaus 20 l/s molemmissa huoneissa. Myöhemmin ilmanvaihto huomattiin liian voimakkaaksi kyseiseen tilaan ja se säädettiin virtausnopeuteen 2 l/s. Koejärjestelyn olosuhteet on esitetty taulukossa 3.

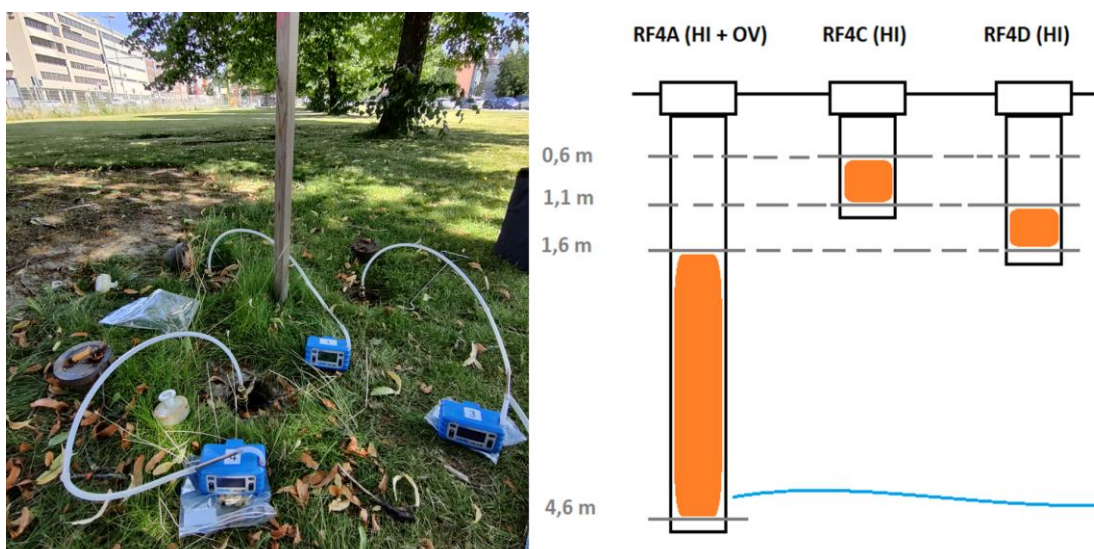
Taulukko 3. Laitteiston asetukset ja säädetyt olosuhteet koejärjestelyn aikana.

<b>IV-kone</b>	Päällä virtaus 20 l/s; myöhemmin 2 l/s
<b>IV-kone, ryömintätilan tuuletus</b>	alipaine
	pois päältä
<b>Ryömintätilan tuuletus Alapohjan läpivientiputket</b>	korvausilmaventtiili ja poistoputki tulpattu
	putket suljettu
<b>Lämmitys</b>	Peruslämpötilan säätöä ei tehty, pyritty perushuoneenlämpöön (20–25°C) Lämmitys öljytäytteisillä lämpöpattereilla (sisätila 1, sisätila 2)

Vuodenaikojen mukaan vaihteleva ulkolämpötila vaikutti vahvasti sisätilan lämmitystarpeeseen. Käytössä olleiden lämpöpattereiden ylläpito tietyssä lämpötilassa oli hieman haasteellista. Lämpötila pyrittiin pitämään normaalissa huoneenlämpötilassa 20–25°C.

## 6 Näytteenotto

Näytteenotto suoritettiin aktiivikeräyksenä Gilian GilAir Plus -pumpuilla. Näytteitä kerättiin noin kerran kuussa muista pisteistä, paitsi ryömintätilasta kahden viikon välein. Kontista näytteet otettiin sisätilojen 1 ja 2 huoneilmasta sekä ryömintätilasta tuulikaapissa sijaitsevan putken kautta. Taustapitoisuus mitattiin ulkoilmasta kontin läheisyydessä. Kontin vieressä noin 3 metrin etäisyydellä sijaitsevista maahan asennetuista havaintoputkista RF4A (siiviläosa 1,6–4,6 m), RF4C (siiviläosa 0,6–1,1 m) ja RF4D (siiviläosa 1,1–1,6 m) otettiin kustakin näytteet, jotta tiedetään millaisia pitoisuuksia maaperästä ja pohjavedestä voisi teoriassa haihtua. Havaintoputkien siiviläosa RF4A:ssa ylettyy orsivesikerrokseen (OV), RF4C:ssä ja RF4D:ssä ovat vain maaperän huokosilmapitoisuuksien (HI) mittaamiseen. Kuvassa 22 on kuvattu mittaus maaperästä sekä havainnollistettu eri putkien pituudet ja siivilöiden syvyydet.



Kuva 22. Näytteenotto maaperän havaintoputkista RF4A, RF4C ja RF4D ja putkien syvyydet, siivilät merkitty oranssilla.

Näytteet kerättiin analysoivan laboratorion toimittamiin Tenax TA -, aktiivihiihi- sekä Carbopack B -näytekeräimiin. Tenaxista analysoidaan laajasti VOC-yhdisteitä, mukaan lukien TCE, PCE ja DCE:t, kuten vastaavasti Carbopackista, jolla voidaan määrittää korkeampia pitoisuuksia. Aktiivihiihiputkesta taas saadaan analysoitua vinyylidikloridi. Taulukossa 4 on koottu kustakin näytestä kerätävät näytetilavuudet V sekä käytetty pumppausteho Q.

Taulukko 4. Näytteenottotilavuudet (V) ja -pumppaustehot (Q) näytestä kullakin näytekeräimellä.

	Tenax TA		Carbopack B		Aktiivihiihi	
Näytestä	V (l)	Q (l/min)	V (l)	Q (l/min)	V (l)	Q (l/min)
Sisätila 1	6	0,1			6	0,25
Sisätila 2	6	0,1			6	0,25
Ryömintätila	6	0,1			6	0,25
Taustapitoisuus	6	0,1			6	0,25
RF4A (1,6–4,6 m)	1	0,1	1	0,1	6	0,25
RF4C (0,6–1,1 m)	1	0,1	1	0,1	6	0,25
RF4D (1,1–1,6 m)	1	0,1	1	0,1	6	0,25

Ensimmäisten näytteenottokertojen jälkeen ulkonäytestä otettiin näytteet myös Carbopack-putkiin, sillä analyysitulokset ylittivät Tenaxin määritysrajat. Ulkona sijaitsevat havaintoputket huuhdeltiin eli tyhjennyspumattiin ennen näytteenottoa, jotta näytteeksi kerätty ilma vastaisi maaperästä tulevaa huokosilmaa eikä putkessa seissyttä ilmaa. Näistä pisteistä näytteitä otettaessa putket suljetaan näytteenottokorkeilla tiiviisti, jottei ilmaa pääse ohivirtaamaan.

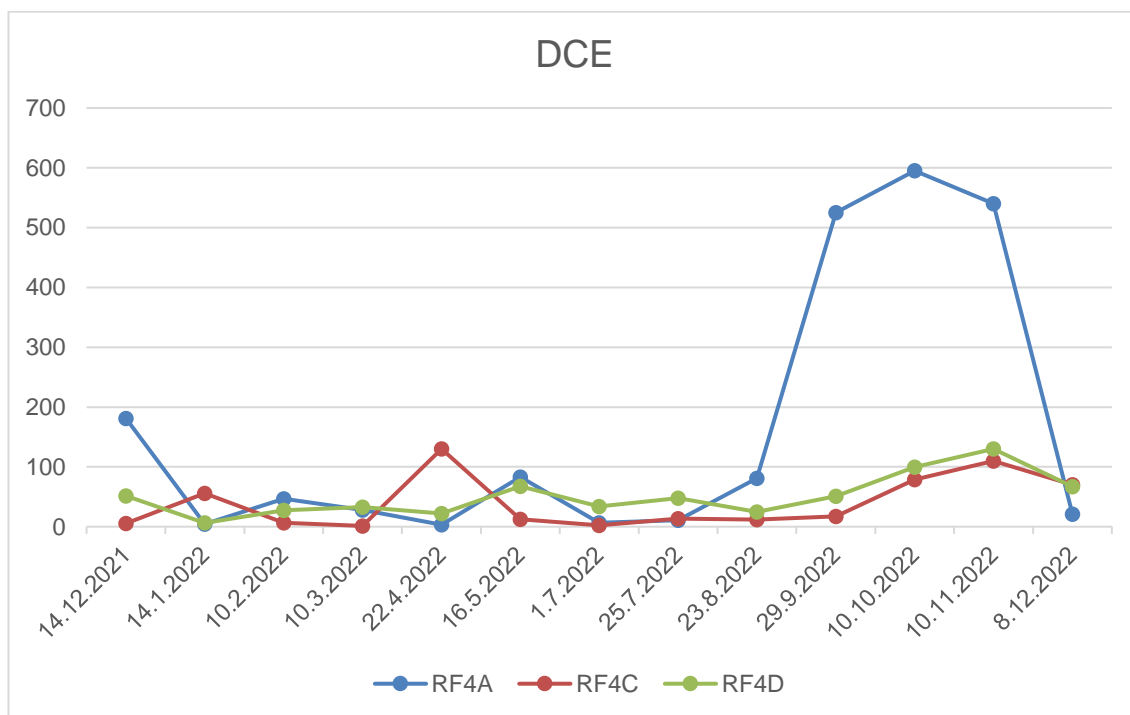
Näytteet toimitettiin analysoitavaksi Eurofins Environment Testing Finland Oy:lle mahdollisimman pian näytteenoton jälkeen. Analyysit tehtiin standardoiduilla menetelmillä, joiden kuvaukset löytyvät analyysitodistuksista.

## 7 Tulokset

Seuranta-ajan mittaustulokset löytyvät liitteestä 4. Seuraavissa luvuissa tulokset on esitetty kuvaajina, ja ne on eritelty maaperässä ja ryömintätilassa todettuihin pitoisuuksiin. Sisätiloissa DCE-, TCE- ja PCE-pitoisuudet jäivät yksittäisiä mitauskertoja lukuun ottamatta määritysrajan alapuolelle. Mitatut pitoisuudet jäivät välille 0,13–1,6 µg/m<sup>3</sup>. Vinyylikloridipitoisuudet jäivät kaikissa mittauksissa alle laboratorion määritysrajan. Myöskään taustapitoisuuksia ei juuri havaittu.

### 7.1 Huokosilmapitoisuudet maaperässä

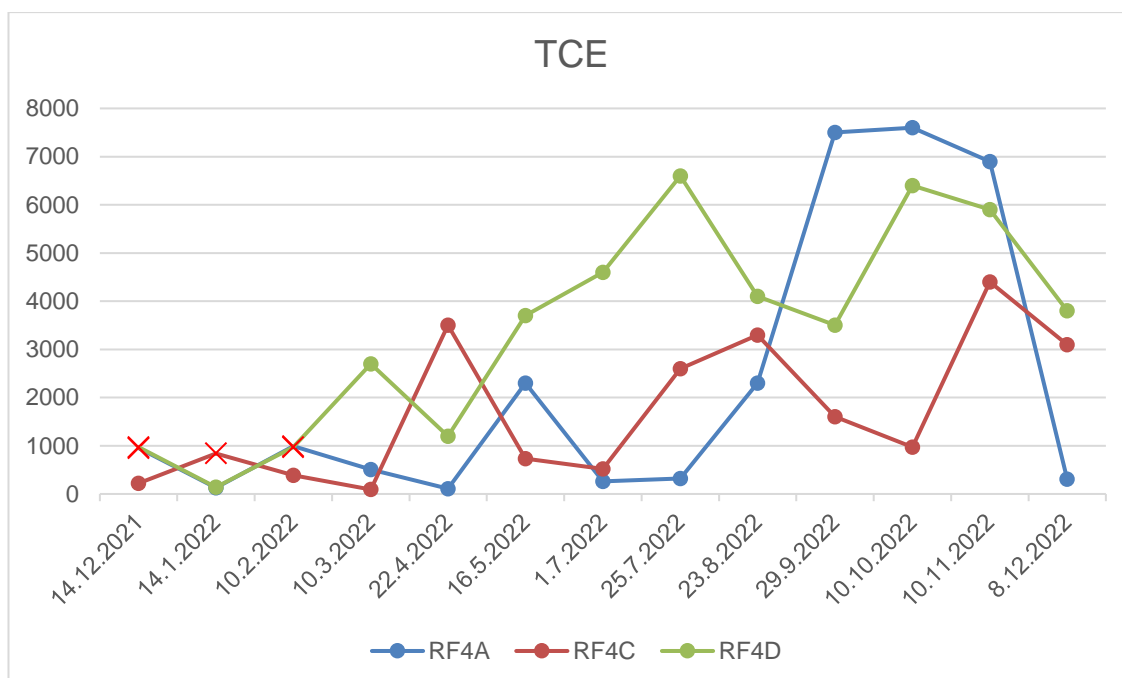
Maaperän huokoskaasuputkista todettiin TCE-pitoisuuksia, jotka pystyttiin määrittämään kvantitatiivisesti sekä Tenaxilla että Carbopackilla. DCE- ja PCE-pitoisuuksia mitattiin, mutta pitoisuustasot olivat pieniä. Mikäli näytteet on analysoitu sekä Tenaxista että Carbopackista, tulosten käsittelyyn on valittu suurempi tulos. Kuvassa 23 on esitetty kuvaaja maaperäputkista mitatuista DCE-pitoisuuksista.



Kuva 23. Mitatut DCE-pitoisuudet maaperäputkista RF4A, RF4C ja RF4D.

Maaperässä DCE-pitoisuudet vaihtelevat 1,3–595  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . OV-putken RF4A mitaustulokset vaihtelevat tarkastelujakson aikana 3,3–595  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , HI-putkesta RF4C 1,3–130  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ja HI-putkesta RF4D 6,3–130  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

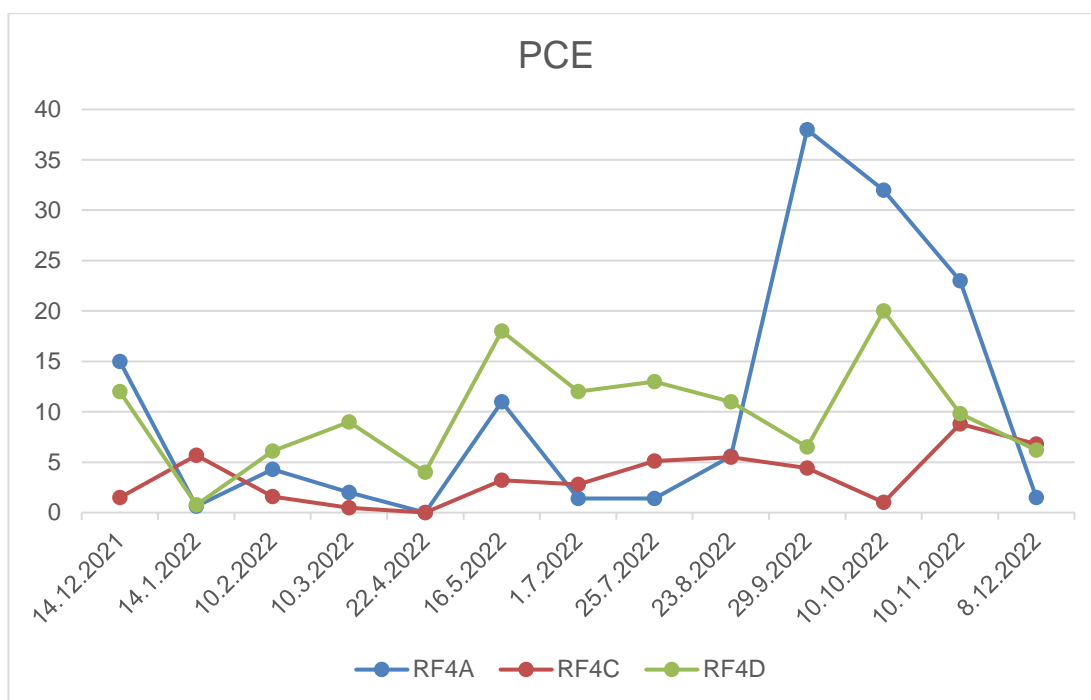
Kuvassa 24 on esitetty maaperän putkista mitatut TCE-pitoisuudet kuvaajana. Ensimmäisillä mittauskerroilla mitatut TCE-pitoisuudet, jotka on analysoitu vain Tenaxista, ylittivät määrittäysrajan, joten nämä pitoisuudet on merkitty punaisilla rukeilla niihin pitoisuuksiin, jotka analyysitodistuksessa on merkitty ylittävän määrittäysrajan. Nämä pitoisuudet käsittävät RF4A:sta mitatut pitoisuudet 14.12. ja 10.2., RF4C:stä 14.1. sekä RF4D:stä 14.12. ja 10.2.



Kuva 24. Mitatut TCE-pitoisuudet maaperäputkista RF4A, RF4C ja RF4D. Määrittäysrajan ylittäneet tulokset merkitty punaisilla rasteilla.

Maaperän TCE-pitoisuuksia mitattiin 73–7500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . OV-kerrokseen asennettu RF4A-putken TCE-pitoisuus vaihteli 87–7500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , kun 1,6 m:n syvyydessä olevasta RF4D-putkesta mitattiin 140–6600  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ja 1,1 m:n syvyydestä RF4C-putkesta vastaavasti 73–4400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Kuvassa 25 on esitetty kuvaaja maaperästä mitatuista PCE-pitoisuuksista.



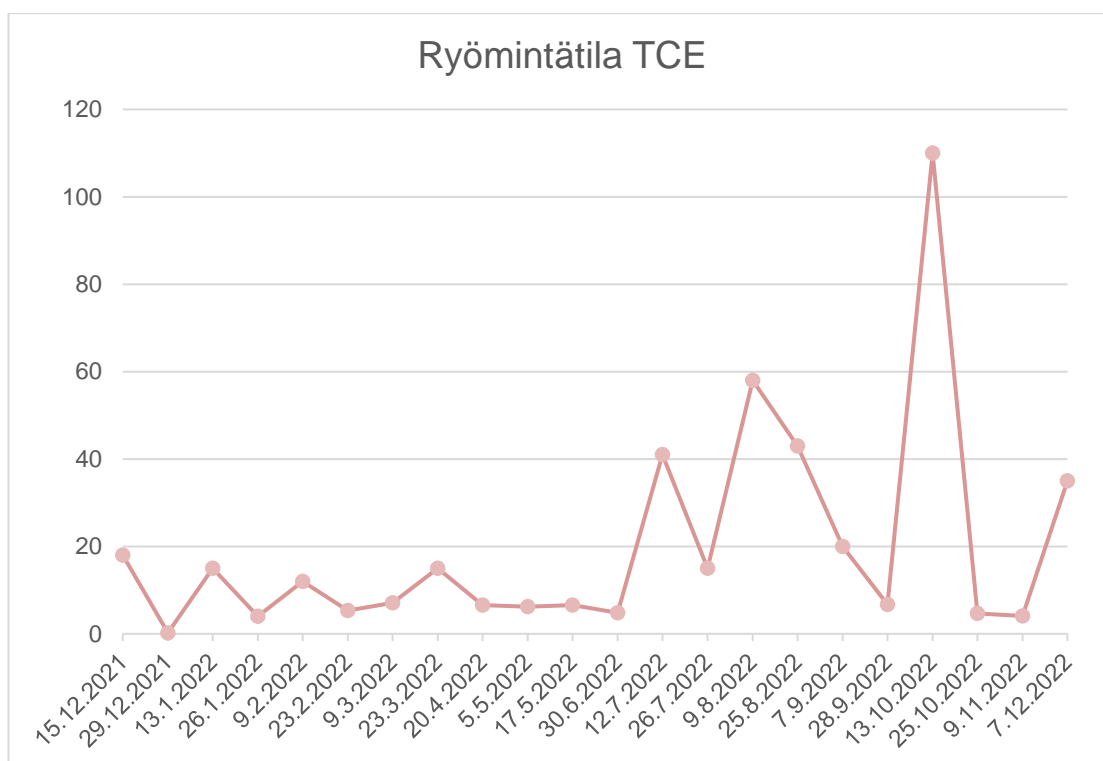
Kuva 25. Mitatut PCE-pitoisuudet maaperäputkista RF4A, RF4C ja RF4D.

PCE-pitoisuudet maaperässä vaihtelivat 0,46–38 µg/m³. OV-kerroksen huoko-silmapitoisuudeksi putkesta RF4A mitattiin 0,65–38 µg/m³. HI-putkista mitatut pitoisuudet olivat RF4C-putkesta 0,46–19 µg/m³ ja RF4D:stä 0,75–18µg/m³

## 7.2 Pitoisuudet ryömintätilassa

Ryömintätilassa saatiin riittävästi pitoisuustuloksia vain TCE:stä. Tuloksista piirrettiin kuvaaja, joka on esitetty kuvassa 26.





Kuva 26. Ryömintätilan TCE-pitoisuudet

TCE-pitoisuuksia ryömintätilasta mitattiin 0,23–110 µg/m³. Pitoisuudet pysyvät suhteellisen tasaisina mittausjakson puoleen väliin, minkä jälkeen pitoisuusvaihtelut suurenevat jakson loppuun asti.

## 8 Tulosten käsittely

Maaperästä mitattujen kloorattujen liuottimien pitoisuudet vaihtelivat putkittain eriteltynä tutkintajakson aikana seuraavasti. DCE:n kohdalla pitoisuudet kaikista putkista mitattuna pysyivät tasaisesti alle 100 µg:ssa/m³ lukuun ottamatta OV-putkea. Pitoisuudet lähtivät voimakkaaseen, yli viisikertaiseen nousuun, n. 600 µg:aan/m³ tarkastelujakson neljännessä kvartaalissa, mutta putosivat takaisin alle 50 µg:aan/m³ viimeisessä mittauksessa.

TCE:n osalta ensimmäisen kvartaalissa putkista RF4A ja RF4D saadut pitoisuudet ovat epävarmoja, mutta pitoisuudet pysyvät mittausjakson toiseen kvartaaliin saakka alle 3000 µg:ssa/m³, minkä jälkeen HI-putkessa RF4D-pitoisuudet

nousevat keskimäärin toisen ja kolmannen kvartaalin ajan pysyen n. 3000–7000  $\mu\text{g:ssa/m}^3$ , tehden pienen laskun n. 1000  $\mu\text{g:aan/m}^3$  toisessa kvartaalissa. Vastaavasti huokosilmaputkessa RF4C TCE-pitoisuus lähtee nousuun kolmannen kvartaalin alussa nousten 500–3000  $\mu\text{g:aan/m}^3$ . Samankaltainen pitoisuusnotkahdus kuin RF4D-putkessa (n. 3500  $\mu\text{g:sta/m}^3$  alle 1000  $\mu\text{g:aan/m}^3$ ) edeltää kuitenkin RF4C:n pitoisuusnousua toisen kvartaalin lopussa. RF4A-putkessa pitoisuuspiikki löytyy kolmannen kvartaalin alusta, ja pitoisuus nousee n. 250  $\mu\text{g:sta/m}^3$  n. 7000  $\mu\text{g:aan/m}^3$  pysytellen samalla tasolla viimeiseen mittauserkaan saakka, jolloin pitoisuus laskee n. 300  $\mu\text{g:aan/m}^3$ . Huokosilmaputkissa pitoisuudet lähtevät n. 2000  $\mu\text{g:n/m}^3$  laskuun kolmannessa kvartaalissa, mutta nousevat pian neljännessä kvartaalissa takaisin pudotusta edeltävälle tasolle.

PCE-pitoisuuksia mitattiin koko tutkimusjakson ajan alle 40  $\mu\text{g/m}^3$ . Pääosin pitoisuudet pysyivät alle 15  $\mu\text{g:ssa/m}^3$ . HI-putkesta RF4D mitatut pitoisuudet toisen kvartaalin alkuun pysyivät alle 10  $\mu\text{g:ssa/m}^3$ , minkä jälkeen pitoisuus käväisi 19  $\mu\text{g:ssa/m}^3$  ja pysytteli pääosin 10–15  $\mu\text{g/m}^3$  kolmannen kvartaalin loppuun. Vastaavasti RF4C-putkesta mitattiin toisen kvartaalin alkuun alle 5  $\mu\text{g/m}^3$ , mistä pitoisuus koukkasi n. 20  $\mu\text{g:aan/m}^3$ , ja palasi takaisin edeltäville pitoisuuksille. Siellä se pysyi lähes koko mittausjakson loppuun saakka. OV-putkessa RF4A pitoisuus pysyy pääosin alle 5  $\mu\text{g:ssa/m}^3$ , minkä jälkeen se tekee nousun RF4D:n kanssa yhtäaikaaisesti yli 10  $\mu\text{g:aan/m}^3$ . Tämän yksittäisen pompun jälkeen pitoisuudet pysyvät alle 5  $\mu\text{g:ssa/m}^3$ , kunnes kolmannen kvartaalin alussa lähtevät nousevat lähes 40  $\mu\text{g:aan/m}^3$ , ja laskevat sitten tutkimusjakson loppuun asti viimeisimpänä saavuttaen 1,5  $\mu\text{g/m}^3$ .

Taulukossa 5 on laskettu maaperästä mitattujen yhdisteiden pitoisuuksista minimi (min), maksimit (max), keskiarvot (KA) ja mediaanit (Md) sekä keskihajonnat (s) sekä yhdisteittäin että putkittain. Näiden arvojen perusteella voidaan verrata, miten eri yhdisteiden pitoisuudet käyttäytyvät putken pituuden muuttuessa.

Taulukko 5. Maaperästä mitattujen pitoisuuksien minimi (min), maksimi (max), keskiarvot (KA) sekä mediaanit (Md) ja keskihajonnat (s) eriteltynä yhdisteittäin ja putkittain.

		DCE	TCE	PCE
<b>RF4A (OV + HI) 1,6–4,6 m</b>	<b>min</b>	3,3	110	0,65
	<b>max</b>	595	7 500	38
	<b>KA</b>	164	2 064	9,4
	<b>Md</b>	47	415	4,3
	<b>s</b>	228	2 836	12
<b>RF4C (HI) 0,6–1,1 m</b>	<b>min</b>	1,3	92	0,46
	<b>max</b>	130	4 400	19
	<b>KA</b>	40	1 859	5,4
	<b>Md</b>	14	1 600	4,8
	<b>s</b>	44	1 563	4,9
<b>RF4D (HI) 1,1–1,6 m</b>	<b>min</b>	6,3	140	0,75
	<b>max</b>	130	6 600	18
	<b>KA</b>	51	3 624	9,0
	<b>Md</b>	48	3 750	9,4
	<b>s</b>	34	1 948	4,6

Taulukon maksimipitoisuuden perusteella nähdään, että OV-kerroksesta mitatut pitoisuudet ovat kaikkien yhdisteiden osalta suuremmat verrattuna HI-kerrokseen, mutta TCE-pitoisuuksissa erot kasvavat myös putken asennussyvyyden mukaisesti. Keskiarvoja tarkastellessa pitoisuudet korreloivat myös asennussyvyyden mukaan, paitsi TCE:n osalta, joka osoittaa RF4D:stä mitatun keskiarvopitoisuuden korkeammaksi kuin RF4A:sta. TCE:n pitoisuusvaihtelu kasvaa myös putken syvyyden kasvaessa, mutta HI-putkien välillä PCE- ja DCE-pitoisuusvaihteluiden suuruuserot ovat päinvastaiset, mikä voi johtua siitä, että nämä mitatut pitoisuudet ovat pieniä ja kokonaisuudessaan lähellä toisiaan.

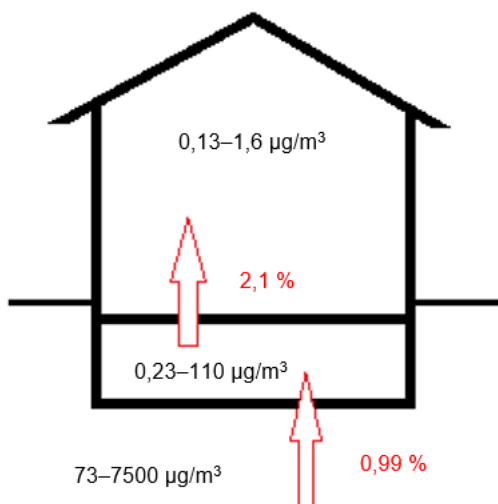
Ryömintätilassa TCE-pitoisuudet pysyvät mittausjakson puoleen väliin hyvin taiseena 0–20 µg/m<sup>3</sup>, minkä jälkeen pitoisuudet ja sen vaihtelut lähtevät maltilliseen nousuun. Yhtä yli 100 µg:n/m<sup>3</sup> pitoisuusmittausta lukuun ottamatta pitoisuudet pysyvät alle 60 µg:ssa/m<sup>3</sup>, ja enimmäkseen alle 20 µg:ssa/m<sup>3</sup>.

Taulukossa 6 on laskettu maaperästä ryömintätilan kautta sisäilmaan kulkeutuneet TCE-pitoisuudet ja niiden prosenttiosuudet. Tulokset on laskettu TCE-pitoisuuksista, sillä niistä saatiin suurimmat pitoisuudet kaikissa mittauskohteissa. Taulukossa on laskettu maaperästä (MAA), ryömintätilasta (RT) ja sisätiloista (ST) mitatuista tuloksista minimi ja maksimi sekä keskiarvo, keskihajonta ja mediaani. Lasketut prosenttiosuudet kuvaavat, kuinka paljon ryömintätilan keskiarvopitoisuus on kaikista maaperäputkista lasketuista keskiarvopitoisuuksista. Sisätilojen keskiarvopitoisuuksien osuudet sekä ryömintätilan että maaperän keskiarvopitoisuuksista on laskettu vastaavalla tavalla.

Taulukko 6. Mitattujen TCE-pitoisuuksien määrällinen osuus maaperässä, ryömintätilassa sekä maaperässä, sekä prosentuaalinen osuus kulkeutumisesta tilojen välillä.

	min	max	KA	s	Md
<b>MAA (µg/m<sup>3</sup>)</b>	73	7 500	2 007	2 169	850
<b>RT (µg/m<sup>3</sup>)</b>	0,23	110	20	25	9,6
<b>ST (µg/m<sup>3</sup>)</b>	0,13	1,6	0,42	0,43	0,26
<b>MAA -&gt; RT (%)</b>	-	-	0,99		
<b>RT -&gt; ST (%)</b>	-	-	2,1		
<b>MAA -&gt; ST (%)</b>	-	-	0,021		

Taulukossa lasketut pitoisuudet ja kulkeutumisosuudet on esitetty kuvamuodossa kuvassa 27. Kuvaan on merkitty mustalla mitatut pitoisuusvaihtelut kussakin tilassa sekä punaisella prosentuaaliset kulkeutumisosuudet tilojen välillä.



Kuva 27. Haitta-aineiden kulkeutumisen osuus maaperästä sisäilmaan

Kulkeutumisosuus maaperästä ryömintätilaan oli noin yhden prosentin luokkaa ja ryömintätilasta sisäilmaan noin kaksi prosenttia. Huonetiloista mitatut pitoisuudet olivat promillen suuruusluokkaa maaperästä mitatuista pitoisuuksista.

## 9 Johtopäätökset

Kokonaisuudessa kloorattujen liuottimien mitatut pitoisuudet kaikissa tiloissa olivat korkeammalla mittausjakson loppupuolella verrattuna alkupuoleen. Kuvajien perusteella pitoisuuksien nousuissa ja laskuissa oli havaittavissa samanaikaisuutta, mutta kvantitatiivisesti pitoisuudet eivät muuttuneet samassa suhteessa. Sisätiloissa mitattujen määritysrajan ylittävien pitoisuuksien määrä oli kuitenkin hyvin vähäinen. Pitoisuuskäyrien samankaltainen muoto ja nouseva trendi loppua kohden viittaavat sää- ja ympäristöolosuhteiden muutoksiin reagoimiseen.

Mittausten perusteella vallitsevissa testiolosuhteissa kloorattujen liuottimien kulkeutuminen sisäilmaan on hyvin vähäistä. Ulkopisteistä mitatuista pitoisuuksista voidaan todeta, että kulkeutuminen sisäilmaan olisi mahdollista. Kuitenkaan merkittäviä määriä kloorattuja eteenejä ei saatu kertymään ryömintätilaan, joten pienet pitoisuudet sisäilmassa olivat odotettuja. Lisäksi tutkimuksen aikana

ryömintätilan tuuletus oli poissa käytöstä. Normaalitilanteessa asumiskäytössä olevassa rakennuksessa tuuletus olisi päällä, joten haitta-aineiden kulkeutuminen olisi todennäköisesti vielä vähäisempää.

Maaperän huokoskaasuputket sijaitsevat noin kolmen metrin etäisyydellä kontista. Juuri kontin alapuolella olevia pitoisuuksia ei siis varmuudella tiedetä, ja ne voivat todellisuudessa olla erisuuruisia kuin maaperästä mitattiin. Toisaalta myös huokoskaasu ei kulkeudu maaperässä vain suoraan ylöspäin, vaan myös sivuttaissuunnassa, jolloin yhdestä pisteestä lähteneet päästöt hajaantuvat ja pitoisuudet laimenevat. Esimerkiksi Jenni Jyräsen opinnäytetyössä on esitetty huokosilmamittaustuloksia oikean rakennuksen sisäilmasta ja rakennuksen alaisesta maaperästä. Tulokset ovat samansuuntaisia, eli maaperässä on todettu suuria pitoisuuksia, mutta sisäilmasta mitatut pitoisuudet ovat laimentuneet ja jäävät alle laboratorion määritysrajan [85, s. 20].

Kloorattujen liuottimien pitoisuuksia on mahdollista kasvattaa ryömintätilassa vapauttamalla TCE:tä hallitusti. Kun pitoisuuksia saadaan kertymään enemmän ryömintätilaan ja kulkeutumaan sisätilaan, voidaan tutkia, kuinka ilmanvaihto vaikuttaa pitoisuuksiin ja miten alapohjan tuuletuksen säädöt vaikuttavat. Sisätilassa 2 olevia putkivientejä säädellysti avaamalla voidaan tutkia, millainen lattia-rakenteen epätiiviyden taso ja laajuus vaikuttavat kulkeutumiseen ja millä tavalla.

## Lähteet

- 1 Sisäilman epäpuhtaudet ja hajut – Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (Volatile Organic Compounds, VOC). Verkkoaineisto. Hengitysliitto. <<https://www.hengitysliitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/sisailman-laatu/sisailman-epapuhtaudet-ja-hajut/>>. Luettu 2.9.2022.
- 2 Evaluating Indoor Air near VOC Contaminated Sites. 2008. Tietolehti. New Jersey Department of Environmental Protection.
- 3 Ympäristöhallinnon ohjeita: Pilaantuneen maa-alueen riskinarviointi ja kestävä riskinhallinta. 2014. Ympäristöministeriö. Helsinki: Edita Prima Oy.
- 4 Jätelaki. 2011. 646/17.6.2011.
- 5 Ympäristönsuojelulaki. 2014. 527/27.6.2014.
- 6 Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista. 2007. 214/1.3.2007.
- 7 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi orgaanisten liuottimien käytöstä tietyissä maaleissa ja lakoissa sekä ajoneuvojen korjausmaalaus- tuotteissa aiheutuvien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöjen rajoittamisesta ja direktiivin 1999/13/EY muuttamisesta. 2004. 2004.4.21/42/EY.
- 8 Mikä on M1? Verkkoaineisto. Rakennustietosäätiö. <<https://cer.rts.fi/rakennusmateriaalien-paastoluokitus-m1/mika-on-m1/>>. Luettu 13.1.2023.
- 9 Rakennusmateriaalien päästöluokitus M1. Verkkoaineisto. Rakennustietosäätiö. <[https://cer.rts.fi/rakennusmateriaalien-paastoluokitus-m1/?gclid=Cj0KCQiAn4SeBhCwARIsA-NeF9DJKWj6EO20V7Gs\\_8IYXZpKjnn-jgf5hsVRVn31etn3EEbX4vqmU4d3UaAuDMEALw\\_wcB](https://cer.rts.fi/rakennusmateriaalien-paastoluokitus-m1/?gclid=Cj0KCQiAn4SeBhCwARIsA-NeF9DJKWj6EO20V7Gs_8IYXZpKjnn-jgf5hsVRVn31etn3EEbX4vqmU4d3UaAuDMEALw_wcB)>. Luettu 13.1.23.
- 10 Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. 2015. 545/23.4.2015.
- 11 Asumisterveysohje. 2003. Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003:1. Helsinki: Edita Prima Oy.

- 12 REACH-asetus tutuksi. Verkkoaineisto. European Chemicals Agency. <<https://echa.europa.eu/fi/regulations/reach/understanding-reach>>. Luettu 21.6.2022
- 13 HTP-arvot 2020: Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. 2020. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2020:24. Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö.
- 14 Chlorinated Solvents. 2013. Verkkoaineisto. Worker Health Protection Program. <<http://www.worker-health.org/chlorinatedsolvents.html>>. Luettu 2.9.2022
- 15 Ai, Jing; Yin, Weizhao; Hansen, Hans Christian B. 2019. Fast Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Green Rust in the Presence of Bone Char. *Environmental Science & Technology Letters*. 6<sup>th</sup> ed., s. 191–196.
- 16 Åkersson, Sofia; Sparrenbom, Charlotte J.; Paul, Catherine J.; Jansson, Robin; Holmstrand, Henry. 2020. Characterizing natural degradation of tetrachloroethene (PCE) using a multidisciplinary approach. *Ambio*. Vol. 50, s. 1074–1088.
- 17 Orgaaniset liuottimet. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <<https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvallisuus/altistuminen-tyoympariston-haitte-tekijoille/kemiallisten-tekijoiden-hallinta-tyopaikalla/kemikaalit-ja-tyo-altistumistietosivusto/orgaaniset-liuottimet>>. Luettu 21.6.22.
- 18 Tetrakloorietyleeni, HTP-arvon perustelumistio. 2017. Muistio. Työturvallisuussäännöksiä valmisteleva neuvottelukunta. <<https://www.tyosuoja.fi/documents/14660/6121707/Tetrakloorietyleeni2017/91fbacf6-712a-ab46-5a4f-54aab6a7ce6d>>. Luettu 21.6.2022.
- 19 Substance Infocard: Tetrachloroethylene. Verkkoaineisto. European Chemicals Agency. <<https://echa.europa.eu/fi/substance-information/-/substanceinfo/100.004.388>>. Luettu 21.6.2022.
- 20 World Health Organization. 2000. Air quality guidelines for Europe. European Series, No. 91. 2<sup>nd</sup> ed. Copenhagen: WHO Regional Publications.
- 21 Päätös ympäristönsuojelulain (527/2014) 136 §:n mukaisen pilaantuneen maaperän ja pohjaveden puhdistamista koskevan ilmoituksen hyväksynnästä. 2019. Päätös. UUDELY/7409/2019.
- 22 Päätös ympäristönsuojelulain (527/2014) 136 §:n mukaisesta pilaantuneen maaperän ja pohjaveden puhdistamista koskevasta ilmoituksesta. Päätös. 2017. KASELY/787/2017.



- 23 Kemiaallisten altisteiden raja-arvot. Verkkodokumentti. Työterveyslaitos. <<https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvallisuus/altistuminen-tyoympariston-haitta-tekijoille/kemiaallisten-tekijoiden-hallinta-tyopaikalla/kemiaallisten-altisteiden-raja-arvot>>. Luettu 21.6.2022.
- 24 Perustelumuistio tetrakloorieteenin toimenpiderajaksi. 2022. Muistio. Työterveyslaitos. <<https://www.ttl.fi/sites/default/files/2022-01/Tetrakloorieteeni.pdf>>.
- 25 OVA-ohjeet, Tetrakloorietyleeni. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <<https://www.ttl.fi/ova/tetrakloorietyleeni>>. Päivitetty 23.08.2022. Luettu 25.9.2022.
- 26 Muños Morales, Martin; Castañeda-Juárez, Monserrat; Souza, Fernanda; Linares-Hernández, Ivonne. 2021. Assessing the viability of electro-absorption and photoelectron-absorption for the treatment of gaseous perchloroethylene. Environmental science and pollution research international. Vol. 28.
- 27 Trikloorietyleeni: Esitys trikloorietyleenin HTP-arvoksi. 2007. PDF-dokumentti. Työsuojeluhallinto. <https://www.tyosuojelu.fi/documents/14660/6121707/Trikloorietyleeni2007.pdf/12346508-fa5c-4e14-1c14-64530a7e3050>.
- 28 Perustelumuistio trikloorieteenin (trikloorietyleenin) toimenpiderajoiksi. 2007. Muistio. Työterveyslaitos. <<https://www.tyosuojelu.fi/documents/14660/6121707/Trikloorietyleeni2007.pdf/12346508-fa5c-4e14-1c14-64530a7e3050>>.
- 29 Substance Infocard: Trichloroethylene. Verkkoaineisto. European Chemicals Agency. <<https://echa.europa.eu/fi/substance-information/-/substanceinfo/100.001.062>>. Luettu 14.5.2022.
- 30 Slunge, Daniel. Andersson, Ida. Sterner, Thomas. 2022. REACH authorization and the substitution of hazardous chemicals: The case of trichloroethylene. Journal of Cleaner Production. Vol. 364.
- 31 OVA-ohjeet: Trikloorietyleeni. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <<https://www.ttl.fi/ova/trikloorietyleeni>>. Luettu 14.5.2022.
- 32 Devi, S.S.; Mehendale, H.M. 2014. 1,2-Dichloroethylene. Tiivistelmä. Encyclopedia of Toxicology. 3<sup>rd</sup> ed.
- 33 1,2-Dikloorietyleeni; HTP-arvon perustelumuistio. 2007. Muistio. Työsuojeluhallinto. <<https://www.tyosuojelu.fi/documents/14660/6121608/1%2C2-Dikloorietyleeni2007.pdf/0885f5b7-8d1c-49af-c712-6972ff889d80>>.

- 34 Substance Infocard: cis-1,2-Dichloroethylene. Verkkoaineisto. European Chemicals Agency. <<https://echa.europa.eu/fi/substance-information/-/substanceinfo/100.005.328>>. Luettu 14.5.2022.
- 35 Substance Infocard: trans-1,2-Dichloroethylene: Substance Information. Verkkoaineisto. European Chemicals Agency. <<https://echa.europa.eu/fi/substance-information/-/substanceinfo/100.005.329>>. Luettu 14.5.2022.
- 36 Substance Infocard: 1,1-Dichloroethylene. Verkkoaineisto. European Chemicals Agency. <<https://echa.europa.eu/fi/substance-information/-/substanceinfo/100.000.786>>. Luettu 14.5.2022.
- 37 PubChem Compound summary for CID 6366, Vinylidene chloride. Verkkoaineisto. National Center for Biotechnology Information. <<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/6366>>. Luettu 14.5.2022.
- 38 Valtioneuvoston päätös tiettyjä kloorattuja liuottimia koskevista kielloista ja rajoituksista. 1997. 1209/18.12.1997.
- 39 1,2-Dichloroethene. Lausunto. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. <<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp87-c1.pdf>>.
- 40 1,1-Dichloroethene - ToxFAQs™. 2022. Tietolehti. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. <<https://www.atsdr.cdc.gov/toxfaqs/tfacts39.pdf>>
- 41 Suomenkieliset kemikaalikortit: 1,2-dikloorietyleeni. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <[https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=fi&p\\_card\\_id=0436&p\\_version=2](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=fi&p_card_id=0436&p_version=2)>. Luettu 14.5.2022.
- 42 Vinyylikloridi: HTP-arvon perustelumuistio. 2018. Muistio. Työturvallisuus-säännöksiä valmisteleva neuvottelukunta. <<https://www.tyosuojelu.fi/documents/14660/6121710/Vinyylikloridi2018/e521eb87-2410-1747-713b-8a086453712b>>.
- 43 Substance Infocard: Vinyl Chloride. Verkkoaineisto. European Chemicals Agency. <<https://echa.europa.eu/fi/substance-information/-/substanceinfo/100.000.756>>. Luettu 14.5.2022.
- 44 OVA-ohjeet: Vinyylikloridi. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <<https://www.ttl.fi/ova/vinyylikloridi>>. Päivitetty 23.8.2022. Luettu 14.9.2022.

- 45 Dense nonaqueous phase liquids (dnaps); Treatment Technologies. Verkkoaineisto. United States Environmental Protection Agency. <[https://clu-in.org/contaminantfocus/default.focus/sec/dense\\_nonaqueous\\_phase\\_liquids\\_\(dnaps\)/cat/Treatment\\_Technologies/p/1/n/3](https://clu-in.org/contaminantfocus/default.focus/sec/dense_nonaqueous_phase_liquids_(dnaps)/cat/Treatment_Technologies/p/1/n/3)>. Luettu 18.7.2022.
- 46 Pierri, Dorota. 2021. Actual decay of tetrachloroethene (PCE) and trichloroethene (TCE) in a highly contaminated shallow groundwater system. Environmental Advances, Vol 5.
- 47 Åkesson, S.; Sparrenbom, C.J.; Paul, C.J. 2021. Characterizing natural degradation of tetrachloroethene (PCE) using a multidisciplinary approach. Tutkimusartikkeli. Ambio. Vol. 50, s. 1074–1088.
- 48 Bioremediation: anaerobic bioremediation. Verkkoaineisto. United States Environmental Protection Agency. <[https://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/bioremediation/cat/anaerobic\\_bioremediation\\_%28direct%29/](https://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/bioremediation/cat/anaerobic_bioremediation_%28direct%29/)>. Luettu 18.7.2022
- 49 Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista. 2007. 214/1.3.2007.
- 50 Suomenkieliset kemikaalikortit: Vinylideenikloridi. 2022. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <[https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_card\\_id=0083&p\\_edit=&p\\_version=2&p\\_lang=fi](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0083&p_edit=&p_version=2&p_lang=fi)>. Luettu 20.9.2022.
- 51 Suomenkieliset kemikaalikortit: 1,2-dikloorietyleeni. 2022. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <[https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_card\\_id=0436&p\\_edit=&p\\_version=2&p\\_lang=fi](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0436&p_edit=&p_version=2&p_lang=fi)>. Luettu 20.9.2022.
- 52 1,1-Dichloroethene. Verkkoaineisto. ChemEurope. <<https://www.chemurope.com/en/encyclopedia/1%2C1-Dichloroethene.html>>. Luettu 20.9.2022.
- 53 Suomenkieliset kemikaalikortit: Tetrakloorietyleeni. 2022. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <[https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_card\\_id=0076&p\\_edit=&p\\_version=2&p\\_lang=fi](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0076&p_edit=&p_version=2&p_lang=fi)>. Luettu 20.9.2022.
- 54 Suomenkieliset kemikaalikortit: Trikloorietyleeni. 2022. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <[https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_card\\_id=0081&p\\_edit=&p\\_version=2&p\\_lang=fi](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0081&p_edit=&p_version=2&p_lang=fi)>. Luettu 20.9.2022.
- 55 Suomenkieliset kemikaalikortit: Vinyylkloridi. 2022. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <[https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_card\\_id=0082&p\\_edit=&p\\_version=2&p\\_lang=fi](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0082&p_edit=&p_version=2&p_lang=fi)>. Luettu 20.9.2022.

- 56 Genium. 1999. Genium's Handbook of Safety, Health and Environmental Data for common hazardous substances. Vol 1. New York: McGraw-Hill.
- 57 PubChem Annotation record for, cis-1,2-Dichloroethylene, Source: Hazardous Substances Data Bank (HSDB). Verkkoaineisto. National Center for Biotechnology Information. <<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/source/hsdb/5656>>. Luettu 20.9.2022.
- 58 PubChem Annotation record for, trans-1,2-Dichloroethylene, Source: Hazardous Substances Data Bank (HSDB). Verkkoaineisto. National Center for Biotechnology Information. <<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/source/hsdb/6361>>. Luettu 20.9.2022.
- 59 PubChem Compound summary for CID6366, Vinylidene chloride. Verkkoaineisto. National Center for Biotechnology Information. <<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Vinylidene-chloride>>. Luettu 20.9.2022.
- 60 Toxicological Profile for Tetrachloroethylene. 2019. Toksikologisen profiilin julkaisu. Agency for Toxic Substance and Disease Registry. <<https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp18.pdf>>.
- 61 Toxicological Profile for Trichloroethylene. 2019. Toksikologisen profiilin julkaisu. Agency for Toxic Substance and Disease Registry. <<https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp19.pdf>>
- 62 Toxicological Profile for 1,2-Dichloroethene. 1996. Toksikologisen profiilin julkaisu. Agency for Toxic Substance and Disease Registry. <<https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp87.pdf>>
- 63 Toxicological Profile for 1,1-Dichloroethene. 2022. Toksikologisen profiilin julkaisu. Agency for Toxic Substance and Disease Registry. <<https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp39.pdf>>
- 64 Toxicological Profile for Vinyl chloride. 2023. Toksikologisen profiilin julkaisu. Agency for Toxic Substance and Disease Registry. <<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp20.pdf>>
- 65 Rakentajan tietokustannus oy. 2010. Talonrakentajan käsikirja 8: pientalon perustustyöt. 6. uudistettu painos. Espoo: Rakentajan tietokirjat.
- 66 Maanvastainen betonilaatta. 2008. Verkkoaineisto. Sisäilmayhdistys ry. <<https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kunnossapito-ja-korjaaminen/Maanvastaiset-rakenteet/Maanvastainen-betonilaatta>>. Luettu 13.7.2022.

- 67 Sokkeli on osa perustuksia. Verkkoaineisto. Lammin Betoni Oy. <<https://www.lammi.fi/tassu/ohjeet-ja-dokumentit/sokkeli/>>. Luettu 13.9.2022.
- 68 Valmistele perustukset kerralla kuntoon. Verkkoaineisto. Rudus Oy. <<https://www.rudus.fi/kotipolku/perustukset-ja-runkotyot/apua-suunniteluun/valmistele-perustukset-kerralla-kuntoon>>. Luettu 13.7.2022.
- 69 Perustus ja alapohjarakenteet. Verkkoaineisto. Rudus Oy. <<https://www.rudus.fi/Download/23824/Perustus%20ja%20alapohjarakenteet.pdf>>. Luettu 13.7.2022.
- 70 Ulkoilmalla tuuletettu puualapohja. 2020. Verkkoaineisto. Puuinfo Oy. <<https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/tekniset-tiedotteet/ulkoilmalla-tuuletettu-puualapohja>>. Luettu 13.7.2022.
- 71 Maanvastainen kaksoislaatta tai puukorotettu lattia. 2008. Verkkoaineisto. Sisäilmäyhdistys ry. <<https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kunnossapito-ja-korjaaminen/Maanvastaiset-rakenteet/Maanvastainen-kaksoislaatta-tai-puukorotettu-lattia>>. Luettu 13.7.2022.
- 72 1940–80-luvun talojen alapohjarakenne on altis kosteudelle. 2021. Verkkoaineisto. Raksystems. <<https://raksystems.fi/talotohtori/1940-80-luvun-talojen-alapohjarakenne-on-altis-kosteudelle/>>. Luettu 13.7.2022.
- 73 Betoninen alapohja. 2008. Verkkoaineisto. Sisäilmäyhdistys ry. <<https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kunnossapito-ja-korjaaminen/Maanvastaiset-rakenteet/Betoninen-alapohja>>. Luettu 13.7.2022.
- 74 Puinen alapohja. 2008. Verkkoaineisto. Sisäilmäyhdistys ry. <<https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kunnossapito-ja-korjaaminen/Maanvastaiset-rakenteet/Puinen-alapohja>>. Luettu 13.7.2022.
- 75 Lindroos, Noora; Itkonen, Jaana. 2019. Hanasaaren Voimalaitosalue: ympäristö- ja terveysriskien alustava tarkastelu. Yrityksen sisäinen dokumentti. Ramboll Finland Oy.
- 76 Järvinen, Kimmo. 2018. Case Hanasaari – haastava aluerakennuskohde. Yrityksen sisäinen dokumentti. Ramboll Finland Oy.
- 77 K., Jaana. 2019. Hanasaari, Helsinki. Yrityksen sisäinen dokumentti. Ramboll Finland Oy.
- 78 Helsingin kaupungin kartta. Verkkoaineisto. Helsingin karttapalvelu. <[kartta.hel.fi](https://kartta.hel.fi)>. Kuvakaappaus 24.8.2022.

- 79 Teurastamon uusi aika. Verkkoaineisto. Teurastamo. <<https://teurastamo.com/teurastamonhistoria1/>>. Luettu 12.11.2022.
- 80 Lindstedt, Kari. Margariinitehdas. Verkkoaineisto. <<https://www.hermannikuvia.fi/margariinitehdas/>>. Luettu 12.11.2022.
- 81 Tengvall, Jukka. 2022. Johtava asiantuntija, Ramboll Finland Oy, Espoo. Keskustelu 29.6.2022.
- 82 Nurmi, Sakari. 2021. Sisäilman kulkeutumiskontti rakenteet. Yrityksen sisäinen dokumentti. Ramboll Finland Oy.
- 83 DL-LP8P Datasheet. Manuaali. DecentLab.
- 84 DL-IAM Datasheet. Manuaali. DecentLab.
- 85 Jyränen, Jenni. 2019. Kansainvälinen selvitys huokosilmanäytteenotosta. Opinnäytetyö. Theseus-tietokanta.

## Liite 1. Ohjeen laskukaavat

Ympäristöministeriön Ympäristöhallinnon ohjeita 6/2014-julkaisusta löytyvät kulkeutumis- ja jakautumisyhtälöt.

### I. Jakautumisyhtälöitä (pitoisuus päästölähteessä)

Pitoisuus huokosvedessä:

$$C_{pw} = C_{cs} / \left[ K_{d\_cs} + \frac{\theta_w + \theta_a \cdot H}{\rho_s} \right] \text{ TAI } S, \text{ jos } S < C_{pw}$$

Maa-maavesi -jakautumiskerroin (orgaaniset aineet):

$$K_{d\_cs} = K_{oc} \cdot f_{oc\_cs}$$

Pitoisuus huokosilmassa (orgaaniset aineet ja haihtuvat epäorgaaniset):

$$C_{pa} = H \cdot C_{pw} \cdot 10^3 \text{ TAI } C_{sat\_a}, \text{ jos } C_{sat\_a} < C_{pa}$$

Maaperän kyllästymispitoisuus (orgaaniset haitta-aineet, ei koske aineita NAPL-faasissa)

$$C_{sat\_s} = \frac{S}{\rho_s} \left[ \theta_w + K_{oc} \cdot f_{oc\_cs} \cdot \rho_s + H \cdot \theta_a \right]$$

Pitoisuus kylläisen höyryn paineessa (NAPL-faasi)

$$C_{sat\_a} = \frac{V_p \cdot M}{R \cdot K} \cdot 10^3$$

## 2. Kulkeutumisytälöitä (pitoisuus kulkeutumis- ja altistusreiteillä)

### 2.1 Kulkeutuminen sisäilmaan

Pitoisuus rakennuksen sisäilmassa:

$$C_{ia} = C_{pa} \cdot DF_{ia} \text{ TAI } C_{ia\_max}, \text{ jos } C_{ia\_max} < C_{ia} \times DF_{ia}$$

Laimenemiskerroin: huokosilma – sisäilma

$$DF_{ia} = \frac{Q_{pa}}{V_{house} \cdot k_{airex}} \cdot \frac{A_{house} \cdot D_s}{Q_{pa} \cdot z_{cs} + A_{house} \cdot D_s}$$

Sisäilman enimmäispitoisuus (kokonaismäärän asettama rajoitus sisäilman pitoisuudelle)

$$C_{ia\_max} = \frac{C_{cs} \cdot d_{cs} \cdot A_{cs} \cdot \rho_s}{V_{house} \cdot k_{airex} \cdot \tau_a}$$

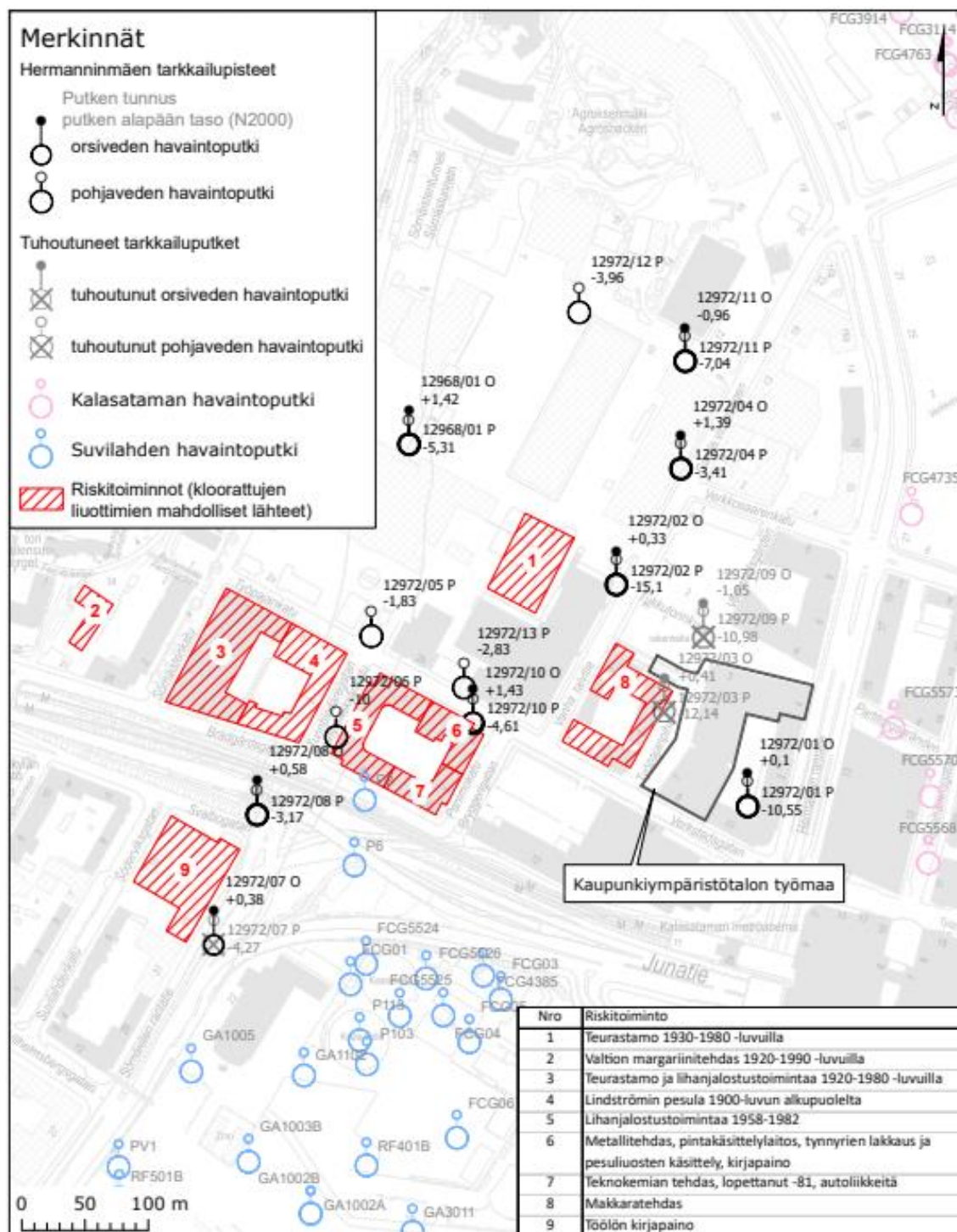
Diffuusiokerroin maaperässä

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

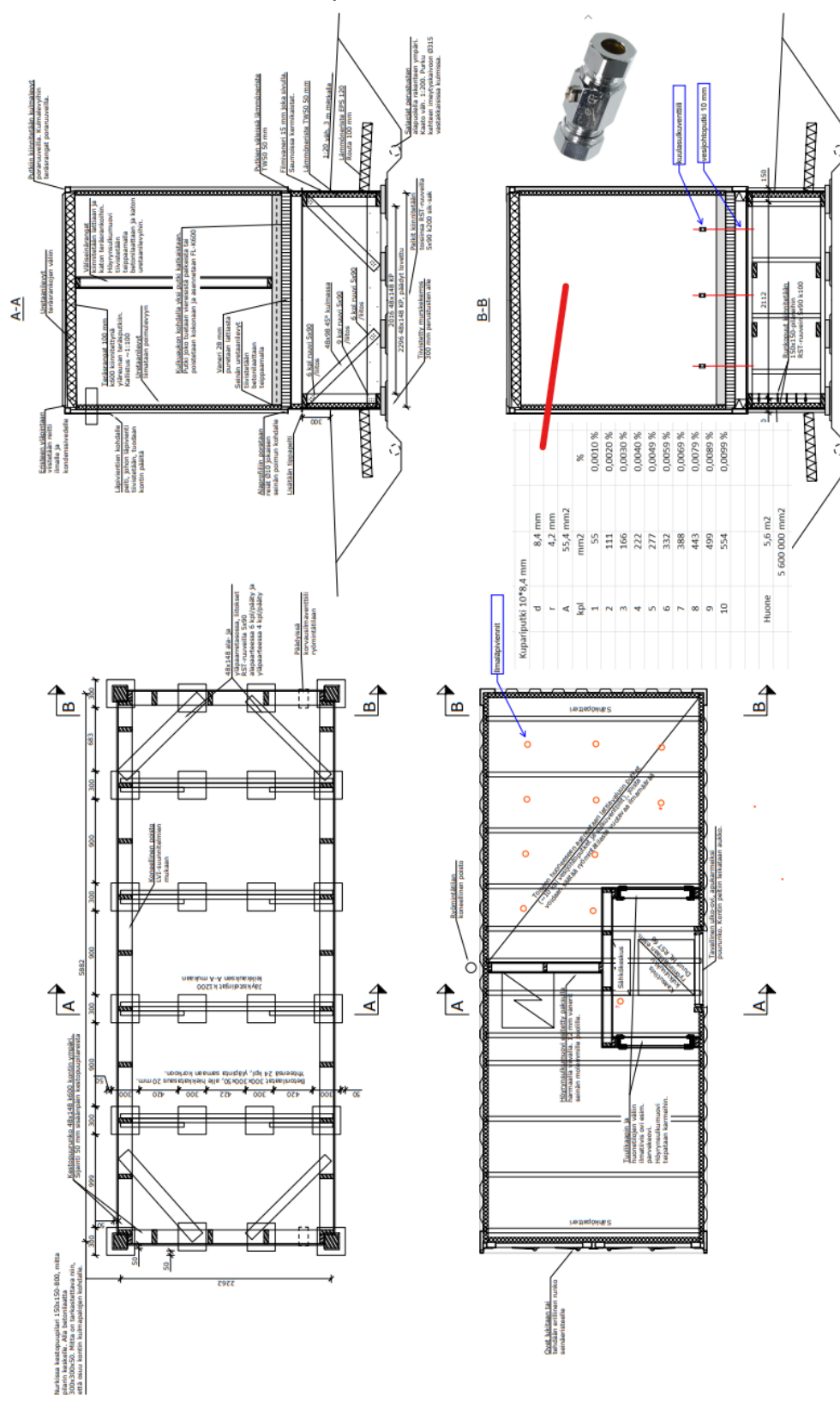


## Liite 2. Hermanninmäen tarkkailupisteet

Vuoden 2019 Hermanninmäen tekninen piirustus, johon on merkitty kloorattujen liuottimien mahdolliset lähteet.



Testikontista luodut suunnitelmapiiirustukset.



## Liite 4. Mittaustulokset

Mittausdata tutkimusjaksolta.

Piste	Ajankohta	TVOC-pitoisuus	Vinyyliforidi	1,1-Dikloorieteeni	cis-1,2-Dikloorieteeni	trans-1,2-Dikloorieteeni	Dikloorieteeni, summapitoisuus	Triikloorieteeni	Tetrakloorieteeni
		250 µg/m <sup>3</sup>	0,36 µg/m <sup>3</sup>	-- yht. 30 -- µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	30 µg/m <sup>3</sup>	23 µg/m <sup>3</sup>	250 µg/m <sup>3</sup>
Sisätila 1	15.12.2021	92	<0,33	<0,07	<0,06	<0,07	0	0,83	0,21
Sisätila 1	13.1.2022	84	<0,33	<0,11	<0,09	<0,11	0	0,32	<0,08
Sisätila 1	9.2.2022	130	<0,33	<0,11	<0,10	<0,11	0	<0,13	<0,08
Sisätila 1	9.3.2022	>280	<0,33	<0,12	0,2	0,14	0,34	<0,13	<0,08
Sisätila 1	20.4.2022	>610	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	0,17	<0,08
Sisätila 1	17.5.2022	>320	<0,33	<0,11	<0,10	<0,11	0	<0,13	<0,08
Sisätila 1	30.6.2022	>750	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	0,32	0,17
Sisätila 1	26.7.2022	>430	<0,32	<0,12	<0,10	<0,12	0	<0,13	<0,08
Sisätila 1	25.8.2022	270	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	<0,13	<0,08
Sisätila 1	28.9.2022	96	<0,33	<0,10	<0,08	<0,10	0	<0,11	<0,07
Sisätila 1	13.10.2022	96	<0,33	<0,51	<0,10	<0,12	0	<0,13	0,17
Sisätila 1	9.11.2022	68	<0,32	<0,52	<0,10	<0,12	0	<0,13	<0,08
Sisätila 1	7.12.2022	100	<0,34	<0,10	<0,09	<0,10	0	<0,12	<0,07
Sisätila 2	15.12.2021	38	<0,33	<0,07	<0,06	<0,07	0	<0,25	<0,05
Sisätila 2	13.1.2022	<32	<0,33	<0,11	<0,1	<0,11	0	0,16	<0,08
Sisätila 2	9.2.2022	130	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	<0,13	<0,08
Sisätila 2	9.3.2022	72	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	<0,13	<0,08
Sisätila 2	20.4.2022	>510	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	0,13	<0,08
Sisätila 2	17.5.2022	>270	<0,33	<0,11	<0,10	<0,11	0	<0,13	<0,08
Sisätila 2	30.6.2022	570	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	0,18	0,1
Sisätila 2	26.7.2022	470	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	<0,16	<0,08
Sisätila 2	25.8.2022	190	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	1,6	<0,08
Sisätila 2	28.9.2022	190	<0,33	<0,10	<0,08	<0,10	0	0,2	<0,07
Sisätila 2	13.10.2022	100	<0,33	<0,40	<0,10	<0,12	0	0,47	0,14
Sisätila 2	9.11.2022	85	<0,32	<0,48	<0,10	<0,12	0	0,48	<0,08
Sisätila 2	7.12.2022	85	<0,34	<0,10	<0,09	<0,10	0	0,13	<0,07
Ryömintätila	15.12.2021	>460	<0,33	<0,07	<0,06	<0,07	0	18	0,07
Ryömintätila	29.12.2021	91	<0,34	<0,11	<0,10	<0,11	0	0,23	<0,08
Ryömintätila	13.1.2022	430	<0,33	<0,12	0,19	<0,12	0,19	15	<0,08
Ryömintätila	26.1.2022	>890	<0,33	<0,11	<0,09	<0,11	0	4	<0,08
Ryömintätila	9.2.2022	>1000	<0,33	<0,11	<0,10	<0,11	0	12	<0,08
Ryömintätila	23.2.2022	580	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	5,3	<0,08
Ryömintätila	9.3.2022	>780	<0,33	<0,12	<0,12	<0,12	0	7,1	<0,08
Ryömintätila	23.3.2022	>1100	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	15	0,08
Ryömintätila	20.4.2022	>1800	<0,33	<0,12	<0,17	<0,12	0	6,6	<0,08
Ryömintätila	5.5.2022	>1000	<0,33	<0,12	<0,11	<0,12	0	6,2	<0,08
Ryömintätila	17.5.2022	>590	<0,33	<0,11	<0,10	<0,11	0	6,6	<0,08
Ryömintätila	30.6.2022	>1500	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	4,8	0,11
Ryömintätila	12.7.2022	>1900	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	41	0,09

Ryömintätila	26.7.2022	>1600	<0,32	<0,12	<0,10	<0,12	0	15	<0,08
Ryömintätila	9.8.2022	>1800	<0,32	<0,12	<0,10	<0,12	0	58	<0,12
Ryömintätila	25.8.2022	>1400	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	43	0,08
Ryömintätila	7.9.2022	>850	<0,33	<0,11	<0,10	<0,11	0	20	<0,08
Ryömintätila	28.9.2022	>550	<0,33	<0,11	<0,10	<0,11	0	6,7	<0,08
Ryömintätila	13.10.2022	>690	<0,33	<0,19	0,27	<0,12	0,27	110	0,19
Ryömintätila	25.10.2022	>550	<0,33	<0,13	<0,10	<0,11	0	4,7	<0,08
Ryömintätila	9.11.2022	290	<0,32	<0,12	<0,10	<0,12	0	4,1	<0,08
Ryömintätila	7.12.2022	>460	<0,34	<0,10	<0,09	<0,10	0	35	0,09
Taustapitoisu	14.12.2021	<160	<0,37	<0,56	<0,48	<0,56	0	<3,0	<0,40
Taustapitoisu	10.2.2022	<33	<0,38	<0,12	<0,10	<0,12	0	<0,13	<0,08
Taustapitoisu	9.3.2022	34	<0,35	<0,12	<0,10	<0,12	0	<0,13	<0,08
Taustapitoisu	20.4.2022	65	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	<0,13	<0,08
Taustapitoisu	17.5.2022	46	<0,33	<0,11	<0,10	<0,11	0	0,26	<0,08
Taustapitoisu	30.6.2022	<33	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	0,27	0,15
Taustapitoisu	26.7.2022	<33	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	<0,13	<0,08
Taustapitoisu	25.8.2022	-	<0,33	<0,11	<0,10	<0,11	0	<0,13	<0,08
Taustapitoisu	28.9.2022	<32	<0,33	<0,11	<0,10	<0,11	0	0,14	<0,08
Taustapitoisu	13.10.2022	76	<0,33	<0,12	<0,10	<0,12	0	0,21	0,12
Taustapitoisu	9.11.2022	<33	<0,33	<0,34	<0,10	<0,12	0	<0,63	<0,08
Taustapitoisu	7.12.2022	<28	<0,34	<0,10	<0,08	<0,10	0	<0,11	<0,07
RF4A	14.12.2021	>1100	<0,35	<0,67	170	11	181	>950	15
RF4A	14.1.2022	230	<0,35	<0,62	4,6	<0,62	4,6	130	0,65
RF4A	10.2.2022	>1300	<0,38	<0,70	43	3,8	47	>990	4,3
RF4A	10.2.2022	-	-	-	-	-	-	-	-
RF4A	10.3.2022	540	<0,32	<0,70	19	2	21	500	2
RF4A	10.3.2022	-	-	<20	28	<20	28	510	<20
RF4A	22.4.2022	1500	<0,33	<0,69	3,3	<0,69	3,3	110	<0,49
RF4A	22.4.2022	-	-	<19	<19	<19	<19	87	<19
RF4A	16.5.2022	>1900	<0,33	<0,67	68	4,8	73	>960	11
RF4A	16.5.2022	-	-	<17	83	<17	83	2300	<17
RF4A	1.7.2022	1000	<0,33	<0,68	6,6	<0,68	6,6	260	1,4
RF4A	1.7.2022	-	-	<20	<20	<20	<20	240	<20
RF4A	25.7.2022	290	<0,32	<0,65	11	<0,65	11	320	1,4
RF4A	25.7.2022	-	-	<20	<20	<20	<20	230	<20
RF4A	23.8.2022	630	<0,32	<0,70	47	1,3	48	970	5,6
RF4A	23.8.2022	-	-	<20	81	<20	81	2300	<20
RF4A	29.9.2022	>1300	<0,33	<0,69	490	35	525	>990	30
RF4A	29.9.2022	-	-	<20	380	29	409	7500	38
RF4A	10.10.2022	>1600	<0,33	<0,69	570	25	595	>990	27
RF4A	10.10.2022	-	-	<15	520	30	550	7600	32
RF4A	10.11.2022	>1100	<0,33	<0,69	320	18	338	>980	12
RF4A	10.11.2022	-	-	<20	510	30	540	6900	23
RF4A	8.12.2022	280	-	<0,69	20	1	21	310	1,5
RF4A	8.12.2022	-	<0,33	<19	20	<19	20	200	<19
RF4C	14.12.2021	230	<0,33	<0,70	5,7	<0,70	5,7	220	1,5
RF4C	14.1.2022	>990	<0,44	<0,59	50	5,9	56	>840	5,7

RF4C	10.2.2022	390	<0,33	<0,70	5,9	0,72	6,6	390	1,6
RF4C	10.2.2022	-	-	-	-	-	-	-	-
RF4C	10.3.2022	<185	<0,31	<0,65	1,3	<0,65	1,3	92	0,46
RF4C	10.3.2022	-	-	<19	<19	<19	<19	73	<19
RF4C	22.4.2022	>1400	<0,33	<0,69	100	6,1	106	>980	19
RF4C	22.4.2022	-	-	<20	130	<20	130	3500	<20
RF4C	16.5.2022	740	<0,33	<0,68	11	1,5	13	730	3,2
RF4C	16.5.2022	-	-	<20	<20	<20	<20	510	<20
RF4C	1.7.2022	1800	<0,33	<0,70	2,1	<0,70	2,1	520	2,8
RF4C	1.7.2022	-	-	<20	<20	<20	<20	130	<20
RF4C	25.7.2022	>1100	<0,32	<0,70	11	2,5	14	>1000	5,1
RF4C	25.7.2022	-	-	<20	<20	<20	<20	2600	<20
RF4C	23.8.2022	880	<0,32	<0,70	10	1,8	12	>1000	5,5
RF4C	23.8.2022	-	-	<20	<20	<20	<20	3300	<20
RF4C	29.9.2022	>1200	<0,33	<0,70	15	2	17	>1000	4,4
RF4C	29.9.2022	-	-	<20	<20	<20	<20	1600	<20
RF4C	10.10.2022	890	<0,33	<0,70	71	7,7	79	>1000	1
RF4C	10.10.2022	-	-	<17	57	<17	57	970	<17
RF4C	10.11.2022	>1100	<0,33	<0,70	90	9,6	100	>1000	8,8
RF4C	10.11.2022	-	-	<20	110	<20	110	4400	<20
RF4C	8.12.2022	>1200	-	<0,69	56	5,1	61	>980	6,8
RF4C	8.12.2022	-	<0,33	<20	70	<20	70	3100	<20
RF4C	14.12.2021	>1300	<0,33	<0,68	47	4,6	52	>970	12
RF4D	14.1.2022	<190	<0,33	<0,67	6,3	<0,67	6,3	140	0,75
RF4D	10.2.2022	>1200	<0,33	<0,68	25	2,5	28	>970	6,1
RF4D	10.2.2022	-	-	-	-	-	-	-	-
RF4D	10.3.2022	>1600	<0,51	<0,69	25	5,3	30	>980	9
RF4D	10.3.2022	-	-	<19	33	<19	33	2700	<19
RF4D	22.4.2022	3000	<0,33	<0,68	14	<1,5	14	>970	4
RF4D	22.4.2022	-	-	<19	22	<19	22	1200	<19
RF4D	16.5.2022	>1300	<0,33	<0,66	62	5,4	67	>940	18
RF4D	16.5.2022	-	-	<20	51	<20	51	3700	<20
RF4D	1.7.2022	>2000	<0,33	<0,69	30	4,1	34	>990	12
RF4D	1.7.2022	-	-	<20	33	<20	33	4600	<20
RF4D	25.7.2022	>1100	<0,32	<0,70	36	4,9	41	>1000	13
RF4D	25.7.2022	-	-	<20	48	<20	48	6600	<20
RF4D	23.8.2022	>1100	<0,33	<20	10	1,8	12	>1000	11
RF4D	23.8.2022	-	-	<20	25	<20	25	4100	<20
RF4D	29.9.2022	>1200	<0,33	<0,69	43	7,8	51	>990	6,5
RF4D	29.9.2022	-	-	<20	39	<20	39	3500	<20
RF4D	10.10.2022	>1000	<0,33	<0,64	93	6,7	100	>920	13
RF4D	10.10.2022	-	-	<19	100	<19	100	6400	20
RF4D	10.11.2022	>1100	<0,33	<0,70	91	6,5	98	>1000	9,8
RF4D	10.11.2022	-	-	<20	130	<20	130	5900	<20
RF4D	8.12.2022	>1100	-	<0,69	49	3,7	53	>980	6,2
RF4D	8.12.2022	-	<0,33	<20	67	<20	67	3800	<20